

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้น
ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับ
ประยุกต์ใช้ในพลังงานทดแทน

นายศิริวรรณ สกุนโชติเรืองเดช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**A FAULT-TOLERANT THREE-CHANNEL
INTERLEAVED BOOST CONVERTER FOR
RENEWABLE ENERGY SYSTEM
APPLICATIONS**



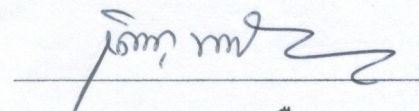
Siriwat Sakulchotruangdet

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2018**

วจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟเวสต์ตามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด
สำหรับประยุกต์ใช้ในพลังงานทดแทน

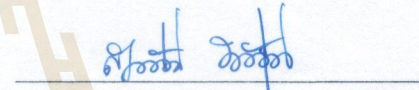
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



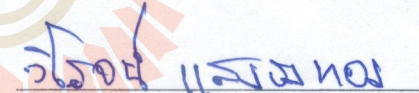
(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



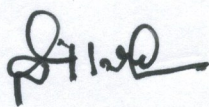
(ผศ. ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



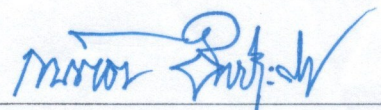
(อ. ดร.วิโรจน์ แสงทอง)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิริวรรณ สกุลโชติเรื่องเลข : วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟวูดสามชั้นที่มี
ความทนต่อความผิดพลาดสำหรับประยุกต์ใช้ในพลังงานทดแทน (A FAULT-
TOLERANT THREE-CHANNEL INTERLEAVED BOOST CONVERTER FOR
RENEWABLE ENERGY SYSTEM APPLICATIONS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ขวัญอ่อน, 299 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟวูดสามชั้นที่
มีความทนต่อความผิดพลาด โดยได้กล่าวถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิด
วงจร วิธีการควบคุมที่อาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสที่เหมาะสม เมื่อวงจร
อินเทอร์ลีฟวูดสามชั้นทำงานภายใต้สภาวะปกติและสภาวะความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิด
วงจร ทั้งนี้มุ่งหวังให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้น
สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง และขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ
อินเทอร์ลีฟวูดสามชั้นสามารถควบคุมให้วงจรรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ
และรักษาคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในสภาวะที่เกิด
ความผิดพลาดได้ ทั้งนี้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB เข้าช่วยในการ
แสดงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟวูดสามชั้น รวมถึงวิธีการ
ตรวจจับความผิดพลาดและวิธีการควบคุมการทำงานของวงจрдังกล่าว จากนั้นจะดำเนินการสร้าง
ชุดทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดและวิธีที่ใช้ในการ
ควบคุมวงจร จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า วิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจาก
สวิตช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า
แบบอินเทอร์ลีฟวูดสามชั้นสามารถควบคุมให้วงจรทำงานได้แมู้่ภายใต้สภาวะที่เกิดความ
ผิดพลาด

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ศิริวรรณ สกุลโชติเรื่องเลข
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สุรัตน์ ขวัญอ่อน

SIRIWAT SAKULCHOTRUANGDET : A FAULT-TOLERANT THREE-
CHANNEL INTERLEAVED BOOST CONVERTER FOR RENEWABLE
ENERGY SYSTEM APPLICATIONS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
SUDARAT KHWAN-ON, Ph.D., 299 PP.

THREE-CHANNEL INTERLEAVED BOOST CONVERTER/FAULT-TOLERANT
/FAULT DETECTION/CONTROL STRATEGY

This thesis presents a fault-tolerant three-channel interleaved boost converter, including the open-circuited switch fault detection technique and the control strategy based on the PI controller with the proposed phase-shift technique under normal and fault operating conditions. It is expected that the proposed fault detection technique can correctly detect the open-circuited switch fault. In addition the proposed control strategy can regulate the output voltage at the desired constant level. The ripple cancellation property of the currents flowing through the inductors under faulty operations can be achieved. The simulation using MATLAB program is employed to show the effectiveness of the three-channel interleaved boost converter with the proposed fault detection technique and the converter control strategy. The experimental setup is also used to confirm the effectiveness of the fault detection technique and the control method. The simulation and experimental results show that the proposed fault detection technique can correctly detect the open-circuited switch fault and the proposed control strategy can also control the three-channel interleaved boost converter even under fault operating conditions.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature ศิริวาท สักกุลชอทรูางเดต

Advisor's Signature สุदारต ขวานอน

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นกำลังใจ เป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้ คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ความช่วยเหลือแลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิชาการ และให้กำลังใจ ตลอดมา

ขอขอบคุณวิศวกร และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ให้ความรู้ ตั้งแต่ในอดีตจนถึง ปัจจุบัน และบุคคลที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวทุก ๆ ท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และการดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดย ตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเสมอมา

ศิริวรรณ สกุดโชติเรืองเดช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
2 บริบทศนั้วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดพ่วง ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง.....	9
2.3 วงจรทบระดับแรงดัน.....	14
2.4 สรุป.....	16
3 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟเวสต์สามชั้น.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟเวสต์สามชั้น.....	17
3.3 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟเวสต์สามชั้น.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น.....	32
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์.....	35
3.6	สรุป.....	39
4	การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น.....	40
4.1	บทนำ.....	40
4.2	การออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น.....	40
4.2.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอดูปแรงดัน.....	41
4.2.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอดูปกระแส.....	44
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์.....	49
4.4	สรุป.....	64
5	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด.....	65
5.1	บทนำ.....	65
5.2	ความคงทนต่อความผิดพลาด.....	65
5.3	ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาด.....	66
5.4	การตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร.....	89
5.5	การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้นในสถานะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร.....	129
5.6	ผลการจำลองสถานการณ์.....	133
5.7	สรุป.....	156
6	การสร้างชุดทดสอบ.....	157
6.1	บทนำ.....	157

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2	โครงสร้างของชุดทดสอบ.....	157
6.3	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	159
6.4	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด.....	161
6.5	วงจรตรวจจับสัญญาณ.....	165
6.5.1	วงจรตรวจจับกระแส.....	165
6.5.2	วงจรตรวจจับแรงดัน.....	170
6.6	วงจรรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญญาณ.....	173
6.7	การควบคุมแรงดันเอาต์พุต.....	175
6.7.1	การโปรแกรมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	175
6.8	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ สามชั้น แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ.....	183
6.9	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ.....	180
6.10	สรุป.....	186
7	ผลการทดสอบ.....	188
7.1	บทนำ.....	188
7.2	ผลการทดสอบเมื่อกรณีแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่.....	189
7.3	ผลทดสอบเมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิทช์เปิดวงจร.....	196
7.4	ผลทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตแบบทันทีทันใด.....	224
7.5	ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต.....	227
7.6	ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต.....	230
7.7	สรุป.....	235
8	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	237
8.1	สรุป.....	237

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	239
รายการอ้างอิง	240
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การเปรียบเทียบการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบรูสต์และ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟเวสต์.....	243
ภาคผนวก ข. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	270
ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมชุดทดสอบ.....	274
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	289
ประวัติผู้เขียน.....	299

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเวอร์ทีฟบูสต์ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด.....	9
3.1 ตารางแสดงอัตราขยายแรงดันที่แปรผันตามค่า Duty cycle (D).....	31
4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ.....	49
4.2 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น.....	49
6.1 เบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ.....	165
6.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับกระแสตัวที่หนึ่ง.....	167
6.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม.....	169
6.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับแรงดัน.....	172
ก.1 ตารางแสดงผลจำลองสถานการณ์ระบบวงปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์.....	252
ก.2 ตารางแสดงผลจำลองสถานการณ์ระบบวงปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์.....	264
ก.3 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ I_{in} (A) และ V_o (V) ของระบบวงปิดระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์.....	265

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม..... 2
1.2	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สองชั้น..... 2
1.3	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์หลายชั้น..... 3
2.1	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม..... 15
2.2	วงจรทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟสองเฟส..... 15
2.3	วงจรทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟสามเฟส..... 16
3.1	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์..... 18
3.2	waveform ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์..... 19
3.3	วงจรสมมูลขณะปิดสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์..... 19
3.4	วงจรสมมูลขณะเปิดสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์..... 20
3.5	วงจรโดยทั่วไปของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์..... 22
3.6	โหมดการทำงานที่ 1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์..... 23
3.7	โหมดการทำงานที่ 2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์..... 24
3.8	โหมดการทำงานที่ 3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์..... 24
3.9	โหมดการทำงานที่ 4 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์..... 25
3.10	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น..... 26
3.11	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_1, S_2 และ S_3 นำกระแส และ D_1, D_2 และ D_3 ไม่นำกระแส..... 27
3.12	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_1, S_2 นำกระแส และ S_3 ไม่นำกระแส..... 27
3.13	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_1, S_3 นำกระแส และ S_2 ไม่นำกระแส..... 28
3.14	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_1 นำกระแส และ S_2, S_3 ไม่นำกระแส..... 28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_2, S_3 นำกระแส และ S_1 ไม่นำกระแส	29
3.16 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_2 นำกระแส และ S_1, S_3 ไม่นำกระแส	29
3.17 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_3 นำกระแส และ S_1, S_2 ไม่นำกระแส	30
3.18 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_2, S_1, S_3 ไม่นำกระแส	30
3.19 กราฟอัตราขยายแรงดันที่แปรผันตามค่า Duty cycle (D)	31
3.20 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	32
3.21 ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น	35
3.22 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ = 0.3	36
3.23 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น กรณีไม่มีตัวควบคุมที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ = 0.3	37
3.24 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ = 0.5	37
3.25 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ = 0.5	38
3.26 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ = 0.7	38
3.27 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ = 0.7	39
4.1 โครงสร้างการควบคุมชนิดพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น	41
4.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นที่เทียบเคียงวงจร ทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิมสำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไออุปแรงดัน	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	แผนภาพการควบคุมลู่แรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ..... 43
4.4	โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่เทียบเคียงวงจร ทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอลู่กระแส..... 45
4.5	แผนภาพการควบคุมลู่กระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ..... 46
4.6	โครงสร้างการจำลองสถานการณ์การควบคุมชนิดพีไอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น..... 48
4.7	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$ 50
4.8	ภาพขยายวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$ 50
4.9	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 40 V_{dc}$ 51
4.10	ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 40 V_{dc}$ 51
4.11	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$ 52
4.12	ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$ 52
4.13	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}, 50 V_{dc}$ และ $40 V_{dc}$ 53
4.14	ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอช่วงการเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 35 V_{dc}$ เป็น $50 V_{dc}$ 54
4.15	ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอช่วงการเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 50 V_{dc}$ เป็น $40 V_{dc}$ 54
4.16	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$ 55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่ $V_{ref} = 35V_{dc}$	56
4.18 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่ $V_{ref} = 40V_{dc}$	57
4.19 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่ $V_{ref} = 40 V_{dc}$	57
4.20 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$	58
4.21 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$	59
4.22 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$	60
4.23 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$	60
4.24 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 40 V_{dc}$	61
4.25 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 40 V_{dc}$	62
4.26 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$	63
4.27 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$	63
5.1 โครงสร้างการควบคุมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์.....	66
5.2 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที.....	67
5.3 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดพลาด ที่ S_1 เวลา 3วินาที.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที.....	68
5.5 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที.....	69
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที.....	70
5.7 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที.....	70
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที.....	71
5.9 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที.....	72
5.10 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที.....	73
5.11 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที.....	73
5.12 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที.....	74
5.13 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที.....	75
5.14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที.....	76
5.15 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที.....	76
5.16 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที.....	77
5.17 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที.....	78
5.18 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที.....	79
5.19 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที.....	79
5.20 กระแสอินพุต กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V, 40V$ และ $50V$	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35\text{ V}$	81
5.22 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40\text{ V}$	82
5.23 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50\text{ V}$	83
5.24 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 35\text{ V}$ เป็น 50 V เวลา 3 วินาที.....	85
5.25 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 50\text{ V}$ เป็น 35 V เวลา 3 วินาที.....	86
5.26 พฤติกรรมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 และกรณีเปลี่ยนแปลง V_{ref} ที่เวลา 3 วินาที.....	88
5.27 การกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 และกรณีเปลี่ยนแปลง V_{ref} ที่เวลา 3 วินาที.....	87
5.28 แผนผังขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร.....	88
5.29 โครงสร้างการควบคุมที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ ในการตรวจจับความผิดพลาด.....	90
5.30 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35\text{V}$	90
5.31 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาด ที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35\text{V}$	91
5.32 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35\text{ V}$	92
5.33 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35\text{ V}$	93
5.34 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35\text{ V}$	94
5.35 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35\text{ V}$	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.36 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V.....	96
5.37 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V.....	97
5.38 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V.....	98
5.39 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V.....	99
5.40 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V.....	100
5.41 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V.....	101
5.42 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V.....	102
5.43 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V.....	103
5.44 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V.....	104
5.45 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V.....	105
5.46 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V.....	106
5.47 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V.....	107
5.48 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35$ V เป็น 50V ที่เวลา 3 วินาที.....	108
5.49 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง จาก $V_{ref} = 35$ V เป็น 50V ที่เวลา 3 วินาที.....	109
5.50 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50$ V เป็น 35V ที่เวลา 3 วินาที.....	110
5.51 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง จาก $V_{ref} = 50$ V เป็น 35V ที่เวลา 3 วินาที.....	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.52 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	113
5.53 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลด จาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	114
5.54 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	115
5.55 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลด จาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	116
5.56 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	117
5.57 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	118
5.58 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35V$	120
5.59 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต จาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35V$	121
5.60 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$	123
5.61 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต จาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$	124
5.62 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50V$	126
5.63 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต จาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50V$	127
5.64 แผนผังขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรมอเตอร์ภายใต้สภาวะที่เกิดความผิดพลาด.....	130
5.65 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ในสภาวะเกิดความผิดพลาด.....	132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.66 โครงสร้างการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่เกิดความผิดปกติ	133
5.67 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	134
5.68 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	134
5.69 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	136
5.70 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	137
5.71 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	139
5.72 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	139
5.73 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	141
5.74 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	142
5.75 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	144
5.76 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$	144
5.77 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	146
5.78 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	147
5.79 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	149
5.80 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	149
5.81 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	151
5.82 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	152

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.83 การควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	154
5.84 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$	154
6.1 โครงสร้างของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	158
6.2 ชุดทดสอบจริงของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ.....	159
6.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	160
6.4 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส.....	160
6.5 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส 36MT160.....	161
6.6 ตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	161
6.7 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ.....	162
6.8 มอดูลของมอสเฟตสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ.....	162
6.9 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ.....	163
6.10 ตัวเก็บประจุต่าง ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ.....	163
6.11 ไดโอดกำลังที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ.....	164
6.12 โหลดตัวต้านทานสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ.....	164
6.13 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....	166
6.14 การเปรียบเทียบค่าการวัดกระแสอินพุต.....	167
6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง i_{in} และ i_{digi1} ของตัวตรวจจับกระแสตัวที่หนึ่ง.....	168
6.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง i_{L3} และ i_{digi2} ของตัวตรวจจับกระแสตัวที่สอง.....	170

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.17 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน.....	170
6.18 การเปรียบเทียบค่าการวัดแรงดันเอาต์พุต.....	172
6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_o และ i_{digi} ของตัวตรวจจับแรงดัน.....	173
6.20 โครงสร้างของไอซีออปโตเบอร์ PC923L.....	174
6.21 การต่อวงจรของวงจรแยกโคคแบบขยายสัญญาณ.....	174
6.22 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	175
6.23 ไอ้ดอะแกรมการเขียนโปรแกรมของตัวควบคุม.....	176
6.24 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP.....	180
6.25 แผนการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	181
6.26 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ.....	182
6.27 การเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบกรณี $V_{ref} = 35V$	183
6.28 การเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบกรณี $V_{ref} = 40V$	183
6.29 การเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบกรณี $V_{ref} = 50V$	184
6.30 การเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบกรณีเปลี่ยนแปลงจาก $V_{ref} = 35V$ เป็น $50V$ ที่เวลา 1.5 วินาที.....	185
6.31 การเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบกรณีเปลี่ยนแปลงจาก $V_{ref} = 50V$ เป็น $35V$ ที่เวลา 1.5 วินาที.....	186
7.1 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อ V_{ref} คงที่.....	190
7.2 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณี $V_{ref} = 35V$	190
7.3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 35V$	191
7.4 สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตซ์ทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 35V$	191
7.5 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณี $V_{ref} = 40V$	192
7.6 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 35V$	193

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.7 สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 40V$	193
7.8 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณี $V_{ref} = 50V$	194
7.9 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 50V$	195
7.10 สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 50V$	195
7.11 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S1 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	197
7.12 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	197
7.13 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	198
7.14 สัญญาณพัลส์หลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติ S_1 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	198
7.15 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	199
7.16 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	200
7.17 ชุดสัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	200
7.18 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	201
7.19 สัญญาณพัลส์หลังจากการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	201
7.20 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	202
7.21 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$	203
7.22 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	203

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.23 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	204
7.24 สัญญาณพัลส์หลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	204
7.25 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$	205
7.26 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	206
7.27 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	207
7.28 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	207
7.29 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	208
7.30 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	208
7.31 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	209
7.32 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	210
7.33 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	210
7.34 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	211
7.35 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	211
7.36 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	212

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.37 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	213
7.38 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติและหลังจากตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	213
7.39 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$	214
7.40 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	215
7.41 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	216
7.42 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	216
7.43 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	217
7.44 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	217
7.45 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	218
7.46 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	219
7.47 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	219
7.48 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	220
7.49 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	220
7.50 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	221
7.51 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	222

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.52 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	222
7.53 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	223
7.54 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$	223
7.55 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น เมื่อให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีการปรับเปลี่ยน.....	225
7.56 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}	226
7.57 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}	226
7.58 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติเมื่อมีการปรับเปลี่ยน V_{in}	227
7.59 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติเมื่อมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 50V$	228
7.60 สัญญาณพัลส์หลังจากมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 50V$	228
7.61 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติเมื่อมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 40V$	229
7.62 สัญญาณพัลส์หลังจากมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 40V$	229
7.63 ชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o	231
7.64 ผลการทดสอบวงจร เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกรณี V_{ref} เท่ากับ 35V.....	233
7.65 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานกรณี V_{ref} เท่ากับ 35V.....	233
7.66 ผลการทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกรณี V_{ref} เท่ากับ 40V.....	234
7.67 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานกรณี V_{ref} เท่ากับ 40V.....	234
7.68 ผลการทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกรณี V_{ref} เท่ากับ 50V.....	235

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.69 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานกรณิ V_{ref} เท่ากับ 50V.....	235
ก.1 แบบจำลองระบบวงปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัสต์.....	244
ก.2 แบบจำลองระบบวงปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์.....	244
ก.3 แรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	245
ก.4 การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	245
ก.5 กระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	245
ก.6 การกระเพื่อมของกระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	246
ก.7 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	246
ก.8 กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	246
ก.9 แรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30 V.....	247
ก.10 การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30 V.....	248
ก.11 กระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30 V.....	248
ก.12 การกระเพื่อมของกระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30 V.....	248
ก.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ที่แรงดันเอาต์พุต=30 V.....	248
ก.14 การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ที่แรงดันเอาต์พุต=30 V.....	249
ก.15 แรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100 V.....	249
ก.16 การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100 V.....	249
ก.17 กระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30 V.....	250
ก.18 การกระเพื่อมของกระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100 V.....	250
ก.19 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ที่แรงดันเอาต์พุต=100 V.....	251
ก.20 การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ที่แรงดันเอาต์พุต=100 V.....	251
ก.21 แรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	252
ก.22 การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	253
ก.23 กระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	253
ก.24 การกระเพื่อมของกระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....	254

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.25	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (สีน้ำเงิน) และตัวที่ 2 (สีชมพู) ที่แรงดันเอาต์พุต=40V.....
	254
ก.26	การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (สีน้ำเงิน) และตัวที่ 2 (สีชมพู) ที่แรงดันเอาต์พุต =40 V.....
	255
ก.27	กระแสอินพุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....
	255
ก.28	การกระเพื่อมของกระแสอินพุต ที่แรงดันเอาต์พุต=40 V.....
	256
ก.29	แรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	256
ก.30	การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	257
ก.31	กระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	257
ก.32	การกระเพื่อมของกระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	258
ก.33	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (สีน้ำเงิน) และตัวที่ 2 (สีชมพู) ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	258
ก.34	การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (สีน้ำเงิน) และตัวที่ 2 (สีชมพู) ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	259
ก.35	กระแสอินพุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	259
ก.36	การกระเพื่อมของกระแสอินพุต ที่แรงดันเอาต์พุต=30V.....
	260
ก.37	แรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	260
ก.38	การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	261
ก.39	กระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	261
ก.40	การกระเพื่อมของกระแสเอาต์พุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	262
ก.41	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (สีน้ำเงิน) และตัวที่ 2 (สีชมพู) ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	262
ก.42	การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (สีน้ำเงิน) และตัวที่ 2 (สีชมพู) ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	263
ก.43	กระแสอินพุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	263
ก.44	การกระเพื่อมของกระแสอินพุต ที่แรงดันเอาต์พุต=100V.....
	264

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิด ระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์และวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรง แบบอินเวอร์ตีฟบวสต์.....	265
ก.46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระเพื่อมของกระแสอินพุตของ การจำลองสถานการณ์ระบบวงปิดระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง แบบบวสต์และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ตีฟบวสต์.....	266
ก.47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตของการจำลอง สถานการณ์ระบบวงปิดระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ตีฟบวสต์.....	266
ข.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	271



บทที่ 1

บทนำ

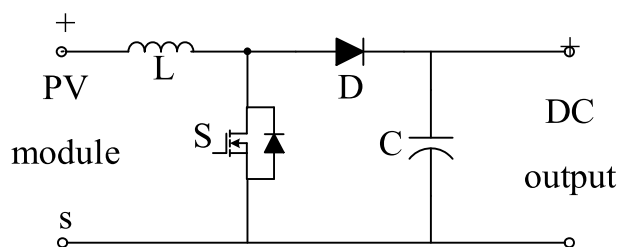
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากทรัพยากรธรรมชาติในประเทศไทยที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานได้ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ นับวันยังมีปริมาณลดลงและอาจหมดสิ้นในที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแสวงหาแนวทางแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคตเพื่อเพียงพอกับความต้องการใช้พลังงานที่มีแนวโน้มสูงขึ้นสำหรับการพัฒนาประเทศชาติที่ยั่งยืน ปัจจุบันได้มีการส่งเสริมให้มีการศึกษาและพัฒนาด้านพลังงานทดแทน(Renewable Energy) เช่นพลังงานแสงอาทิตย์(solar energy) พลังงานลม(wind energy) พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง(fuel cell energy) และพลังงานชีวมวล (biomass energy) เป็นต้น เพื่อสามารถนำพลังงานดังกล่าวมาใช้แก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

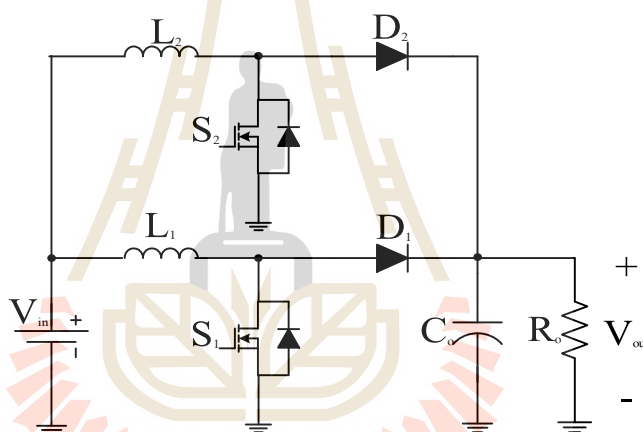
เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรประกอบด้วยลักษณะทางภูมิประเทศและภูมิอากาศ ทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง รวมทั้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด(clean energy) ไม่สร้างมลภาวะให้กับสภาพแวดล้อม อีกทั้งเป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านระบบพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกแนวทางที่น่าสนใจอย่างยิ่งเพื่อเป็นพลังงานทดแทนสำหรับใช้ในการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตามการนำพลังงานทดแทนมาใช้ต้องมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า(power electronics converter) ที่เหมาะสมเข้าช่วยเพื่อเชื่อมต่อระหว่างแหล่งพลังงานทดแทนกับโหลด

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสท์ (interleaved boost converter) เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่น่าสนใจและเหมาะสมสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน เนื่องจากสามารถทบทระดับแรงดันอินพุตเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น ประกอบกับมีสมรรถนะที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสท์ดั้งเดิม (conventional boost converter) อาทิเช่น ช่วยลดการกระเพื่อม (ripple) ของกระแสอินพุตและการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์ค่อนข้างต่ำ (low switching loss) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรเพิ่มขึ้น ขนาดของวงจรเล็กลงเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุในวงจรมีขนาดเล็กลง รวมถึงช่วยลดผลกระทบการแผ่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

(electromagnetic interference) รูปที่ 1.1 และ 1.2 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ตั้งเดิม และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบัสต์สองชั้น ตามลำดับ



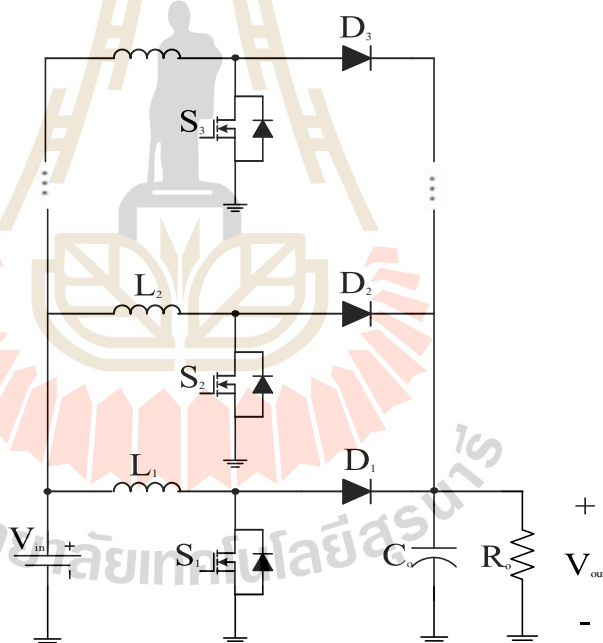
รูปที่ 1.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ตั้งเดิม



รูปที่ 1.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบัสต์สองชั้น

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าในแต่ละชั้นของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบัสต์ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำหนึ่งตัว สวิตช์กำลังหนึ่งตัว และไดโอดกำลังหนึ่งตัว หากมีการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังแต่ละตัวอย่างเหมาะสม จะทำให้กระแสอินพุตถูกแบ่งแยกไหลไปยังตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวเท่า ๆ กัน จึงสามารถออกแบบเพื่อเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำในละชั้นให้มีขนาดเล็กลงได้ และเลือกใช้สวิตช์กำลังที่มีพิกัดกระแสไม่สูงมากนักได้ รวมถึงเกิดการหักล้างของกระแสกระเพื่อม (ripple cancelation) ที่ไหลผ่านสวิตช์กำลังแต่ละตัว ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบพลังงานทดแทน เช่น ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งแรงดันอินพุตของวงจรที่ได้จากแผง PV modules จะมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อกำลังไฟฟ้า

ที่ต้องการส่งไปยังโหลดสูงขึ้น ส่งผลให้กระแสอินพุตมีค่าค่อนข้างสูง หากใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมเข้าช่วยในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต จำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ เพื่อเพียงพอกับกระแสที่ไหลผ่านสูงๆ และช่วยกรองการกระเพื่อมของกระแสอินพุต นอกจากนี้ยังต้องเลือกใช้สวิตช์กำลังที่มีพิกัดกระแสที่สูงมากพอ รวมทั้งต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ด้วยเหตุเหล่านี้จึงทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และระบบมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างน้อย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการประยุกต์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักการแบ่งกระแสอินพุตให้แยกไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและสวิตช์กำลังในแต่ละชั้น เกิดการหักล้างของการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละชั้น ทั้งนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ยังเหมาะสำหรับประยุกต์ในงานที่มีกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูง รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์หลายชั้น



รูปที่ 1.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์หลายชั้น

จากรูปที่ 1.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์หลายชั้น มีจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงจำนวนสวิตช์กำลัง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญยิ่งในการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้างดกล่าว หากสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งทำงานผิดพลาดไป ซึ่งอาจเกิดจากการพังเสียหายแบบเปิดวงจร (open-circuit switch fault) ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์หลายชั้นไม่สามารถทำงานได้ปกติดังเดิม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแนวทาง

ในการเพิ่มความน่าเชื่อถือ (reliability) ให้กับระบบพลังงานทดแทน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นสำคัญ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอาจแบ่งได้เป็นความผิดปกติแบบเปิดวงจร (open-circuit fault) และความผิดปกติแบบปิดวงจร (short-circuit fault) ทั้งนี้กรณีความผิดปกติแบบปิดวงจร จะมีกระแสไหลในวงจรสูงมาก (overcurrent) แต่สามารถตรวจจับและตัดความผิดปกติดังกล่าวออกจากระบบได้อย่างรวดเร็วโดยอาศัยการป้องกันตามมาตรฐานของระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะพัฒนาหาแนวทางในการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่เกิดกับสวิตช์กำลังเท่านั้น เพื่อสามารถดำเนินการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์หลายชั้นต่อไปได้ แม้จะอยู่ในสถานะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น (fault operation) ทั้งนี้จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์หลายชั้น และศึกษาพฤติกรรมของวงจรดังกล่าวทั้งในสภาวะการทำงานปกติ (normal operating conditions) และในสภาวะการทำงานผิดปกติ (fault operating conditions) เพื่อหาแนวทางในการตรวจจับความผิดปกติ (fault detection) เนื่องจากสวิตช์กำลังเกิดการพังเสียหายแบบเปิดวงจร นอกจากนี้จะทำการสร้างชุดทดสอบและทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์หลายชั้นทั้งในสภาวะการทำงานปกติ และทำงานภายใต้สภาวะที่เกิดความผิดปกติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์หลายชั้นทั้งในสภาวะการทำงานปกติและในสภาวะการทำงานที่มีความผิดปกติอันเนื่องมาจากความผิดปกติแบบเปิดวงจรของสวิตช์กำลัง

1.2.2 เพื่อหาแนวทางในการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่เกิดขึ้นกับสวิตช์กำลังและแนวทางในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์หลายชั้นให้สามารถทำงานต่อไปได้ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ

1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์หลายชั้นให้ยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ ภายใต้สภาวะการทำงานที่มีความผิดปกติของสวิตช์กำลังเกิดขึ้น

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์พึ่งพาโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems

1.3.2 ระบบที่ใช้เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอินพุตของวงจรและมีโหลดเป็นตัวต้านทาน

1.3.3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นกระแสต่อเนื่อง

1.3.4 สวิตช์ในวงจรพิจารณาเป็นแบบอุดมคติ

1.3.5 ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เป็นตัวควบคุมแบบพีไอ

1.3.6 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น ใช้บอร์ดคิ เอสพีคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูงสำหรับการสั่งการควบคุมการทำงานของวงจร

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์หลายชั้นถูกออกแบบและควบคุมการทำงานเพื่อทำการเพิ่มระดับแรงดันอินพุตกระแสตรงที่มีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20 Vdc ให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงขึ้น โดยมีการหักล้างกันของการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ทั้งนี้ในงานวิจัยจะพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น

1.4.2 ตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่อาศัยการออกแบบโดยวิธีดั้งเดิม

1.4.3 การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นจะพิจารณาเฉพาะช่วงกระแสต่อเนื่อง

1.4.4 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น จะพิจารณาเพียงความผิดพลาดของสวิตช์กำลังเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรเท่านั้น

1.4.5 การตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น จะดำเนินการตรวจจับความผิดของสวิตช์กำลังเนื่องจากความผิดพลาดแบบเปิดวงจรเท่านั้น

1.4.6 ประสิทธิภาพของการตรวจจับความผิดพลาดแบบเปิดวงจรของสวิตช์กำลังในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น จะพิจารณาจากการจำลองสถานการณ์ด้วย

อุปกรณ์คอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ได้จากการสร้างชุดทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้รับองค์ความรู้ด้านการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟิวส์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดพลาด

1.5.2 ได้รับองค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟิวส์หลายชั้น ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและสภาวะที่มีความผิดพลาดแบบเปิดวงจรของสวิตช์กำลังเกิดขึ้น โดยศึกษาพฤติกรรมของระบบจากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5.3 ได้รับองค์ความรู้ด้านการตรวจจับความผิดพลาดแบบเปิดวงจรของสวิตช์กำลัง โดยอาศัยการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของระบบในสภาวะปกติและสภาวะที่มีความผิดพลาดแบบเปิดวงจรของสวิตช์กำลังเกิดขึ้น

1.5.4 ได้รับองค์ความรู้ด้านการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟิวส์หลายชั้น ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและสภาวะที่มีความผิดพลาดแบบเปิดวงจรของสวิตช์กำลังเกิดขึ้น

1.5.5 ได้รับองค์ความรู้ด้านการใช้บอร์ดดีเอสพีคอนโทรลเลอร์ สำหรับการตรวจจับความผิดพลาดและการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟิวส์หลายชั้น

1.5.6 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้มีการนำเสนอเนื้อหาดังต่อไปนี้
บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการทำวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมถึงการแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่มีในอดีต โดยจะแบ่งหัวข้อออกเป็น 3 หัวข้อดังนี้ 1. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟิวส์ ซึ่งก็จะมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับวงจรแปลง

ผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์ในอดีต 2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้น ซึ่งจะมีเนื้อหาเกี่ยวกับวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นที่เคยมีมาในอดีต และสุดท้าย 3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรและการควบคุมวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้น ซึ่งรวบรวมการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรและการควบคุมวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์โดยวิธีต่าง ๆ

บทที่ 3 วงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้น

บทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ปรากฏในวงจร เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแส และสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลังทั้งสามตัว

บทที่ 4 การควบคุมวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้น

บทนี้กล่าวถึงการควบคุมวงจรวจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โครงสร้างการควบคุม และเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลัง สุดท้ายผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถตัวควบคุมว่าสามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

บทที่ 5 วงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ

บทนี้กล่าวถึงวิธีการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้น โดยการศึกษาพฤติกรรมของกระแสในสภาวะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ วิธีการควบคุมวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นในสภาวะที่มีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น โดยใช้เทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับควบคุมสวิตช์ให้เหมาะสม และผลการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของวิธีการตรวจจับความผิดปกติและวิธีการควบคุมว่าสามารถตรวจจับความผิดปกติและควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

บทที่ 6 การสร้างชุดทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบสำหรับวงจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้ 1. ส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ป้อนให้กับระบบ 2. วงจรวจรแปลงผ่นกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์

สามชั้น 3. วงจรตรวจจับสัญญาณ ซึ่งจะใช้ในการตรวจจับแรงดันเอาต์พุตและจับกระแสอินพุต เพื่อใช้ในการควบคุมวงจร 4.การควบคุมการทำงานของวงจร โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 7 ผลการทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติขณะที่มีตัวควบคุมภายใต้สภาวะต่าง ๆ โดยแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้ 1. การทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่ 2. การทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงแบบทันทีทันใด 3. การทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตแบบทันทีทันใดที่ค่าแรงดันอ้างอิงต่างๆ 4. การทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดและบทที่ 8 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ

ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมพร้อมทั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบรูสต์และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์, ภาคผนวก ข. แสดงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335, ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ, ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ผลงาน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นและการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งในอดีตที่ผ่านมา งานวิจัยด้านดังกล่าว ได้มีผู้วิจัยคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ผ่านมา การสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีต เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นและการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเทอร์ลิฟบูสต์ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
2011	Youngjong Ko Hae-Gwang Jeong Kyo-Beum Lee Dong-Choon Lee Jang-Mok Kim	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้วิธีการแปลงดีคิวแต่วิธีนี้อาจใช้ได้เฉพาะไฟฟ้ากระแสสลับ เพราะต้องตรวจจับกระแสที่ไหลทั้ง 3 เฟส

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเทอร์ลิฟบูสต์ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Y. Chen, X. Pei, S. Nie, and Y. Kang	บทความนี้แนะนำเสนอการวินิจฉัยความผิดปกติในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงโดยใช้ the magnetic near field ร่วมกับการวิเคราะห์ความถี่ที่ได้จากกระบวนการ fast Fourier transform ซึ่งฮาร์โมนิกอันดับต่ำจะใช้อาศัยวิธีการ neural network ในขณะที่ฮาร์โมนิกอันดับสูงจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย
2012	Xuejun Pei Songsong Nie Yu Chen Yong Kang	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติในกรณีที่เกิดความผิดปกติแล้วมีการเปิดวงจรออกไปของวงจร PSFB
2012	X. Pei, S. Nie, Y. Chen and Y. Kang	บทความนี้แนะนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ isolated phase-shifted full bridge โยใช้การวัดแรงดันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
2013	Jorge O. Estima และคณะ	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติโดยอาศัยกระแสที่คลาดเคลื่อนเป็นตัวอ้างอิงซึ่งจะใช้ตัวแปรอินพุตที่มีอยู่แล้วในระบบควบคุมหลักทำให้สามารถลดจำนวนอุปกรณ์ที่จะนำมาต่อเพิ่มได้
2013	Mahmoud Shahbazi Philippe Poure Shahrokh Saadate Mohammad Reza Zolghadri	นำเสนอการเกี่ยวกับความผิดปกติภายในวงจร Five-leg converter เมื่อเกิดความผิดปกติแล้วเปิดวงจรที่ขาใดขาหนึ่ง ซึ่งขาที่เหลือยังต้องสามารถทำงานต่อไปได้ โดยจะใช้วิธีเขียนโปรแกรมลงบนชิพ FIOGA เพื่อตรวจจับความผิดปกติ

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเทอร์ลิฟบูสต์ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
2013	Hyun-Keun Ku Jang-Mok Kim	นำเสนอการตรวจจับการเกิดความผิดพลาดของสวิตช์แบบเปิดวงจรพร้อมกันหลายตัวและการคงทนต่อความเสียหายของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสกลับเป็นกระแสดตรงแบบสามเฟส
2013	M. Shahbazi, E. Jamshidpour, P. Poure, S. Saadate, and M. Zolghadri	บทความนี้แนะนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบเปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสดตรงเป็นกระแสดตรงที่ไม่มีการแยกโหนด ทั้งนี้ต้องเพิ่มเซนเซอร์กระแสเพื่อวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละชั้น โดยอาศัย FPGA เข้าช่วยในการประมวลผลร่วมกับการพิจารณาความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละตัว
2014	E. Rebeiro, A. J. M. Cardoso and C. Boccaletti	บทความนี้แนะนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบเปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ โดยอาศัยการวัดค่ากระแส dc link โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเครื่องหมายที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของกระแส dc link ร่วมกับสัญญาณการควบคุมการทำงานของสวิตช์ ทั้งนี้ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรค่อนข้างต่ำเพียง 1 kHz
2014	Kiwoo Park Zhe Chen	นำเสนอการตรวจจับความผิดพลาดแบบเปิดวงจรและการควบคุมสำหรับการคงทนต่อความเสียหายของ Parallel-Connected Single Active Bridge (PCSAB) dc-dc converter โดยจะใช้ Sensor เพียงตัวเดียวในการส่งค่าเอาต์พุต

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเวอร์ตลิฟท์ที่มีความทนต่อความผิดพลาด (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
2014	Shin-Myung Jung Kwansup Lee Hag-Wone Kim	นำเสนอการตรวจจับความผิดพลาดแบบเปิดวงจรในสัญญาณ PWM แบบ 3 เฟส ที่ใช้ควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยจะวิเคราะห์จากกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ เมื่อมีการเกิดความผิดพลาดด้านลบจะไม่สามารถไหลผ่านสวิตช์ได้แต่จะไหลผ่าน free-wheeling diode ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นสมมูลกันของกระแสซึ่งจะส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกและแรงดันกระเพื่อมด้านเอาต์พุตเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก Zero Vector ได้รับผลกระทบจากการเกิดความผิดพลาด
2014	Songsong Nie Xuejun Pei Yu Chen Yong Kang	นำเสนอการตรวจจับความผิดพลาดของสัญญาณ PWM สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยใช้สมการแรงดันของ Magnetic Component
2014	Hiba Al-Sheikh Ouadie Bennouna Ghaleb Hoblos Nazih Moubayed	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์การเกิดความผิดพลาดของวงจร Bidirectional DC-DC Converter สำหรับใช้ในพาหนะที่ทำงานด้วยระบบไฮบริด
2015	J. L. soon and D. D-C. Lu	บทความนี้แนะนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักค์ โดยทำการวัดค่าแรงดัน source-to-ground ของ MOSFET แต่ละตัว
2015	Ehsan Jamshidpour Philippe Poure Eskandar Gholipour Shahrokh Saadate	นำเสนอการอธิบายเกี่ยวกับจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวโดยพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่เกิดความผิดพลาดแบบเปิดวงจรและแบบปิดวงจร

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเทอร์ลิฟบูสต์ที่มีความทนต่อความผิดพลาด (ต่อ)

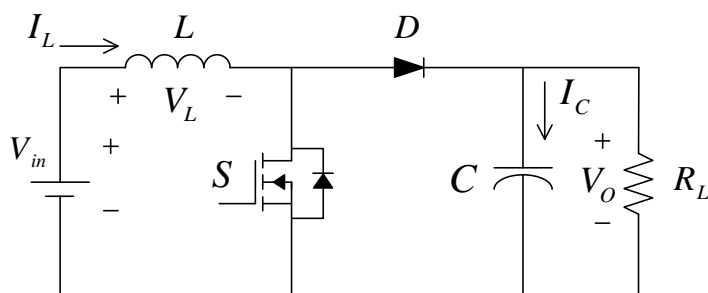
ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
2015	E. Jamshidpour, P. Poure and S. Saadate	บทความนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงสำหรับระบบพีวี โดยอาศัยการพิจารณารูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำร่วมกับการพิจารณาสัญญาณ state machine ที่กำหนดขึ้น
2015	E. Jamshidpour, P. Pour, E. Gholipour and S. Saadate	บทความนี้เสนอการตรวจจับความผิดพลาดสองวิธีการสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดียว โดยวิธีการแรกจะอาศัยสัญญาณการสวิตช์ร่วมกับเครื่องหมายของความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่วิธีการที่สองจะอาศัยการพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ร่วมด้วย
2016	Yigeng Huangfu Shengrong Zhuo Fuxi Chen Shengzhao Pang	บทความนี้เสนอการเพิ่มความหนาเชื่อถือให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้นโดยการนำสวิตช์มาต่อขนานเพื่อใช้สำหรับทดแทนสวิตช์ที่เกิดความผิดพลาดแล้วใช้วิธีการ Makov chain method เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของระบบ
2016	Siriwat Sakulchotruangdet SudaratKhwan-on	บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสภาวะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร
2017	Elham Pazouki Jose Alexis De Abreu-Garcia Yilmaz Sozer	บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟในสภาวะเกิดความผิดพลาด โดยใช้หลักการปรับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกและตัวควบคุมกระแสภายในเมื่อตรวจพบความผิดพลาดที่อยู่ในระบบ

จากตารางที่ 2.1 พบว่า การตรวจจับความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสดตรงมีหลายวิธี เช่น การอาศัยสัญญาณการสวิตช์ร่วมกับเครื่องหมายของความชันของ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ การตรวจจับความผิดปกติโดยใช้วิธีการแปลงคิกวแต่วิธีนี้อาจใช้ได้ เฉพาะไฟฟ้ากระแสสลับเพราะต้องตรวจจับกระแสที่ไหลทั้ง 3 เฟส วิธีการตรวจจับความผิดปกติ ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสดตรงสำหรับระบบพีวี โดยอาศัยการพิจารณา รูปร่างของ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำร่วมกับการพิจารณาสัญญาณ state machine ที่กำหนดขึ้น การตรวจจับความผิดปกติของสัญญาณ PWM สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยใช้สมการแรงดัน ของ Magnetic Component เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีก็มีจุดเด่นที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัย วิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นที่การตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร

2.3 วงจรแปลงทระดับแรงดัน

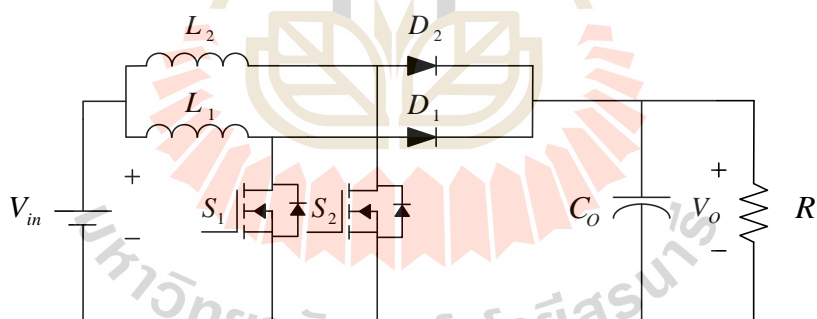
ปัจจุบันโครงสร้างของวงจรทระดับแรงดันถูกพัฒนาให้มีความสามารถในการเพิ่มระดับ แรงดันที่สูงมากยิ่งขึ้น ซึ่งโครงสร้างของวงจรทระดับแรงดันนั้นมีหลากหลายรูปแบบสามารถ จำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบแยกกราวด์ (isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) โดยแบบแยกกราวด์จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกัลวานิก (galvanic transformer) เพื่อ แยกกราวด์ระหว่างด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง โดยหม้อแปลงดังกล่าวจะมีอัตราการพัน ขดลวดสูง (large turn ratio) ซึ่งความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance) และตัวเก็บประจุแอบแฝง (parasitic capacitance) ที่เกิดขึ้นในขดลวดทุกขดลวดของหม้อแปลงจะส่งผลให้เกิดการพุ่งเกิน (spike) ของแรงดันและกระแสภายในวงจร ทำให้สมรรถนะ และประสิทธิภาพของระบบลดลง รวมทั้งทำให้วงจรได้รับความเสียหาย ในขณะที่แบบไม่แยกกราวด์จะใช้ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ในการทำงานสูงกว่าแบบแยกกราวด์ และมีค่าความเครียดแรงดัน (voltage stress) ตกคร่อม สวิตช์กำลังมากกว่า แต่แบบไม่แยกกราวด์ไม่ต้องใช้หม้อแปลงทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานของ วงจรสูงกว่าแบบแยก ดังนั้นในการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมจะมุ่งเน้นเพียงวงจรทระดับ แรงดันแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated boost converter) เท่านั้น

1. วงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม (Conventional boost converter) โครงสร้างของวงจร ทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม (Conventional boost converter) ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ไดโอด ตัวต้านทาน และสวิตช์กำลัง แสดงได้ ดังรูปที่ 2.1 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมแสดงในภาคผนวก ก.



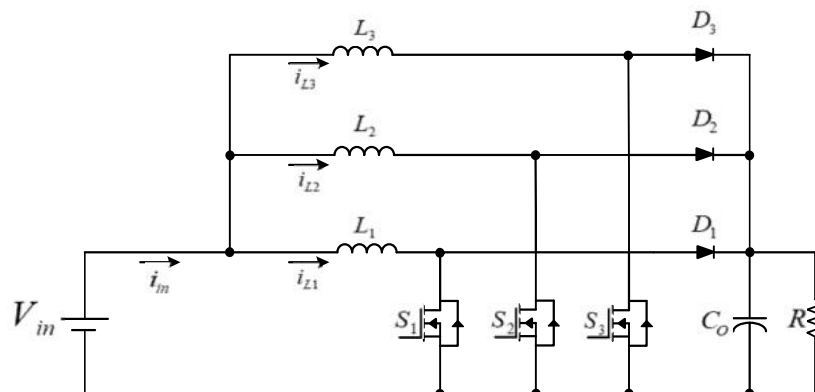
รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม

2. วงจรทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลีฟสองเฟส (Two-phase Interleaved Boost Converter) เป็นการนำวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมสองวงจรมาต่อขนานกัน สวิตช์ทั้งสองตัวภายในวงจรจะทำงานต่างเฟสกัน 180 องศา เพื่อให้เกิดการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะช่วยให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตต่ำ ประสิทธิภาพสูงขึ้น การตอบสนองในสถานะชั่วครู่ไวกว่าวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม และมีความน่าเชื่อถือดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลีฟสองเฟส

3. วงจรทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลีฟสามเฟส (Three-phase Interleaved Boost Converter) เป็นการนำวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมสองวงจรมาต่อขนานกัน สวิตช์ทั้งสองตัวภายในวงจรจะทำงานต่างเฟสกัน 120 องศา เพื่อให้เกิดการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุตและการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต อีกทั้งยังลดความเครียดแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ ซึ่งวงจรดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรทบทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟสามเฟส

2.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทำการพิจารณาข้อดีข้อเสียของ วงจรทบทระดับแรงดันแบบต่าง ๆ ที่ได้ศึกษามา โดยวงจรทบทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมกรณีที่ทำงาน ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูง จะทำให้เกิดการกระเพื่อมของกระแสอินพุตและกระแสที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำสูงขึ้นไปด้วย ส่งผลให้การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นไปด้วย จึงได้มี การพัฒนาวงจรทบทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟสองเฟสขึ้น เพื่อให้เกิดการหักล้างกันของกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะช่วยให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ต่ำ ประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่เมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้น วงจรทบทระดับแรงดัน แบบอินเทอร์ลิฟสองเฟสจะเหลือสวิตช์ยังคงทำงานอยู่เพียงหนึ่งตัว ถึงแม้จะยังคงสามารถควบคุม แรงดันเอาต์พุตได้ แต่ก็จะสูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมไป จึงเป็นแนวทาง ในการพัฒนาโครงสร้างวงจรทบทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟสามเฟสที่มีความคงทนต่อความผิด พหุร่องที่พัฒนาขึ้น สำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับ โหลดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการแรงดันสูงหรือต่อเข้ากับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็น กระแสสลับแบบหนึ่งเฟสเพื่อใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวงจรทบทระดับแรงดันแบบอิน เทอร์ลิฟสามเฟสที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถทำงานต่อไปได้แม้ใน สภาวะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรและไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของ กระแสกระเพื่อม โดยบทที่ 3 จะกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การ ออกแบบค่าพารามิเตอร์ การจำลองสถานการณ์วงจรทบทระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยไม่มีตัว ควบคุม โดยการจำลองสถานการณ์จะอาศัยโปรแกรม MATLAB ผ่านบล็อก Simulink เข้าช่วยใน การจำลองสถานการณ์

บทที่ 3

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้น

3.1 บทนำ

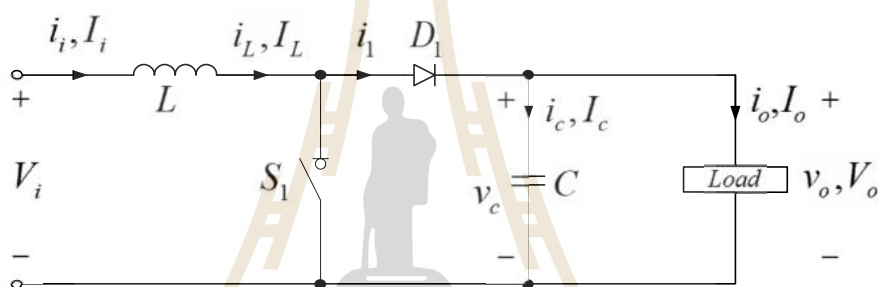
จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์และแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้น ในบทที่ผ่านมา พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้นเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นเพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร และขั้นตอนวิธีสำหรับควบคุมวงจรให้สามารถทำงานต่อไปได้ในสภาวะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น จึงเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟสองชั้นและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟสองชั้น การวิเคราะห์หลักการการทำงาน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ทำการประเมินประสิทธิภาพ รวมทั้งยังนำเสนอการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้น

3.2 โครงสร้างและหลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์

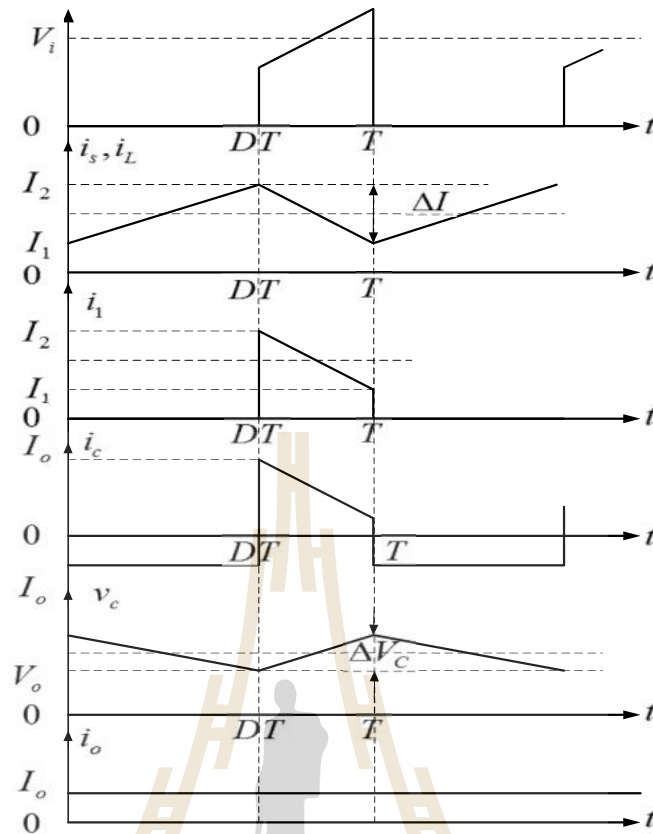
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์แบบสามชั้นเป็นวงจรที่พัฒนามาจาก วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์ (Interleaved Boost Converter) ซึ่งเป็นวงจร ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดัน (V_i) ที่มีค่าคงที่ ให้ได้แรงดันกระแสตรง (V_o) ที่สามารถปรับค่าให้สูงขึ้นได้ตามที่ต้องการ (DC to DC converter) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ (Boost Converter) ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปมาต่อขนานกัน (Parallel) โดยจะทำการจ่ายสัญญาณพัลส์ให้เลื่อนเฟสต่างกัน $\frac{2f}{n}$ องศา (n คือ จำนวนชั้นที่มาต่อขนาน เท่ากับ 2,3,4,...) ให้กับสวิตช์ จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งหมดมีการหักล้างกันไป ซึ่งทำให้สามารถลดการกระเพื่อม (ripple) ของแรงดันเอาต์พุต (V_o) ได้ เป็นผลทำให้กำลังงานสูญเสียในวงจรลดลง และยังสามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) ให้มีค่ามากกว่าค่าแรงดันอินพุต (V_i) ตามต้องการ โดยใช้การจ่ายสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ตามค่าของ Duty cycle (D) ที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้วงจรแปลง

ผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์มีข้อเสีย คือ เป็นวงจรที่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มขึ้น วิธีการสร้างสัญญาณพัลส์ให้เลื้อนเฟสต่างกัน $\frac{2f}{n}$ องศา (n คือ จำนวนขั้นที่มาต่อขนาน เท่ากับ 2,3,4...) ก่อนข้างมีความซับซ้อน แรงดันเอาต์พุต (V_o) จะไม่สามารถควบคุมได้เมื่อค่ารอบการทำงานมีค่าสูงมาก ๆ ซึ่งส่งผลให้ระบบในวงจรขาดเสถียรภาพ และเกิดความเสียหายแก่โหลด และอุปกรณ์อื่น ๆ ภายในวงจรได้

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ (Boost Converter) เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการแปลงแรงดันเอาต์พุต (V_o) ให้มีค่ามากกว่าแรงดันอินพุต (V_i) ที่ป้อนเข้ามาในวงจร วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์จะใช้มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) หรือ ไอจีบีที (IGBT) ดังรูป 3.1



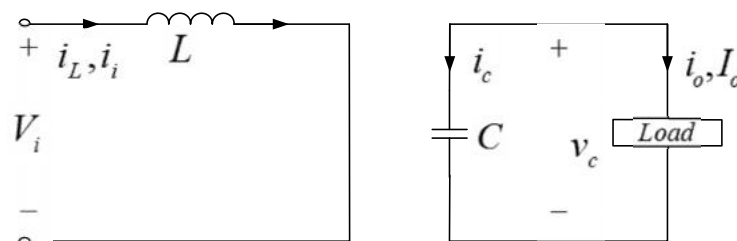
รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์



รูปที่ 3.2 waveform ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์

จากรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 เราสามารถพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ ในแต่ละโหมดการทำงานตามการ On-Off ของสวิตช์ได้ ดังนี้

โหมดการทำงานที่ 1



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลขณะปิดสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์

การทำงานในโหมดนี้ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัสต์ จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าเมื่อปิดสวิตช์ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะจ่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยที่ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ปิดสวิตช์อยู่ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ดังนี้

จาก $V_L = L \frac{di}{dt}$

KVL; $V_i = V_L$

$V_i = L \frac{di}{dt}$

เมื่อพิจารณาในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ $\frac{di}{dt} = \frac{\Delta I}{\Delta T}$ จะได้

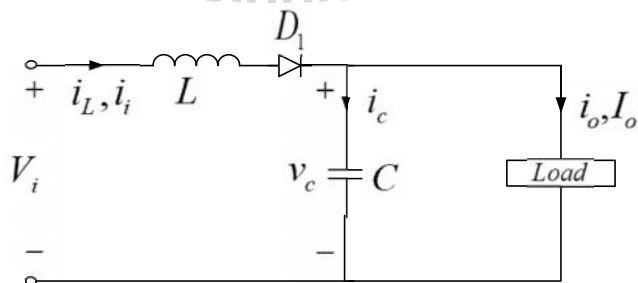
$V_i = L \frac{\Delta I}{\Delta T}$; $\Delta I = I_2 - I_1$

$V_i = L \frac{\Delta I}{t_{on}}$

$\therefore t_{on} = \frac{\Delta I \cdot L}{V_i}$

(3.1)

โหมดการทำงาน 2



รูปที่ 3.4 วงจรสมมุติขณะเปิดสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัสต์

การทำงานในโหมดนี้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายและพลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะถูกส่งมาให้ยังโหลดโดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากตัวเหนี่ยวนำเกิดจากการคายพลังงานไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ หลังจากที่ได้สะสมพลังงานไว้ในโหมดการทำงานที่ 1 ที่ช่วงเวลาที่ปิดสวิตช์และจากการที่โหลดได้รับพลังงานไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และการคายพลังงานของตัวเหนี่ยวนำนี้เอง ส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุตตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ดังนี้

จาก $V_L = L \frac{di}{dt}$

KVL; $V_i - V_C = V_L$

$V_i - V_C = L \frac{\Delta I}{\Delta T}$;

ในโหมดนี้ กระแสจะมีค่าลดลง ค่า ΔI จะมีค่าติดลบ จะได้

$V_i - V_o = -L \frac{\Delta I}{t_2}$; $V_C = V_o$

$\therefore t_{off} = \frac{-L \cdot \Delta I}{V_i - V_o}$

หรือ

$t_{off} = \frac{L \cdot \Delta I}{V_o - V_i}$ (3.2)

จากการทำงานของวงจรทั้ง 2 โหมดนี้ ทำให้เห็นได้ชัดว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ จะมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าจะมีบางส่วนที่สวิตช์ไม่ได้ทำงานก็ตาม และจากความสัมพันธ์ของการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ ทั้ง 2 โหมดนี้ เราสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้ ดังนี้

จากสมการที่ (3-1) และ สมการที่ (3-2) จะได้ว่า

$$\Delta I = \frac{t_{on} \cdot V_i}{L} = \frac{t_{off} \cdot (V_o - V_i)}{L}$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$

$$DT(V_i) = (1-D)T \cdot (V_o - V_i)$$

$$DTV_i = (T - DT)(V_o - V_i)$$

$$DTV_i = TV_o - TV_i - DTV_o + DTV_i$$

$$DTV_i = (T - DT)V_o - (T - DT)V_i$$

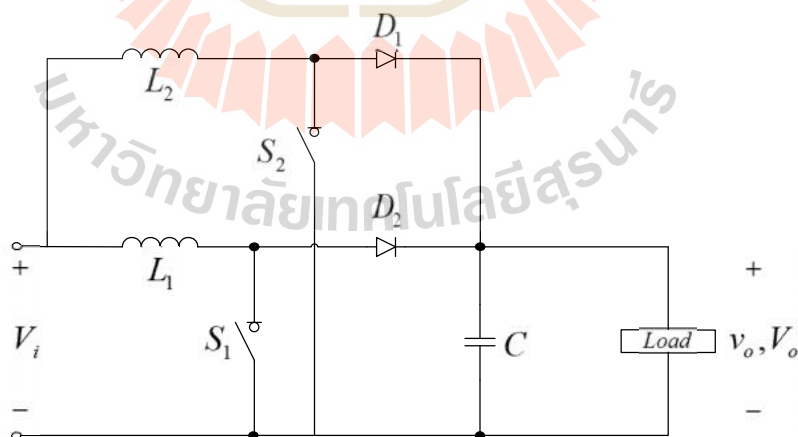
$$(T - DT)V_o = (DT + T - DT)V_i$$

$$V_o = \frac{TV_i}{T - DT}$$

$$\therefore V_o = \frac{V_i}{(1 - D)}$$

(3.3)

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟเวสต์



รูปที่ 3.5 วงจร โดยทั่วไปของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟเวสต์

จากวงจรในรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟเวสต์ ซึ่งเป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัสต์ จำนวนสองวงจรมาทำการ

ขนานกัน โดยการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 จะต้องทำงานต่างเฟสกัน 180 องศา และค่าความต่างเฟสของสวิตช์ S_1 และ S_2 คำนวณได้จากสูตร

$$\theta = \frac{2f}{n}$$

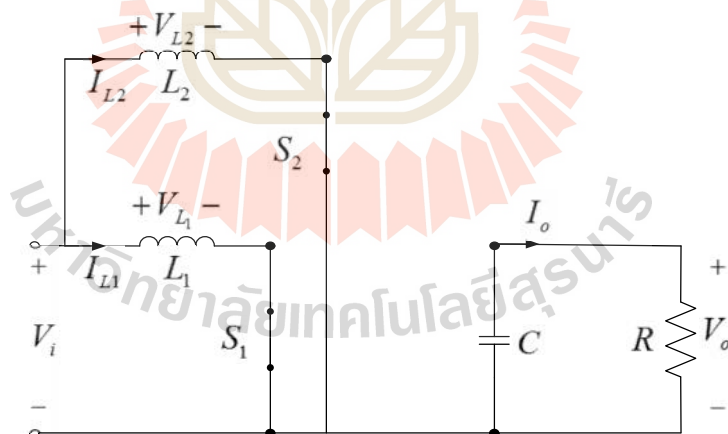
โดยที่ θ คือ ความต่างเฟสของสวิตช์ n สวิตช์

n คือ จำนวนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ตที่นำมาขนานกัน ($n = 2, 3, 4, \dots$)

ในที่นี้มี 2 วงจร ($n = 2$) จะได้ $\theta = 180^\circ$

หลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ตสี่พุ่มสามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 4 โหมด (ในการวิเคราะห์วงจรในที่นี้ กำหนดให้โหลดของวงจรเป็นตัวต้านทาน R) ดังนี้

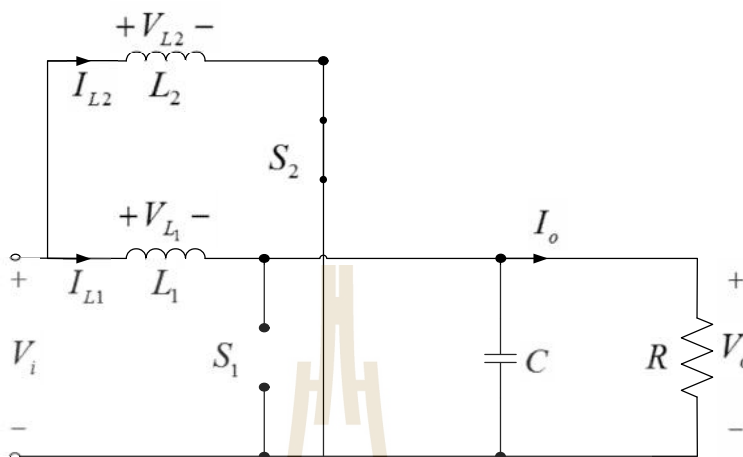
โหมดการทำงานที่ 1 สวิตช์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ทำงาน



รูปที่ 3.6 โหมดการทำงานที่ 1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ตสี่พุ่ม

จากวงจรในรูปที่ 3.6 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 (I_{L1}, I_{L2}) จะทำให้ที่ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวมีการสะสมพลังงานเพิ่มขึ้น และตัวเก็บประจุ (C) ทำหน้าที่จ่ายกระแสไปยังโหลด (R) แทนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_i)

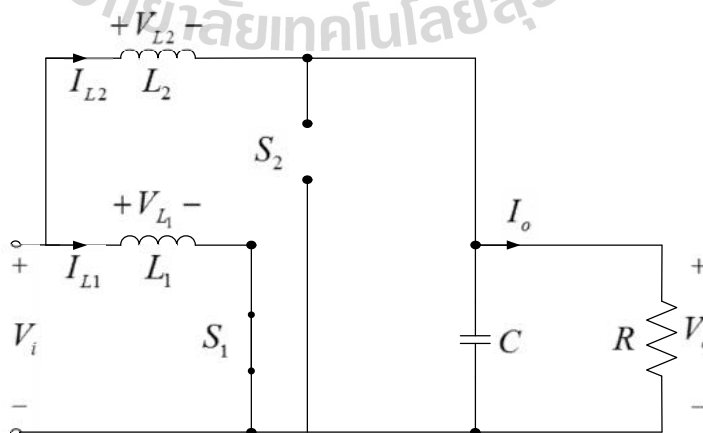
โหมดการทำงานที่ 2 สวิตช์ตัวที่ 1 ไม่ทำงาน และตัวที่ 2 ทำงาน (S_1 Off, S_2 On) ไดโอดตัวที่ 1 มีการนำกระแส (D_1 On)



รูปที่ 3.7 โหมดการทำงานที่ 2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์

จากวงจรในรูปที่ 3.7 เมื่อเปิดสวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 (I_{L2}) ทำให้ที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2 มีการสะสมพลังงานเพิ่มขึ้น แต่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 (I_{L1}) จะไหลผ่านไปยังตัวเก็บประจุ (C) และจ่ายกระแสไปยังโหลด (R) ทำให้ไม่มีการสะสมพลังงานที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 แต่จะเป็นการคายพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำแทน

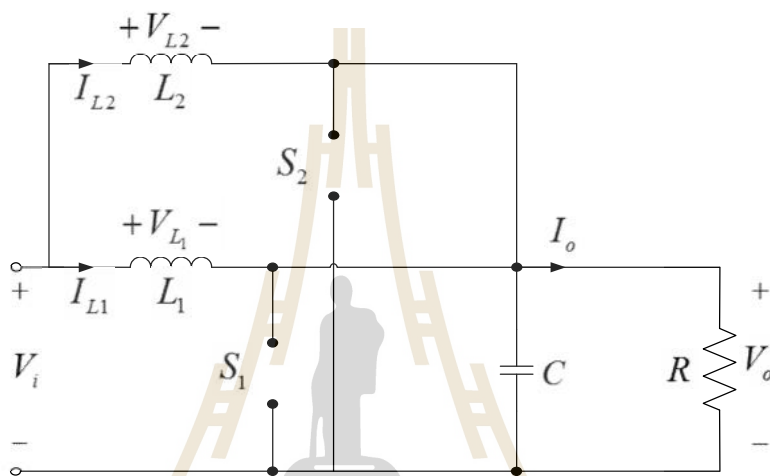
โหมดการทำงานที่ 3 สวิตช์ตัวที่ 1 ทำงาน และตัวที่ 2 ไม่ทำงาน (S_1 On, S_2 Off) ไดโอดมีการนำกระแส (D_2 On)



รูปที่ 3.8 โหมดการทำงานที่ 3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์

จากวงจรในรูปที่ 3.8 เมื่อเปิดสวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 (I_{L1}) ทำให้ที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีการสะสมพลังงานเพิ่มขึ้น แต่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 (I_{L2}) จะไหลผ่านไปยังตัวเก็บประจุ (C) และจ่ายกระแสไปยังโหลด (R) ทำให้ไม่มีการสะสมพลังงานที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2 แต่จะเป็นการคายพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำแทน

โหมดการทำงานที่ 4 สวิตซ์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ไม่ทำงาน (S_1 Off, S_2 Off) ไดโอดทั้งสองตัวมีการนำกระแส (D_1, D_2 On)



รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานที่ 4 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์

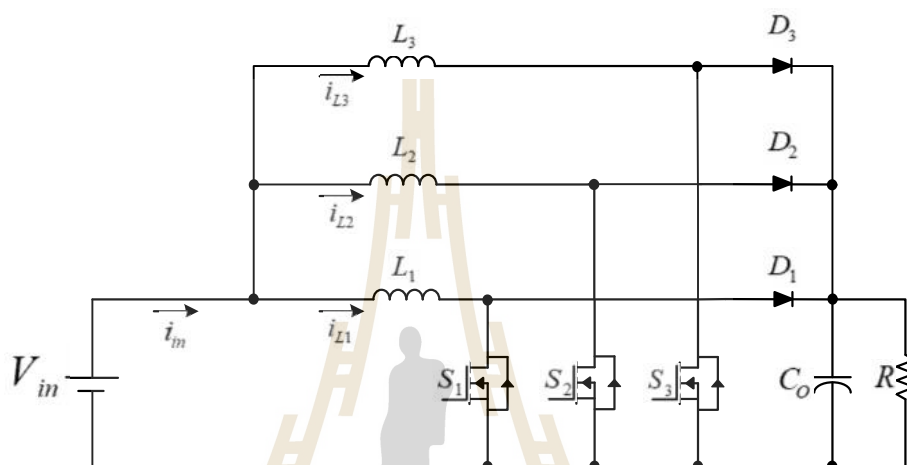
จากวงจรในรูปที่ 3.9 เมื่อเปิดสวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 (I_{L1}, I_{L2}) จะไหลผ่านไปยังตัวเก็บประจุ (C) และจ่ายกระแสไปยังโหลด (R) ทำให้ไม่มีการสะสมพลังงานที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 แต่จะเป็นการคายพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำแทน

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ จะอ้างอิงจากสมการที่ (3.3) ซึ่งเป็นสมการของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัสต์ ดังนั้น อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ จะเป็นดังสมการที่ (3.4) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัสต์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สภาวะการทำงานต่างๆแสดงได้ในภาคผนวก ก

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)} \quad (3.4)$$

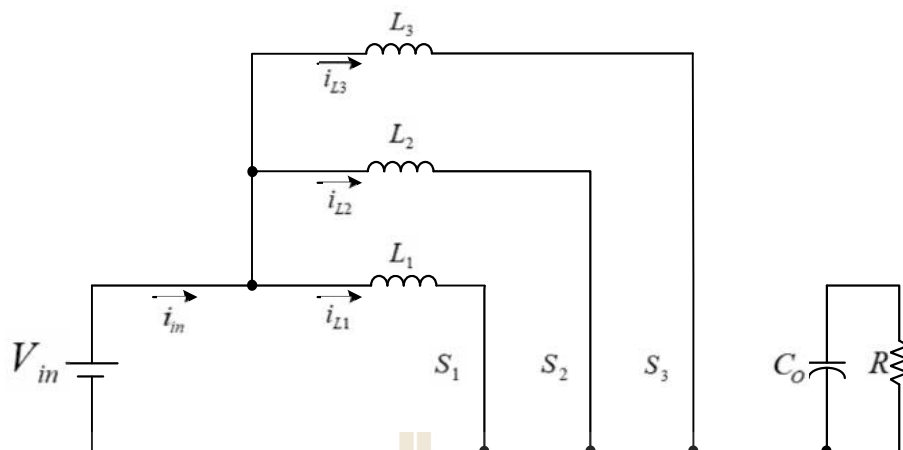
3.3 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น

วงจรอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น เป็นวงจรที่นำวงจรบูสต์แบบดั้งเดิมมาต่อขนานกัน 3 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยจากรูปวงจรจะแสดงให้เห็นว่ากระแสอินพุตเกิดจากผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว



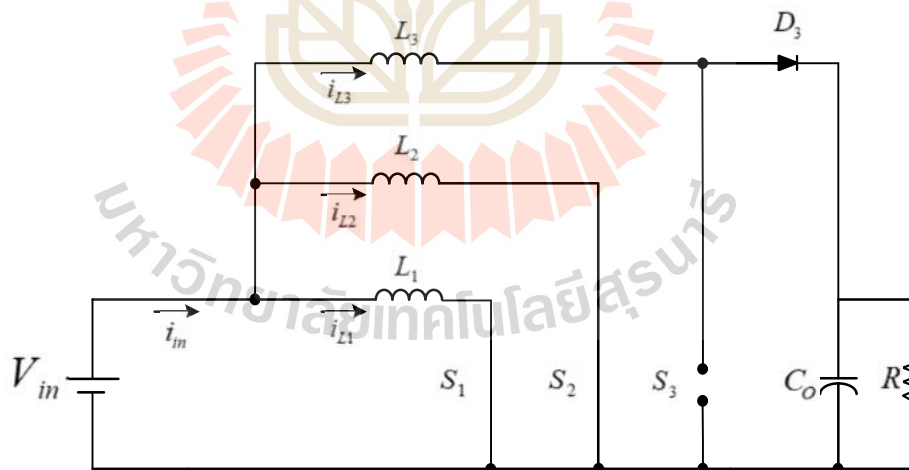
รูปที่ 3.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น

ในโหมดการทำงานแรก สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 นำกระแส ส่วนไดโอด D_1 , D_2 และ D_3 ไม่นำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 3.11 จะมีการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวเก็บประจุทำหน้าที่จ่ายกระแสไปยังโหลดแทนแหล่งจ่ายด้านอินพุต



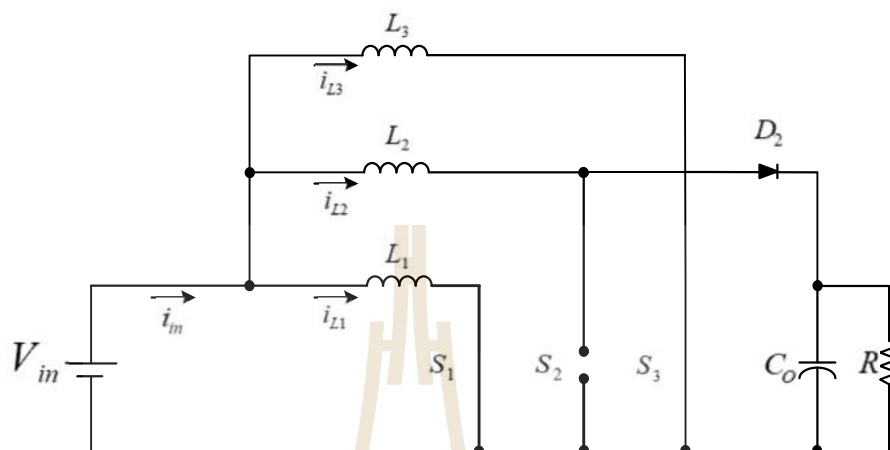
รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟฟิวสต์สามชั้น เมื่อ S_1 , S_2 และ S_3 นำกระแส และ D_1 , D_2 และ D_3 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานที่ 2 จะเห็นว่า S_1 และ S_2 นำกระแส ในขณะที่ S_3 ไม่นำกระแส แสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 จะเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 จะลดลง



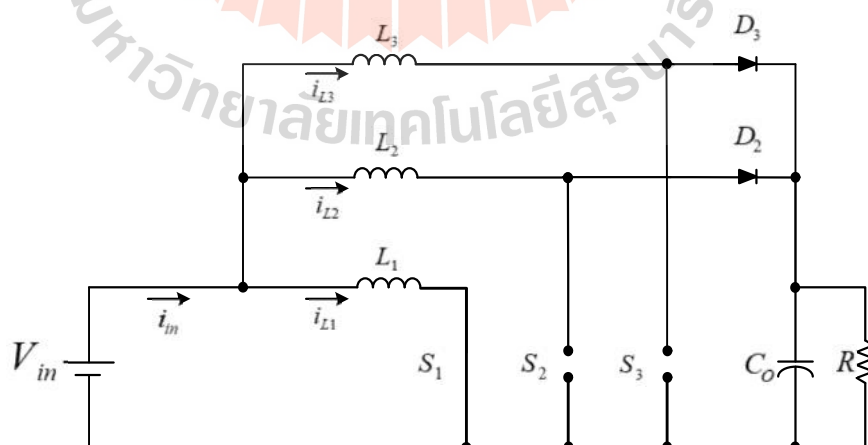
รูปที่ 3.12 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟฟิวสต์สามชั้น เมื่อ S_1 , S_2 นำกระแส และ S_3 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานที่ 3 จะเห็นว่า S_1 และ S_3 นำกระแส ในขณะที่ S_2 ไม่นำกระแส แสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_3 จะเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 จะลดลง



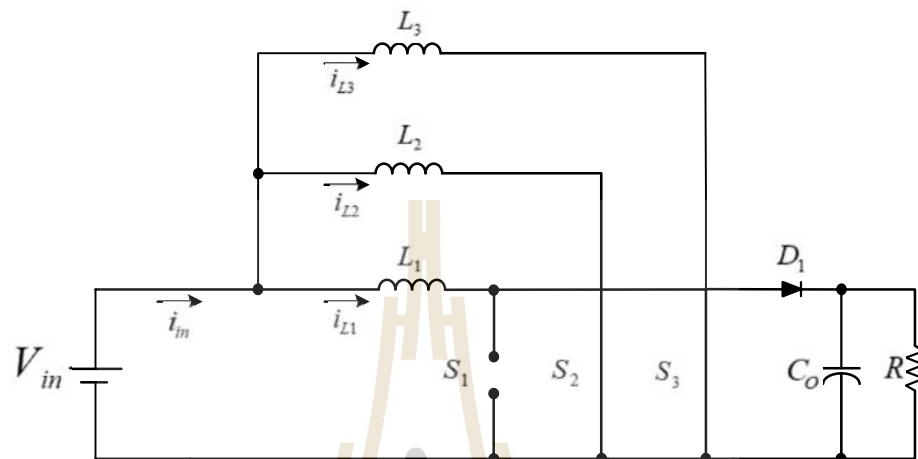
รูปที่ 3.13 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_1 , S_3 นำกระแส และ S_2 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานที่ 4 สวิตช์ S_1 จะนำกระแส ส่วนสวิตช์ S_2 และ S_3 จะไม่นำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 3.14 ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 จะคายพลังงาน ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลง ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะมีค่าเพิ่มขึ้น



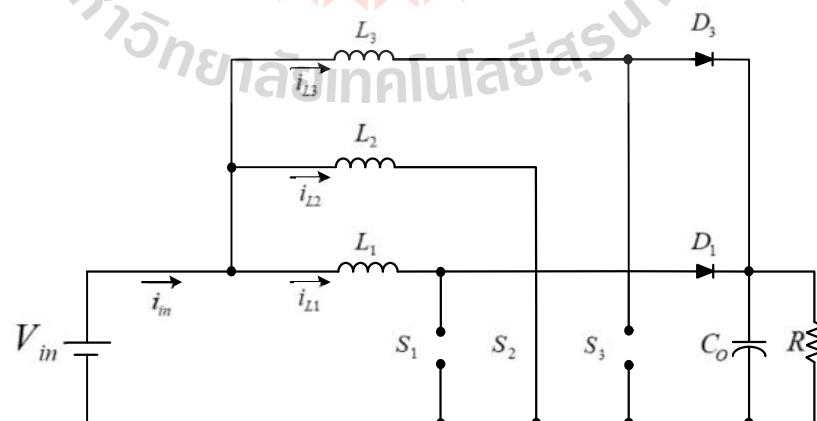
รูปที่ 3.14 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_1 นำกระแส และ S_2 , S_3 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานที่ 5 สวิตช์ S_1 จะไม่นำกระแส ส่วนสวิตช์ S_2 และ S_3 จะนำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 3.15 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะคายพลังงาน ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลง ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 จะมีค่าเพิ่มขึ้น



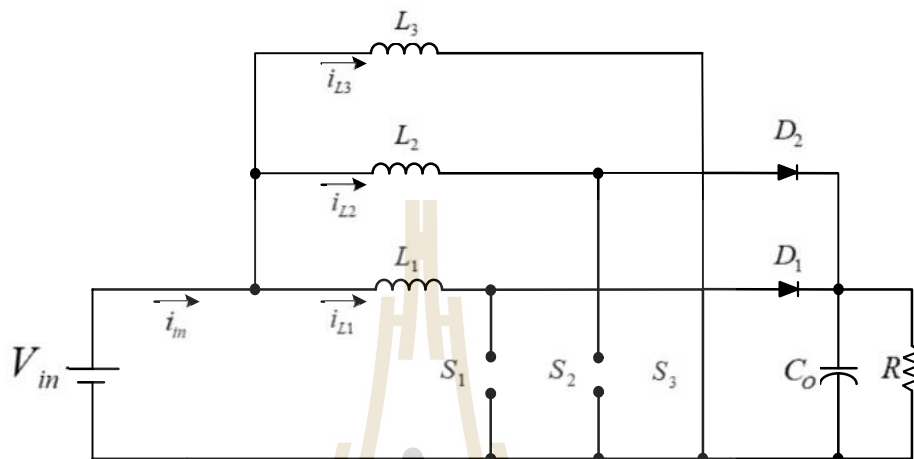
รูปที่ 3.15 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟลูตส์สามชั้น เมื่อ S_2, S_3 นำกระแส และ S_1 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานที่ 6 สวิตช์ S_2 จะนำกระแส ส่วนสวิตช์ S_1 และ S_3 จะไม่นำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 3.16 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_3 จะคายพลังงาน ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลง ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้น



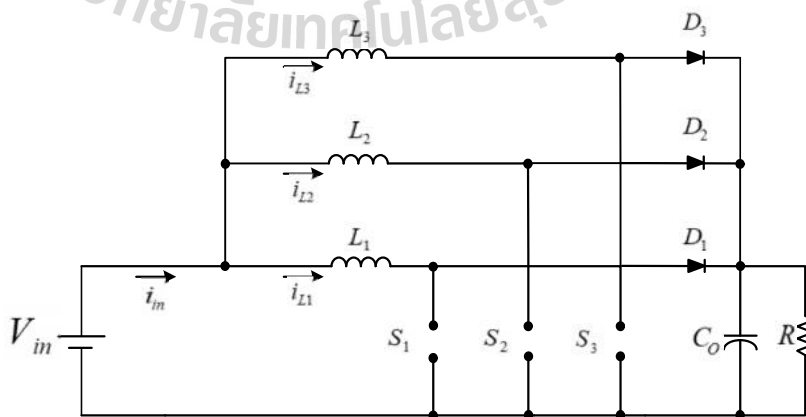
รูปที่ 3.16 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟลูตส์สามชั้น เมื่อ S_2 นำกระแส และ S_1, S_3 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานที่ 7 สวิตช์ S_3 จะนำกระแส ส่วนสวิตช์ S_1 และ S_2 จะไม่นำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 3.17 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 จะคายพลังงาน ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลง ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 จะมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.17 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เมื่อ S_3 นำกระแส และ S_1, S_2 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานสุดท้ายนี้สวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 จะไม่นำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 3.18 ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 และ L_3 จะคายพลังงาน ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 3 ตัวจะลดลง จำนวนโหมดการทำงานของวงจรอินเทอร์ลิฟบูสต์จะขึ้นอยู่กับจำนวนสวิตช์ที่นำมาต่อขนานเพิ่ม ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ 2^N เมื่อ N คือ จำนวนชั้นของวงจรอินเทอร์ลิฟบูสต์



รูปที่ 3.18 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อ S_1, S_2, S_3 ไม่นำกระแส

D

D

D

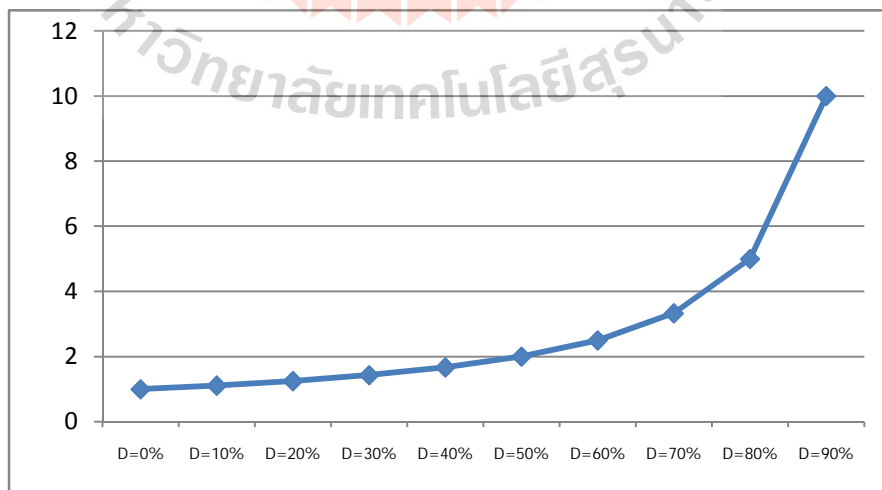
D

Duty cycle (%)

อัตราขยายแรงดัน

0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

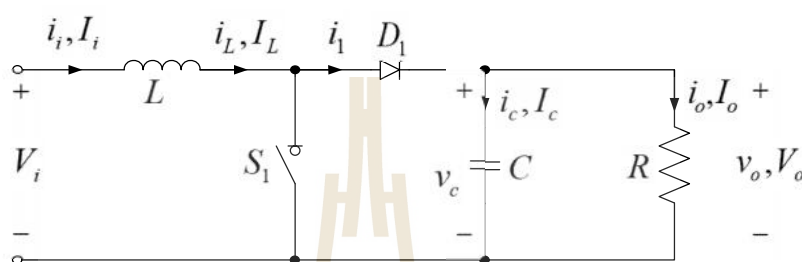
1
1.11
1.25
1.43
1.67
2
2.5
3.33
5
10
infinity



D

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้น

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร เราจะใช้การวิเคราะห์ห้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ ดังรูปที่ 3.20 ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) และตัวเก็บประจุ (C) เพื่อนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจร ซึ่งจะแสดงการออกแบบ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.20 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์ห้วงจรในที่นี้ กำหนดให้โหลดของวงจรเป็นตัวต้านทาน (R) จากการศึกษาวิเคราะห์ห้วงจรที่ได้กล่าวมาในสมการที่ (3-1) ที่ Switch On

$$t_{on} = \frac{\Delta I \cdot L}{V_i}$$

ในสมการที่ (3-2) ที่ Switch Off

$$t_{off} = \frac{L \cdot \Delta I}{V_o - V_i}$$

จาก $T = t_{on} + t_{off} = \frac{1}{f}$ จะได้

$$T = \frac{\Delta I \cdot L}{V_i} + \frac{\Delta I \cdot L}{V_o - V_i} \quad ; \quad \Delta I \text{ คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ}$$

$$= \frac{\Delta I \cdot L \cdot V_o - \Delta I \cdot L \cdot V_i + \Delta I \cdot V_i}{V_i V_o - 2V_i}$$

$$= \frac{\Delta I \cdot L \cdot V_o}{V_i (V_o - V_i)}$$

จะได้

$$\Delta I = \frac{V_i (V_o - V_i)}{f L V_o} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้สมการที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (L) ดังนี้

$$L = \frac{V_i (V_o - V_i)}{f V_o \Delta I} \quad (3.6)$$

แทนค่า

$$V_o = \frac{V_i}{1-D}$$

จะได้

$$L = \frac{D V_i}{f \Delta I} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) จะเห็นว่ากระแสกระเพื่อม (Ripple current, ΔI) นั้นมีการแปรผกผันกับขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) ดังนั้นในการออกแบบ ถ้าต้องการให้มีการกระเพื่อมของกระแส น้อย จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูง นั่นคือ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

ถ้าพิจารณาช่วงปิดสวิตช์ (S_1 on) สังเกตได้ว่า ตัวเก็บประจุจะจ่ายกระแสให้กับโหลด ดังนั้น

$$I_C - I_o$$

พิจารณา I_C ในช่วง $0-t_{on}$ เท่านั้น (S_1 on)

จาก
$$V_C = \frac{1}{C} \int i_C dt + v_C(t=1)$$

$$V_C - V_C(t=0) = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} I_o dt \quad ; \Delta V_C = V_C - V_C(t=0)$$

$$\therefore V_C = \frac{I_o}{C} \cdot t_{on} \quad (3.8)$$

จาก $V_o = \frac{V_i}{1-D}$

แทนค่า $D = \frac{t_{on}}{T} = t_{on}f$ จะได้

$$V_o = \frac{V_i}{1-t_{on}f}$$

$$V_o(1-t_{on}f) = V_i$$

$$V_o - t_{on}fV_o = V_i$$

$$V_o - V_i = t_{on}fV_o \text{ จะได้}$$

$$t_{on} = \frac{V_o - V_i}{V_o f} \quad (3.9)$$

แทนค่า (3.9) ในสมการที่ (3.8)

$$\therefore \Delta V_C = \frac{I_o(V_o - V_i)}{V_o f C} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) จะได้สมการที่ใช้ในการออกแบบตัวเก็บประจุ (C) ดังนี้

$$C = \frac{I_o(V_o - V_i)}{V_o f \Delta V_C} \quad (3.11)$$

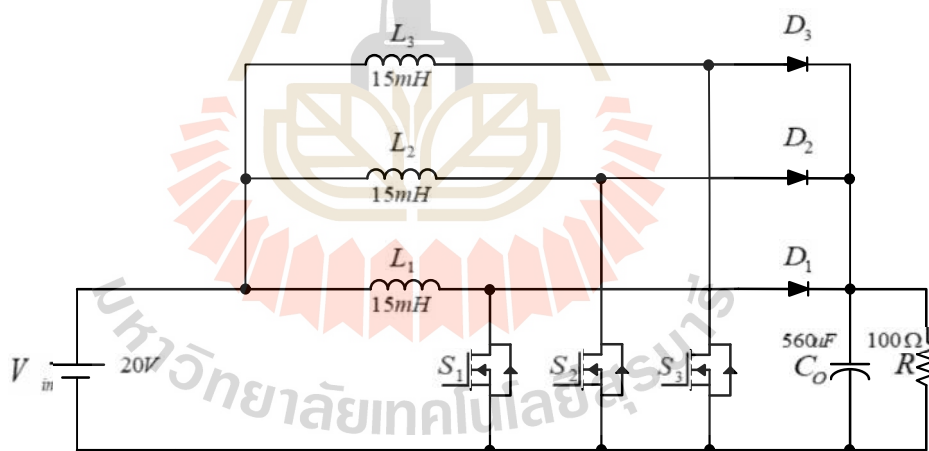
แทนค่า

$$V_o = \frac{V_i}{1-D}$$

จะได้

$$C = \frac{I_o D}{f \Delta V_C} \quad (3.12)$$

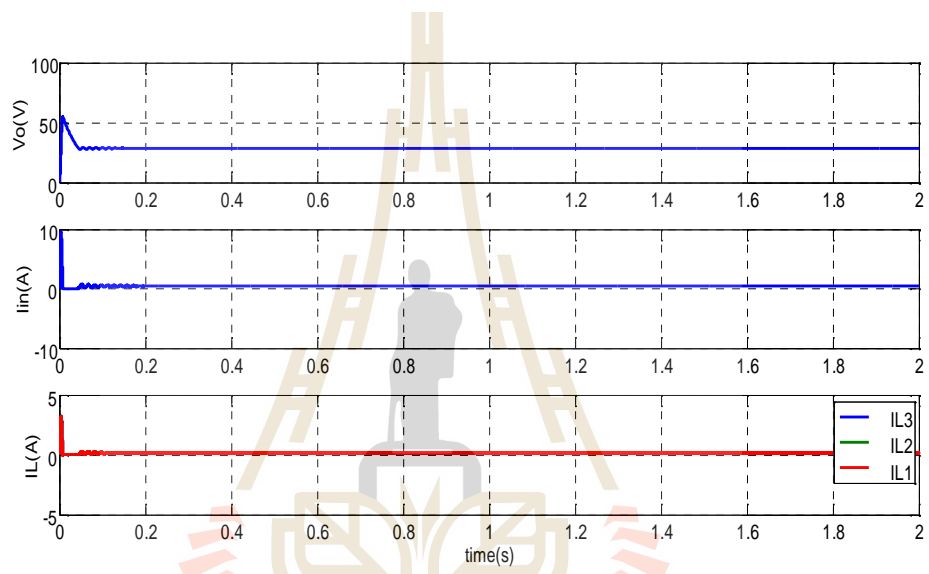
จากสมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.12) จะเห็นว่าแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage, ΔV_C) แปรผกผันกันกับขนาดของตัวเก็บประจุ (C) ดังนั้น ถ้าต้องการให้แรงดันเอาต์พุตมีการกระเพื่อมน้อย ($V_o = V_C$) จะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าเก็บประจุมากขึ้น นั่นคือ ขนาดของตัวเก็บประจุจะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่มีค่าความเหนี่ยวนำมาก และตัวเก็บประจุ (C) ที่มีค่าความเก็บประจุมาก จะมีขนาดใหญ่ และมีราคาสูงตามไปด้วย ซึ่งต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ และงบประมาณมาก ดังนั้นควรเลือกขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสม อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวอุปกรณ์จะต้องขึ้นอยู่กับภาระการกระเพื่อมของกระแสอินพุตและการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต โดยการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) จะกำหนดให้ค่ากระแสแฉกระเพื่อม (Ripple current, ΔI) มีค่าประมาณ 0.08A แรงดันอินพุต 20V ค่าวัฏจักรรอบการทำงาน 0.6 ความถี่ 10kHz โหลดตัวต้านทาน 100Ω เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.7) จะทำให้ได้ค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรคือ 15mH ส่วนการออกแบบค่าตัวเก็บประจุ (C) จะกำหนดให้ค่าแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage, ΔV_C) มีค่าประมาณ 0.05V เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.12) จะทำให้ได้ค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรคือ $560\mu\text{F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.21



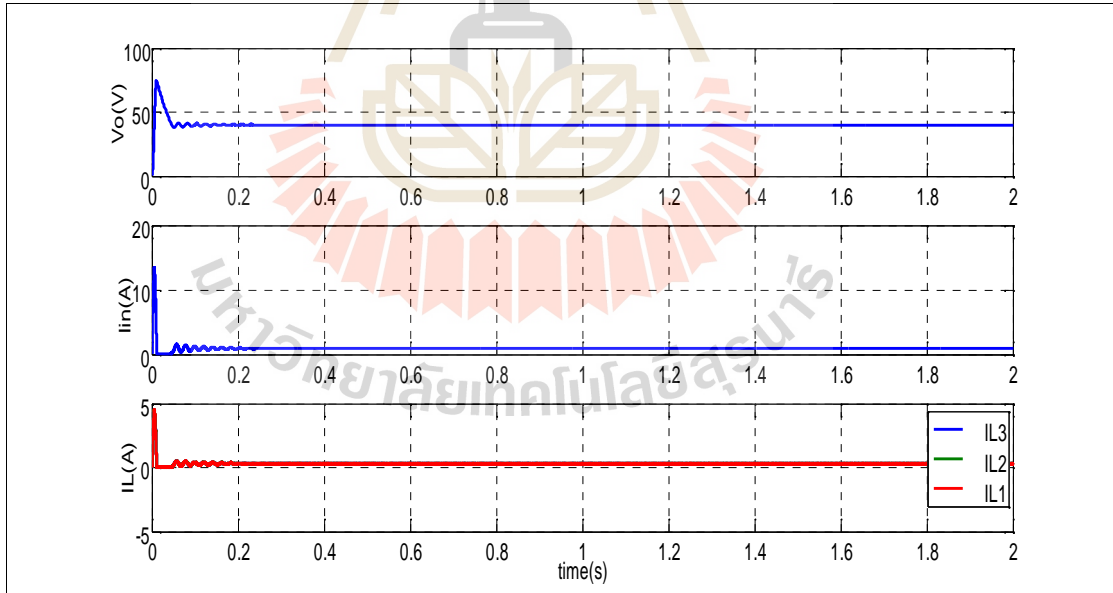
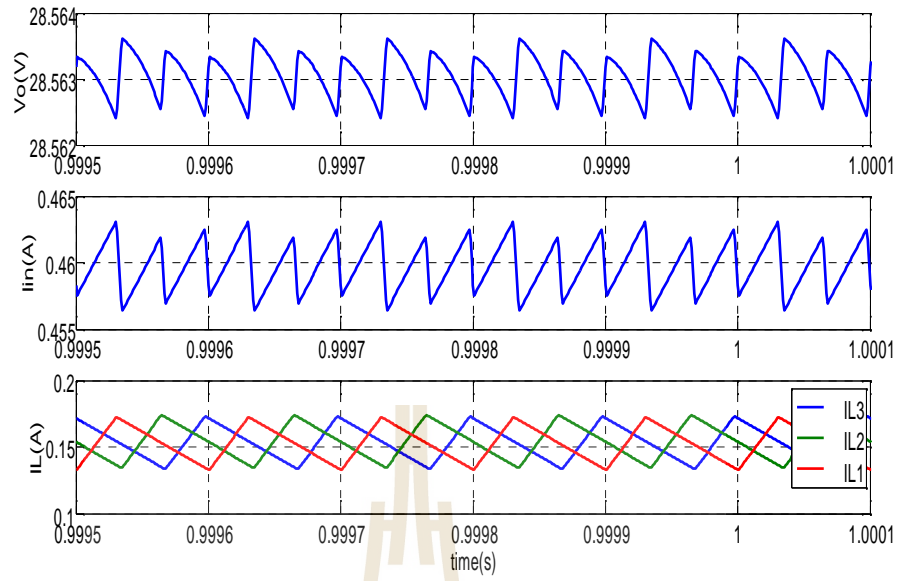
รูปที่ 3.21 ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น

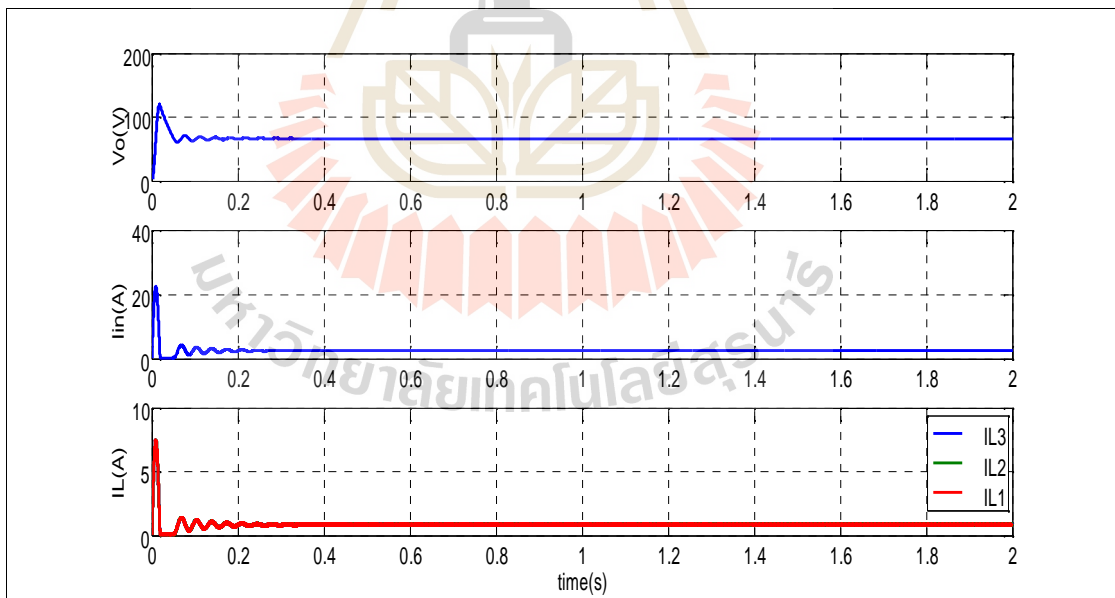
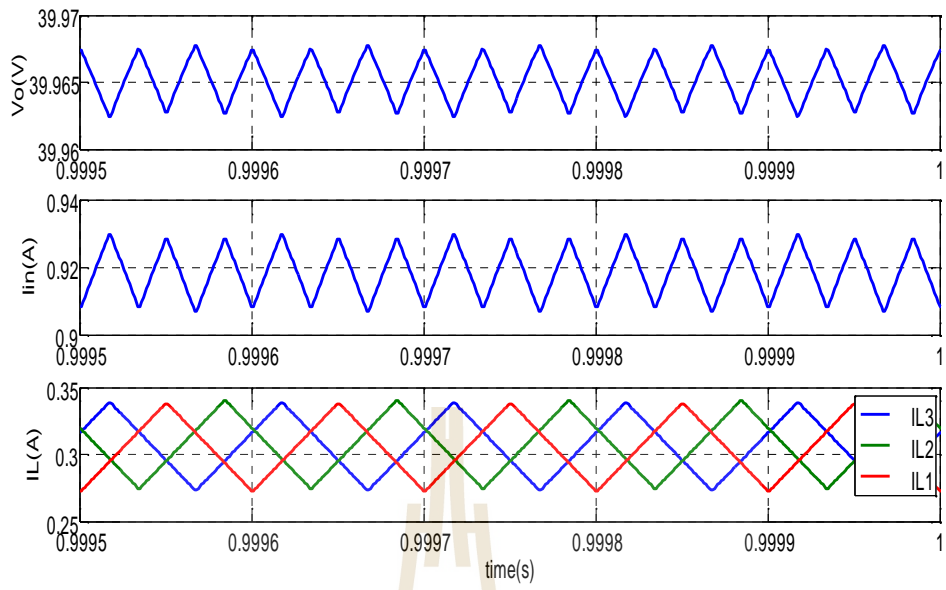
3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

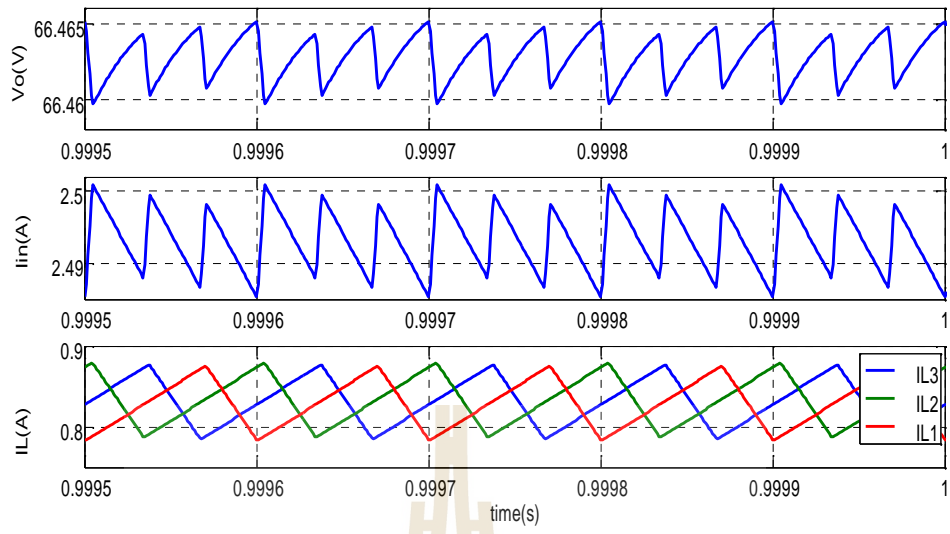
จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น จึงจำเป็นต้องทำการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบมา ว่ามีค่าเหมาะสมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น โดยกำหนดแรงดันอินพุตเป็น $20 V_{dc}$ และค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้แสดงไว้ในรูปที่ 3.21 ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผัน



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี







มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้น

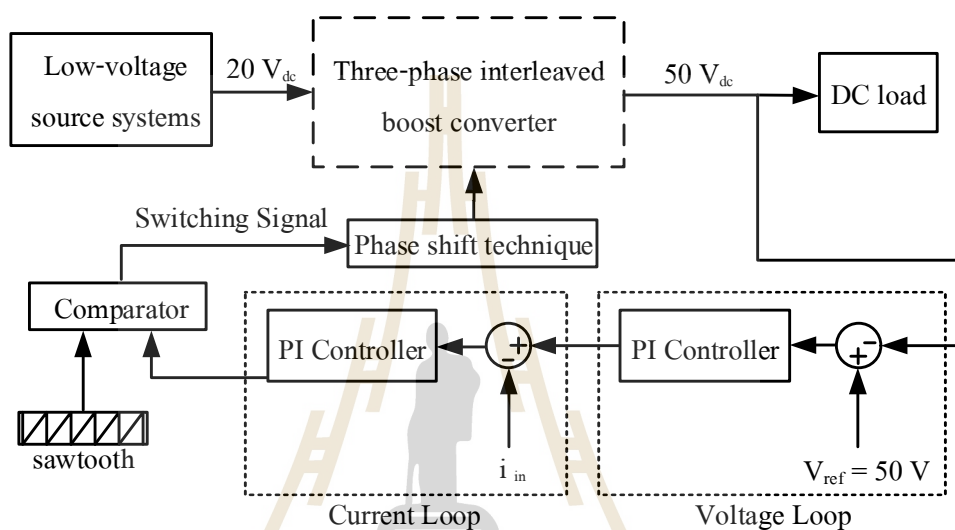
4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ได้กล่าวการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้น กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรย่อยจำเป็นต้องมีระดับกระแสเท่ากันทุกวงจรเพื่อให้เกิดการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อม ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 4 ได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ เข้าช่วยในการควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามที่ต้องการ โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย ควบคุมแรงดันเอาต์พุตหนึ่งรูป และรูปควบคุมกระแสอินพุตหนึ่งรูป เพื่อควบคุมการทำงานของวงจร และอาศัยเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ (Phase shift technique) เข้าช่วยปรับเฟสของสัญญาณพัลส์ให้เหมาะสมสำหรับรูปควบคุมสวิตช์แต่ละตัว เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้น สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรายละเอียดจะนำเสนอต่อไปนี้

4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้น

โครงสร้างการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ แรงดันอินพุตประมาณ $20 V_{dc}$ การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นนั้น จะสร้างตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปแรงดันและรูปกระแส เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมสำหรับเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (sawtooth) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสวิตช์กำลัง ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการเปรียบเทียบจะถูกส่งไปยังสวิตช์กำลังเพื่อสั่งให้สวิตช์กำลังทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) ที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้น จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไออย่างง่าย โดยอาศัยแนวทางการออกแบบที่ได้จากวิธีการออกแบบของวงจรทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน การ

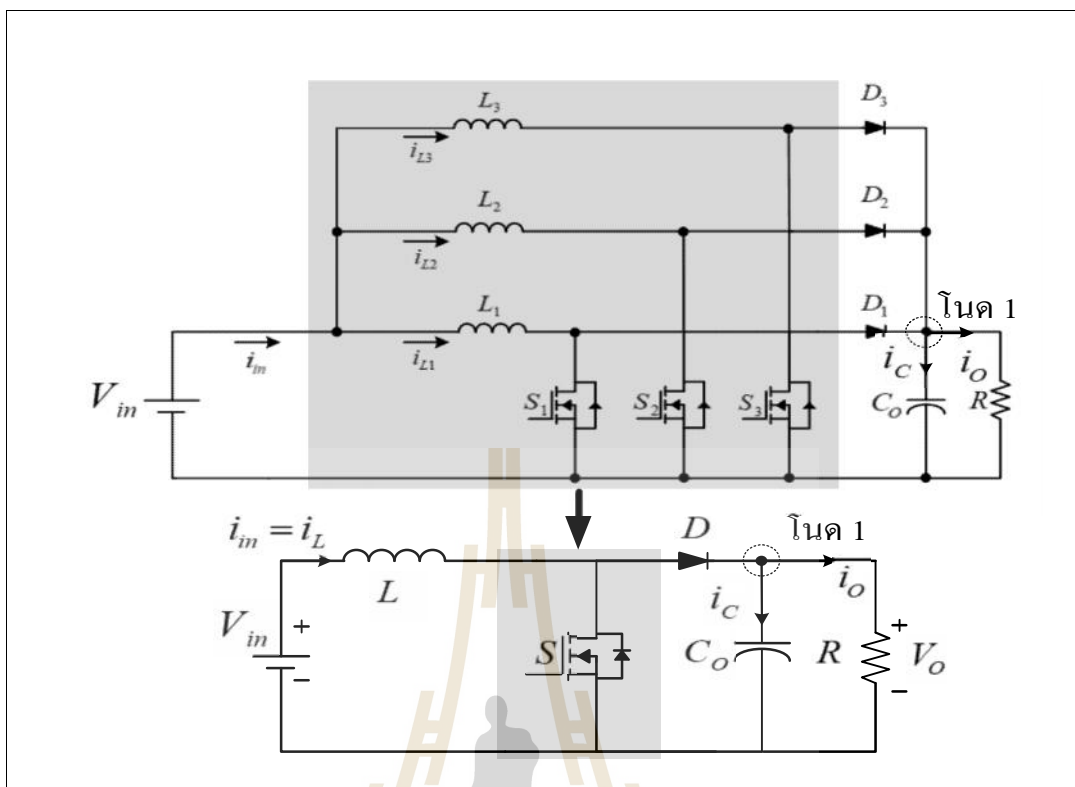
เปรียบเทียบการทำงาน วงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมกับการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟุสต์ แสดงในภาคผนวก ก. ดังนั้นหัวข้อนี้ จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอจากโครงสร้างของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูประดัน และการออกแบบตัวควบคุมลูประแส สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมชนิดพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบอินเทอร์ลีฟุสต์สามชั้น

4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูประดัน

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟุสต์สามชั้น ได้อาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประดันของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน ทั้งนี้จะทำการเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟุสต์สามชั้นกับวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม เพื่อพิจารณาเทียบเคียงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประดัน การเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟุสต์สามชั้นกับวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่เทียบเคียงวงจร
ทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมสำหรับออกแบบตัวควบคุมพีโอลูบแรงดัน

พิจารณาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเทียบเคียง
วงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) พิจารณาการทำงานของ
วงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$i_L(t) = i_C(t) + i_o(t)$$

$$C_o \frac{dv_o(t)}{dt} = (1 - d(t))i_L(t) - \frac{V_o(t)}{R} \quad (4.1)$$

จาก (4.1) พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่เป็นศูนย์

$$C_o \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{V_o(t)}{R} \quad (4.2)$$

จาก (4.2) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังนี้

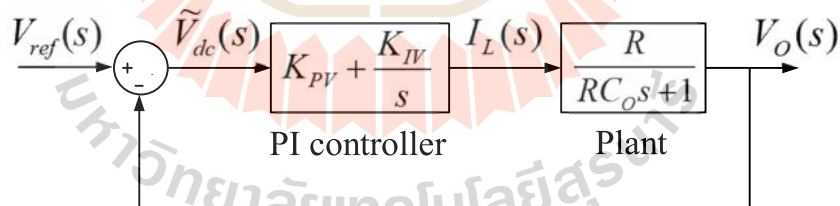
$$C_o s V_o(s) = I_L(s) - \frac{V_o(s)}{R} \quad (4.3)$$

ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น ในส่วนของการควบคุมแรงดัน (4.4) สังเกตว่าตัวเก็บประจุ C_o และโหลดตัวต้านทาน R เป็นพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญส่งผลต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจร

$$\frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{RC_o s + 1} \quad (4.4)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (4.5) จะได้แผนภาพการควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 4.3

$$G_{CV}(s) = K_{PV} + \frac{K_{IV}}{s} \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.3 แผนภาพการควบคุมลูปแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพที่แสดงดังรูปที่ (4.3) ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดัน

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s}\right)\left(\frac{R}{RC_o s + 1}\right)}{1 + \left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s}\right)\left(\frac{R}{RC_o s + 1}\right)} \quad (4.6)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_{PV}Rs + K_{IV}R}{s^2 + \left(\frac{K_{PV}R + 1}{RC_o}\right)s + \frac{K_{IV}R}{RC_o}} \quad (4.7)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PV} และ K_{IV} ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปแรงดัน จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (4.7) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน (4.8)

$$G(s) = \frac{\tilde{S}_n^2}{s^2 + 2'\tilde{S}_n s + \tilde{S}_n^2} \quad (4.8)$$

โดยค่าความถี่ธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ $\tilde{S}_n = \frac{1}{RC}$ rad/s และค่าอัตราหน่วง $' = 1$ เพื่อให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต (critically damped response) สำหรับการออกแบบให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤตเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีการพุ่งเกินเกิดขึ้น ซึ่งการพุ่งเกินของแรงดันอาจส่งผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเกิดความเสียหายได้ในกรณีนำไปทดสอบกับชุดทดสอบ ความสัมพันธ์ในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการควบคุมลูปแรงดันดังสมการ (4.9) และ (4.10)

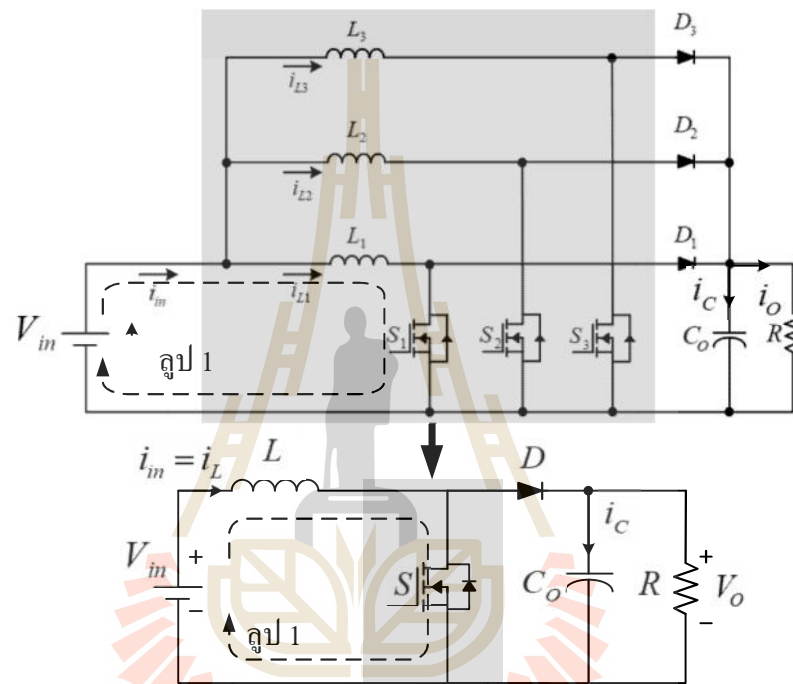
$$K_{PV} = 2'\tilde{S}_n C_o - \frac{1}{R} \quad (4.9)$$

$$K_{IV} = \tilde{S}_n^2 C_o \quad (4.10)$$

4.2.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปกระแส

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตีสี่พุ่มส์สามขั้น จะทำการออกแบบคล้ายกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดัน คือทำ

การเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นกับวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม เพื่อพิจารณาเทียบเคียงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญสำหรับการใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปกระแส ซึ่งการเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นกับวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่เทียบเคียงวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปกระแส

พิจารณา โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเทียบเคียงวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) พิจารณาการทำงานของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{in}(t) = (1-d(t))V_o(t) + V_L(t)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{in}(t) - (1-d(t))V_o(t) \quad (4.11)$$

พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่เป็นศูนย์ จะได้ (4.12)

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{in}(t) - V_o(t) \quad (4.12)$$

จาก (4.12) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังนี้

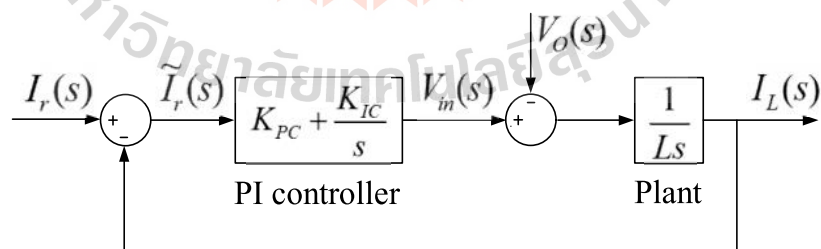
$$LsI_L(s) = V_{in}(s) - V_o(s) \quad (4.13)$$

จาก (4.13) ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟิวสต์สามขั้น ในส่วนของการควบคุมกระแส (4.14)

$$\frac{I_L(s)}{V_{in}(s) - V_o(s)} = \frac{1}{Ls} \quad (4.14)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (4.15) จะได้แผนภาพการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 4.5

$$G_{CC}(s) = K_{PC} + \frac{K_{IC}}{s} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพการควบคุมลูกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพที่แสดงดังรูปที่ (4.5) ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอในลูกระแส

$$\frac{I_L(s)}{I_r(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PC}s + K_{IC}}{s}\right)(V_{in})\left(\frac{1}{Ls}\right)}{1 + \left(\frac{K_{PC}s + K_{IC}}{s}\right)(V_{in})\left(\frac{1}{Ls}\right)} \quad (4.16)$$

$$\frac{I_L(s)}{I_r(s)} = \frac{K_{PC}V_{in}s + K_{IC}V_{in}}{s^2 + K_{PC}\left(\frac{V_{in}}{L}\right)s + K_{IC}\left(\frac{V_{in}}{L}\right)} \quad (4.17)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูประแส จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกับลูประแสดัน โคนจะเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (4.17) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน (4.18)

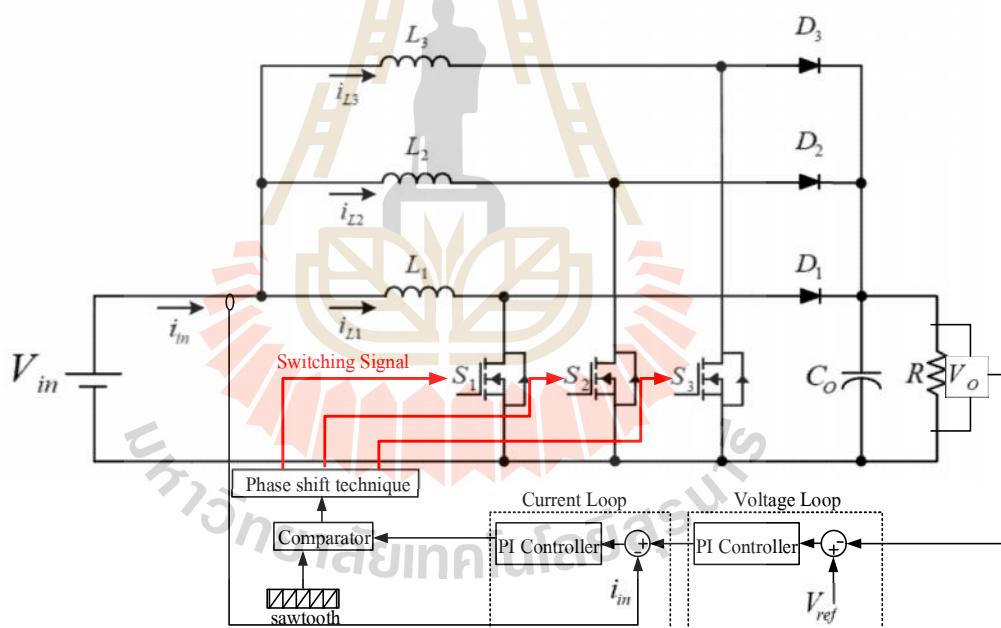
$$G(s) = \frac{\zeta_n^2}{s^2 + 2'\zeta_n s + \zeta_n^2} \quad (4.18)$$

ค่าความถี่ธรรมชาติของลูประแส โดยปกติลูประแสดจะมีความเร็วมากกว่าลูประแสดันประมาณ 4 เท่า เพื่อให้ลูประแสได้คำนวณค่าผลตอบสนองของระบบในสภาวะคงตัวก่อนจะเข้าลูประแสดใหม่ ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของลูประแส มีค่าเท่ากับ $\omega_{ni} = N\omega_n$ rad/s โดยค่า N คือจำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติที่ลูประแสทำงานต่างจากลูประแสดัน จากนั้นทำการเลือกค่า N ที่เหมาะสม โดยการเลือกค่า N จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองของระบบ ดังนั้นจะเลือกใช้ N เท่ากับ 200 ซึ่งที่ค่า N ดังกล่าวค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองของระบบจะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ส่วนค่าอัตราหน่วงเลือกใช้ $\zeta = 1$ ทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต (critically damped response) เช่นเดียวกับลูประแสดันเพื่อไม่ให้ผลตอบสนองของระบบมีการพุ่งเกินเกิดขึ้น ซึ่งการพุ่งเกินของลูประแสอาจส่งผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเช่นกัน ความสัมพันธ์ในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการควบคุมลูประแสดังสมการ (4.19) และ (4.20)

$$K_{PC} = \frac{2'\zeta_n L}{V_{in}} \quad (4.19)$$

$$K_{IC} = \frac{\check{S}_{ni}^2 L}{V_{in}} \tag{4.20}$$

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งรูปแรงดัน และรูปกระแสของวงจรทบทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สามารถนำตัวควบคุมพีไอที่ทำการออกแบบมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น โดยโครงสร้างภาพรวมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ คือ ตัวเหนี่ยวนำ L ตัวเก็บประจุ C_o และ โหลดตัวต้านทาน R เช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรทบทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์การควบคุมชนิดพีไอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น

ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในคำนวณเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{in}	แรงดันอินพุต	20 V
L_1, L_2, L_3	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
C_O	ตัวเก็บประจุ	560 μ F
R	โหลดตัวต้านทาน	100
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	10 kHz

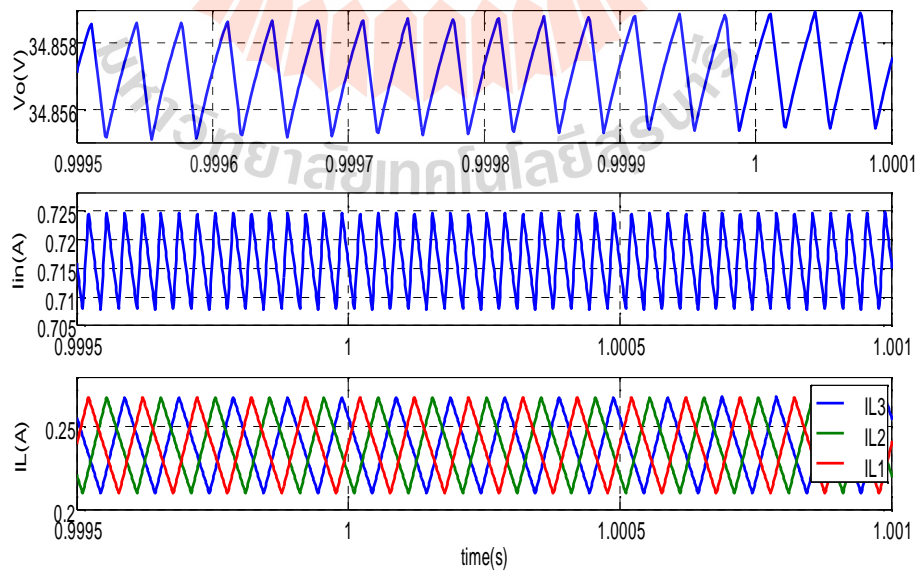
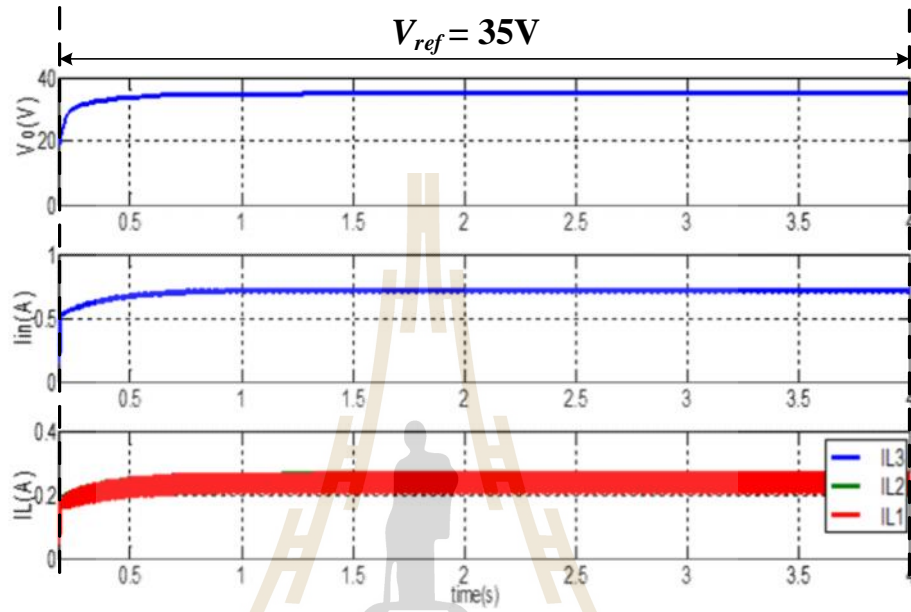
หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สำหรับคำนวณเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอแล้ว ทำการคำนวณเพื่อหาค่าตัวควบคุมพีไอทั้งลูประแรงดัน และลูประกระแส โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งลูประแรงดัน และลูประกระแส แสดงดังตารางที่ 4.2 จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองของระบบ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

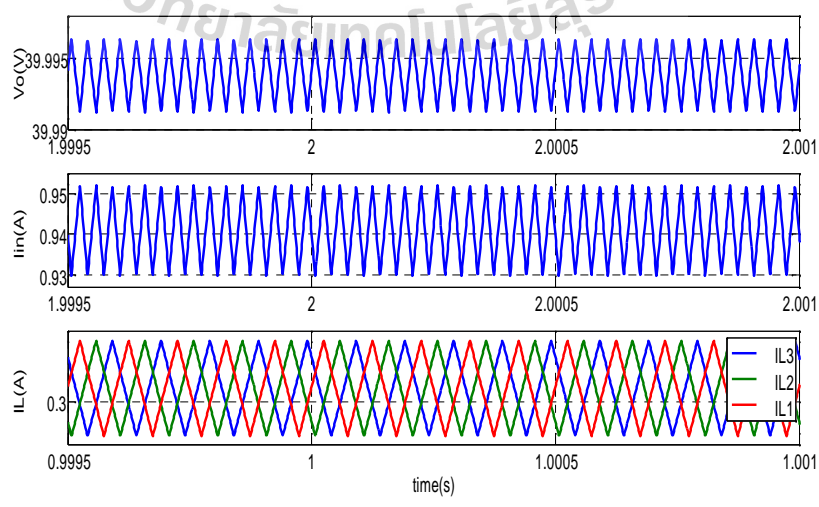
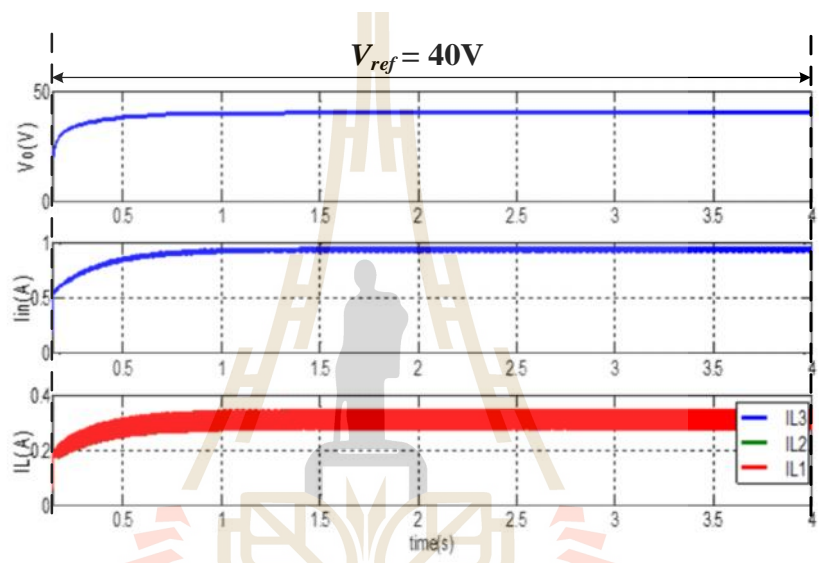
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น

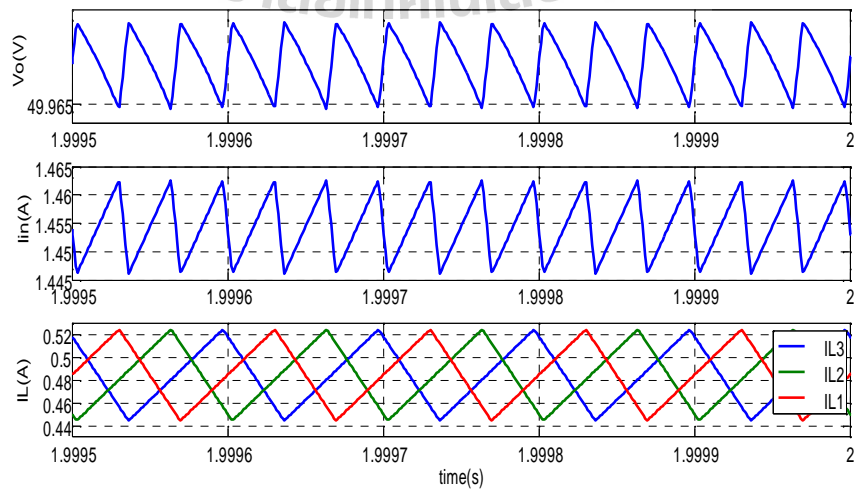
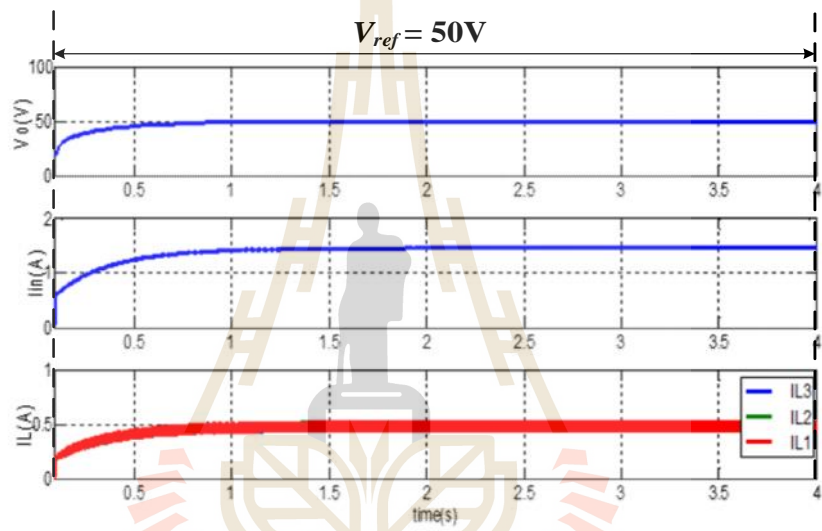
สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
ω_n	17.857
K_{PV}	3.999e-3
K_{IV}	0.018756
ω_m	3571.4
K_{PC}	3.75
K_{IC}	9556.173

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เพื่อพิจารณาสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อใช้ร่วมกับตัวควบคุมพีไอ โดยให้แรงดันอินพุตเป็น 20 V_{dc} และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 35 V_{dc} 40 V_{dc} และ 50 V_{dc} ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบมานั้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้หรือไม่ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลง

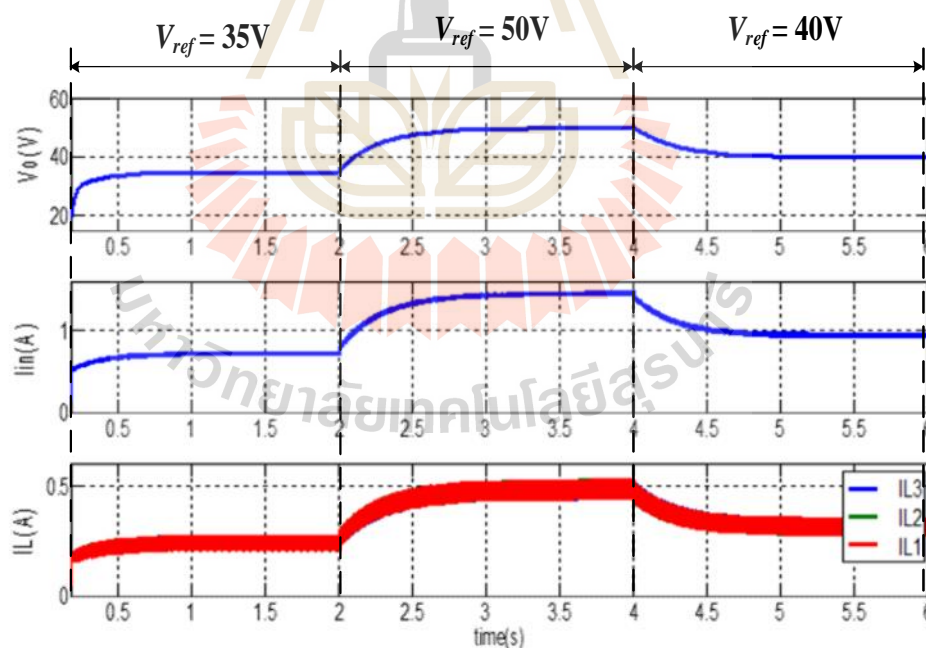




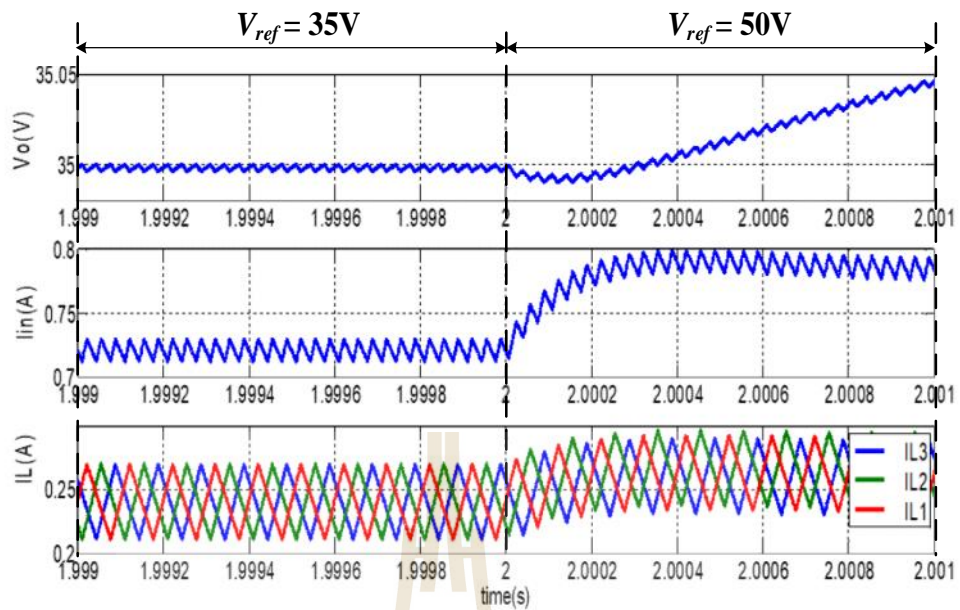


รูปที่ 4.12 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สาม
 ชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 50 \text{ V}_{dc}$

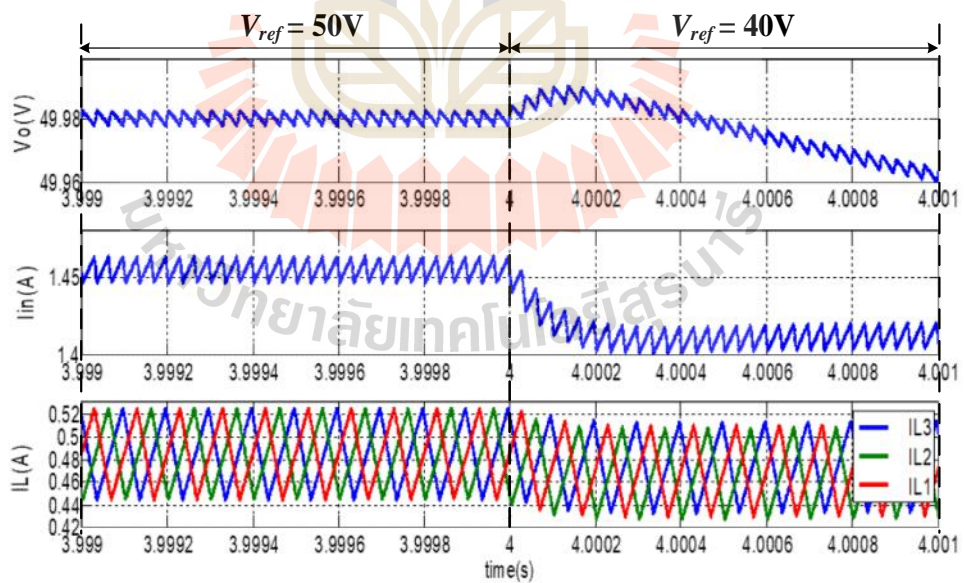
จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สาม
 ชั้นที่ทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 50 \text{ V}_{dc}$ นั้นสามารถควบคุมแรงดันได้ตามต้องการ โดย
 ได้แรงดันเอาต์พุต ประมาณ 49.98 V_{dc} กระแสอินพุตค่อยๆเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่
 ประมาณ 1.45 A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันที่ประมาณ 0.48 A และมี
 การเลื่อนเฟสกัน 120 องศา ทำให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีการ
 หักล้างกันเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$ และ 40 V_{dc} แต่ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหล
 ผ่านตัวเหนี่ยวนำมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากการสะสมพลังงานและคายพลังงานตามค่าวัฏ
 จักรรอบการทำงานของตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลง
 ผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$, 50 V_{dc}
 และ 40 V_{dc} ตามลำดับดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัว
 ควบคุมพีไอที่ $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$, 50 V_{dc} และ 40 V_{dc}

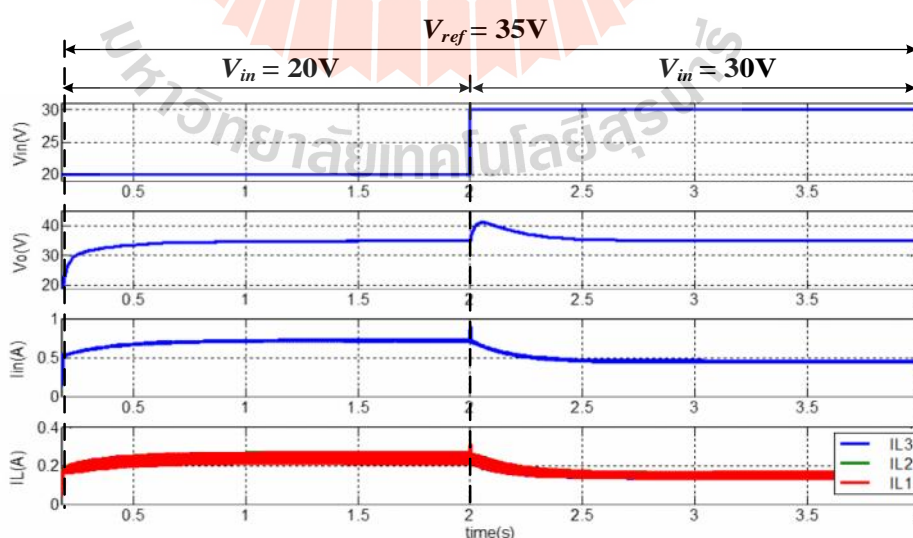


รูปที่ 4.14 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟฟุสต์สาม
 ชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอในช่วงการเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$ เป็น 50 V_{dc}

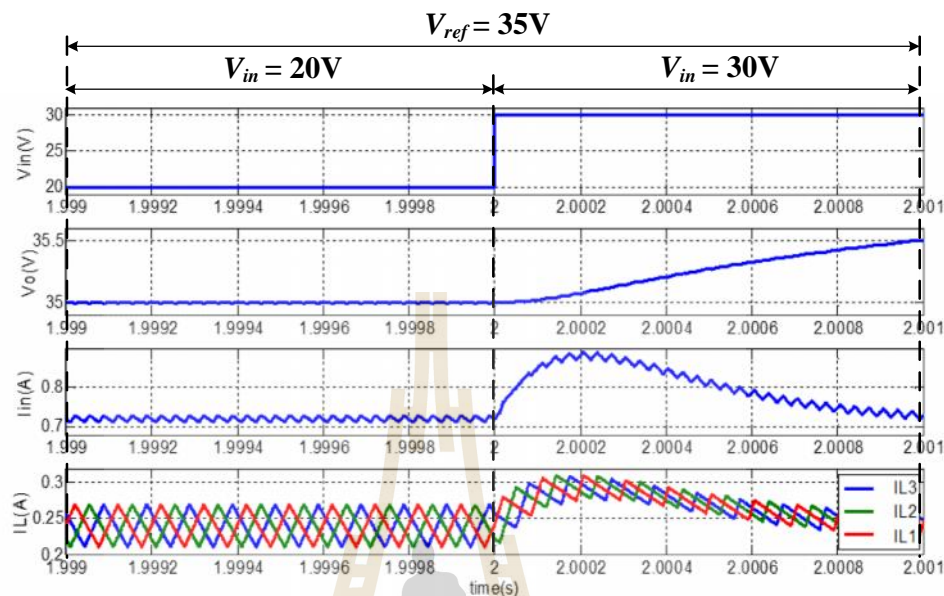


รูปที่ 4.15 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟฟุสต์สาม
 ชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอในช่วงการเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 50 \text{ V}_{dc}$ เป็น 40 V_{dc}

จากรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่ทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไออนั้นที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$, $50 V_{dc}$, $40 V_{dc}$ ตามลำดับนั้น สามารถควบคุมแรงดันได้ตามต้องการ โดยช่วงเวลาที่ 0 ถึง 2 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $35 V_{dc}$ กระแสอินพุตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $0.7 A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.23 A$ ช่วงเวลาที่ 2 ถึง 4 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $50 V_{dc}$ กระแสอินพุตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $1.5 A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.5 A$ และในช่วงเวลาที่ 4 ถึง 6 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $40 V_{dc}$ กระแสอินพุตมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $0.9 A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.3 A$ ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวจะเป็นไปตามการสะสมพลังงานและคายพลังงานของตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวนี้ $V_{ref} = 35 V_{dc}$, $40 V_{dc}$, และ $50 V_{dc}$ ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ต่อไปเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นในกรณีที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงที่ดันอินพุตจาก $20 V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 35 V_{dc}$, $40 V_{dc}$, และ $50 V_{dc}$ ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังต่อไปนี้

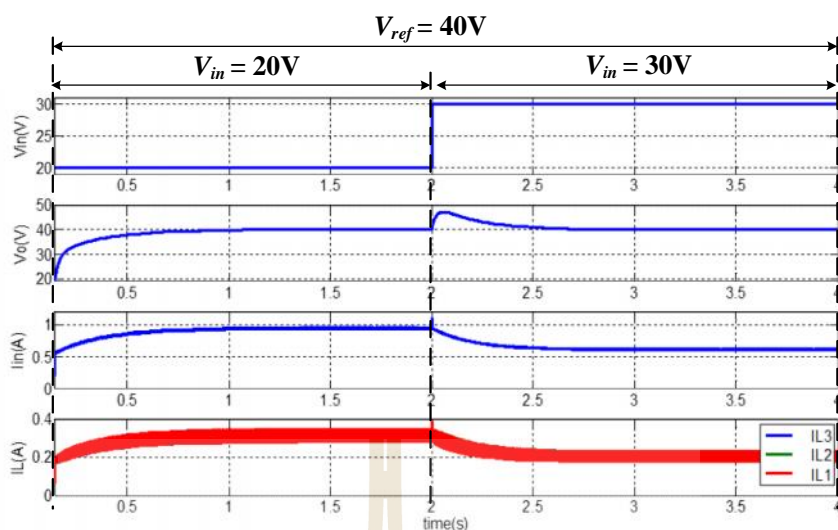


รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 \text{ V}_{dc}$ เป็น 30 V_{dc} ที่ $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$

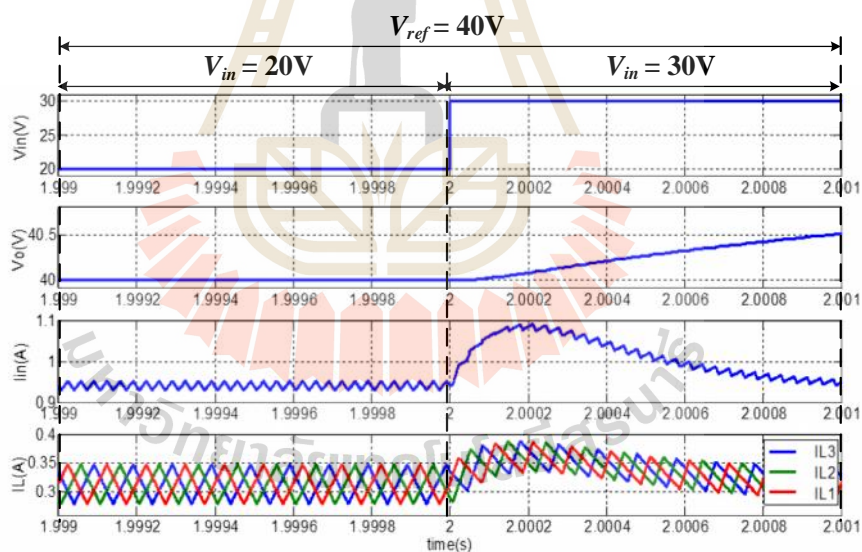


รูปที่ 4.17 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 \text{ V}_{dc}$ เป็น 30 V_{dc} ที่ $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$

จากรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.17 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 \text{ V}_{dc}$ เป็น 30 V_{dc} ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ 35 V_{dc} กระแสอินพุตมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ 0.5 A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.17 A ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอัตราขยายของวงจร ทำให้เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าวัฏจักรรอบการทำงานเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย



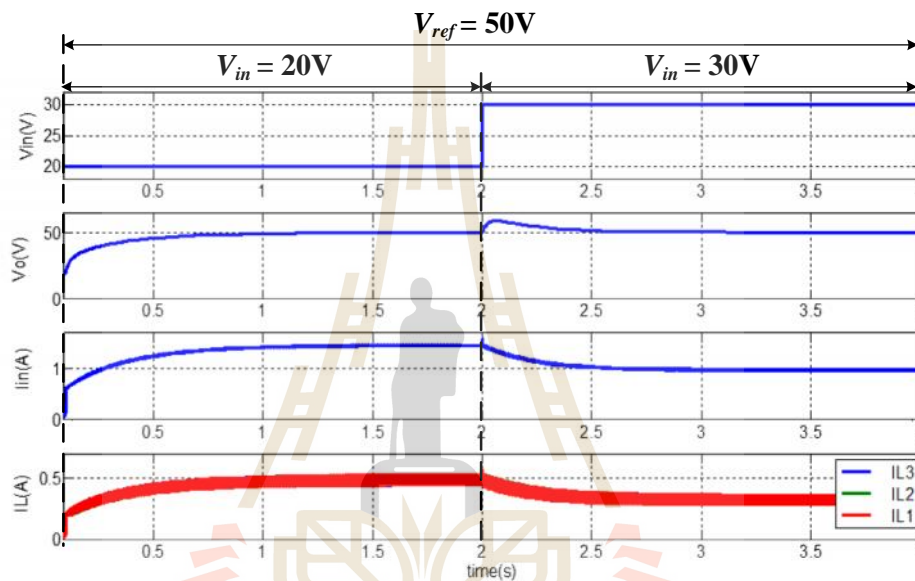
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตี่ฟลูตต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20$ V_{dc} เป็น 30 V_{dc} ที่ $V_{ref} = 40$ V_{dc}



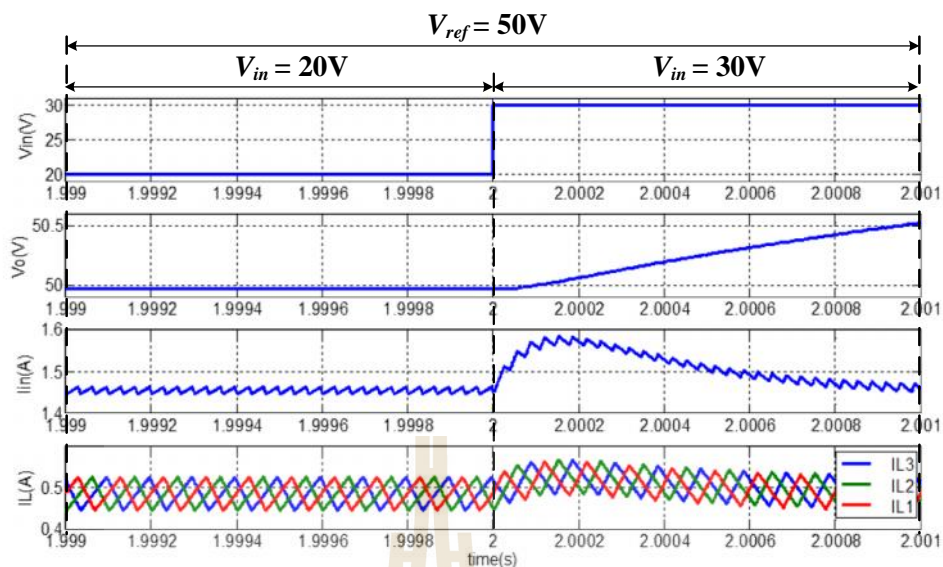
รูปที่ 4.19 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตี่ฟลูตต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20$ V_{dc} เป็น 30 V_{dc} ที่ $V_{ref} = 40$ V_{dc}

จากรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.19 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตี่ฟลูตต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20$ V_{dc} เป็น 30 V_{dc} ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 40$ V_{dc} จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันเอาต์พุตจะมี

แวนโวลต์เพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ 40 V_{dc} กระแสอินพุตมีแวนโวลต์ลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ 0.6 A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแวนโวลต์ลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.2 A ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอัตราขยายของวงจร ทำให้เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าวัฏจักรรอบการทำงานเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นเดียวกับกรณี $V_{\text{ref}} = 40 \text{ V}_{\text{dc}}$ ที่ได้กล่าวมา

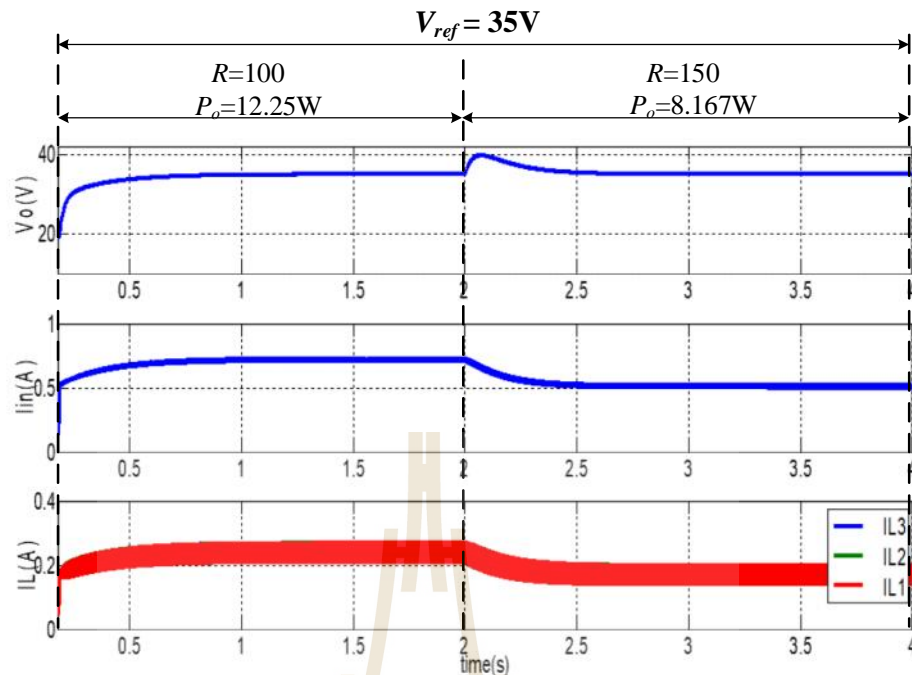


รูปที่ 4.20 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 \text{ V}_{\text{dc}}$ เป็น 30 V_{dc} ที่ $V_{ref} = 50 \text{ V}_{\text{dc}}$

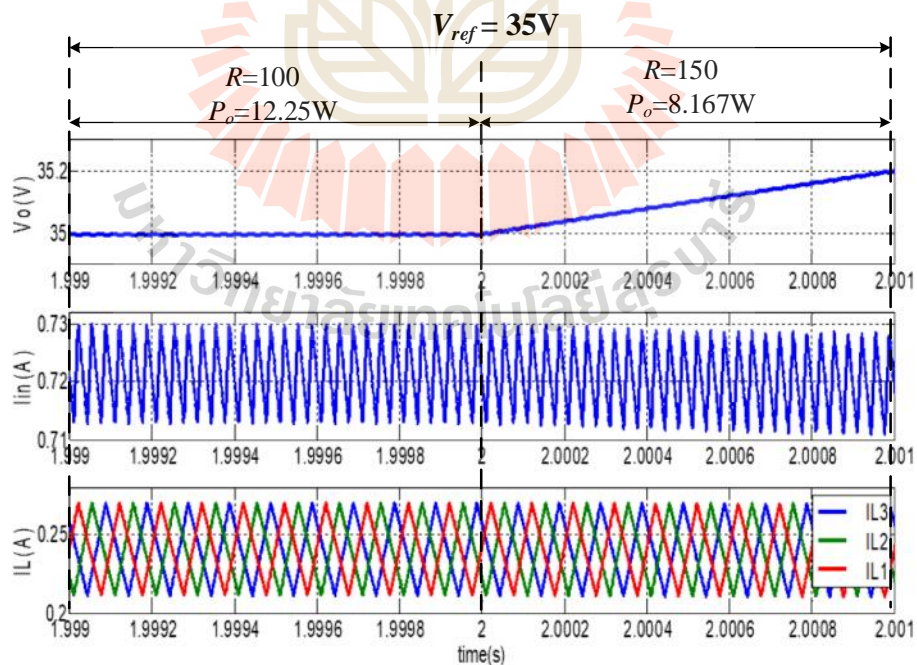


รูปที่ 4.21 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สาม
 ชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 \text{ V}_{dc}$ เป็น 30 V_{dc} ที่ $V_{ref} = 50 \text{ V}_{dc}$

จากรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.21 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง $V_{in} = 20 \text{ V}_{dc}$ เป็น 30 V_{dc} ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 50 \text{ V}_{dc}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ 50 V_{dc} กระแสอินพุตมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ 1 A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.33 A ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอัตราขยายของวงจร ทำให้เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าวัฏจักรรอบการทำงานเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$ และ 40 V_{dc} ที่ได้กล่าวมา ต่อไปเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามชั้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 35 \text{ V}_{dc}$, 40 V_{dc} , และ 50 V_{dc} ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังต่อไปนี้

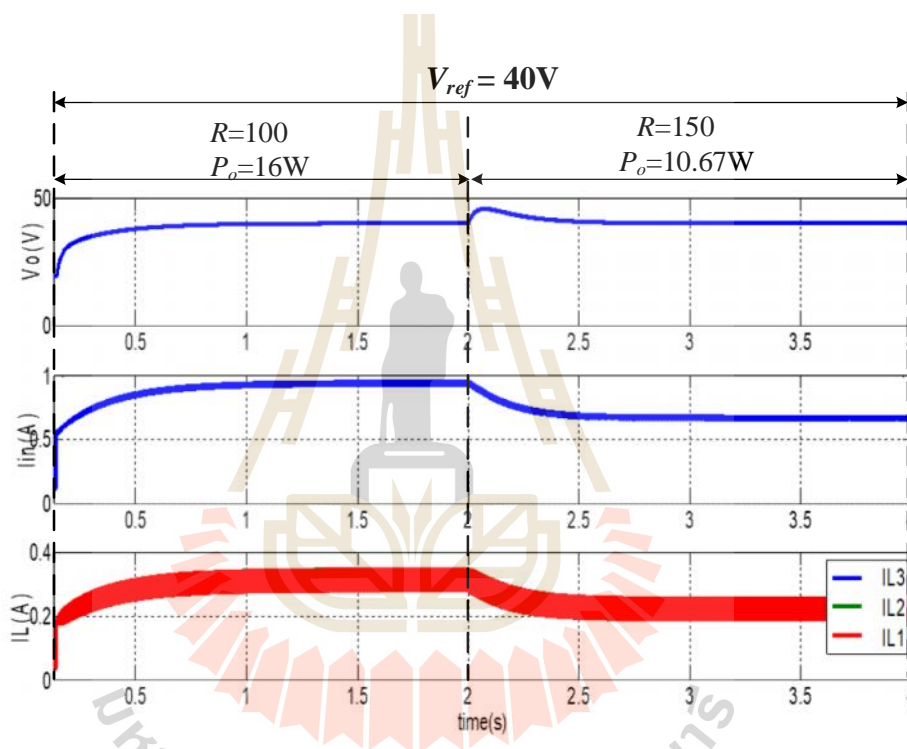


รูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$

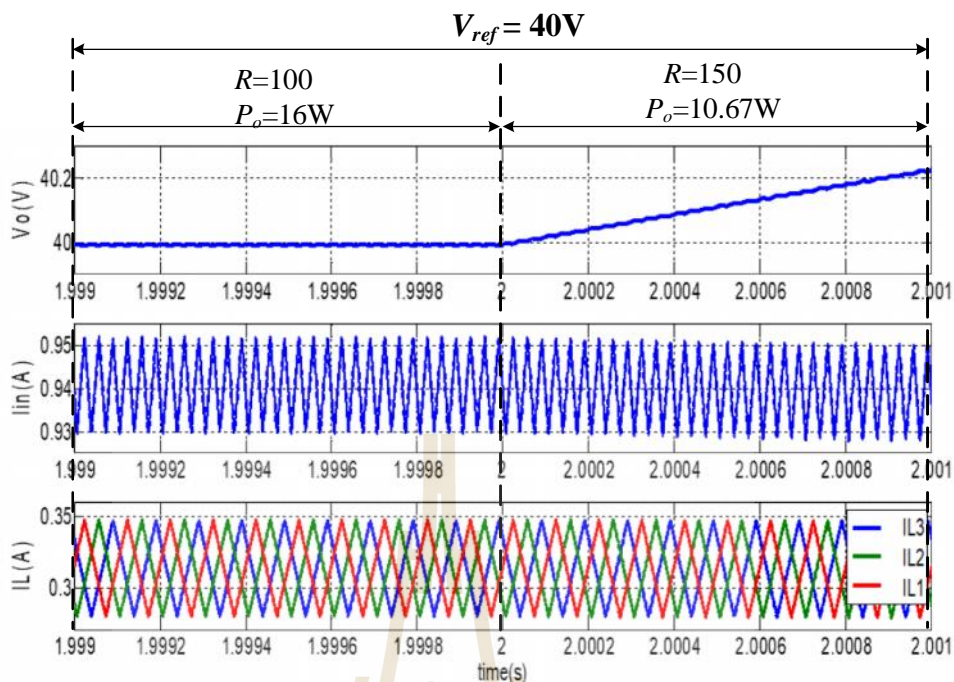


รูปที่ 4.23 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$

จากรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.23 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตสามขั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 35 V_{dc}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $35 V_{dc}$ กระแสอินพุตมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.5 A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.17 A$ ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลดไม่มีผลกับอัตราขยายของวงจร

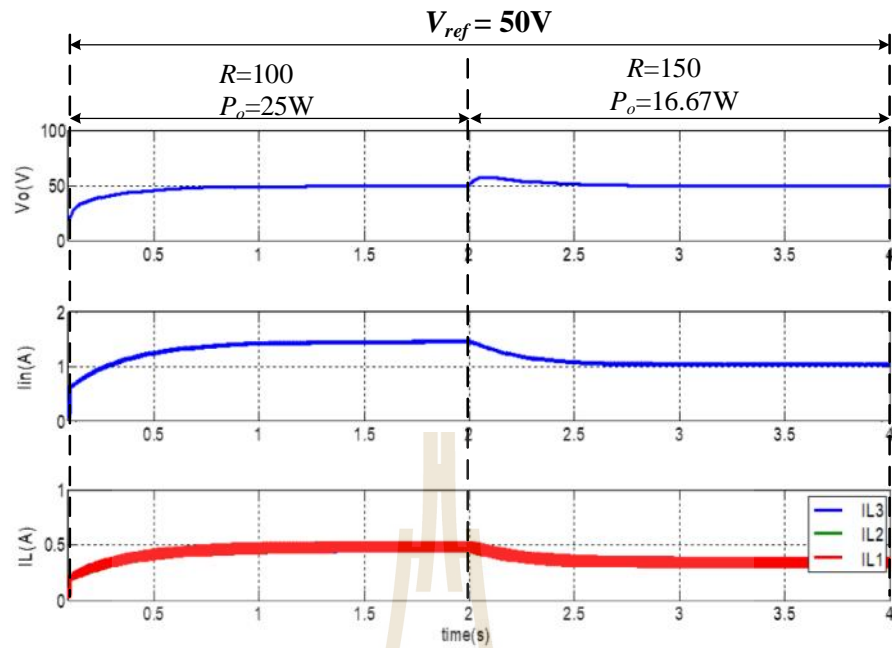


รูปที่ 4.24 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตสามขั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 40 V_{dc}$

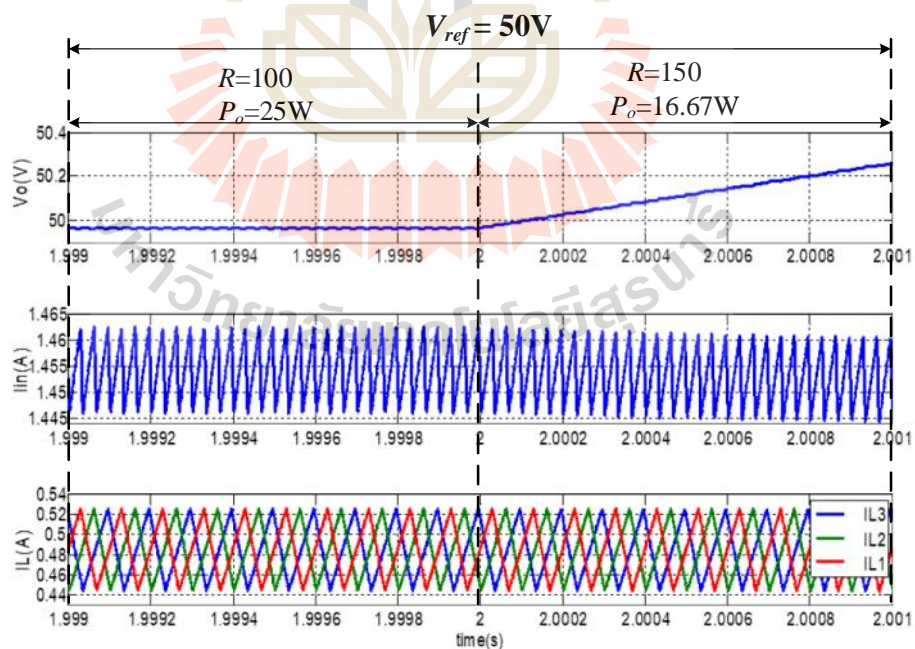


รูปที่ 4.25 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตีสี่เฟสสาม
 ชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 40 V_{dc}$

จากรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.25 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอิน
 เทอร์ตีสี่เฟสสามชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 2
 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 40 V_{dc}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้ม
 เพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $40 V_{dc}$ กระแสอินพุตมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่
 ตัว ที่ประมาณ $0.7 A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มลดลง
 แล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.23 A$ ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
 ทั้งสามตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง โหลดไม่มีผลกับอัตราขยายของวงจร
 เช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35 V_{dc}$



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตี่ฟลูตต์สามชั้นเมื่อมีตัว
ควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$



รูปที่ 4.27 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตี่ฟลูตต์สาม
ชั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ เปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่ $V_{ref} = 50 V_{dc}$

จากรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.27 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามขั้นเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 50 V_{dc}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ $50 V_{dc}$ กระแสอินพุตมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ที่ประมาณ 1 A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันและมีแนวโน้มลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.33 A ลักษณะการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง โหลดไม่มีผลกับอัตราขยายของวงจร เช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35 V_{dc}$ และกรณี $V_{ref} = 40 V_{dc}$

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามขั้น ซึ่งได้อาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน เพื่อตรวจสอบถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามขั้นเมื่อใช้งานร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ทำการออกแบบ ใช้การจำลองสถานการณ์ในสภาวะต่าง ๆ เช่น กรณีแรงดันอ้างอิงคงที่ที่ $V_{ref} = 35 V_{dc}$, $40 V_{dc}$ และ $50 V_{dc}$ ตามลำดับ กรณีมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงแบบทันทีทันใดที่เวลา 2 วินาที และ 4 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 35 V_{dc}$, $50 V_{dc}$ และ $40 V_{dc}$ ตามลำดับ กรณีมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต $V_{in} = 20 V_{dc}$ เป็น $30 V_{dc}$ ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 35 V_{dc}$, $40 V_{dc}$ และ $50 V_{dc}$ ตามลำดับ และสุดท้ายกรณีมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 2 วินาที โดยให้ $V_{ref} = 35 V_{dc}$, $40 V_{dc}$ และ $50 V_{dc}$ ตามลำดับ และจากผลการจำลองสถานการณ์ต่างๆที่ได้กล่าวมานั้น พบว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบมานั้น ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์สามขั้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ

บทที่ 5

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

5.1 บทนำ

จากบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้นำเสนอการวิเคราะห์หลักการทำงาน และการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น ในสถานะต่าง ๆ เพื่อยืนยันสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่สามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้เช่นเดียวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม นอกจากนี้ยังสามารถลดทอนการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจากกระบวนการหักล้างกันของกระแสเฟรมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ด้วยการควบคุมเฟสของสัญญาณพัลส์สำหรับสวิตช์ที่เหมาะสมกับจำนวนวงจรที่นำมาต่อขนาน ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบนั้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ได้ ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสถานะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร(open circuited switch)ที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจร โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึง ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาด วิธีการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสถานะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร

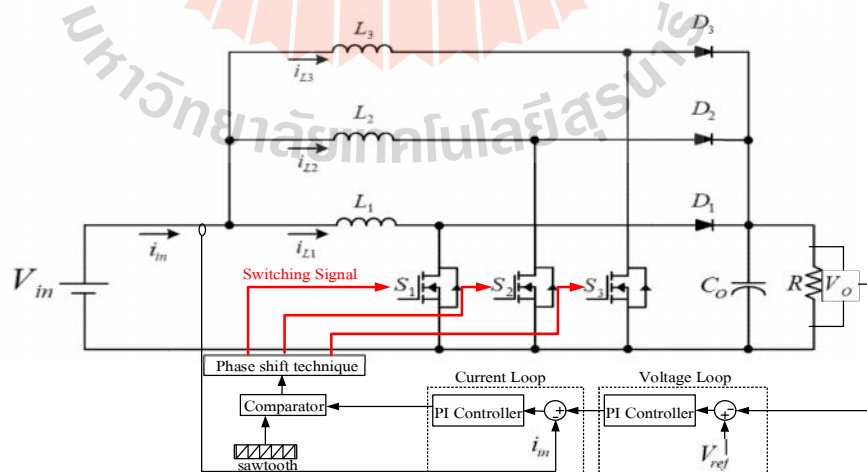
5.2 ความคงทนต่อความผิดพลาด

ความคงทนต่อความผิดพลาด(Fault tolerant) เป็นความสามารถของระบบที่จะทำงานต่อไปได้ ในสถานะที่มีความเสียหายเกิดขึ้น เป้าหมายของระบบที่คงทนต่อความเสียหายคือการป้องกันการล้มเหลวของระบบเท่าที่จะสามารถทำได้ การคงทนต่อความเสียหายนั้นสามารถทำได้ โดยการตรวจจับความผิดพลาดและระบุตำแหน่งความเสียหายเพื่อทำการจัดรูปแบบการทำงานของระบบขึ้นใหม่(Reconfiguration) จากนั้นนำอุปกรณ์ที่เสียหายออกและทำให้ระบบกลับมาทำงานอย่างต่อเนื่อง การจัดรูปแบบการทำงานของระบบต้องคำนึงถึงกระบวนการดังต่อไปนี้ การตรวจจับความเสียหาย(Fault Detection) เป็นกระบวนการที่จะตรวจจับว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นหรือไม่ ซึ่งกระบวนการตรวจจับความเสียหายจะเป็นกระบวนการแรกที่จะดำเนินการก่อนที่จะดำเนินการตาม

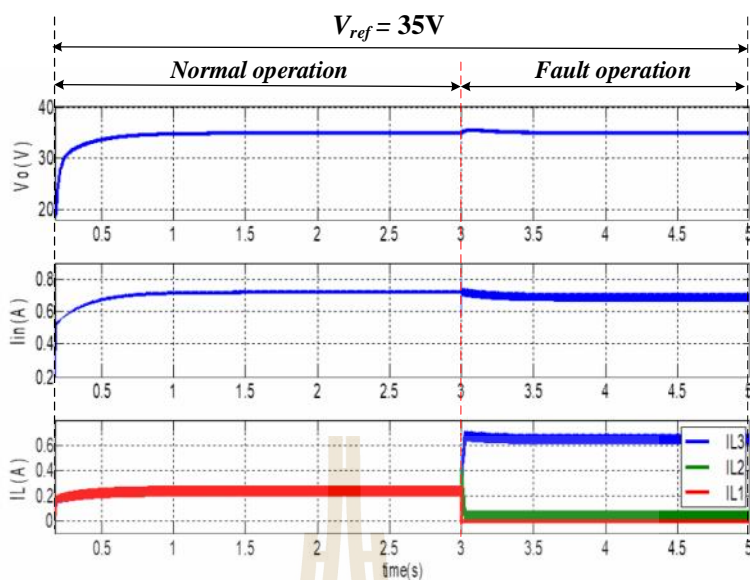
ขั้นตอนต่อไป การระบุตำแหน่งความเสียหาย(Fault Location) เป็นกระบวนการสำหรับระบุว่าระบบมีความเสียหายที่จุดใด เพื่อที่จะสามารถดำเนินการกู้คืนได้อย่างถูกต้อง การจำกัดขอบเขตความเสียหาย(Fault Containment) เป็นกระบวนการสำหรับแยกหรือกั้นความเสียหายออกจากระบบ เพื่อไม่ให้ความเสียดังกล่าวส่งผลกระทบต่อส่วนอื่นของระบบหรือแพร่กระจายไปทั้งระบบ การจำกัดขอบเขตความเสียหายเป็นส่วนสำคัญที่ขาดไม่ได้ของระบบที่คงทนต่อความเสียหายทุกระบบ การกู้คืนจากความเสียหาย(Fault Recovery) เป็นกระบวนการที่ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ต่อเนื่องหรือกลับมาทำงานได้ในสภาวะที่เกิดความเสียหาย

5.3 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ

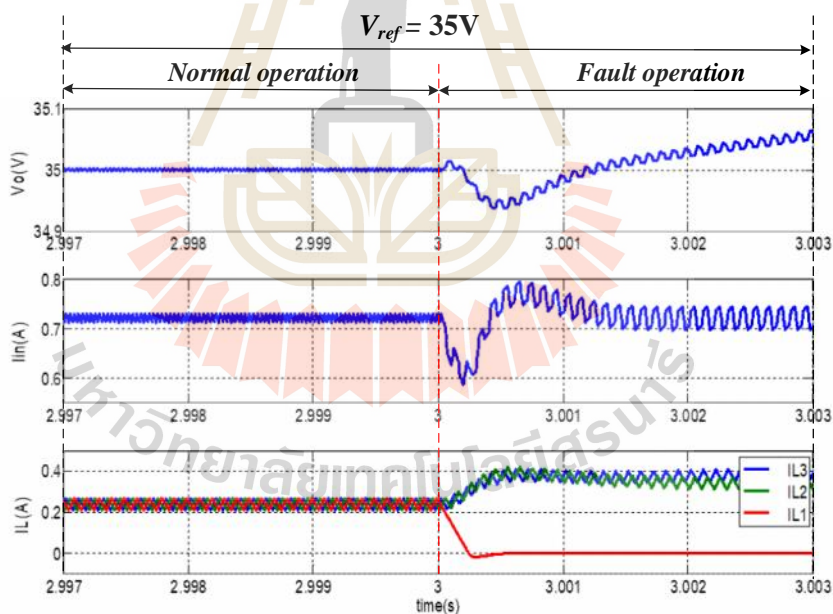
ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นจะใช้วิธีการสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกระแสอินพุตตอนเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น ว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยจะใช้การจำลองสถานการณ์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสอินพุต โครงสร้างการควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น แสดงได้ในรูปที่ 5.1 โดยจะทำการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร(Fault operation)ที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับที่ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V, 40V$ และ $50V$ ตามลำดับ เปรียบเทียบกับกรณีที่วงจรทำงานในสภาวะปกติ(Normal operation) ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.1 โครงสร้างการควบคุมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์



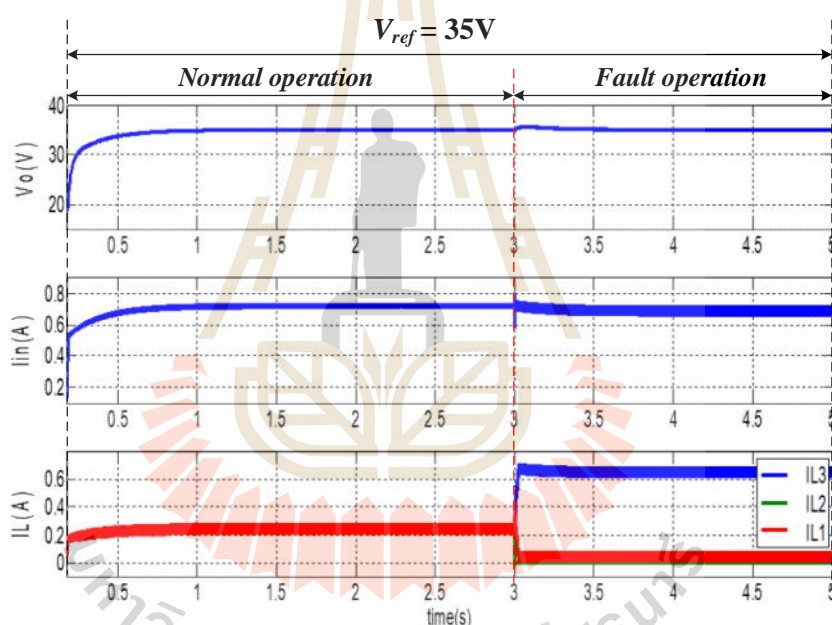
รูปที่ 5.2 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref}=35V$ เกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที



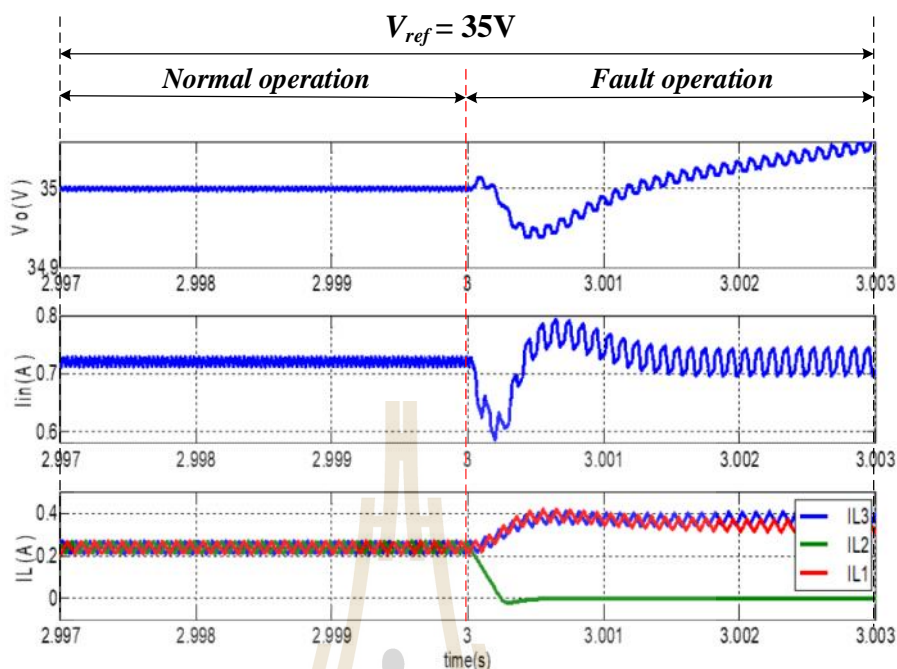
รูปที่ 5.3 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref}=35V$ เกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.2 และ 5.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีกระแสที่เพิ่มขึ้น กระแส

อินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้น มาจากการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่ปฏิบัติตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะคู่ตรงกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.3 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.5

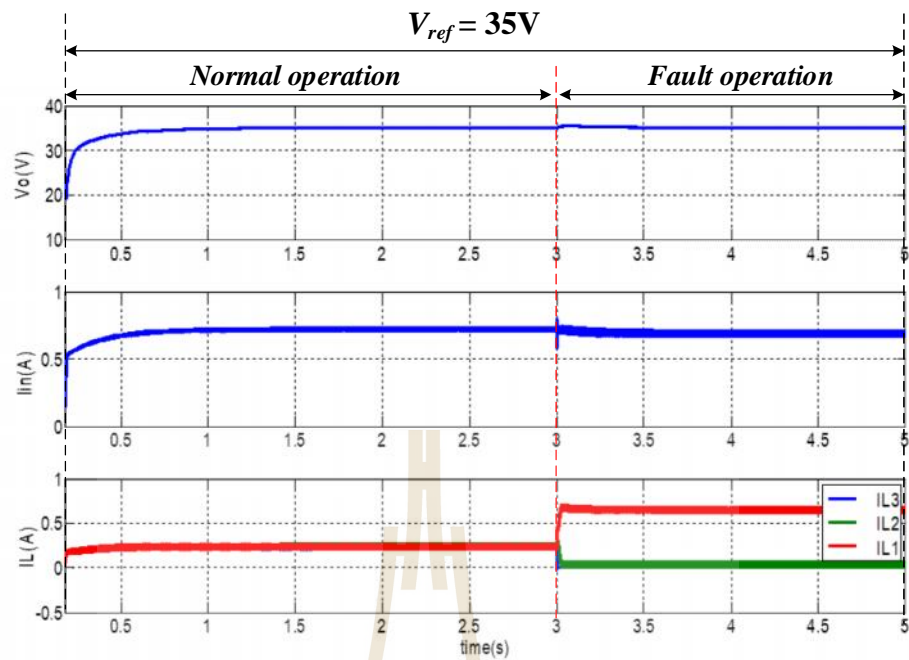


รูปที่ 5.4 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที

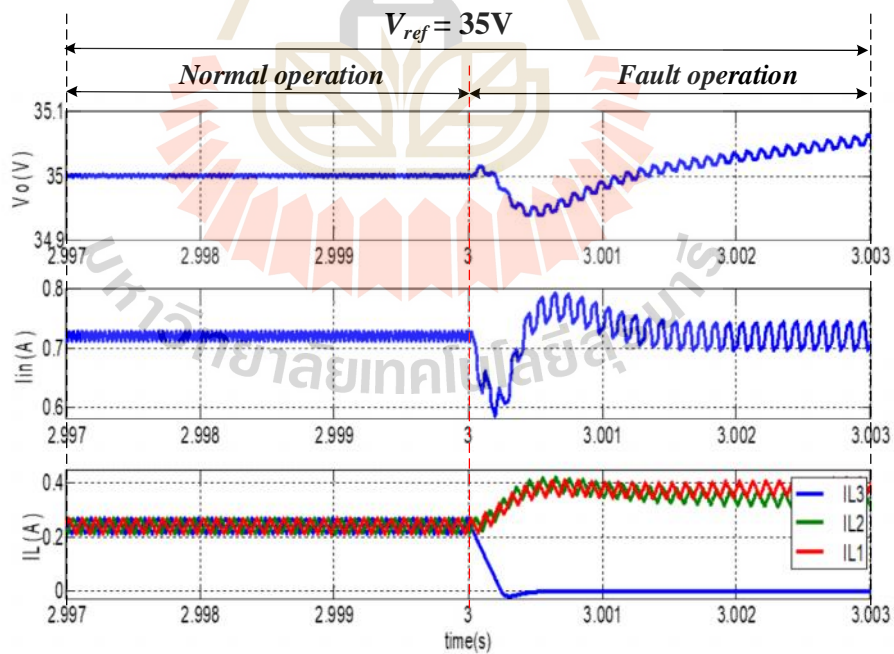


รูปที่ 5.5 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35V$ เกิดความผิดปกติที่ s_2 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟิวส์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A เช่นเดียวกัน กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้น มาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ s_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะคู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.5 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟิวส์แบบสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_3 เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ถึงรูปที่ 5.7

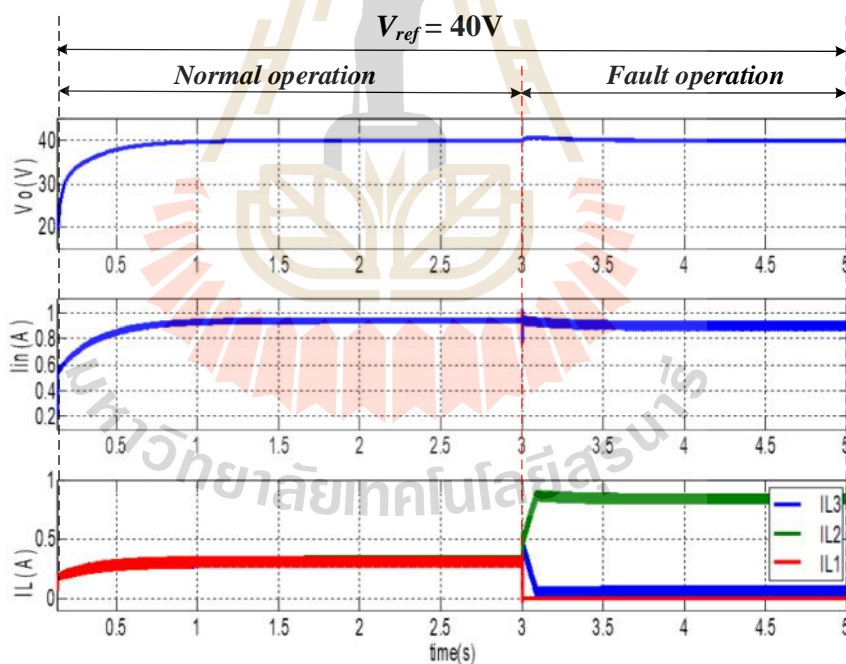


รูปที่ 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35$ V เกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที

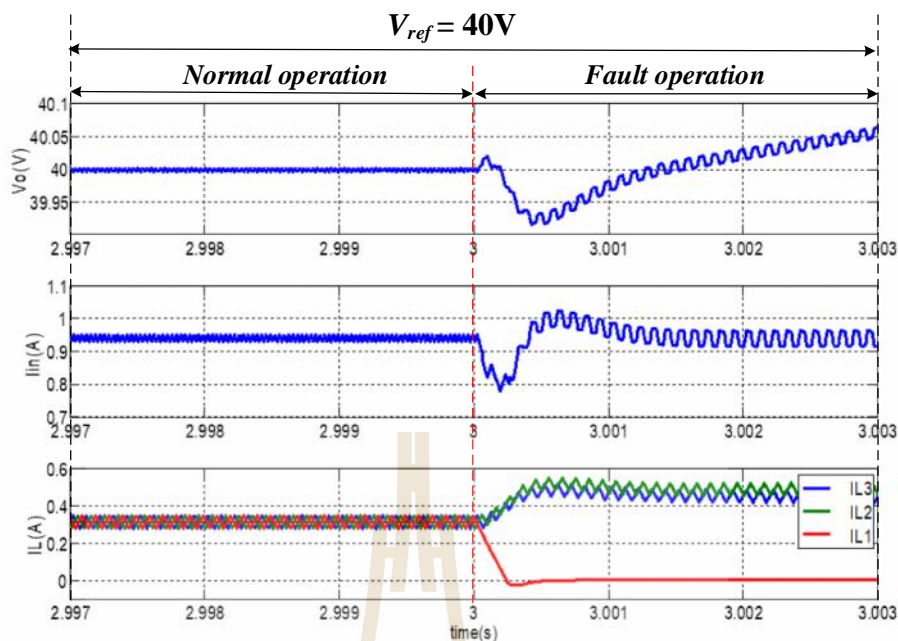


รูปที่ 5.7 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 35$ V เกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A เช่นเดียวกัน กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} มีลักษณะคู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.7 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.9

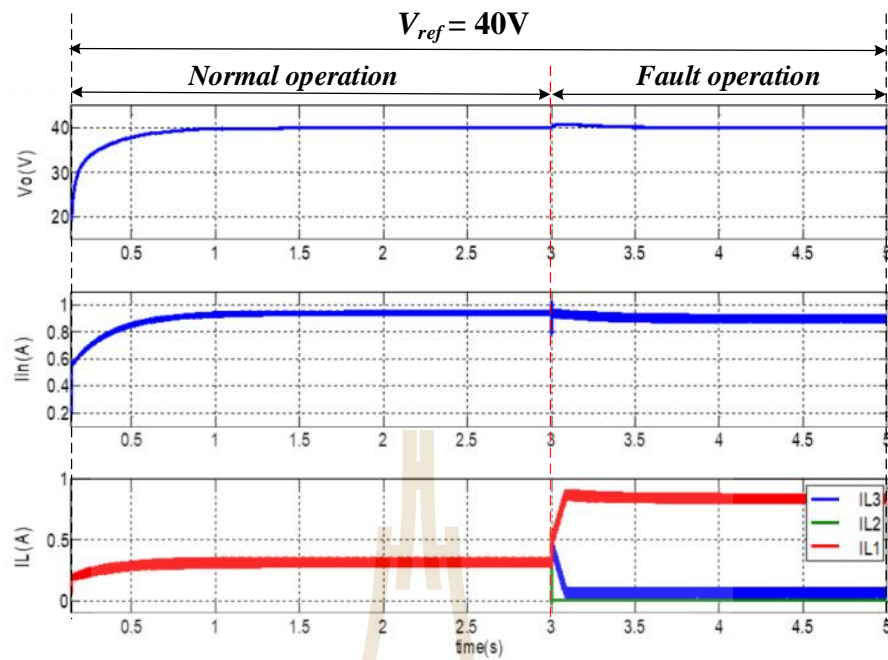


รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที

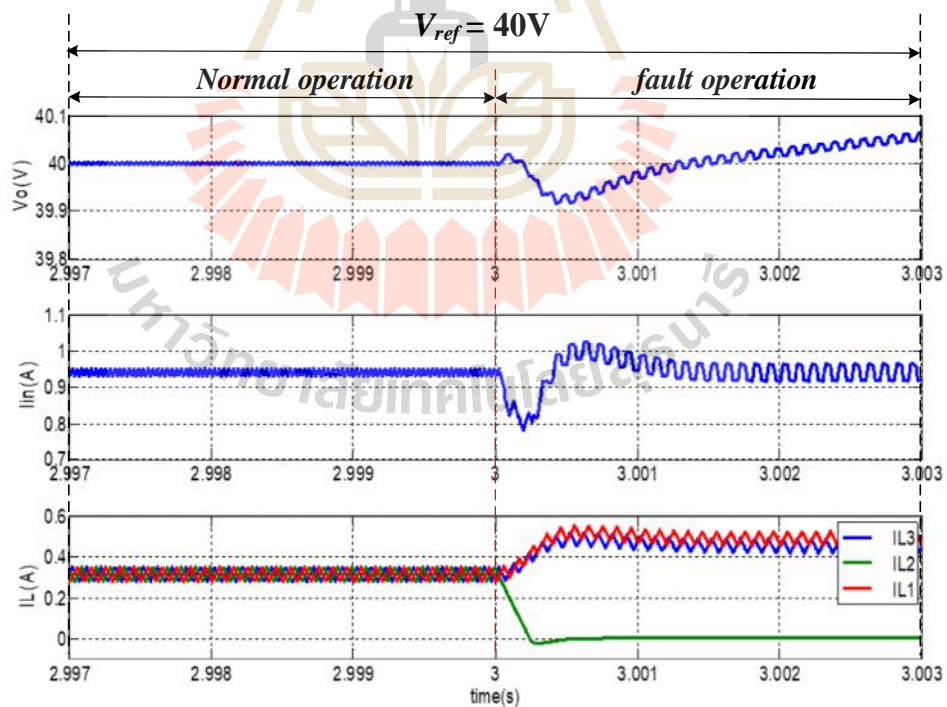


รูปที่ 5.9 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.8 และ 5.9 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะคู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.9 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.11

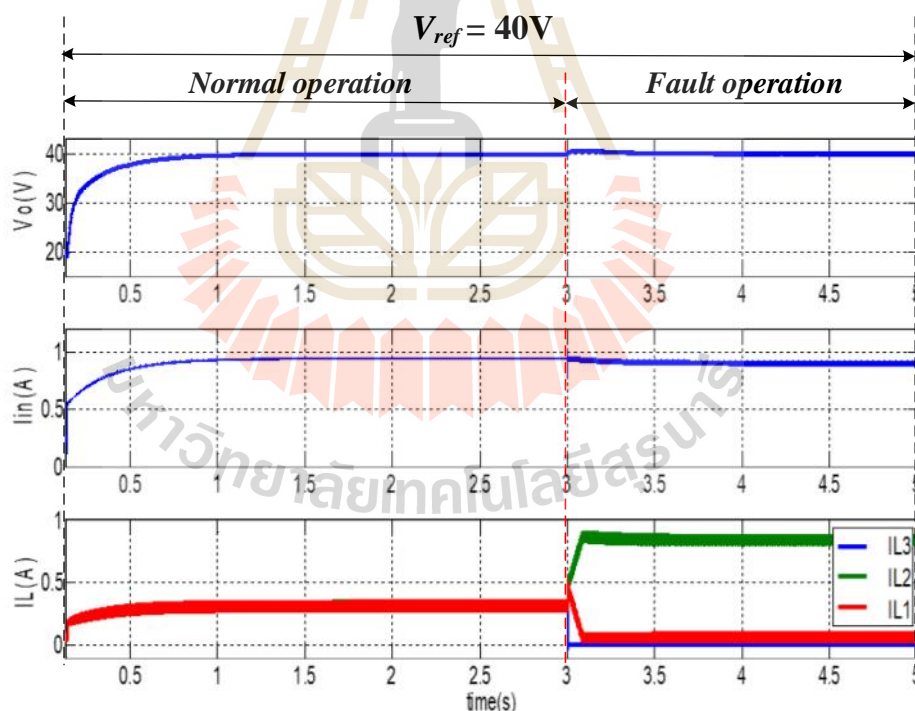


รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40$ V เกิดความผิดปกติที่ s_2 เวลา 3 วินาที

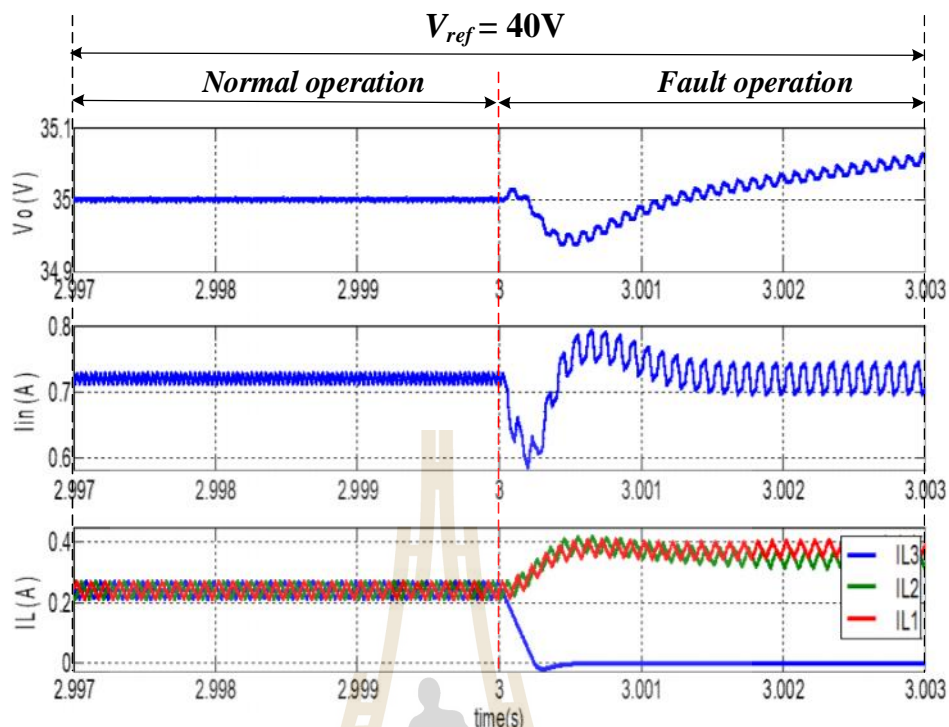


รูปที่ 5.11 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40$ V เกิดความผิดปกติที่ s_2 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.10 และ 5.11 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A เช่นเดียวกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะคู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.11 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์แบบสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.13

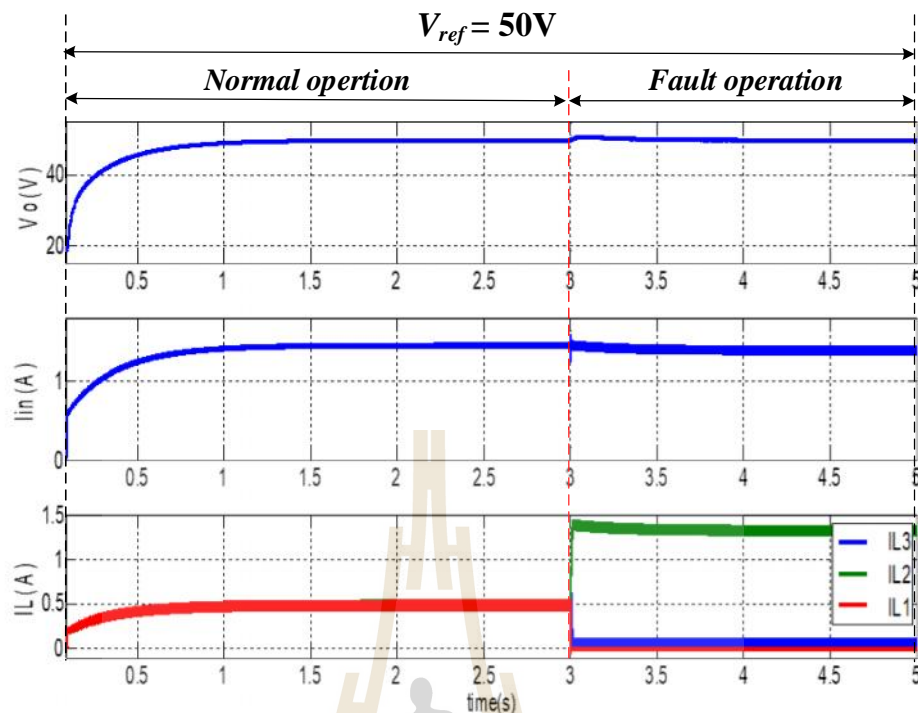


รูปที่ 5.12 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที

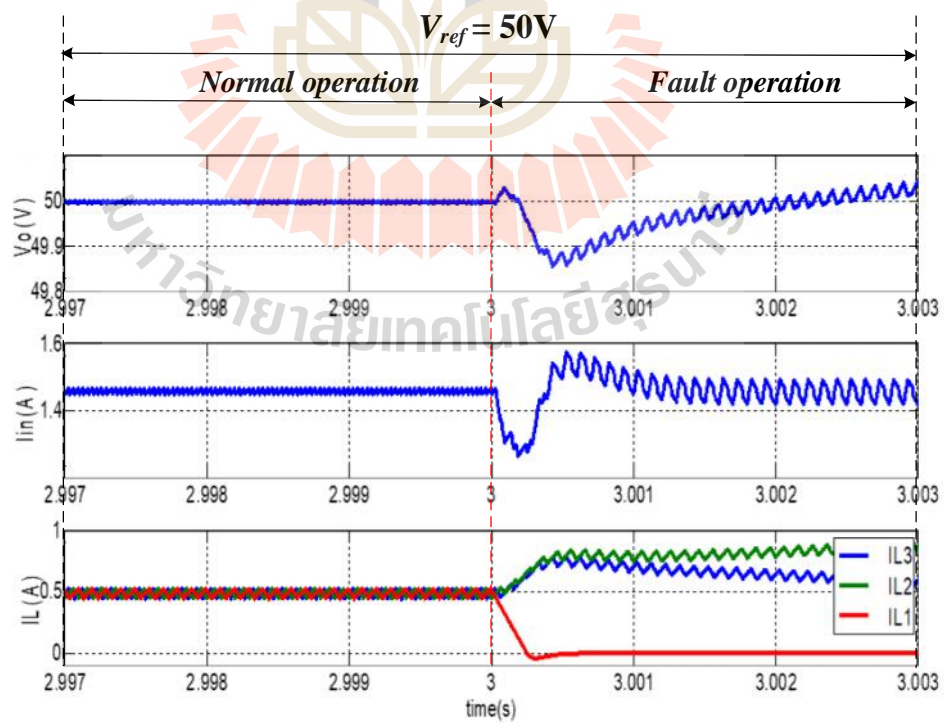


รูปที่ 5.13 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 40V$ เกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.12 และ 5.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิปูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A เช่นเดียวกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} มีลักษณะคู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.13 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิปูสต์แบบสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.15

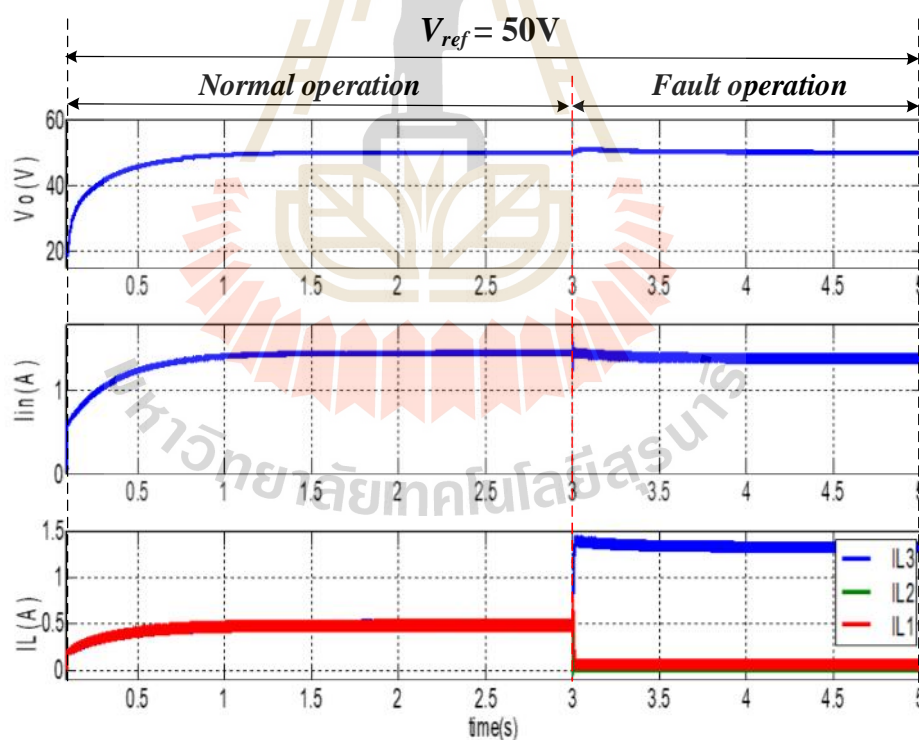


รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที

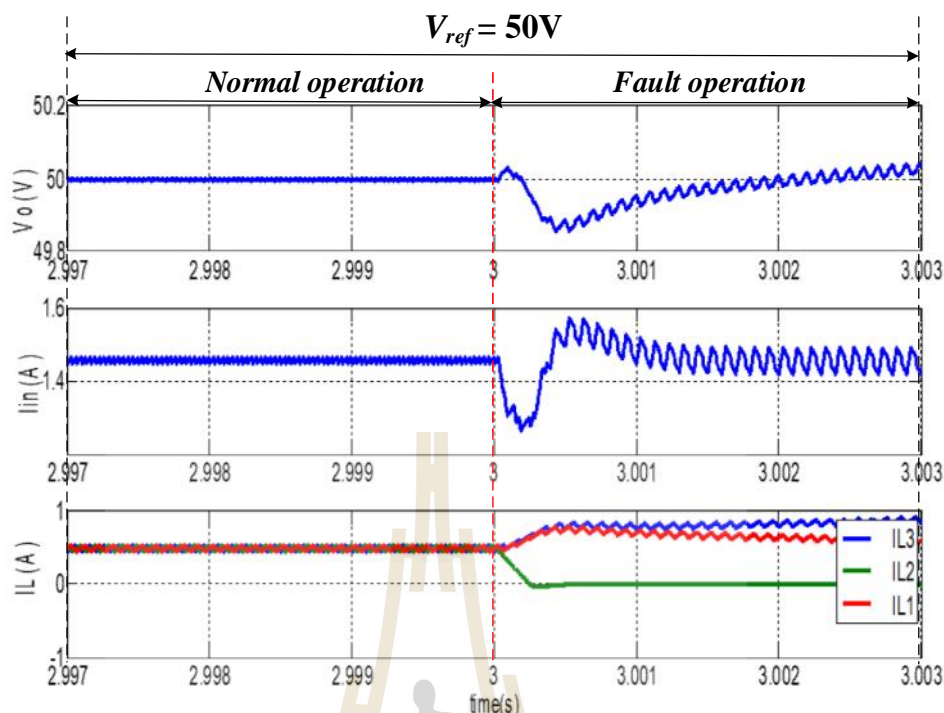


รูปที่ 5.15 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.14 และ 5.15 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปบูสต์สามขั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.46A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะลู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.15 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปบูสต์แบบสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.16 ถึงรูปที่ 5.17

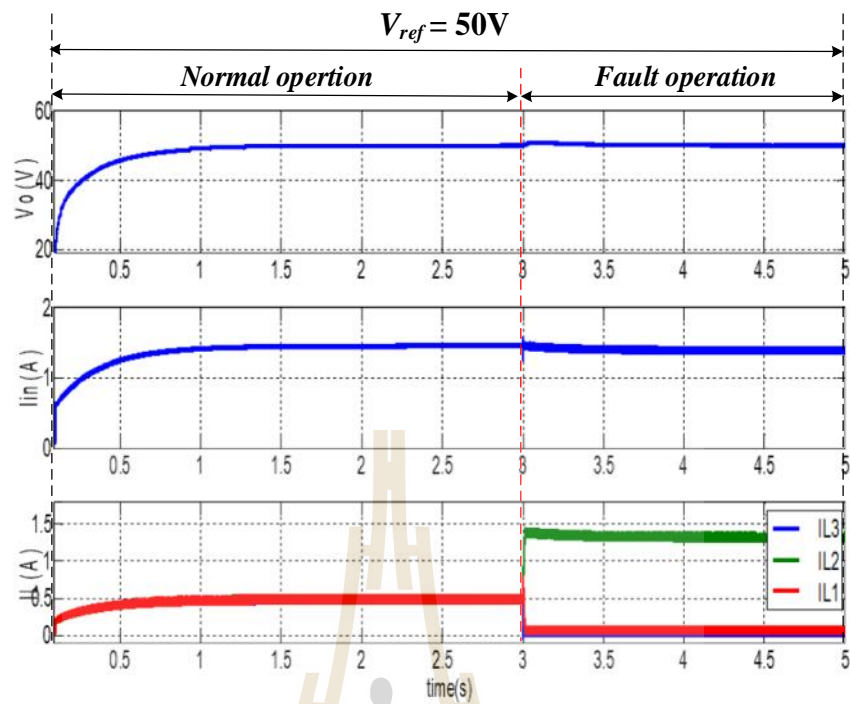


รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดปกติที่ S_2 เวลา 3 วินาที

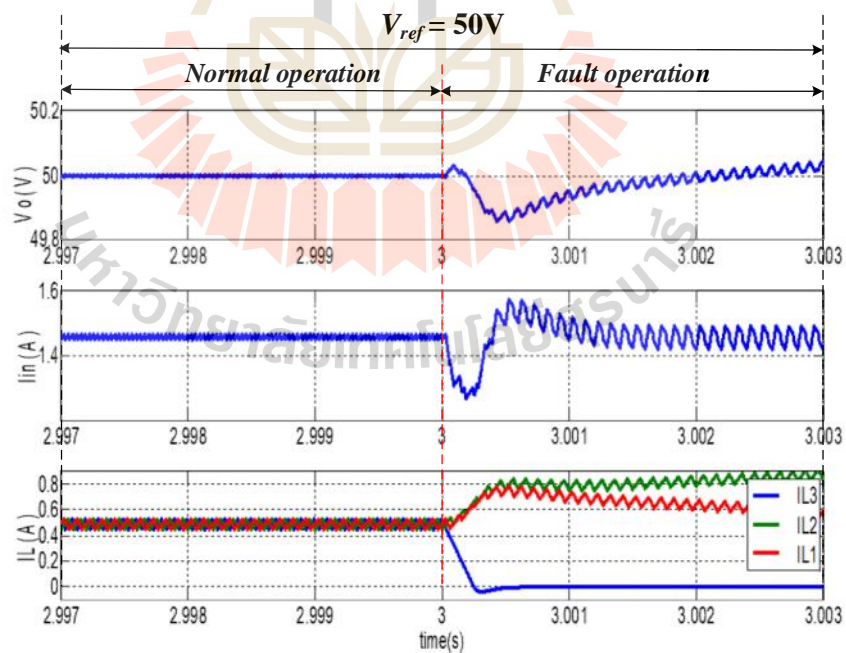


รูปที่ 5.17 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref} = 50V$ เกิดความผิดปกติที่ s_2 เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.16 และ 5.17 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟลูตสามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.46A เช่นเดียวกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ s_1 ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ s_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะลู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.17 ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟลูตแบบสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_2 เวลา 3 วินาที โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 ถึงรูปที่ 5.19

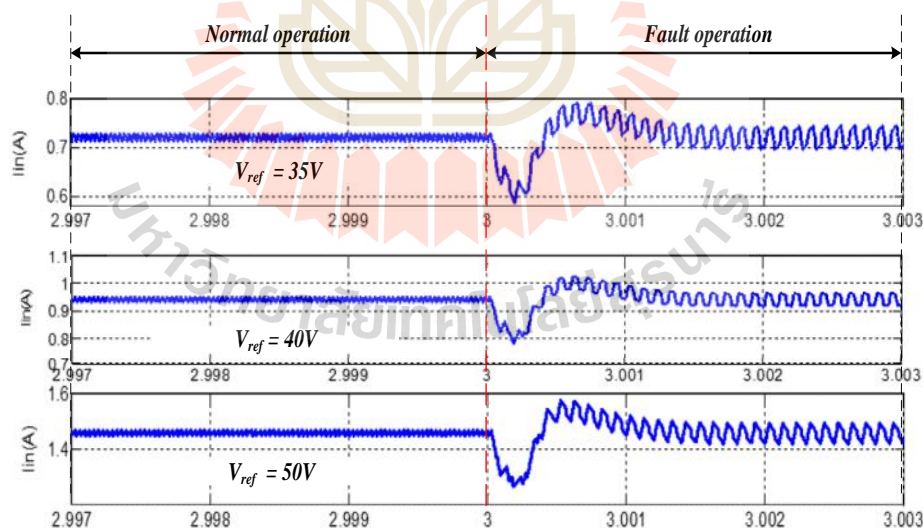


รูปที่ 5.18 ผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref}=50V$ เกิดความผิดปกติที่ s_3 เวลา 3 วินาที



รูปที่ 5.19 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์กรณี $V_{ref}=50V$ เกิดความผิดปกติที่ s_3 เวลา 3 วินาที

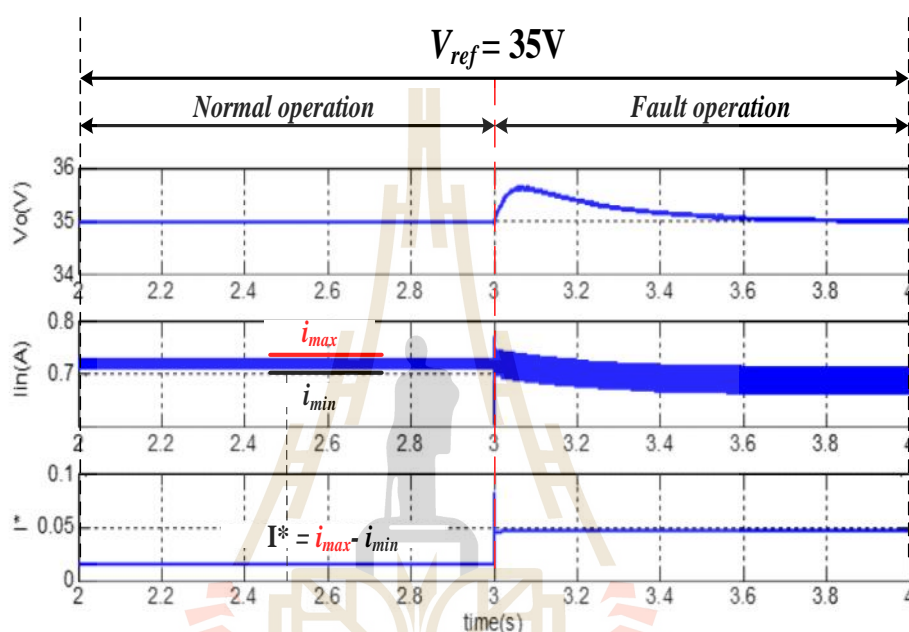
จากรูปที่ 5.18 และ 5.19 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีกระแสเฟืองที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.46A เช่นเดียวกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} มีลักษณะคู่ออกจากกัน ดังแสดงได้ในภาพที่ 5.19 จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะพบว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรทั้ง S_1 , S_2 และ S_3 จะทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตนั้นมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงจะขอยกตัวอย่างกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$, $40V$ และ $50V$ ตามลำดับ เพื่อพิจารณาการกระเพื่อมของกระแสอินพุต ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 กระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$, $40V$ และ $50V$

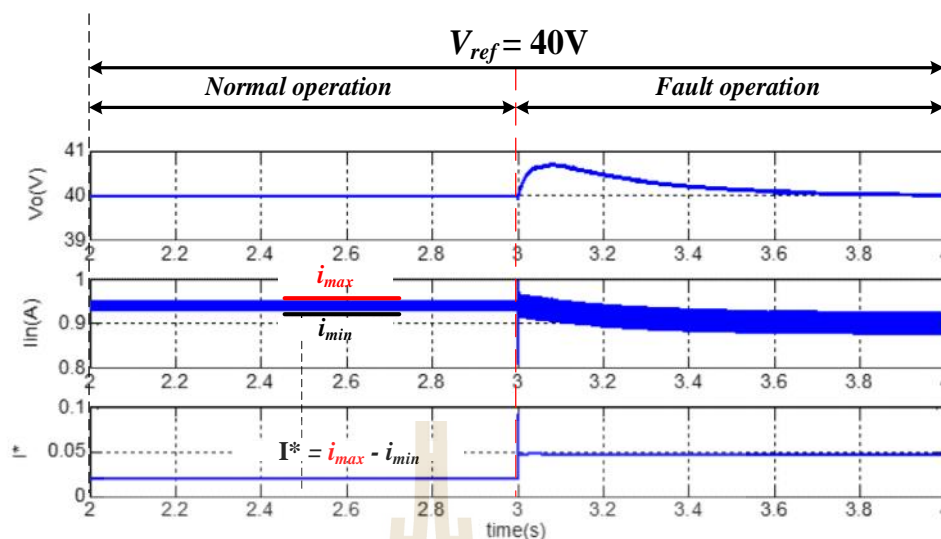
จากรูปที่ 5.20 จะพบว่าพฤติกรรมของกระแสอินพุตระหว่างที่ทำงานปกติกับกรณีเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์ S_3 มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในชัดเจน

โดยเฉพาะการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่สูงขึ้นหลังจากเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เวลา 3 วินาที ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังเกิดความผิดพลาด สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อสร้างขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดได้ โดยจะเริ่มจากการพิจารณาค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต โดยจะคำนวณหาค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจากสมการ $I^* = \Delta i_{in} = i_{max} - i_{min}$ ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.23



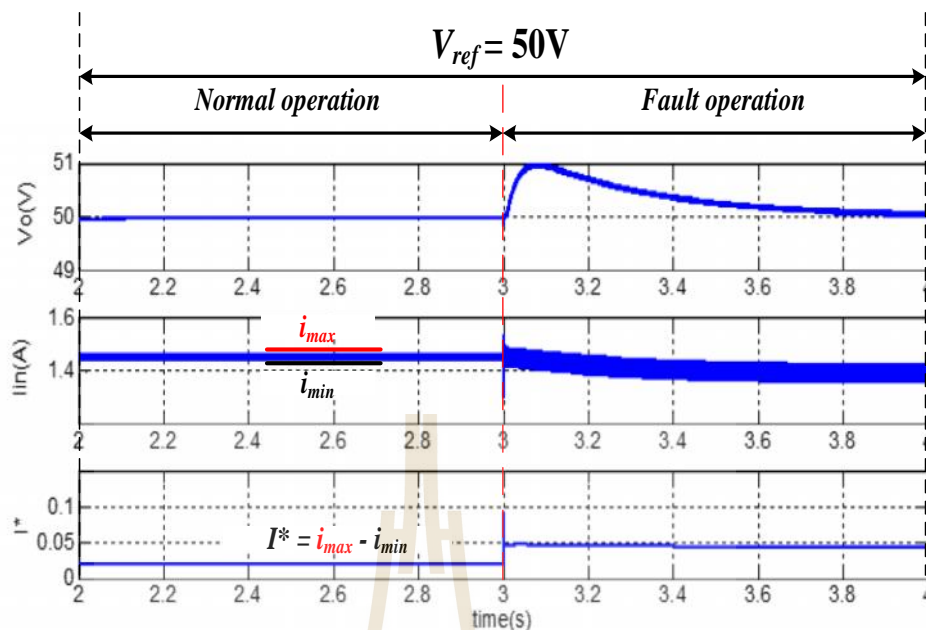
รูปที่ 5.21 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35 V$

จากรูปที่ 5.21 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35 V$ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงขึ้นแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 35 V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.72 A และการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018 A แต่เมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นแล้วลดลงจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.05 A ซึ่งสูงขึ้นจากสถานะปกติประมาณ 2.77 เท่า ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิปซุสต์แบบสามชั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40 V$ ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.22



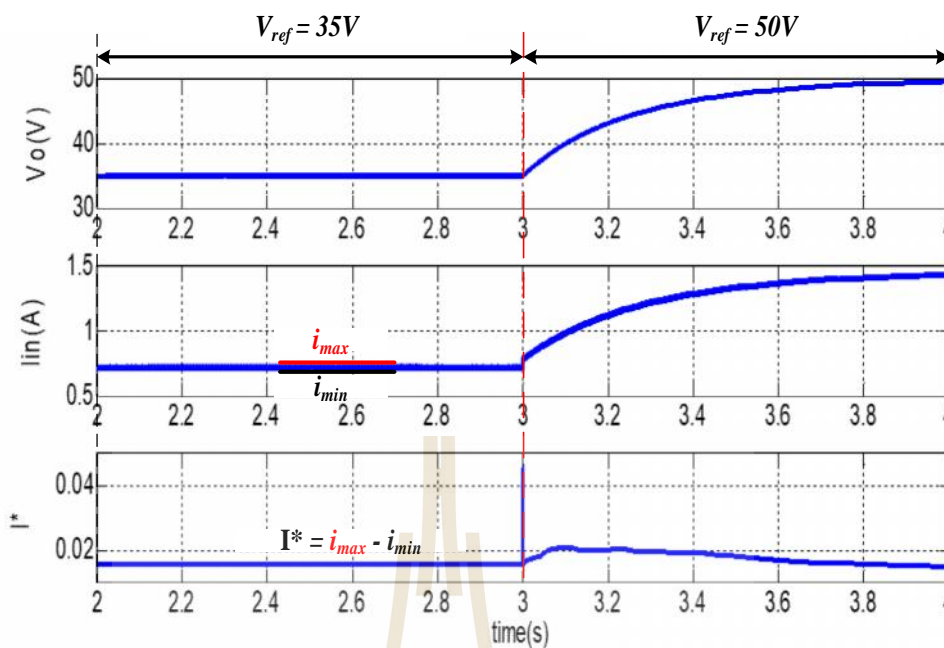
รูปที่ 5.22 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่ s_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40$ V

จากรูปที่ 5.22 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติที่ s_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 40 V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.94 A และการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนตามไปด้วยเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35$ V โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นแล้วลดลงจนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.05 A ซึ่งสูงขึ้นจากสภาวะปกติประมาณ 2.27 เท่า ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ทีฟบูสต์แบบสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติที่ s_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50$ V ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.23



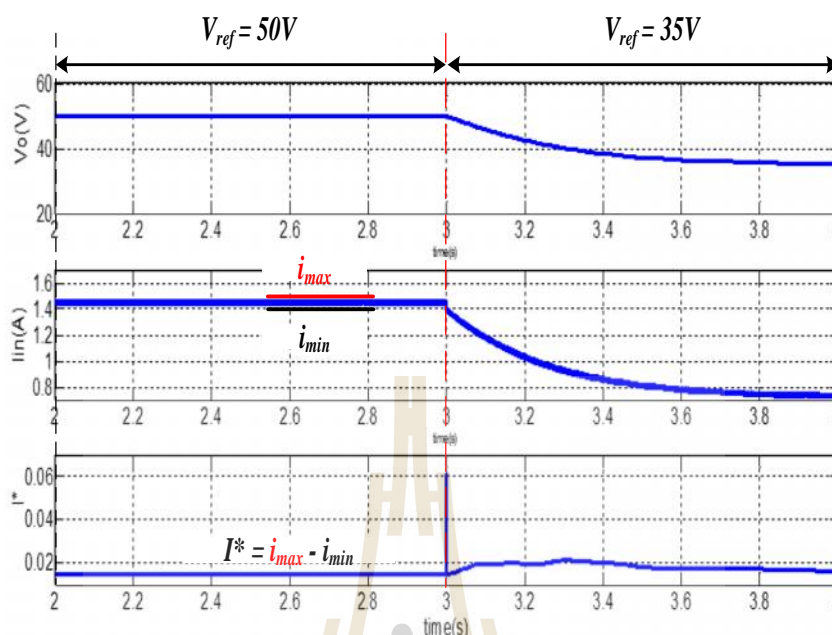
รูปที่ 5.23 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50$ V

จากรูปที่ 5.23 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงขึ้นแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 50 V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 1.42 A และการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนตามไปด้วยเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35$ V และ 40 V โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นแล้วลดลงจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.05 A ซึ่งสูงขึ้นจากสถานะปกติประมาณ 2.08 เท่า ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์แบบสามชั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงแบบทันทีทันใดเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการกระเพื่อมของกระแสอินพุต โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเปลี่ยนแปลงจาก $V_{ref} = 35$ V เป็น $V_{ref} = 50$ V ที่เวลา 3 วินาที ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.24



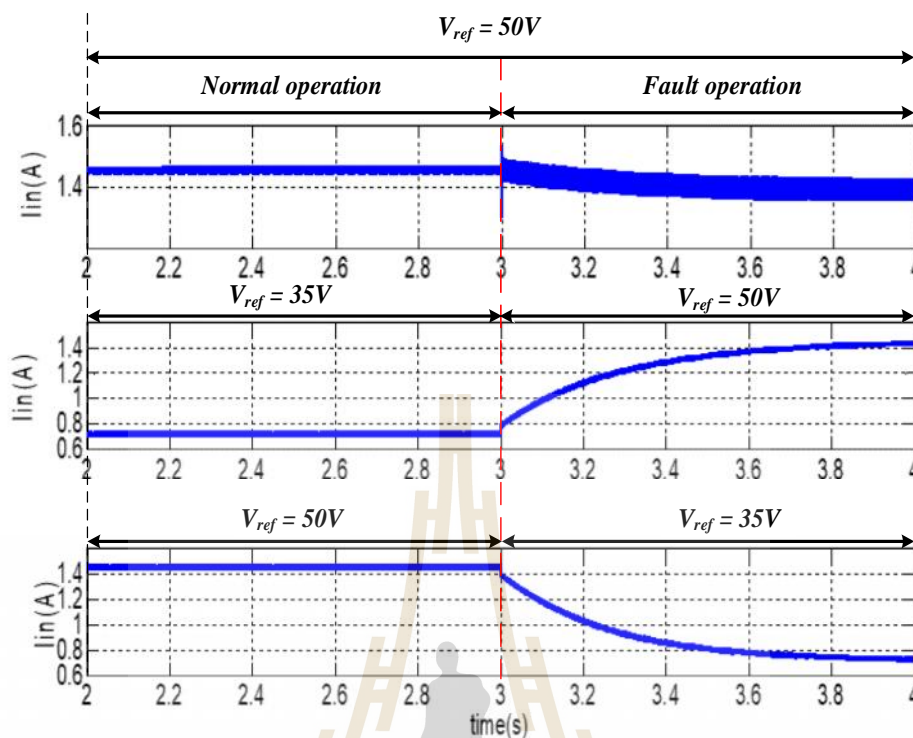
รูปที่ 5.24 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 35\text{ V}$ เป็น 50 V เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.24 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟฟุสต์สามชั้นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35\text{ V}$ เป็น 50 V ที่เวลา 3 วินาที โดยสภาวะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 35 V กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.72 A และค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.018 A และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35\text{ V}$ เป็น 50 V ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50 V กระแสอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45 A และค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าพุ่งสูงขึ้นจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.017 A ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีก่อนมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีผลต่อการกระเพื่อมของกระแสอินพุตเพียงเล็กน้อย จึงทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย ต่างจากกรณีเกิดความผิดพร่องเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรซึ่งจะมีค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตเพิ่มสูงขึ้น ต่อไปจะเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟฟุสต์แบบสามชั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงแบบทันทีทันใดเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการกระเพื่อมของกระแสอินพุต โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเปลี่ยนแปลงจาก $V_{ref} = 50\text{ V}$ เป็น $V_{ref} = 35\text{ V}$ ที่เวลา 3 วินาที ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.25



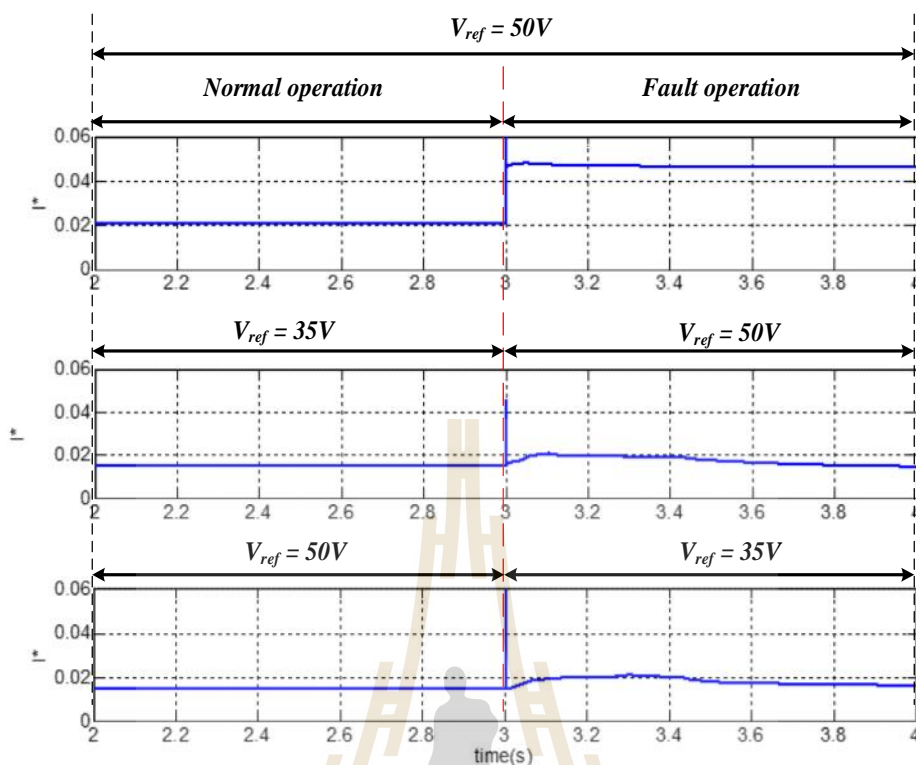
รูปที่ 5.25 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเปลี่ยนแปลง $V_{ref} = 50$ V เป็น 35 V เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.25 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตีสตาร์ทสามขั้นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50$ V เป็น 35 V ที่เวลา 3 วินาที โดยสภาวะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 50 V กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 1.45 A และค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.017 A และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50$ V เป็น 35 V ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35 V กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72 A และค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าพุ่งสูงขึ้นจากนั้นจะค่อยๆลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.018 A ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีก่อนมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีผลต่อการกระเพื่อมของกระแสอินพุตเพียงเล็กน้อย จึงทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วยเช่นเดียวกับกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35$ V เป็น 50 V ซึ่งจะต่างจากกรณีเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรซึ่งจะมีค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตเพิ่มสูงขึ้น ต่อไปจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของกระแสอินพุตในกรณีที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 กรณีเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง จาก $V_{ref} = 35$ V เป็น 50 V และกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50$ V เป็น 35 V ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.26



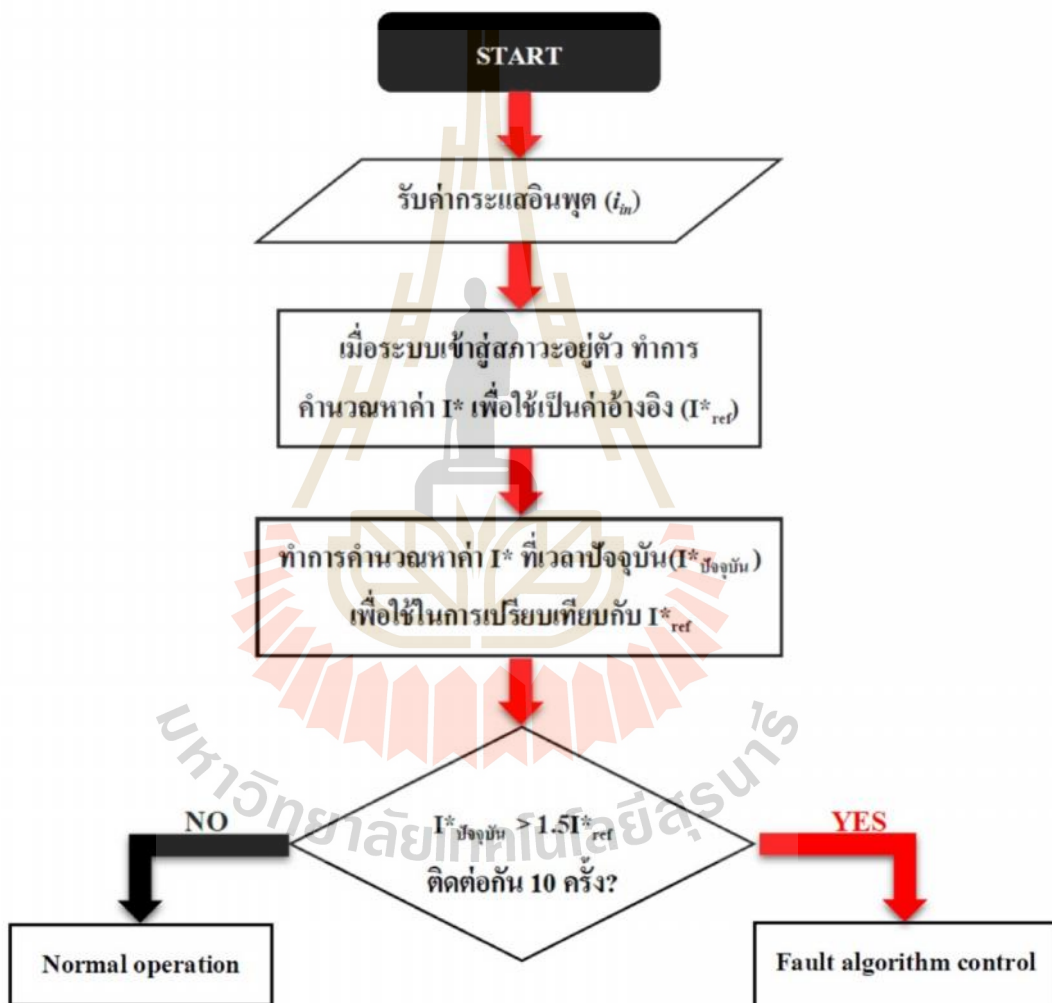
รูปที่ 5.26 พฤติกรรมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่ s_3 และกรณีเปลี่ยนแปลง V_{ref} ที่เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.26 จะเห็นได้ว่ากระแสอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสสามขั้วทั้ง 3 กรณี นั้นมีเพียงกรณีที่เกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเท่านั้น ที่ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าสูงขึ้นจากสภาวะการทำงานปกติอย่างเห็นได้ชัด โดยการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ การกระเพื่อมของกระแสอินพุตในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจากจาก $V_{ref} = 35$ V เป็น 50 V และการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจากจาก $V_{ref} = 50$ V เป็น 35 V สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 การกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่ s_3 และกรณีเปลี่ยนแปลง V_{ref} ที่เวลา 3 วินาที

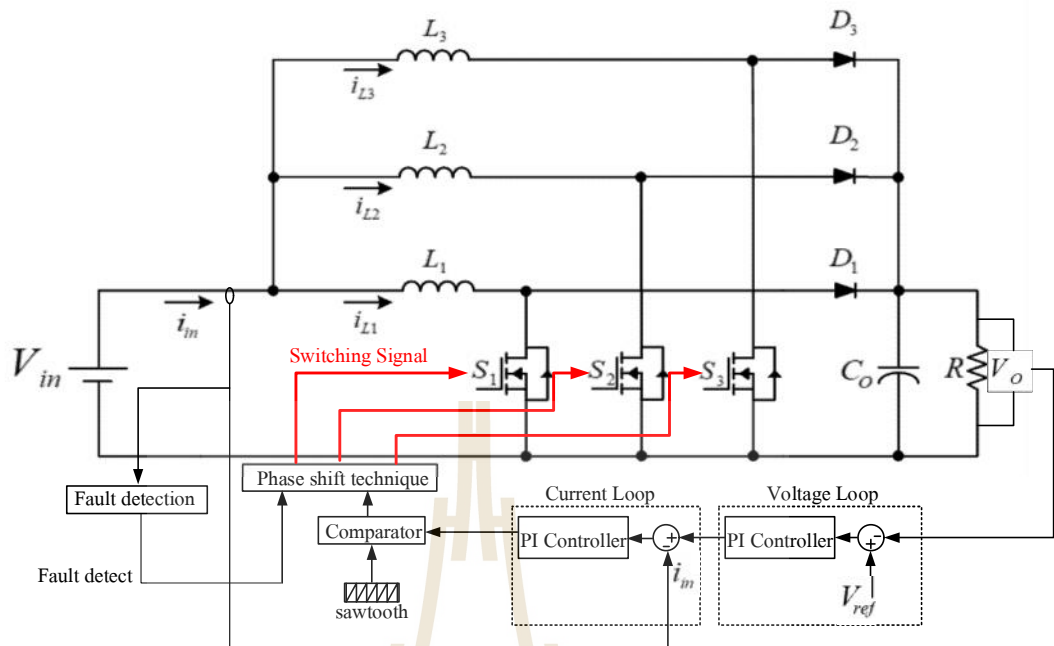
จากรูปที่ 5.27 จะเห็นได้ว่าการกระเพื่อมของกระแสกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะที่เกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เวลา 3 วินาที นั้นมีพฤติกรรมที่ต่างจากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในกรณีที่มีการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตและค่าการกระเพื่อมของกระแสกระเพื่อมของกระแสอินพุตในกรณีที่การลดระดับแรงดันเอาต์พุตที่เวลา 3 วินาทีอย่างชัดเจน โดยการกระเพื่อมของกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_3 เวลา 3 วินาทีนั้น ในสภาวะปกติจะมีค่าประมาณ 0.02 A หลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นจะมีค่าพุ่งสูงขึ้นแบบทันทีทันใดแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.045 A กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35$ V เป็น 50 V ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35$ V การกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.015 A เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50$ V การกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วลดลงเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.015 A และสุดท้ายกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50$ V เป็น 35 V ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50$ V การกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.015 A เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดัน



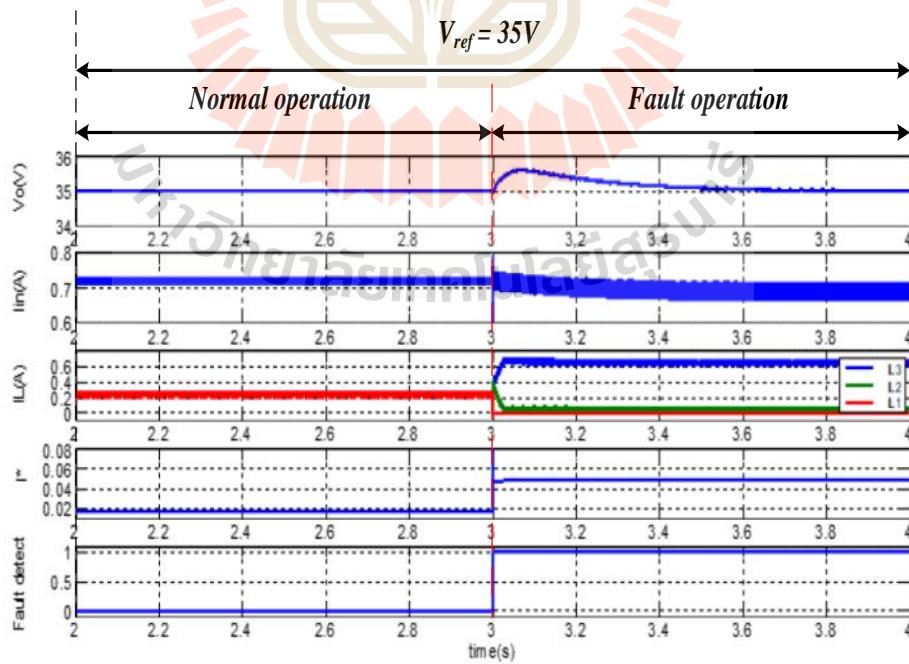
ค่าความถี่ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์คือ 10 kHz ดังนั้นคาบเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์คือ 100 μ s โดยในหนึ่งคาบเวลา จะได้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหนึ่งค่า เมื่อคำนวณได้แล้วเก็บไว้ในตัวแปร เพื่อใช้สำหรับเป็นค่าอ้างอิง (I^*_{ref}) เมื่อได้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่สถานะอยู่ตัวแล้ว จะทำการคำนวณหาค่าการกระเพื่อมค่าใหม่ที่เวลาถัดไปหรือเวลาปัจจุบัน ($I^*_{ปัจจุบัน}$) จากนั้นจะนำค่า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มาเปรียบเทียบกับค่า I^*_{ref} โดยให้เงื่อนไขว่า ถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามชั้น จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นในสถานะเกิดความผิดปกติต่อไป แต่ถ้ากรณีที่ $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ไม่ถึง 10 ครั้งให้เริ่มทำการรีเซ็ตใหม่จากศูนย์เพื่อเป็นการป้องกันการกั้นตรวจจับผิดพลาดของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นนั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร

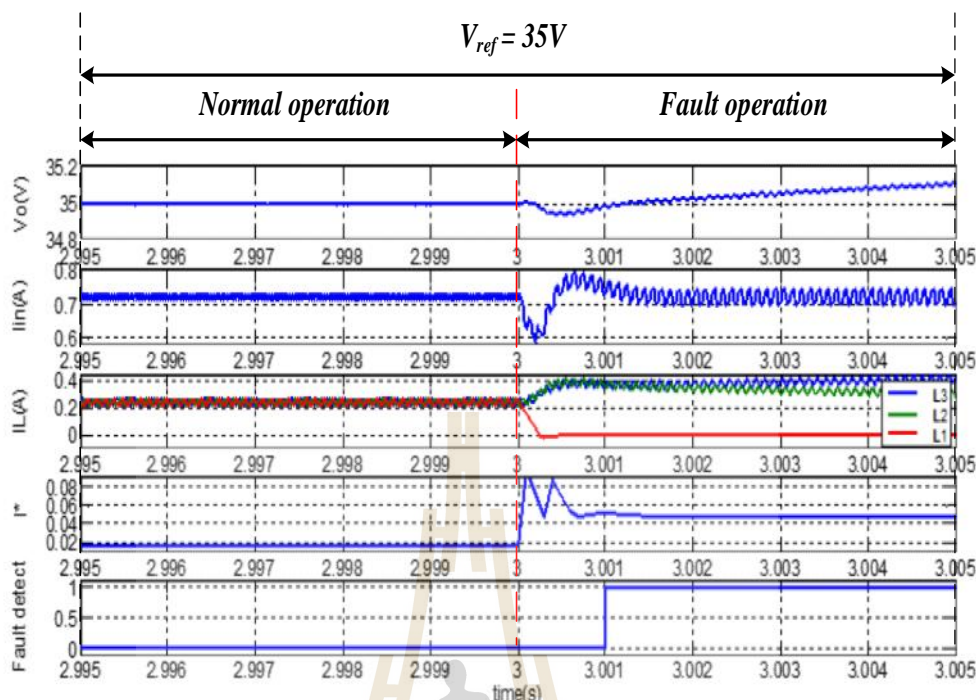
การตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นจะใช้การจำลองสถานการณ์ในที่กรณีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นทำงานภายใต้สถานะต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงโดยเพิ่มแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงแบบทันทีทันใด ลดแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงแบบทันทีทันใด การเพิ่มค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่ใช้เป็นโหลด รวมถึงกรณีที่เกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรในขณะที่วงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นที่ใช้ในการตรวจสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.29 โดยเริ่มจากการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นกรณีที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 35 โวลต์ และเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ตัวที่หนึ่ง (S_1) แสดงได้ในรูปที่ 5.30 และรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.29 โครงสร้างการควบคุมที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ



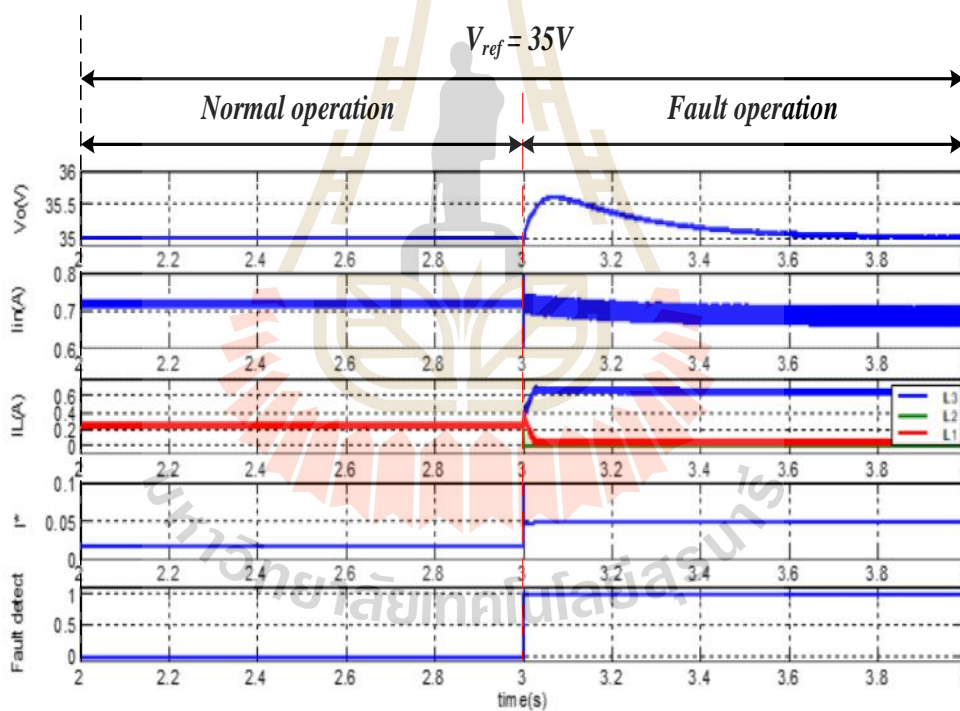
รูปที่ 5.30 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ \$S_1\$ เวลา 3 วินาที \$V_{ref} = 35\$V



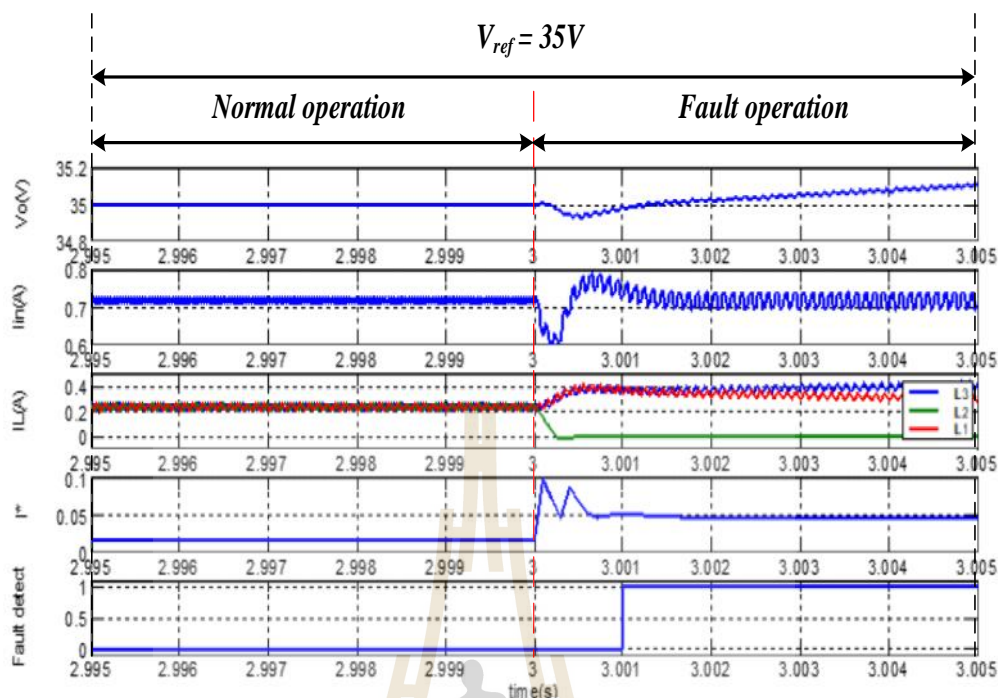
รูปที่ 5.31 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ s_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref}=35V$

จากรูปที่ 5.30 และรูปที่ 5.31 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟท์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ s_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะลู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ s_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.30 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการ

กระแสของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 35\text{ V}$ คือ 0.027 A ซึ่งจากรูปที่ 5.30 เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.027 A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์แบบสามขั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามขั้นกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35\text{ V}$ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.32 ถึงรูปที่ 5.33



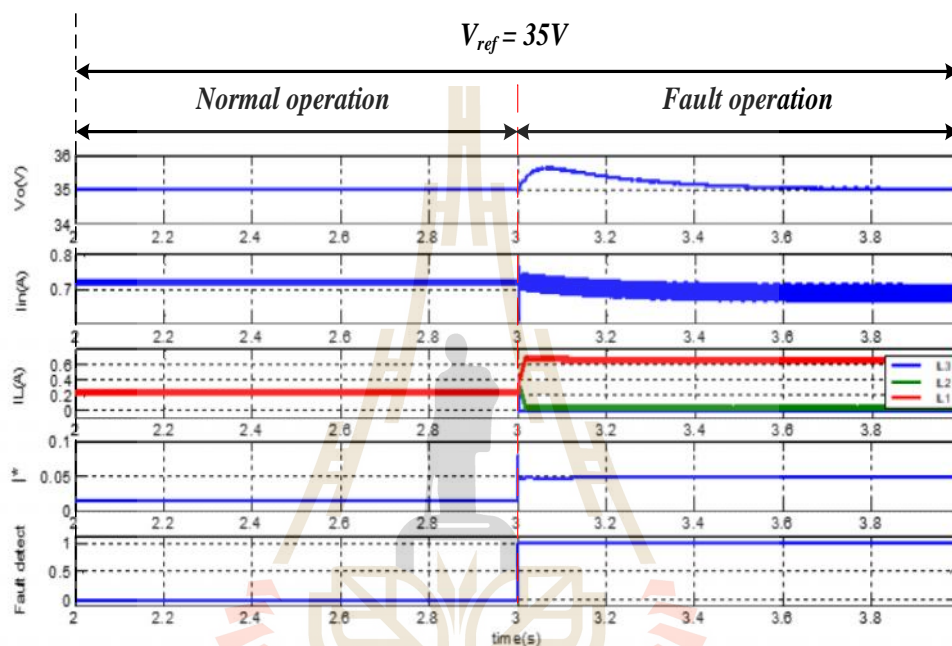
รูปที่ 5.32 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35\text{ V}$



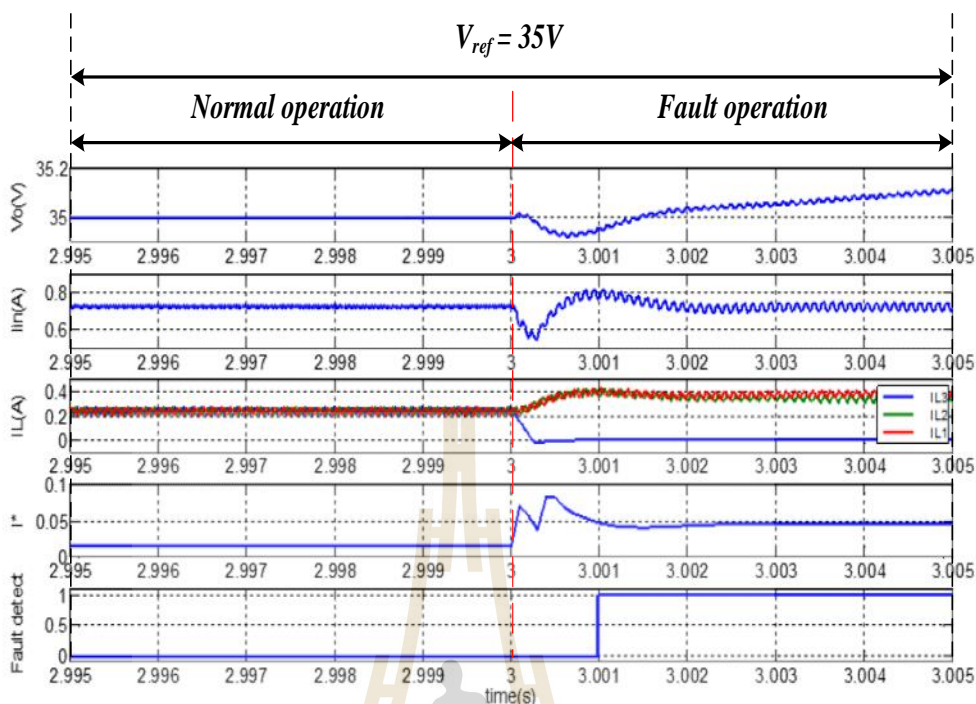
รูปที่ 5.33 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref}=35\text{ V}$

จากรูปที่ 5.32 และรูปที่ 5.33 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามขั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะคู่กัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.33 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป ทำให้อัตโนมัติที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจร

แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สฟลูตต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง โดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที เช่นเดียวกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_7 ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สฟลูตต์สามชั้นกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35$ V สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.34 ถึงรูปที่ 5.35



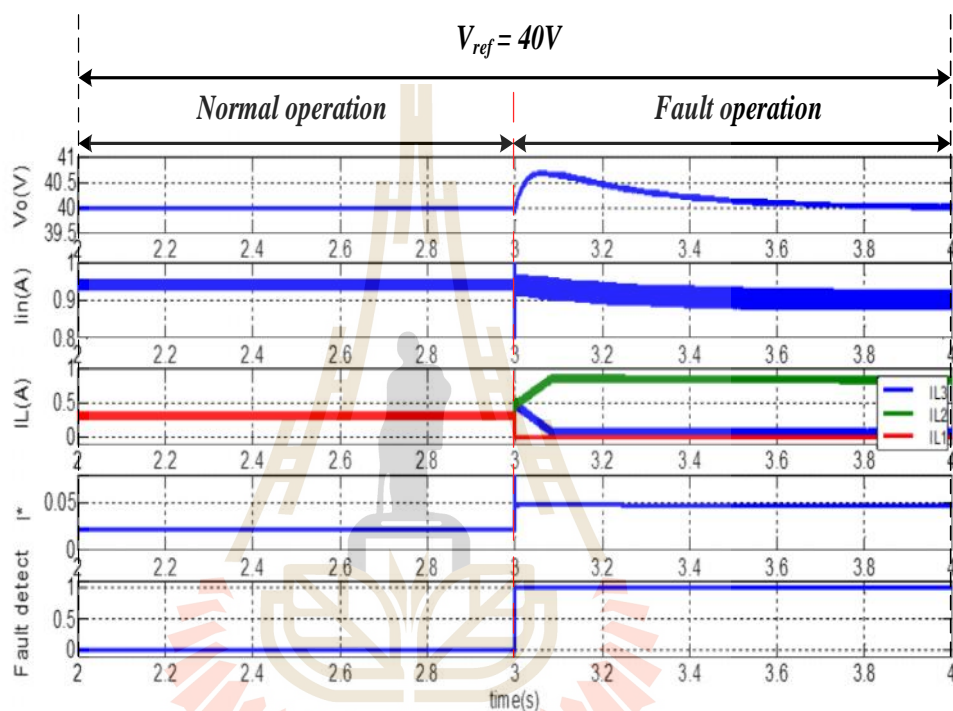
รูปที่ 5.34 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35$ V



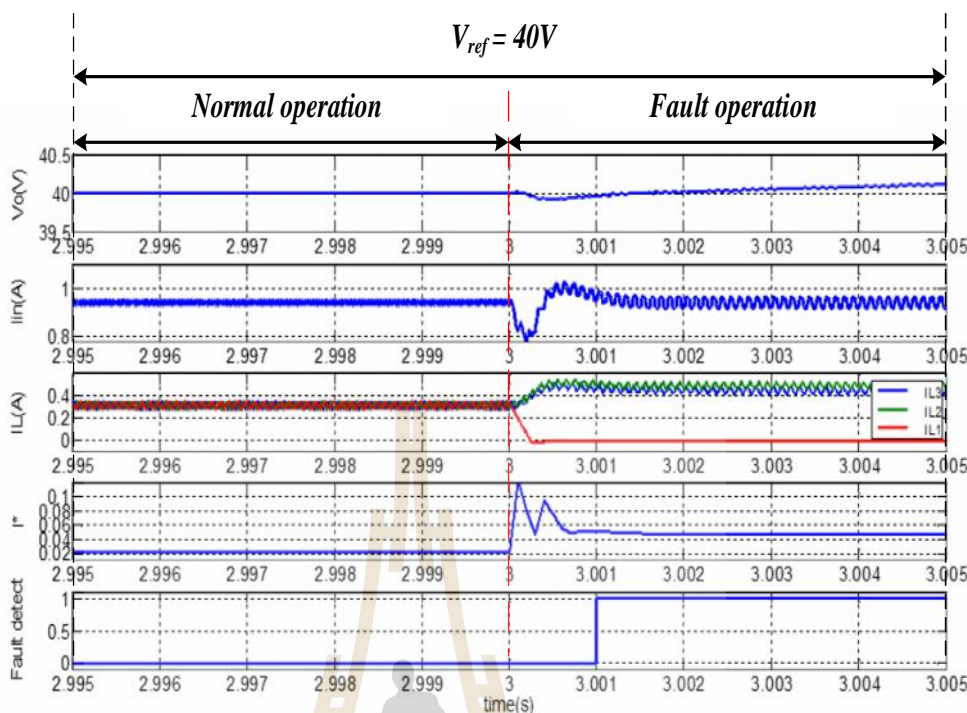
รูปที่ 5.35 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35 V$

จากรูปที่ 5.34 และรูปที่ 5.35 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นที่ไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} มีลักษณะคู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (i^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.35 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป ทำให้อขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจร

แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที เช่นเดียวกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 และ S_2 ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์สามชั้นกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40$ V สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.36 ถึงรูปที่ 5.37



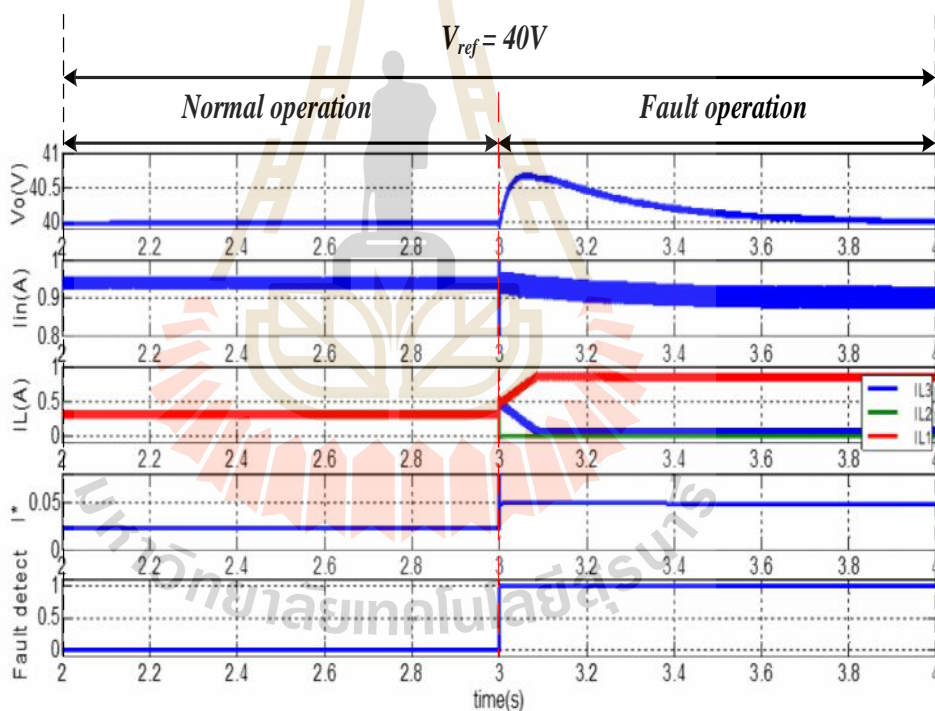
รูปที่ 5.36 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V



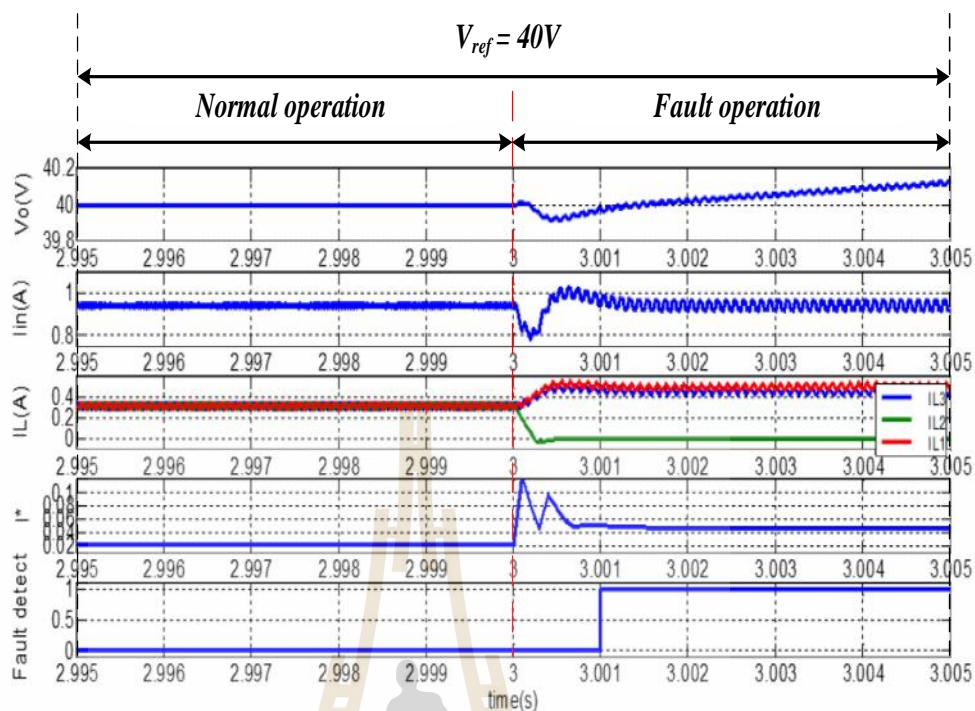
รูปที่ 5.37 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$

จากรูปที่ 5.36 และรูปที่ 5.37 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟท์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะลู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.37 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการ

กระแสของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 40\text{ V}$ คือ 0.033 A ซึ่งจากรูปที่ 5.37 เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.033 A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์แบบสามขั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามขั้นกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40\text{ V}$ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.38 ถึงรูปที่ 5.39



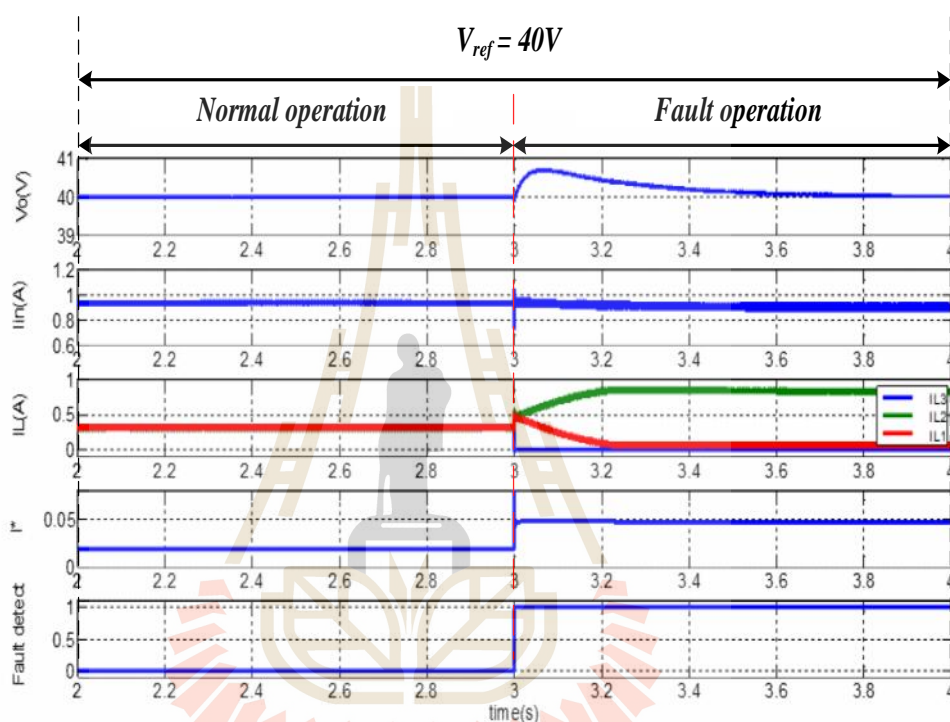
รูปที่ 5.38 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40\text{ V}$



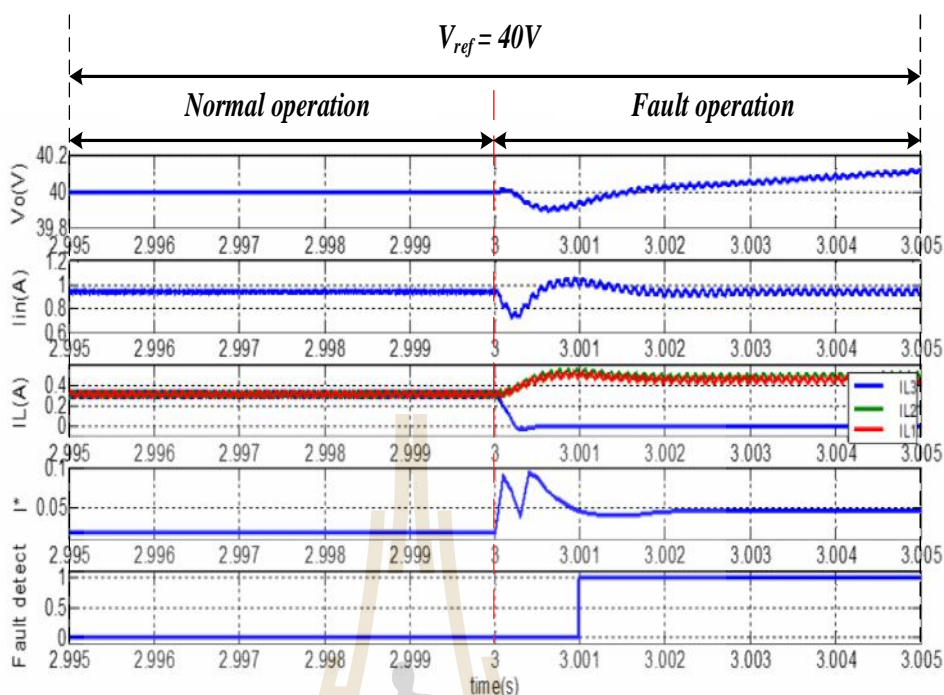
รูปที่ 5.39 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40\text{ V}$

จากรูปที่ 5.38 และรูปที่ 5.39 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} มีลักษณะลู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.39 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจร

แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สฟลูตต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที เช่นเดียวกับกรณีที่เกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_7 ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สฟลูตต์สามชั้นกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40$ V สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.40 ถึงรูปที่ 5.41



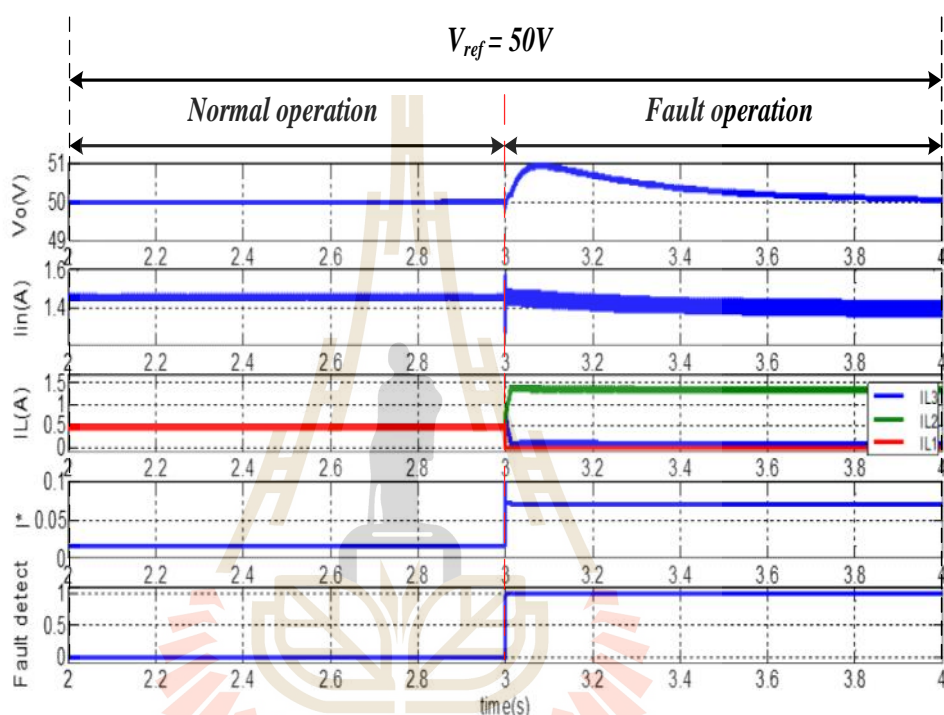
รูปที่ 5.40 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40$ V



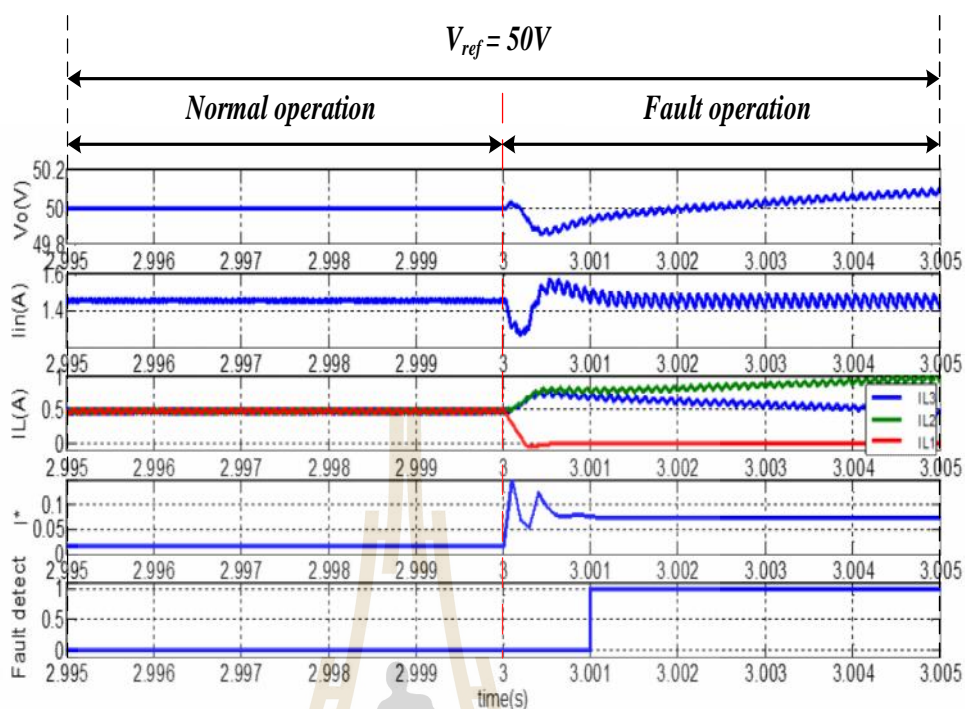
รูปที่ 5.41 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$

จากรูปที่ 5.40 และรูปที่ 5.41 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} มีลักษณะคู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.41 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจร

แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที เช่นเดียวกับกรณีที่เกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 และ S_2 ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50$ V สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.42 ถึงรูปที่ 5.43



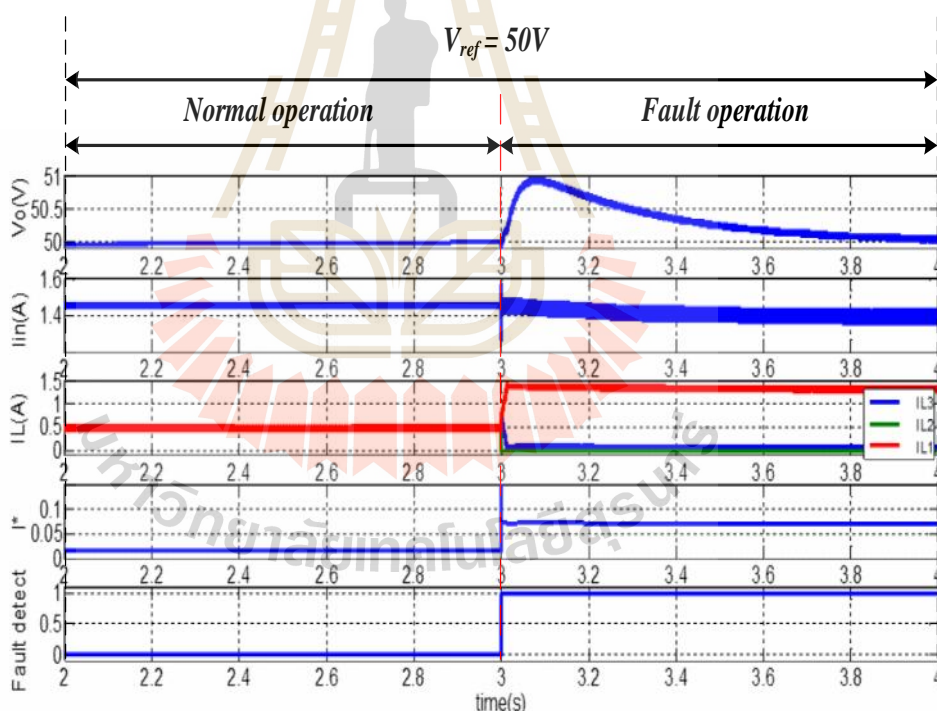
รูปที่ 5.42 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V



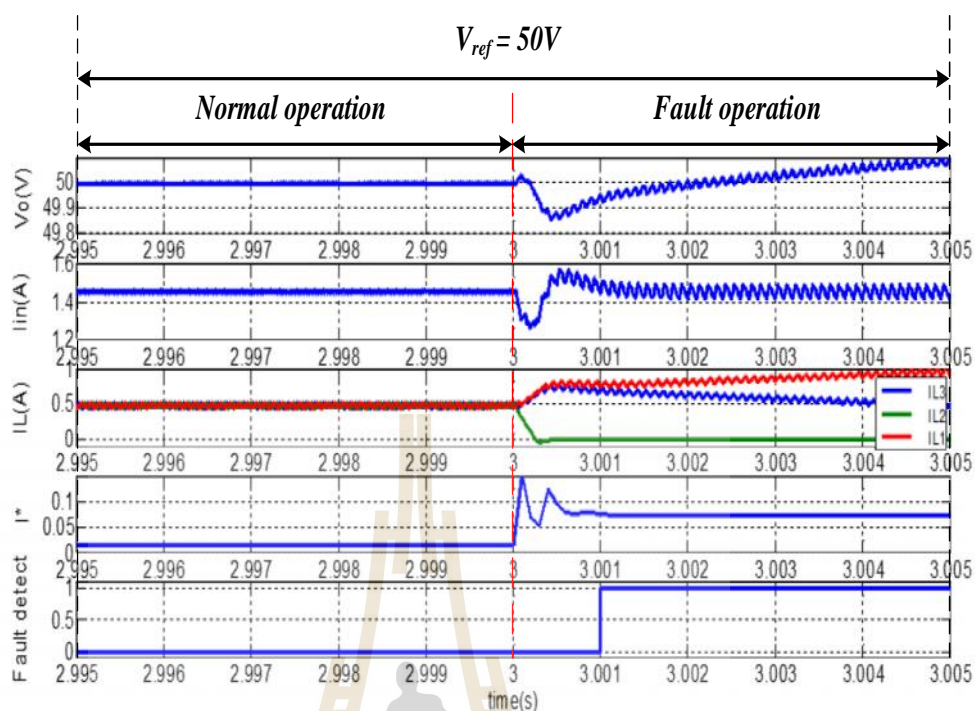
รูปที่ 5.43 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50\text{ V}$

จากรูปที่ 5.42 และรูปที่ 5.43 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะลู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (i^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.15A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.05A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.43 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (i_{ref}^*)

เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) โดยถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I^*_{ref}$) กรณี $V_{ref} = 50\text{ V}$ คือ 0.036 A ซึ่งจากรูปที่ 5.43 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) มีค่ามากกว่า 0.036 A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟนุสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟนุสต์สามชั้น กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50\text{ V}$ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.44 ถึงรูปที่ 5.45



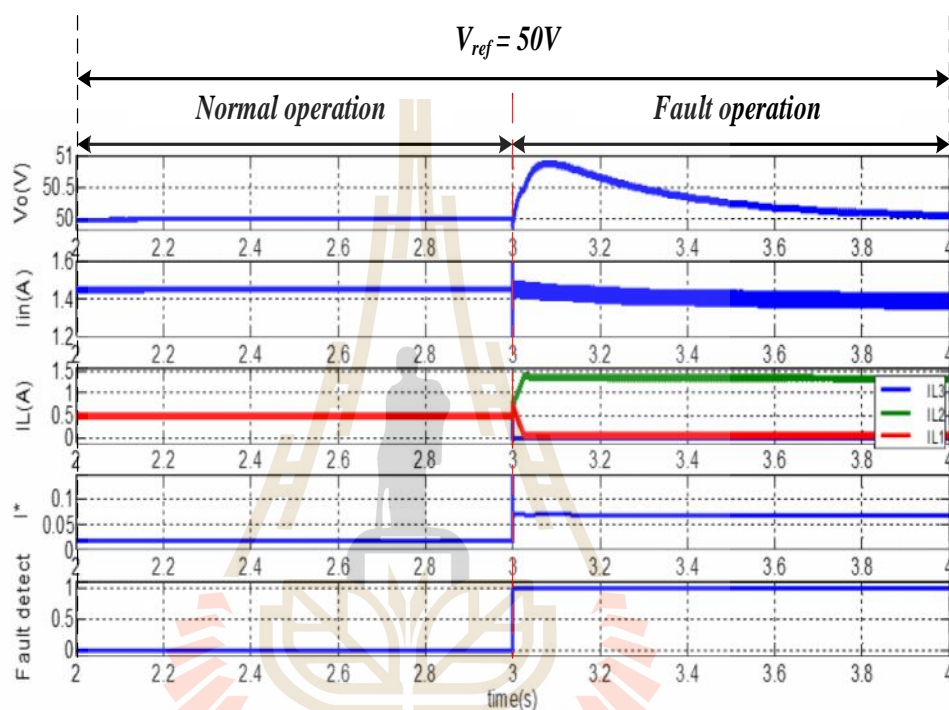
รูปที่ 5.44 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50\text{ V}$



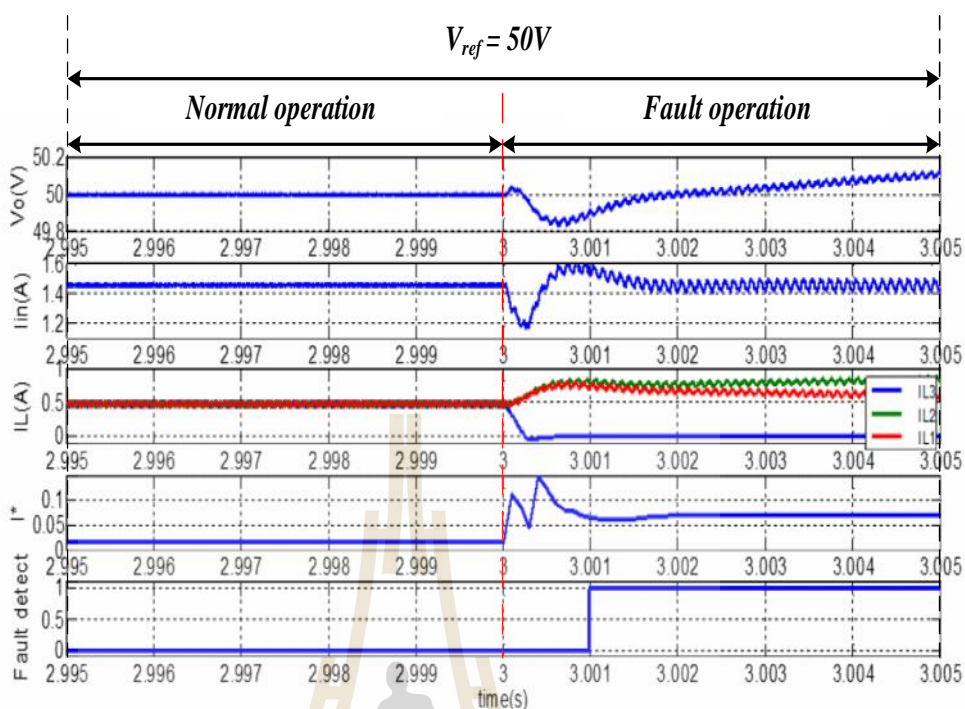
รูปที่ 5.45 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V

จากรูปที่ 5.44 และรูปที่ 5.45 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} มีลักษณะคู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.15A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.05A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงได้ในรูปที่ 5.45 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร

ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟูลบรู๊ตแบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง โดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟูลบรู๊ตสามชั้นกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50$ V สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.46 ถึงรูปที่ 5.47



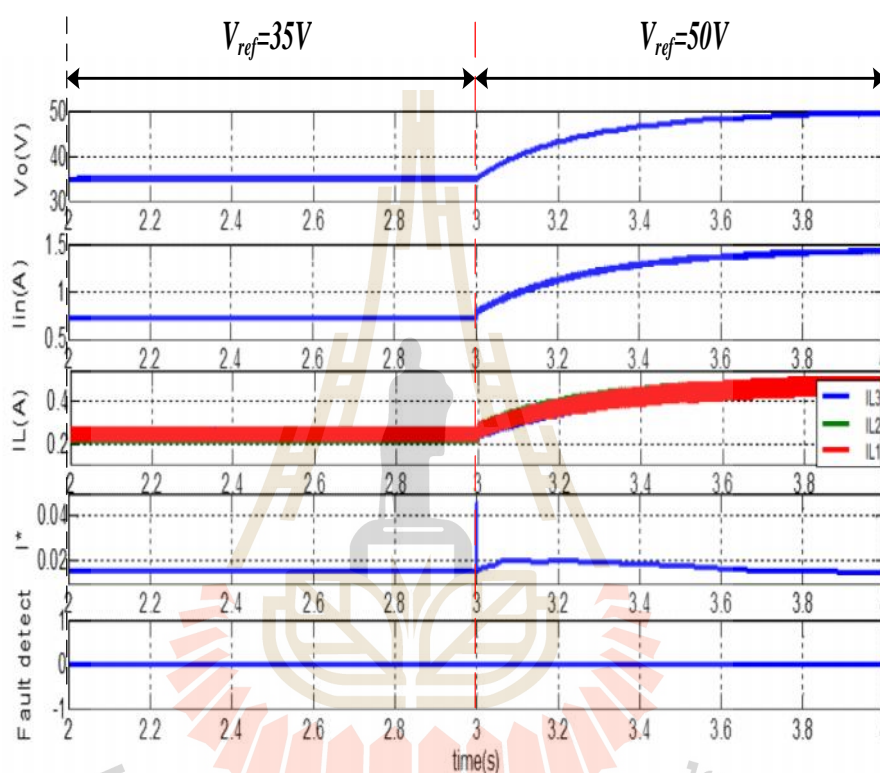
รูปที่ 5.46 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V



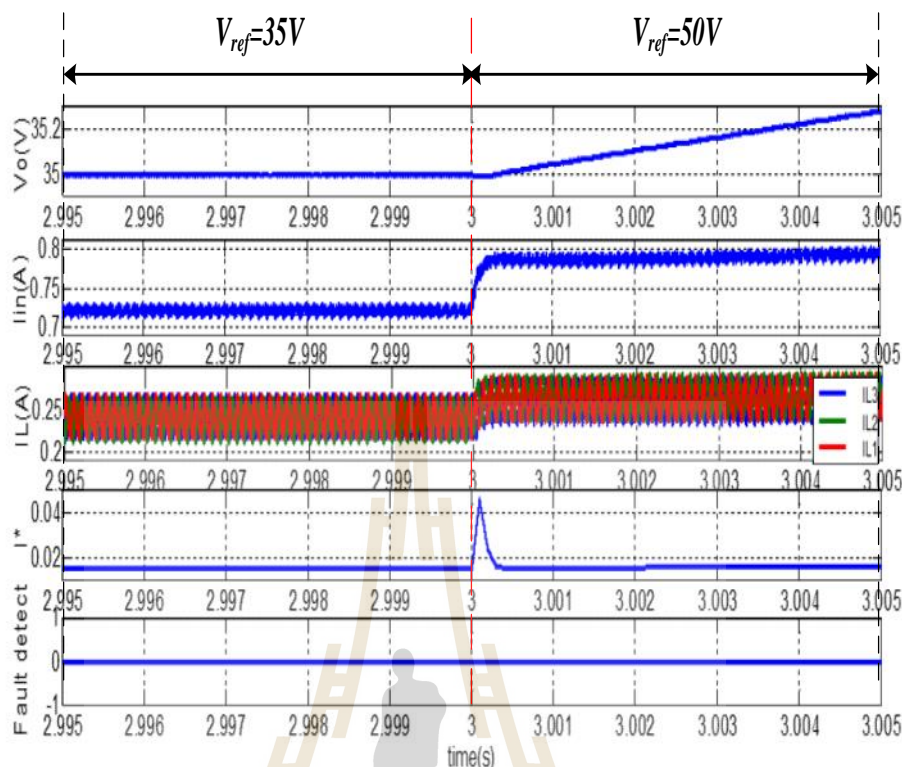
รูปที่ 5.47 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50$ V

จากรูปที่ 5.46 และรูปที่ 5.47 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_n = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} มีลักษณะลู่ออกจากกัน จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.15A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.05A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงได้ในรูปที่ 5.47 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจร

แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที เช่นเดียวกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 และ S_2 ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิปูสต์สามชั้นกรณีมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงพุดอ้างอิงแบบทันทีทันใดจาก $V_{ref} = 35V$ เป็น $50V$ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.48 ถึงรูปที่ 5.49



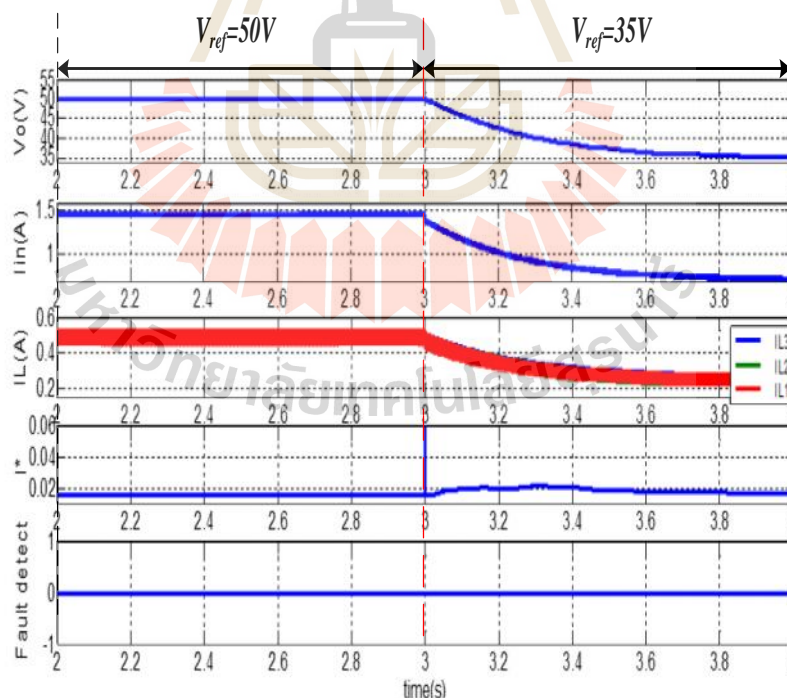
รูปที่ 5.48 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35V$ เป็น $50V$ ที่เวลา 3 วินาที



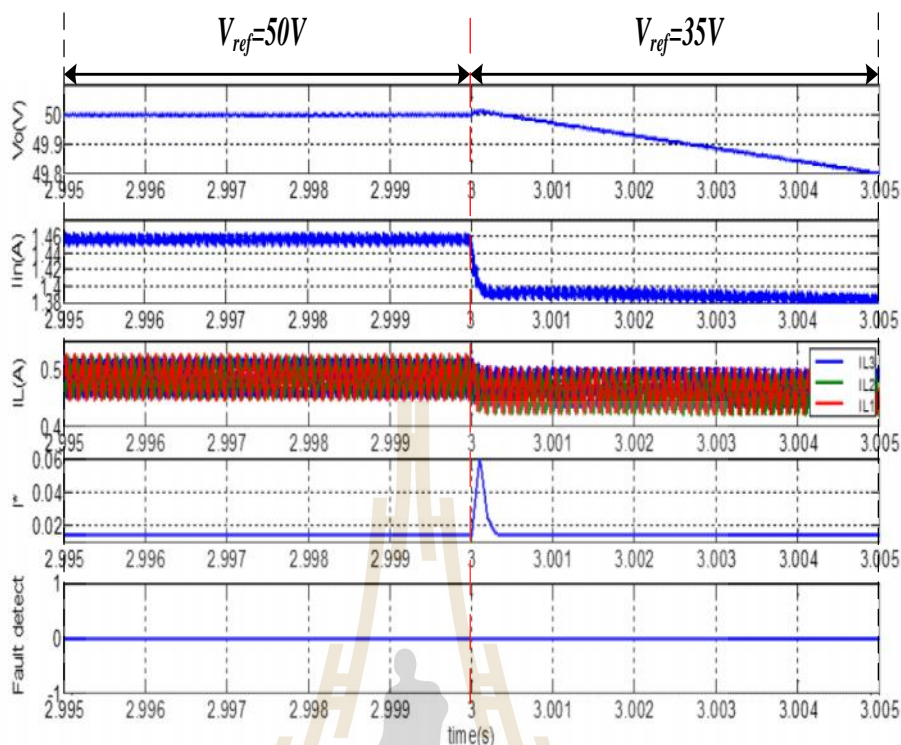
รูปที่ 5.49 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35V$ เป็น $50V$ ที่เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.48 และรูปที่ 5.49 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35V$ เป็น $50V$ ที่เวลา 3 วินาที โดยสถานะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 35V กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.72A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.24A และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35V$ เป็น $50V$ ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V กระแสอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.48A ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้น ทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018A แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.45A แล้วมีการลดลงแล้วคงที่ประมาณ 0.018A ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.49 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแส

อินพุตในสภาวะปกติ(I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 35\text{ V}$ คือ 0.027 A ซึ่งจากรูปที่ 5.49 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 35\text{ V}$ เป็น 50 V ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.027 A ประมาณ 0.0003 วินาทีหรือประมาณ 3 คาบเวลาเท่านั้น ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามขั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามขั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นกรณีมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50\text{ V}$ เป็น 35 V แสดงได้ดังรูปที่ 4.50 ถึงรูปที่ 4.51



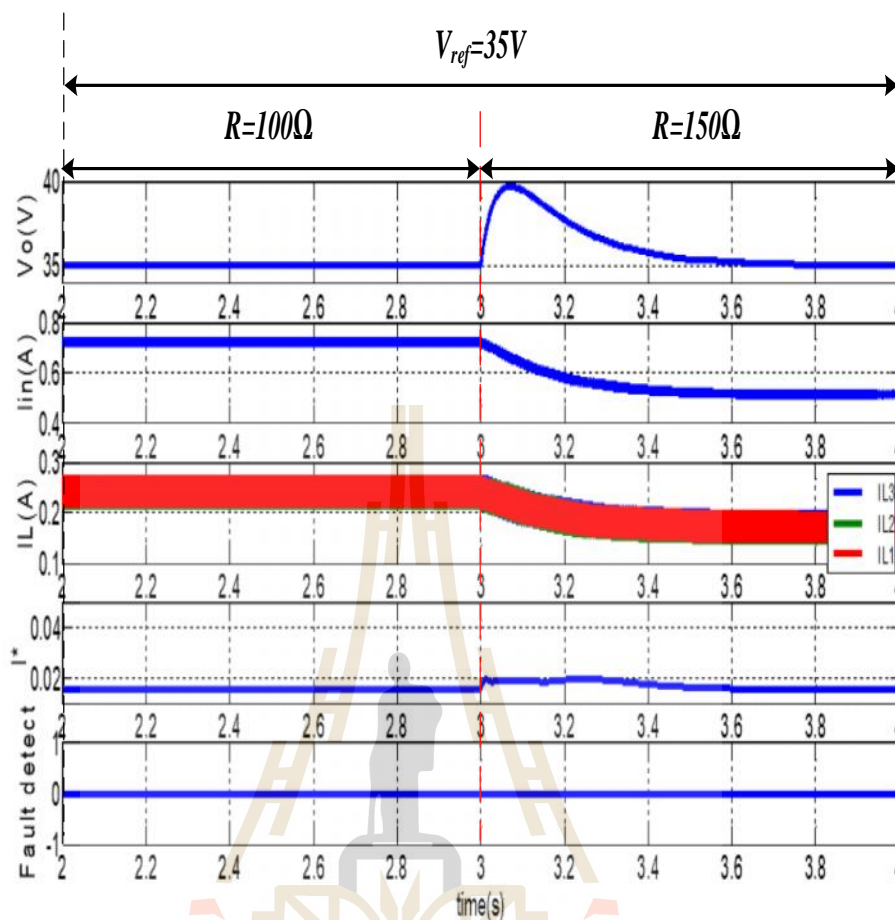
รูปที่ 5.50 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50\text{ V}$ เป็น 35 V ที่เวลา 3 วินาที



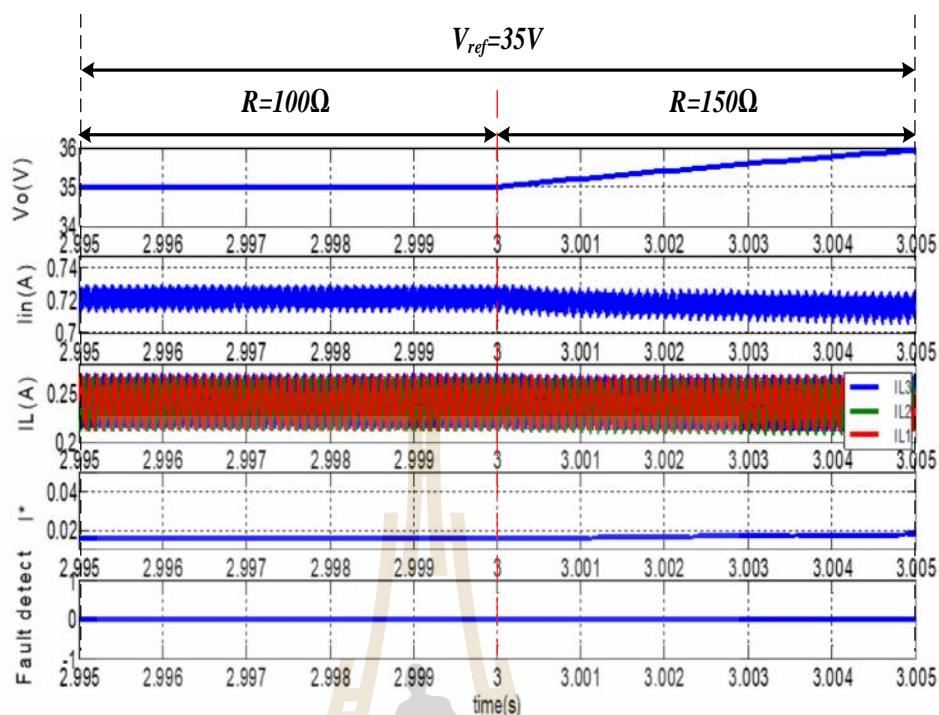
รูปที่ 5.51 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50V$ เป็น $35V$ ที่เวลา 3 วินาที

จากรูปที่ 5.50 และรูปที่ 5.51 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามขั้นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50V$ เป็น $35V$ ที่เวลา 3 วินาที โดยสถานะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ $50V$ กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ $1.45A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ $0.48A$ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50V$ เป็น $35V$ ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ $35V$ กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.72A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ $0.24A$ ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ $0.018A$ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ $0.06A$ แล้วมีการลดลงแล้วคงที่ประมาณ $0.018A$ ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.51 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะ

ปกติ(I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจาก สวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแส อินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 50\text{ V}$ คือ 0.0036 A ซึ่งจากรูปที่ 5.51 เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก $V_{ref} = 50\text{ V}$ เป็น 35 V ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต หลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง($I_{ปัจจุบัน}^*$)มีค่ามากกว่า 0.036 A ประมาณ 0.0003 วินาทีหรือประมาณ 3 คาบเวลาเท่านั้น ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับ ความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบ สามขั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามขั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร ต่อไปเป็นการตรวจสอบความ ถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นกรณีมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวต้านทานที่เป็นโหลด จาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35\text{ V}$, 40 V และ 50 V ตามลำดับ โดยการตรวจสอบ ความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นกรณีมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวต้านทานที่เป็น โหลด จาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35\text{ V}$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.52 ถึงรูปที่ 5.53



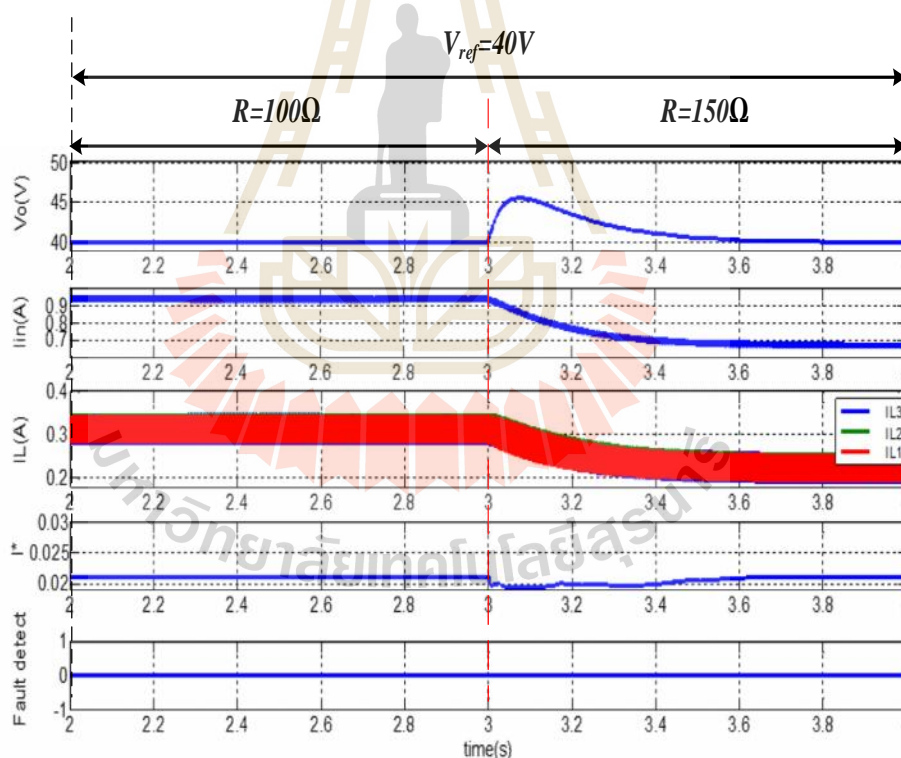
รูปที่ 5.52 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$



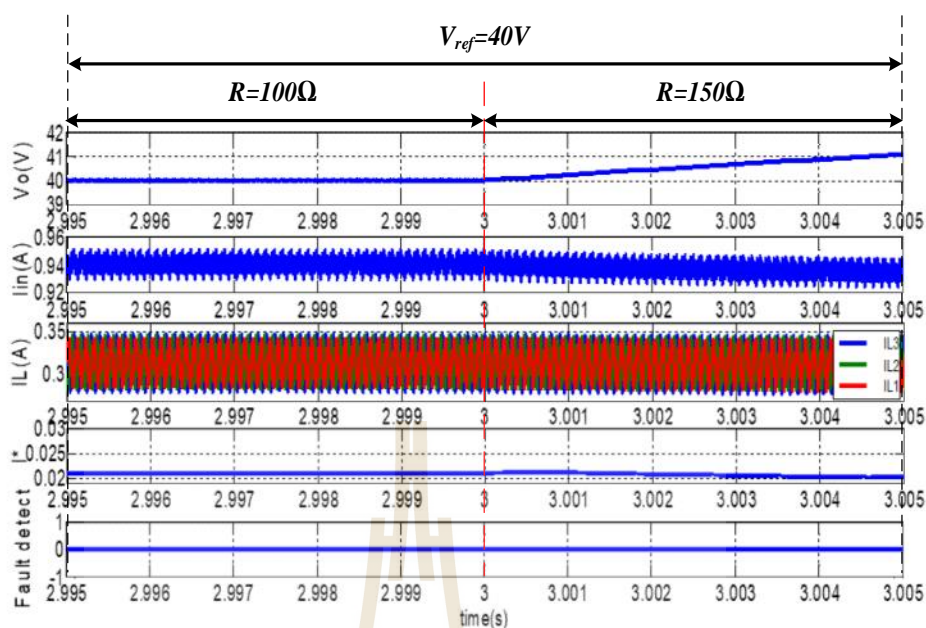
รูปที่ 5.53 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$

จากรูปที่ 5.52 และรูปที่ 5.53 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตีสตีฟฮาร์ดสามชั้นมีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$ โดยสถานะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 35V กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.72A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.24A และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงจากนั้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.71A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.24A ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018A แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ประมาณ 0.019A ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.53 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะเกิด

ความผิดพลาด ($I^*_{ปัจจุบัน}$) โดยถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I^*_{ref}$) กรณี $V_{ref} = 35$ V คือ 0.027 A ซึ่งจากรูปที่ 5.53 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35$ V ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ($I^*_{ปัจจุบัน}$) มีค่าน้อยกว่า 0.036 A ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามขั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามขั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40$ V แสดงได้ดังรูปที่ 5.54 และรูปที่ 5.55



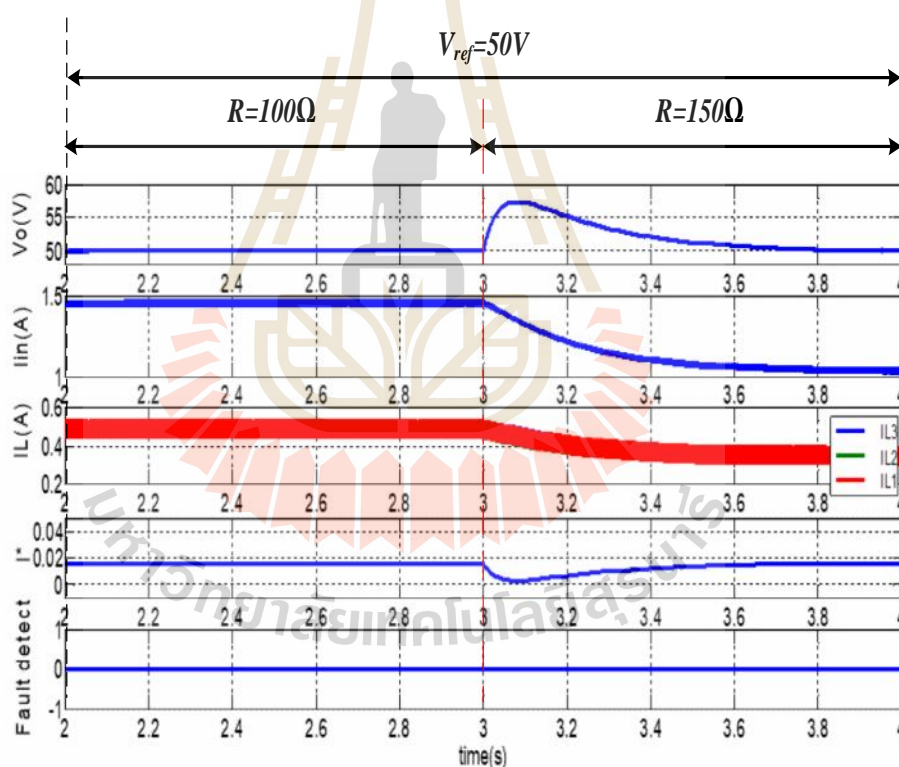
รูปที่ 5.54 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40$ V



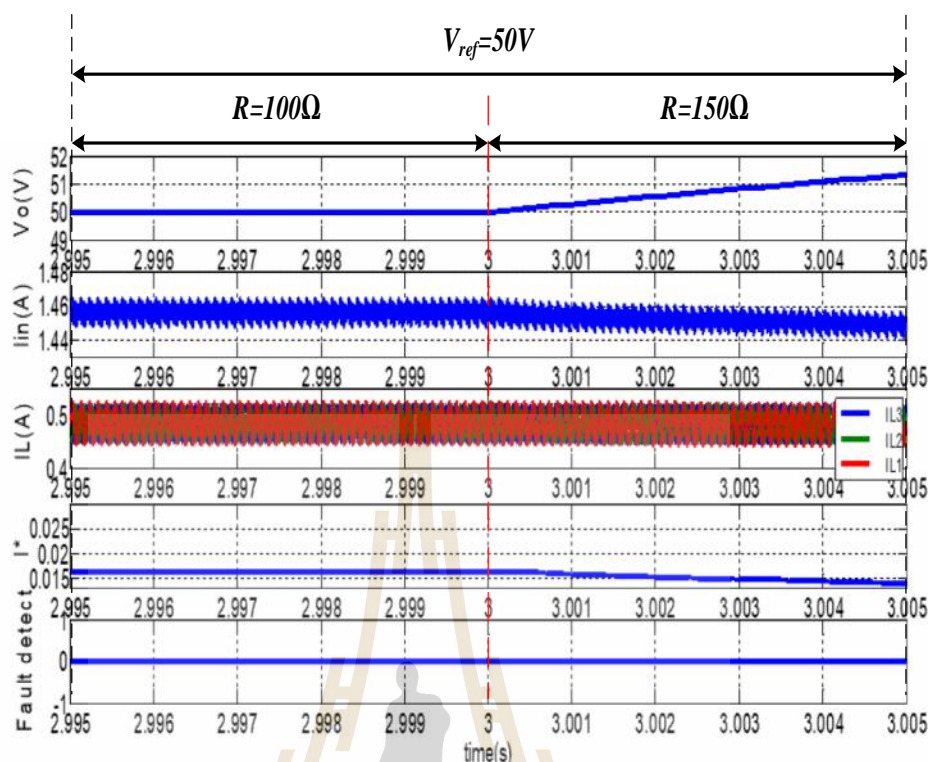
รูปที่ 5.55 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$

จากรูปที่ 5.54 และรูปที่ 5.55 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามชั้นมีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$ โดยสถานะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 40V กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.94A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.313A และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงจากนั้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.93A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.31A ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022A แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ประมาณ 0.02A ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.55 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิด

ความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 35\text{ V}$ คือ 0.033 A ซึ่งจากรูปที่ 5.55 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40\text{ V}$ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่าน้อยกว่า 0.033 A ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟเวสต์แบบสามชั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟเวสต์แบบสามชั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50\text{ V}$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.56 และรูปที่ 5.57



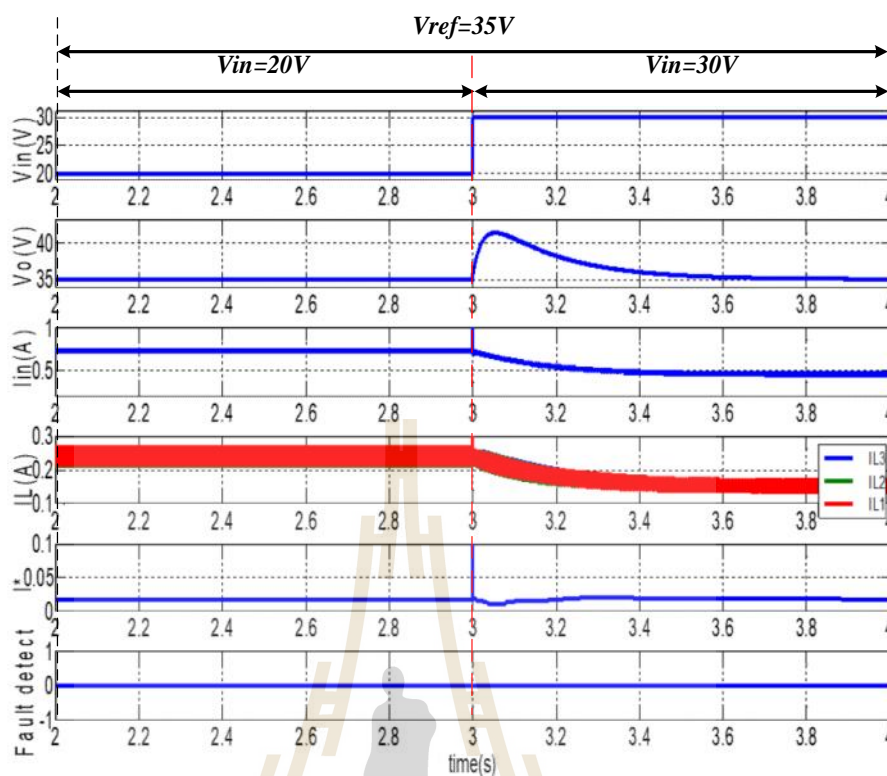
รูปที่ 5.56 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50\text{ V}$



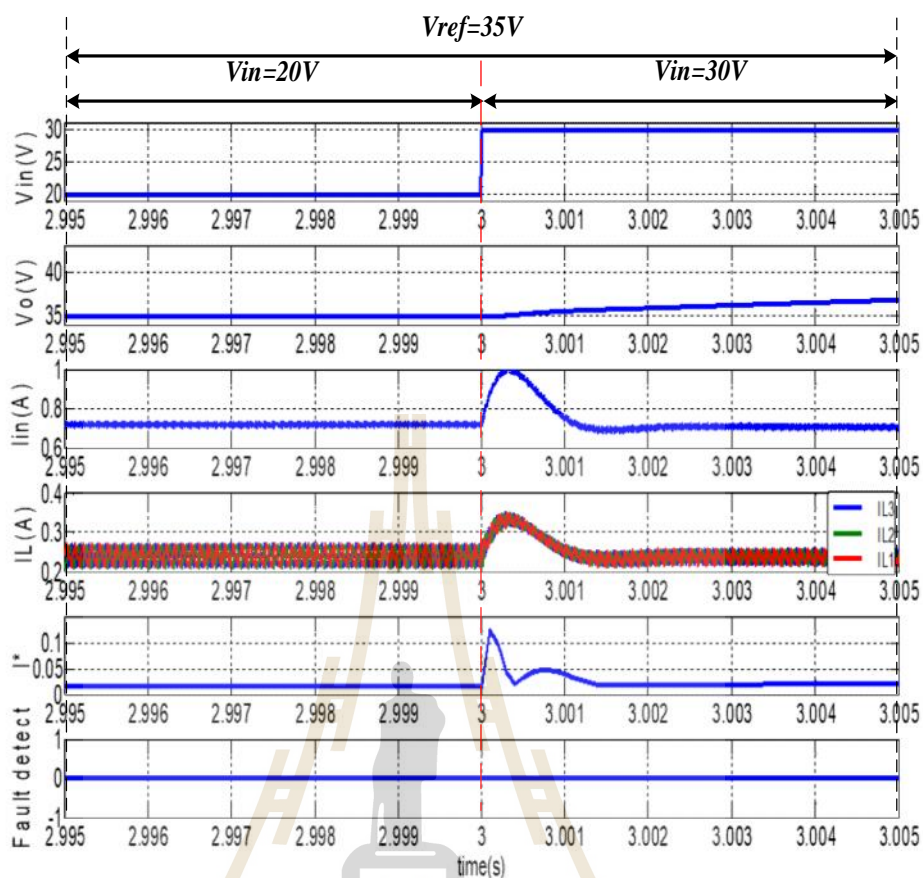
รูปที่ 5.57 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$

จากรูปที่ 5.56 และรูปที่ 5.57 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นมีเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$ โดยสถานะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 50V กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 1.45A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.48A และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงจากนั้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.445A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.481A ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต(i^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.017A แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ประมาณ 0.015A ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.57 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแส

อินพุตในสภาวะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 50\text{ V}$ คือ 0.036 A ซึ่งจากรูปที่ 5.57 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจาก $R = 100$ เป็น 150 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50\text{ V}$ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่าน้อยกว่า 0.036 A ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามขั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามขั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามขั้นกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20\text{ V}$ เป็น 30 V ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35\text{ V}, 40\text{ V}$ และ 50 V ตามลำดับ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามขั้นกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20\text{ V}$ เป็น 30 V ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35\text{ V}$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.58 ถึงรูปที่ 5.59



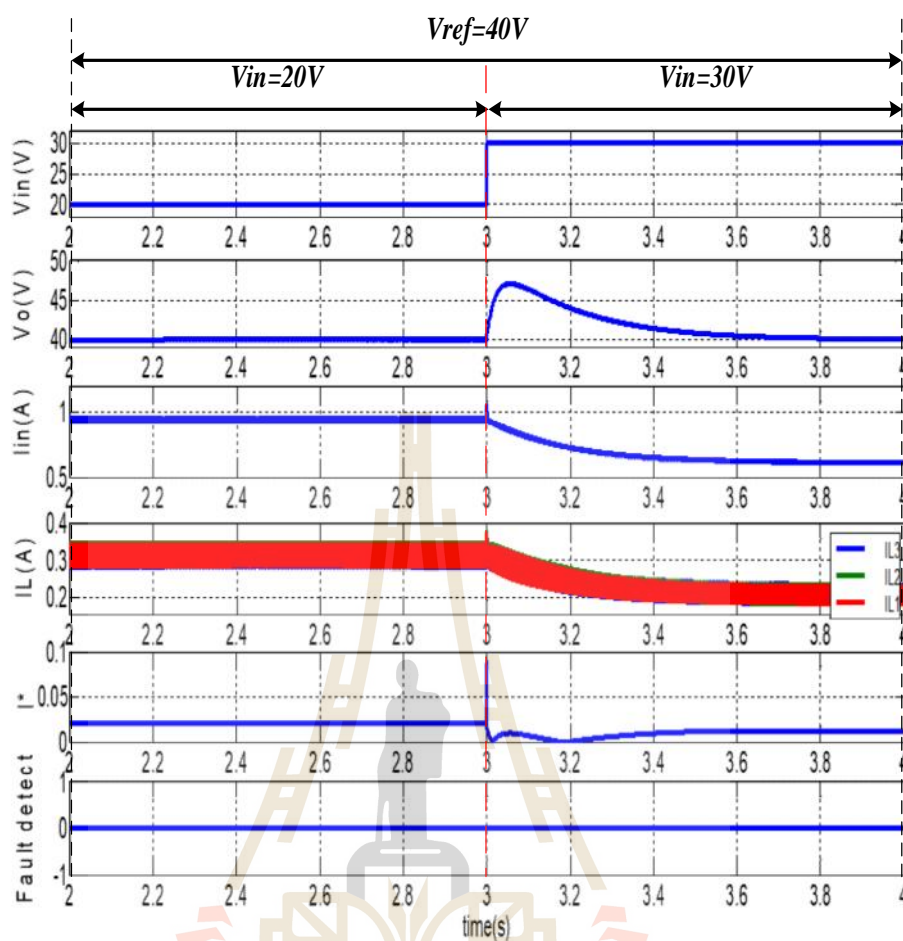
รูปที่ 5.58 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35V$



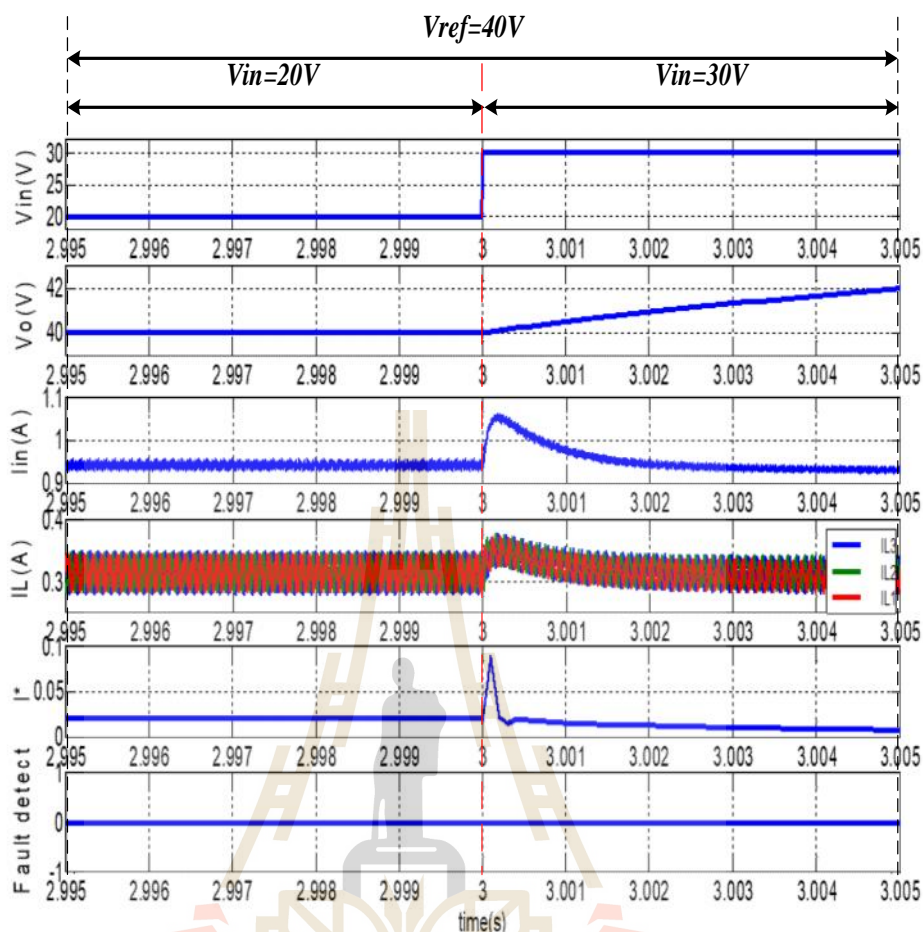
รูปที่ 5.59 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35V$

จากรูปที่ 5.58 และรูปที่ 5.59 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35V$ โดยสภาวะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 35V กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.72A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.24A และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 35V$ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลง จากนั้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.5A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ 0.167A ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018A แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่า

เพิ่มขึ้นประมาณ 0.15A จากนั้นจะลดลงเหลือประมาณ 0.018A และเพิ่มขึ้นแล้วลดลงอีกแล้วคงที่ประมาณ 0.019A ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.61 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 35V$ คือ 0.027A ซึ่งจากรูปที่ 5.59 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.027A ประมาณ 0.0003 วินาที คิดเป็น 3 คาบเวลา จากนั้นค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะลดลงต่ำกว่า 0.027A ทำให้การนับค่า $I_{ปัจจุบัน}^*$ ที่มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ที่อยู่ในขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ นั้นทำการรีเซ็ตนับใหม่ ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามขั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามขั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามขั้นกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.60 ถึงรูปที่ 5.61



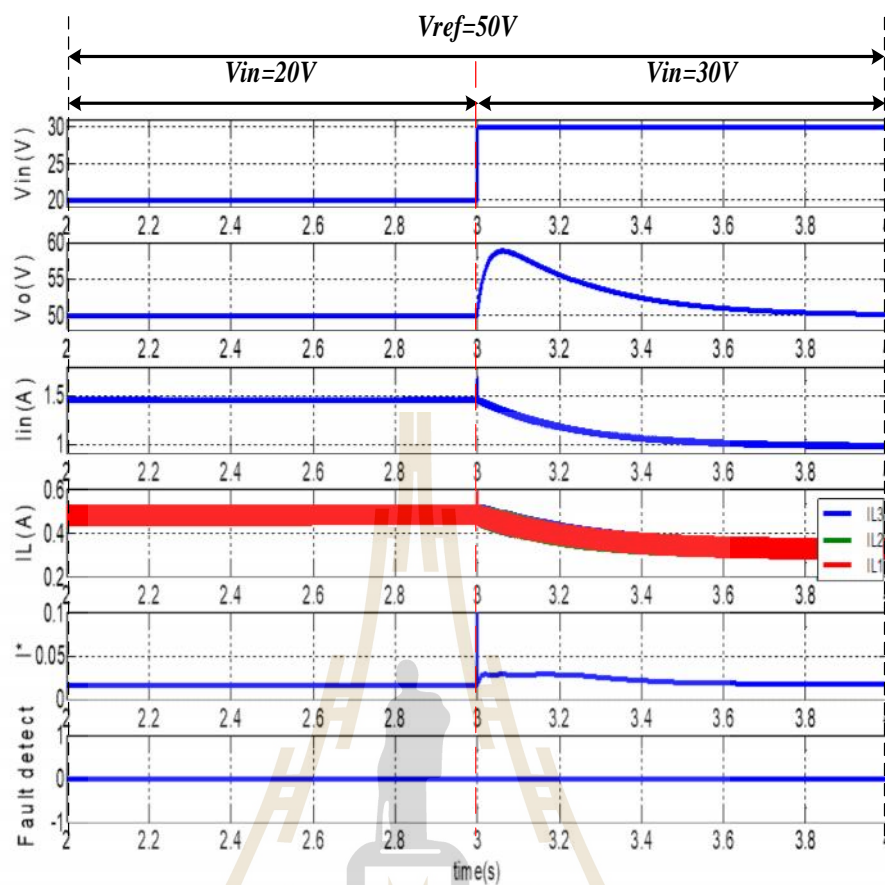
รูปที่ 5.60 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$



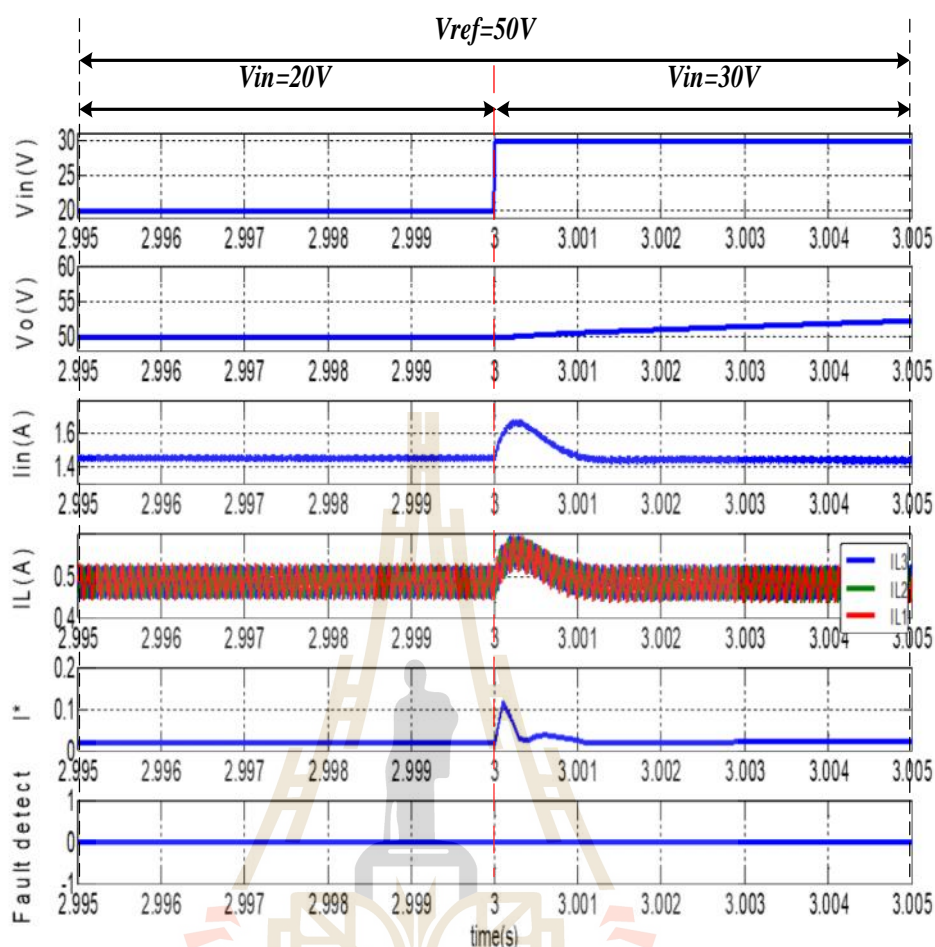
รูปที่ 5.61 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$

จากรูปที่ 5.60 และรูปที่ 5.61 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$ โดยสภาวะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ $40V$ กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ $0.94A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ $0.313A$ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 40V$ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงจากนั้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $40V$ กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $0.6A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ $0.2A$ ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดย

ในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022A แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.08A จากนั้นจะลดลงเหลือประมาณ 0.02A และลดลงอีกแล้วคงที่ประมาณ 0.012A ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.61 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 40V$ คือ 0.033A ซึ่งจากรูปที่ 5.61 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าโวลต์ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.033A ประมาณ 0.0002 วินาที คิดเป็น 2 คาบเวลา จากนั้นค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะลดลงต่ำกว่า 0.033A ทำให้การนับค่า $I_{ปัจจุบัน}^*$ ที่มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ที่อยู่ในขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกตินั้นทำการเริ่มนับใหม่ ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามชั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามชั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร ต่อไปเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามชั้นกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.62 ถึงรูปที่ 5.63



รูปที่ 5.62 การตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50V$



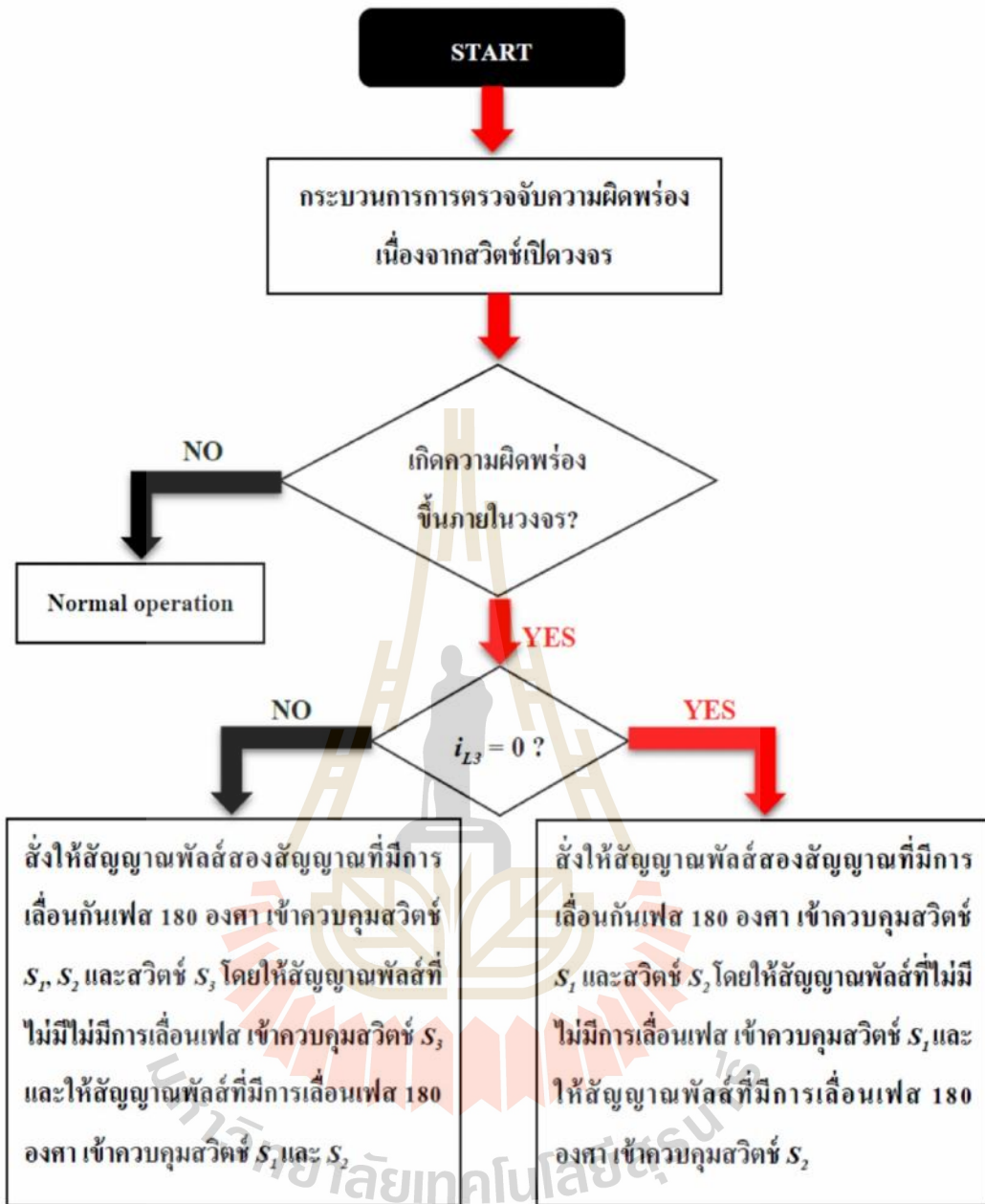
รูปที่ 5.63 ภาพขยายการตรวจสอบความถูกต้องกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50V$

จากรูปที่ 5.62 และรูปที่ 5.63 จะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50V$ โดยสถานะปกติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ $50V$ กระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ $1.45A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ $0.48A$ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น $30V$ ที่เวลา 3 วินาที $V_{ref} = 50V$ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงจากนั้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ $50V$ กระแสอินพุตมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ $1A$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีขนาดเท่ากันประมาณ $0.33A$ ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต(i^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย โดยใน

สภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024A แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.1A จากนั้นจะลดลงเหลือประมาณ 0.024A และเพิ่มขึ้นแล้วลดลงอีกแล้วคงที่ประมาณ 0.024A ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.63 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 50V$ คือ 0.036A ซึ่งจากรูปที่ 5.63 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $V_{in} = 20V$ เป็น 30V ที่เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหนด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.036A ประมาณ 0.0003 วินาที คิดเป็น 3 คาบเวลา จากนั้นค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะลดลงต่ำกว่า 0.036A ทำให้การนับค่า $I_{ปัจจุบัน}^*$ ที่มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ที่อยู่ในขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ นั้นทำการรีเซ็ตนับใหม่ ซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามชั้นที่ได้กำหนดไว้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามชั้น ไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นในวงจร และจากผลการจำลองสถานการณ์การตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นกรณีทำงานภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น เพิ่มแรงดันอินพุต เพิ่มแรงดันด้านเอาต์พุต ลดแรงดันด้านเอาต์พุต เพิ่มค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่ใช้เป็นโหนด รวมถึงกรณีที่เกิดความผิดปกติแบบเปิดความจรรยาในขณะทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง สามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 0.001 วินาที หลังจากที่สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในวงจรได้อย่างแม่นยำแล้ว ต่อไปจะเป็นการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์แบบสามชั้นในสภาวะที่เกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร เพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้แม้ในอยู่ภายใต้สภาวะที่เกิดความผิดปกติ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

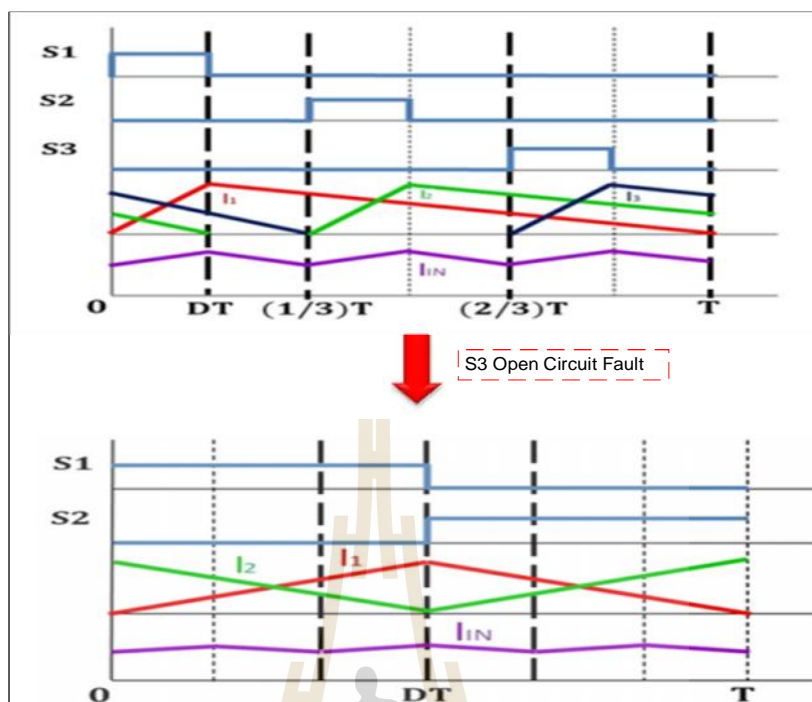
5.5 การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น ในสถานะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร

จากนิยามของความคงทนต่อความผิดพลาด คือ ความสามารถของระบบที่จะทำงานต่อไปได้ ในสถานะที่มีความเสียหายเกิดขึ้นและจากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสถานะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้น เมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นในวงจร จะเหลือเพียงสวิตช์สองตัวเท่านั้นที่ทำงานต่อไปได้ ส่งผลให้กลายเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สองชั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่เหลืออย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ และไม่เกิดการกระเพื่อมของกระแสและแรงดันที่สูง ดังนั้นในสถานะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น กระบวนการควบคุมจะถูกปรับปรุงให้เหมาะสม โดยตัวควบคุมชนิดพีไอจะทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสซึ่งในกรณีนี้หลังจากที่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นตรวจจับได้ว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นภายในวงจร จะทำการตรวจสอบค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวใดตัวหนึ่งในวงจรเพื่อตรวจสอบว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ตัวใด จึงจะสามารถควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่เหลืออยู่ในวงจรให้ทำงานภายใต้สถานะเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรได้อย่างถูกต้อง โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้นภายใต้สถานะที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.64 และการปรับการเลื่อนเฟสสำหรับสวิตช์ที่เหลือแต่ละตัวจากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา ทั้งสามตัว ไปเป็น 180 องศา เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรเพื่อให้เกิดการหักล้างของการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตลดลง ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.65 จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด โครงสร้างการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นภายใต้สถานะปกติและสถานะความผิดพลาด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.66



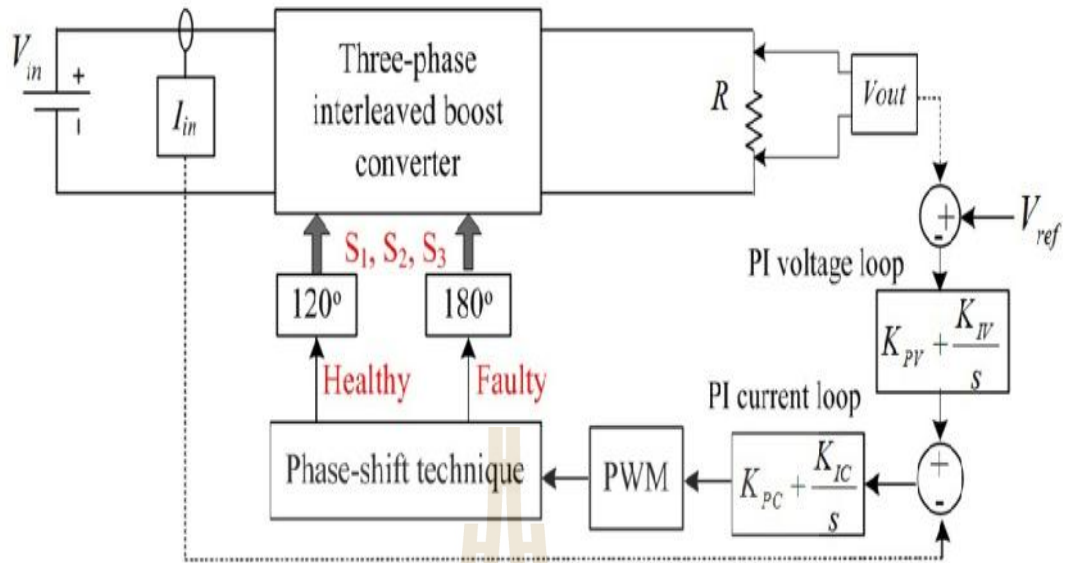
กรณีที่ 1 หลังจากกระบวนการการตรวจจับความผิดปกติพบว่า มีความผิดปกติเนื่องจาก สวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นภายในวงจรแล้ว จะเข้าสู่การตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ว่ามีค่าลดลงจนเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 ให้ทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจร ซึ่งก็คือ สวิตช์ S_1 และ สวิตช์ S_2 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_1 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_2 ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามขั้นไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไป

กรณีที่ 2 หลังจากกระบวนการการตรวจจับความผิดปกติพบว่า มีความผิดปกติเนื่องจาก สวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นภายในวงจรแล้ว จะเข้าสู่การตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ว่ามีค่าลดลงจนเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ไม่มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่ได้เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 แต่เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 หรือ S_2 ตัวใดตัวหนึ่ง ให้ทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งก็คือ สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_3 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_1 , S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งนั้น จะทำให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จึงสามารถทำได้ เนื่องจากจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวที่ยังคงสามารถทำงานควบคู่กับสวิตช์ S_3 ต่อไปได้ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์แบบสามขั้นไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไปเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 การเลื่อนเฟสสัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับควบคุมสวิตช์ที่เหลืออยู่ในวงจรแต่ละตัว จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา ทั้งสามตัว ไปเป็น 180 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.65

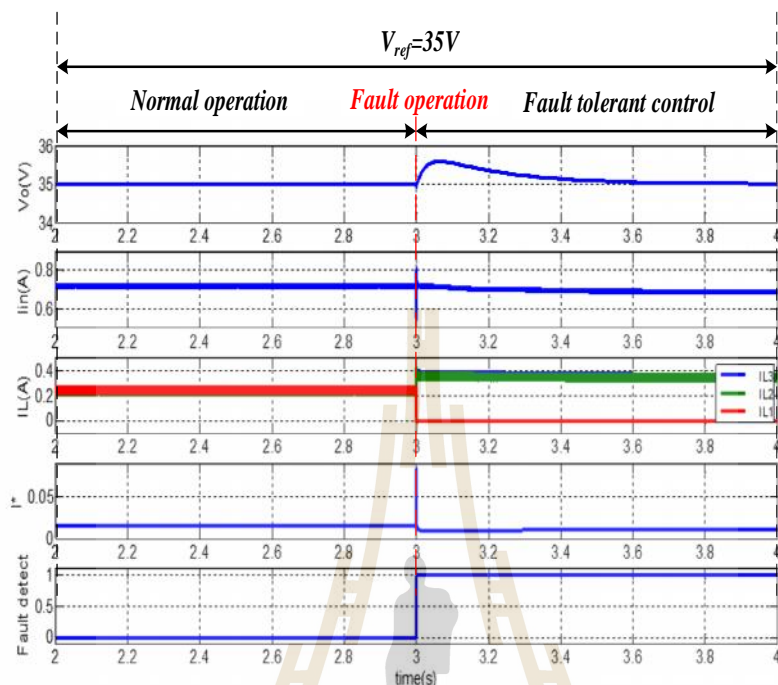


รูปที่ 5.65 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ในสถานะเกิดความผิดปกติ

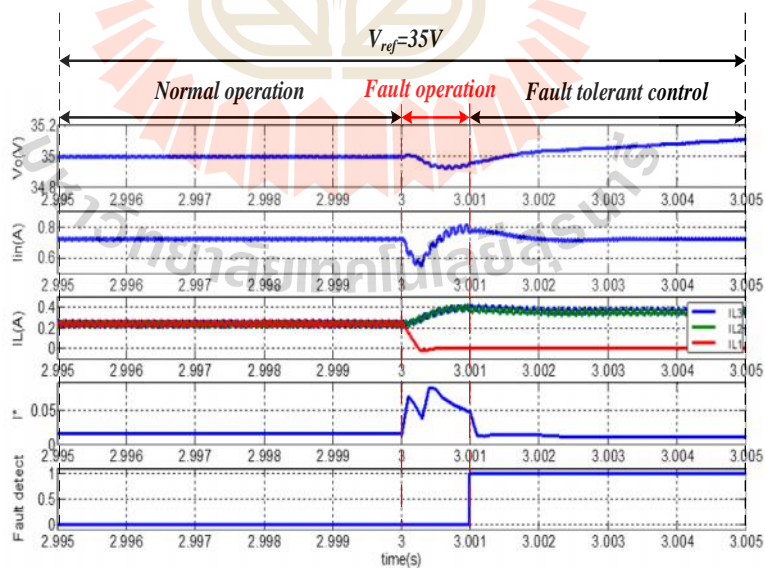
จากรูปที่ 5.65 จะเห็นได้ว่า ในสถานะปกติวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟิวส์สามชั้นนั้นจะควบคุมการทำงานของสวิตช์ด้วยสัญญาณพัลส์สามสัญญาณ ที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา ซึ่งจากโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟิวส์สามชั้น เมื่อมีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น จะทำให้เหลือสวิตช์เพียงสองตัวที่ยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟิวส์สองชั้น จึงต้องมีการปรับการควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่เหลืออยู่ให้เหมาะสม โดยเปลี่ยนจากการควบคุมการทำงานของสวิตช์ด้วยสัญญาณพัลส์สามสัญญาณ ที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็นการควบคุมการทำงานของสวิตช์ด้วยสัญญาณพัลส์สองสัญญาณ ที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เพื่อให้วงจรสามารถทำงานต่อไปได้แม้ในสถานะที่มีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น โดยโครงสร้างการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟิวส์สามชั้นภายใต้สภาวะปกติและสถานะที่เกิดความผิดปกติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.66



แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V, 40V$ และ $50V$ ตามลำดับ แสดงได้ในรูปที่ 5.67 ถึงรูปที่ 5.68



รูปที่ 5.67 การควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$

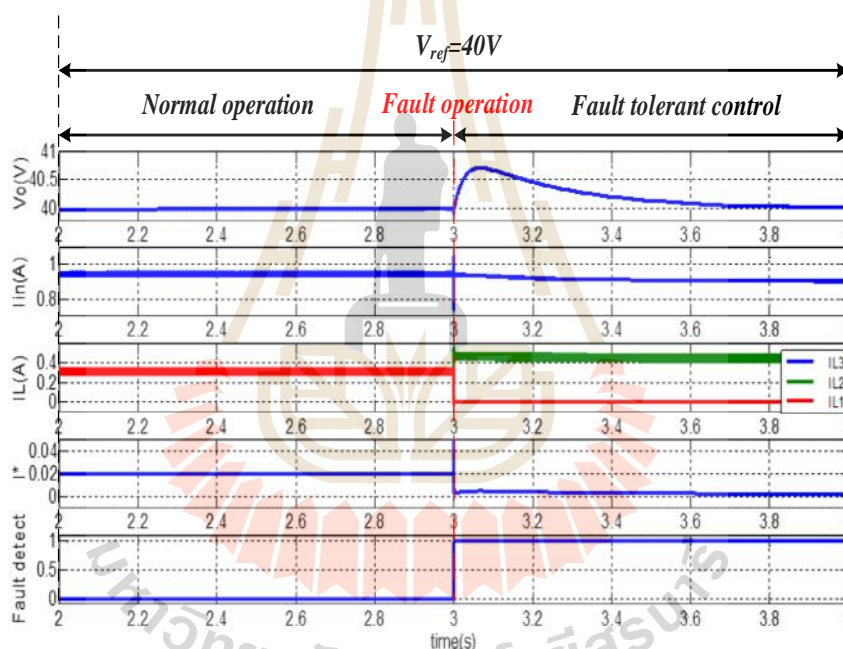


รูปที่ 5.68 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่

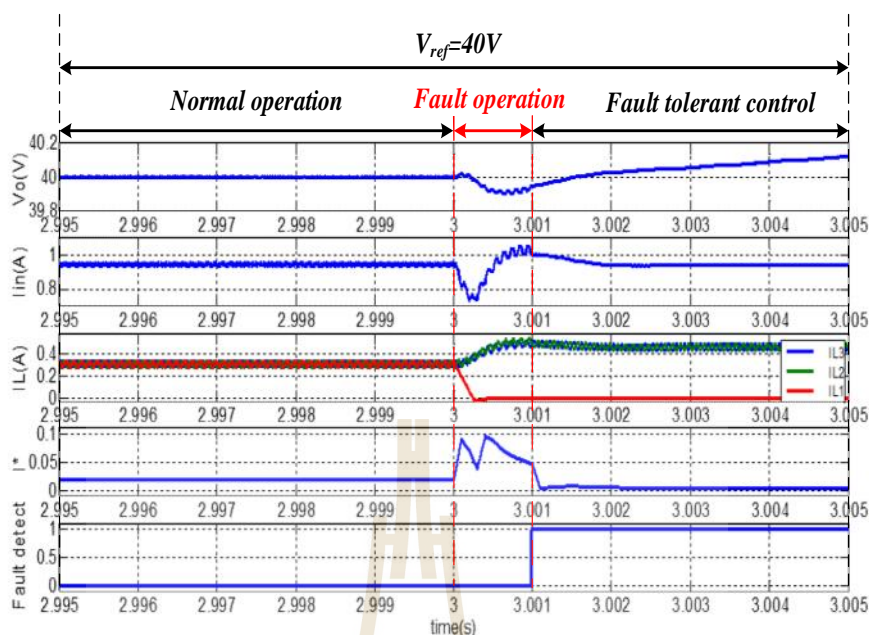
$$V_{ref} = 35V$$

จากรูปที่ 5.67 และรูปที่ 5.68 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระแสที่เพิ่มขึ้น กระแสอินพุตมีการกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A ซึ่งการกระแสที่เพิ่มขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.08A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงได้ในรูปที่ 5.68 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) โดยถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I^*_{ref}$) กรณี $V_{ref} = 35\text{ V}$ คือ 0.027A ซึ่งจากรูปที่ 5.68 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) มีค่ามากกว่า 0.027A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.68 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ไม่เป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่ได้เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 แต่เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 หรือ S_2 ตัวใดตัวหนึ่ง จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งก็คือสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_3 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 นั้น จะทำ

ให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จึงสามารถทำได้ เนื่องจากจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวที่ยังคงสามารถทำงานควบคู่กับสวิตช์ S_2 ต่อไปได้ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.36A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัด ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.69 และรูปที่ 5.70



รูปที่ 5.69 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$

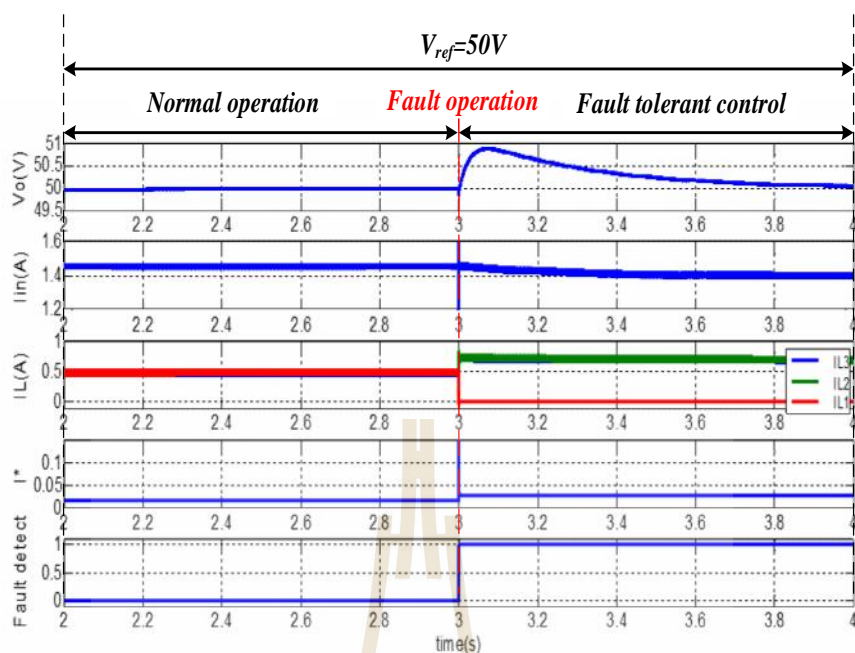


รูปที่ 5.70 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่

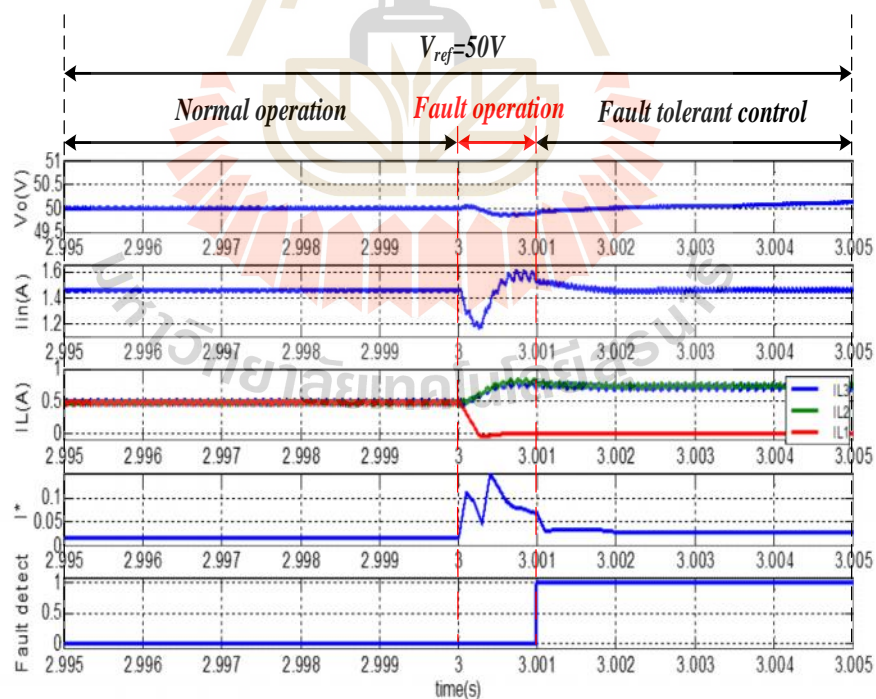
$$V_{ref} = 40V$$

จากรูปที่ 5.69 และรูปที่ 5.70 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามขั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (i^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.08A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงได้ในรูปที่ 5.70 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะปกติ (i^*_{ref}) เปรียบเทียบกับ

ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 40V$ คือ 0.033A ซึ่งจากรูปที่ 5.70 เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดพลาด ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.033A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.70 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ไม่เป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่ได้เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 แต่เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 หรือ S_2 ตัวใดตัวหนึ่ง จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งก็คือสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_3 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่ง เข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดพลาดแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 นั้น จะทำให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดพลาดถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จึงสามารถทำได้ เนื่องจากจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวที่ยังคงสามารถทำงานควบคู่กับสวิตช์ S_3 ต่อไปได้ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.43A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35V$ ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์แบบสามชั้นในสภาวะเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.71 และรูปที่ 5.72



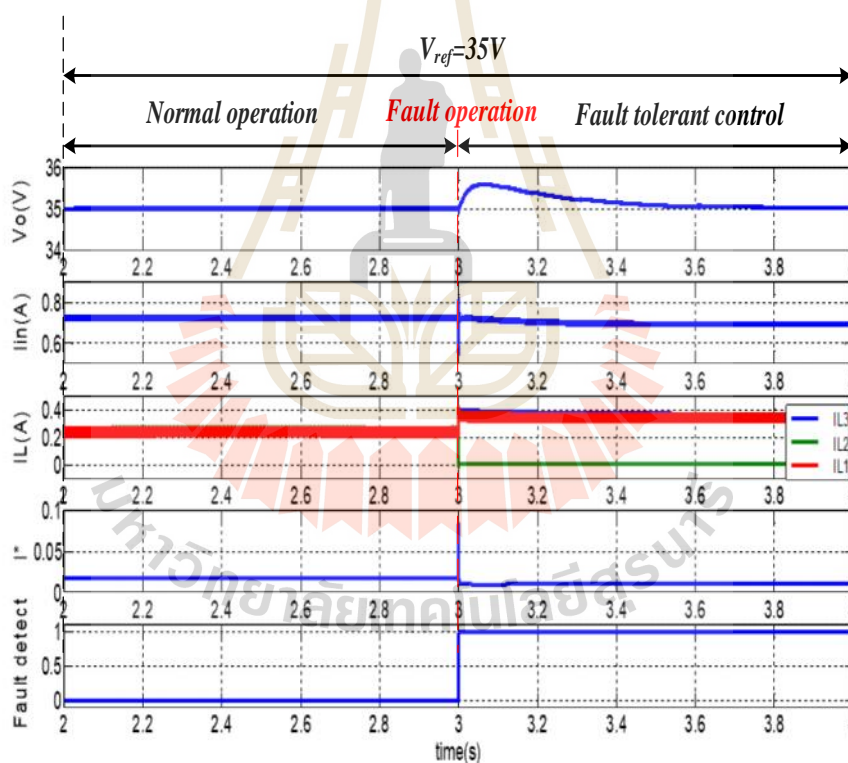
รูปที่ 5.71 การควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$



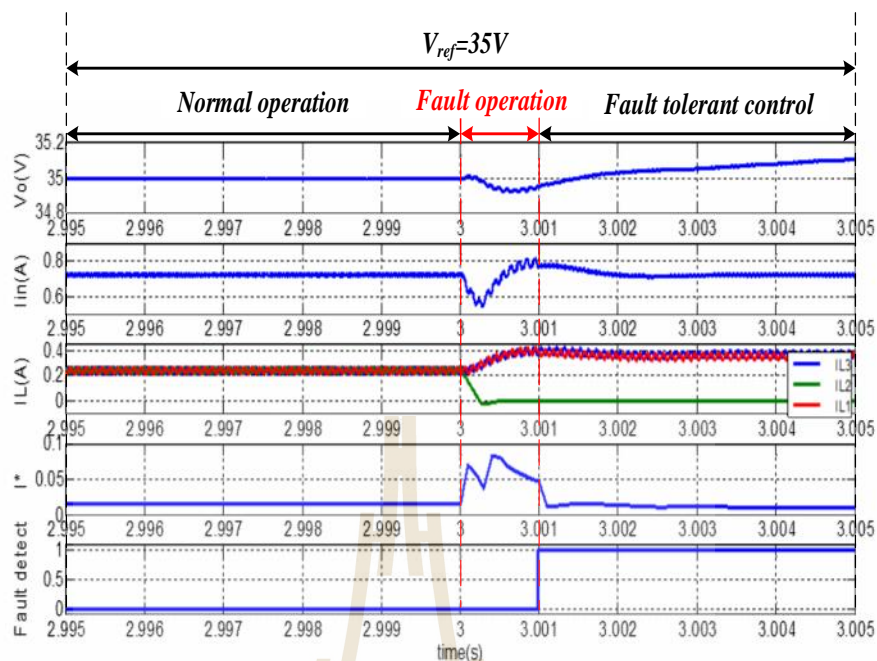
รูปที่ 5.72 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$

จากรูปที่ 5.71 และรูปที่ 5.72 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระแสที่เพิ่มขึ้น กระแสอินพุตมีการกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45A ซึ่งการกระแสที่เพิ่มขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ทำให้การหักล้างกันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} และตัวที่สาม i_{L3} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.05A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงได้ในรูปที่ 5.72 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) โดยถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I^*_{ref}$) กรณี $V_{ref} = 50V$ คือ 0.036A ซึ่งจากรูปที่ 5.72 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) มีค่ามากกว่า 0.036A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.72 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ไม่เป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่ได้เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 แต่เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 หรือ S_2 ตัวใดตัวหนึ่ง จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งก็คือสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_3 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 นั้น จะทำ

ให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จึงสามารถทำได้ เนื่องจากจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวที่ยังคงสามารถทำงานควบคู่กับสวิตช์ S_3 ต่อไปได้ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้นโดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.7A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35V$ และ กรณี $V_{ref} = 40V$ ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์สลิฟบูสต์สามขั้นในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.73 และรูปที่ 5.74



รูปที่ 5.73 การควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$

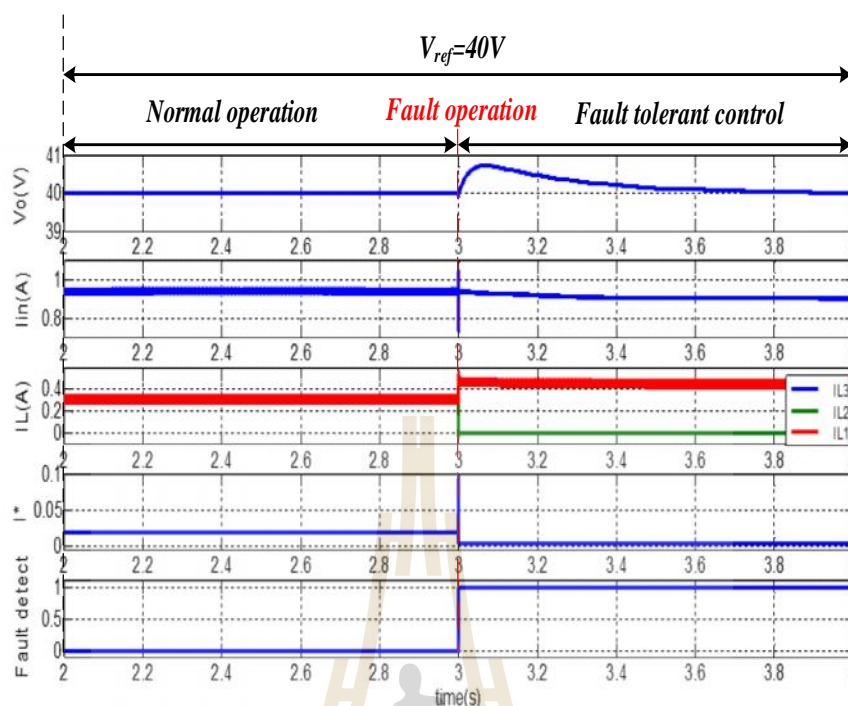


รูปที่ 5.74 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 3 วินาที

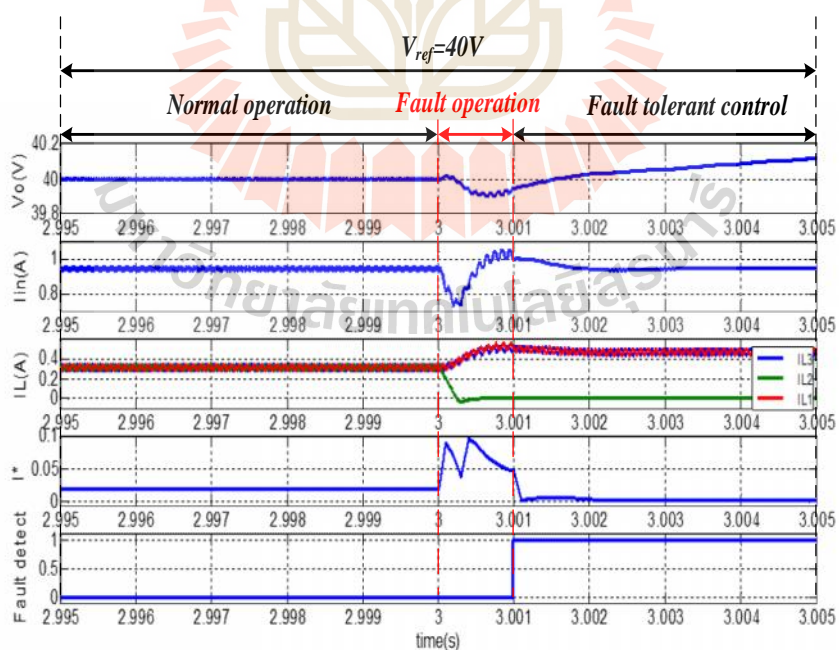
$$\text{ที่ } V_{ref} = 40V$$

จากรูปที่ 5.73 และรูปที่ 5.74 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์สามขั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_n = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.08A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งแสดงได้ในรูปที่ 5.74 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิด

วงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 35\text{ V}$ คือ 0.027 A ซึ่งจากรูปที่ 5.74 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.027 A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟลูตแบบสามขั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.74 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ไม่เป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่ได้เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 แต่เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 หรือ S_2 ตัวใดตัวหนึ่ง จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งก็คือสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_3 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 นั้น จะทำให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จึงสามารถทำได้ เนื่องจากจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวที่ยังคงสามารถทำงานควบคู่กับสวิตช์ S_3 ต่อไปได้ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.36 A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัด ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟลูตสามขั้นในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40\text{ V}$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.75 และรูปที่ 5.76



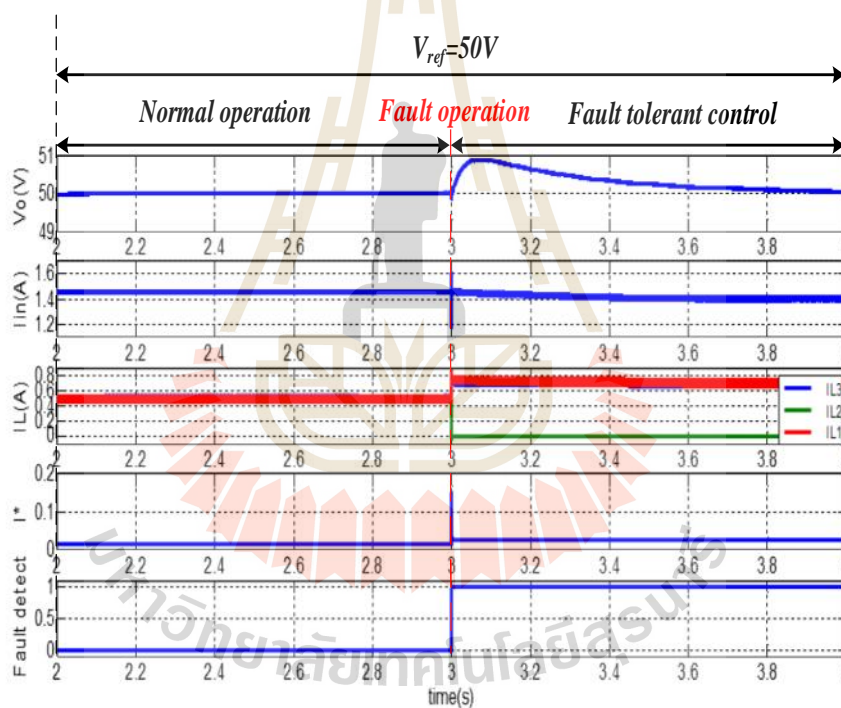
รูปที่ 5.75 การควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 40$ V



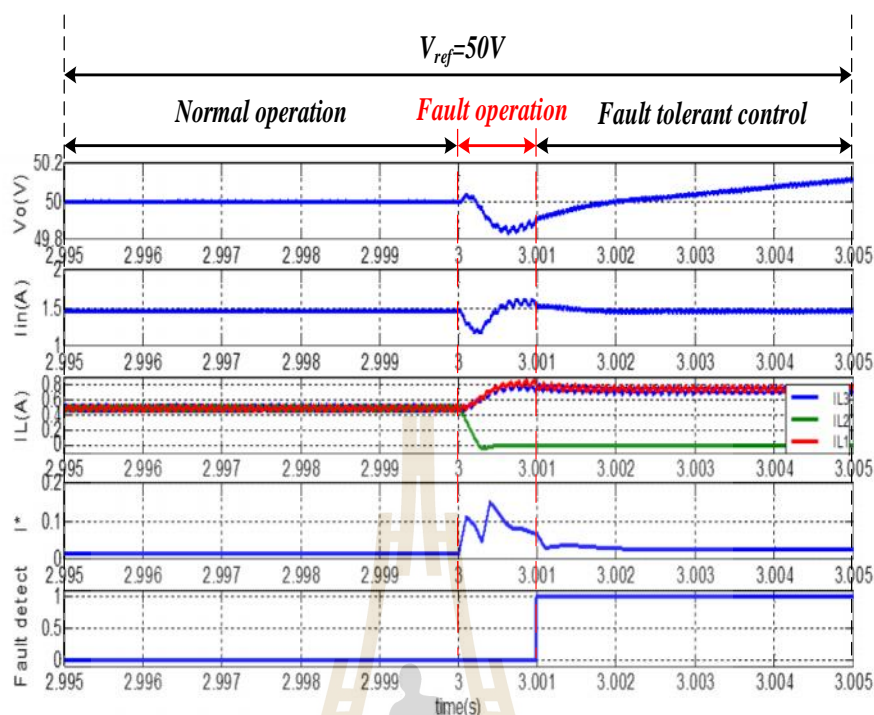
รูปที่ 5.76 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 40$ V

จากรูปที่ 5.75 และรูปที่ 5.76 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระแสที่เพิ่มขึ้น กระแสอินพุตมีการกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A ซึ่งการกระแสที่เพิ่มขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.08A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงได้ในรูปที่ 5.76 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) โดยถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I^*_{ref}$) กรณี $V_{ref} = 40V$ คือ 0.033A ซึ่งจากรูปที่ 5.76 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) มีค่ามากกว่า 0.033A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.76 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ไม่เป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่ได้เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 แต่เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 หรือ S_2 ตัวใดตัวหนึ่ง จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งก็คือสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_3 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 นั้น จะทำ

ให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จึงสามารถทำได้ เนื่องจากจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวที่ยังคงสามารถทำงานควบคู่กับสวิตช์ S_3 ต่อไปได้ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.43A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35V$ ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.77 และรูปที่ 5.78



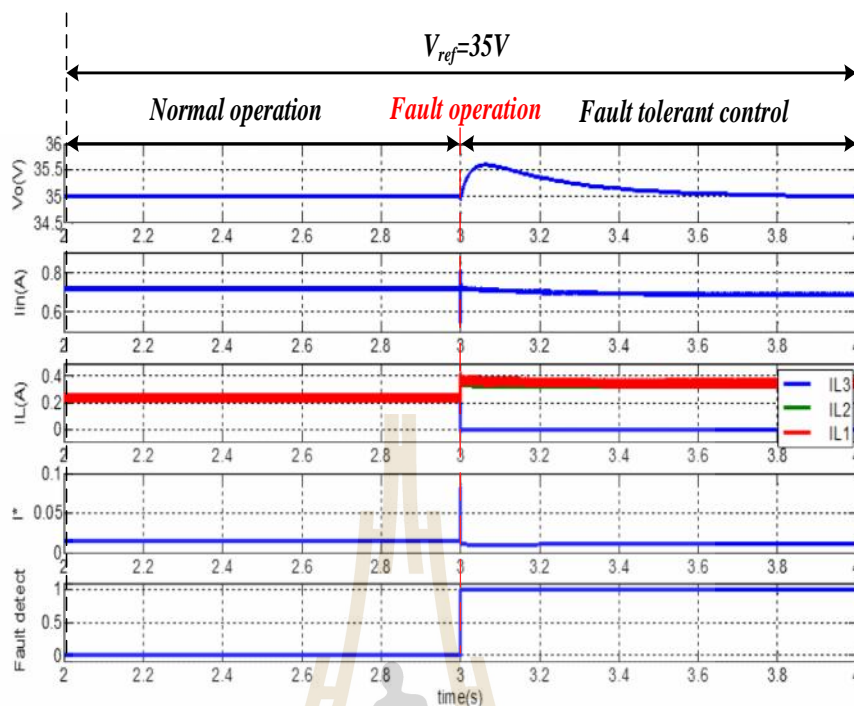
รูปที่ 5.77 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$



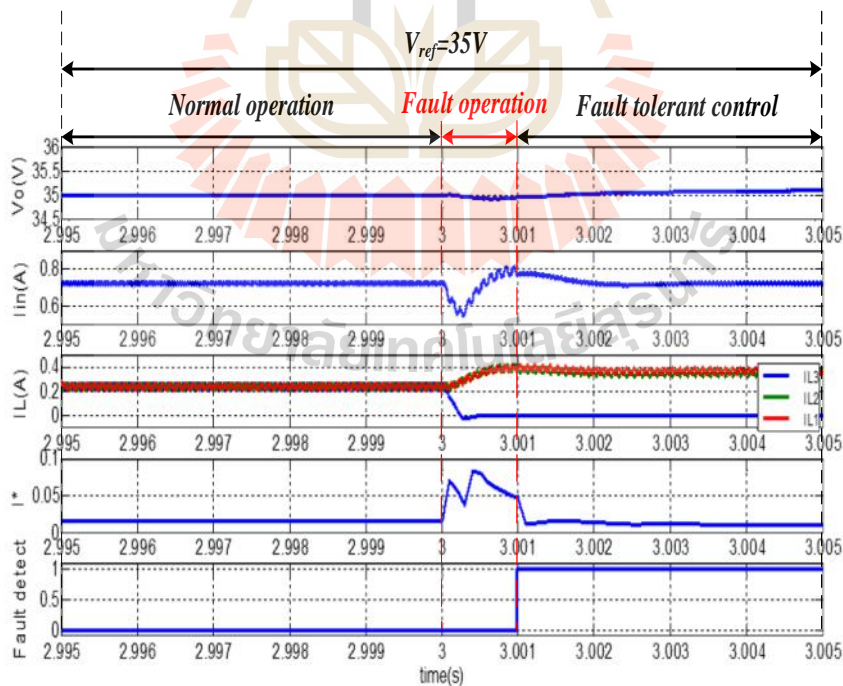
รูปที่ 5.78 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที
ที่ $V_{ref} = 50V$

จากรูปที่ 5.77 และรูปที่ 5.78 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์ตามขั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_n = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง i_{L2} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สาม i_{L3} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (i^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.05A แล้วเพิ่มขึ้นอีกดัง

แสดงได้ในรูปที่ 5.78 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 50V$ คือ 0.036A ซึ่งจากรูปที่ 5.78 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.036A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์แบบสามขั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.78 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ไม่เป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่ได้เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 แต่เกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 หรือ S_2 ตัวใดตัวหนึ่ง จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งก็คือสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_3 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 นั้น จะทำให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมทั้งสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 จึงสามารถทำได้ เนื่องจากจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวที่ยังคงสามารถทำงานควบคู่กับสวิตช์ S_3 ต่อไปได้ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.7A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับกรณี $V_{ref} = 35V$ และ กรณี $V_{ref} = 40V$ ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟท์แบบสามขั้นในสภาวะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.79 และรูปที่ 5.80



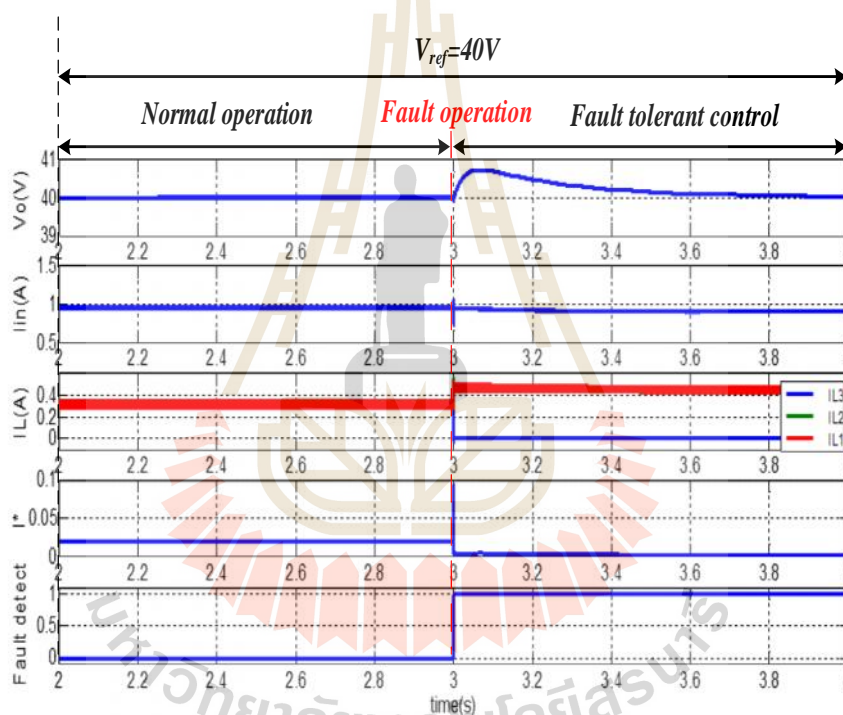
รูปที่ 5.79 การควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$



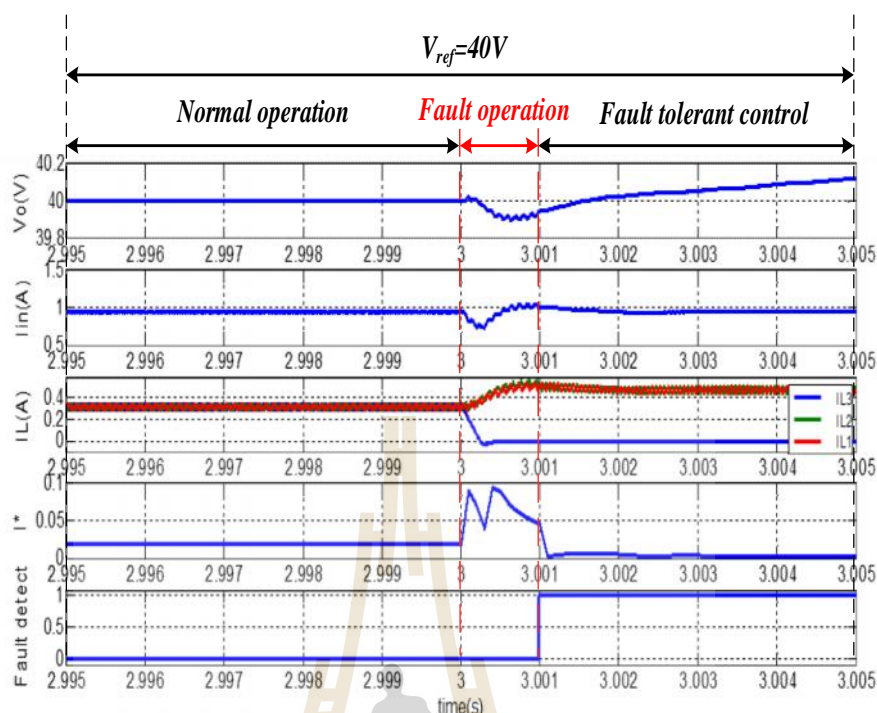
รูปที่ 5.80 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$

จากรูปที่ 5.79 และรูปที่ 5.80 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 35V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.72A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.018 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.08A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงได้ในรูปที่ 5.80 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) โดยถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I^*_{ref}$) กรณี $V_{ref} = 35 V$ คือ 0.027A ซึ่งจากรูปที่ 5.80 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) มีค่ามากกว่า 0.027A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.80 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์เป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจร ซึ่งก็คือ สวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_1 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 นั้น จะทำให้สวิตช์ตัวที่เกิด

ความผิดพลาดถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมสวิตช์ S_2 ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.36A กระแสกระแสเฟืองที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระแสเฟืองของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัด ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสภาวะเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.81 และรูปที่ 5.82



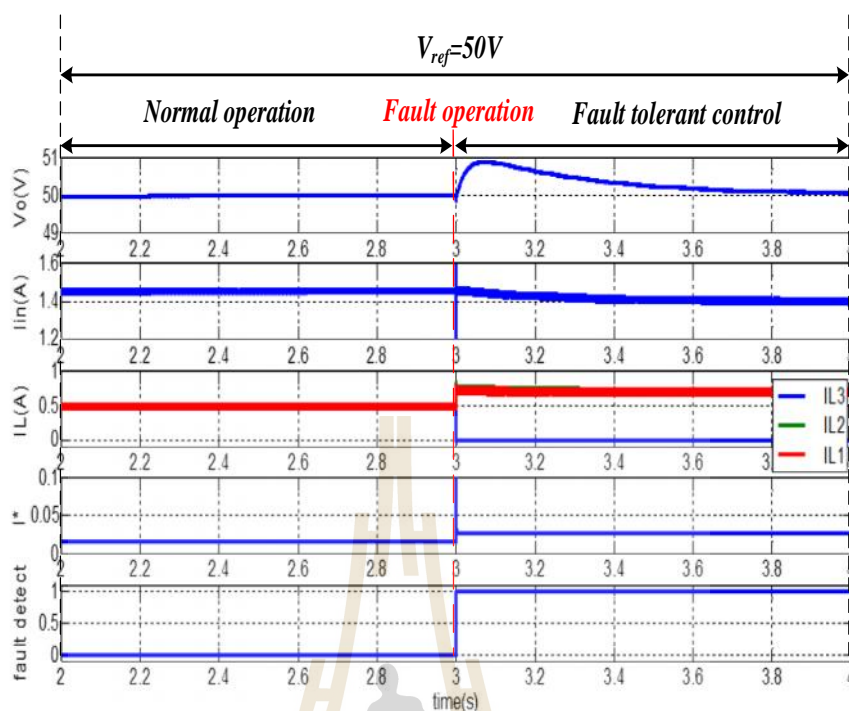
รูปที่ 5.81 การควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$



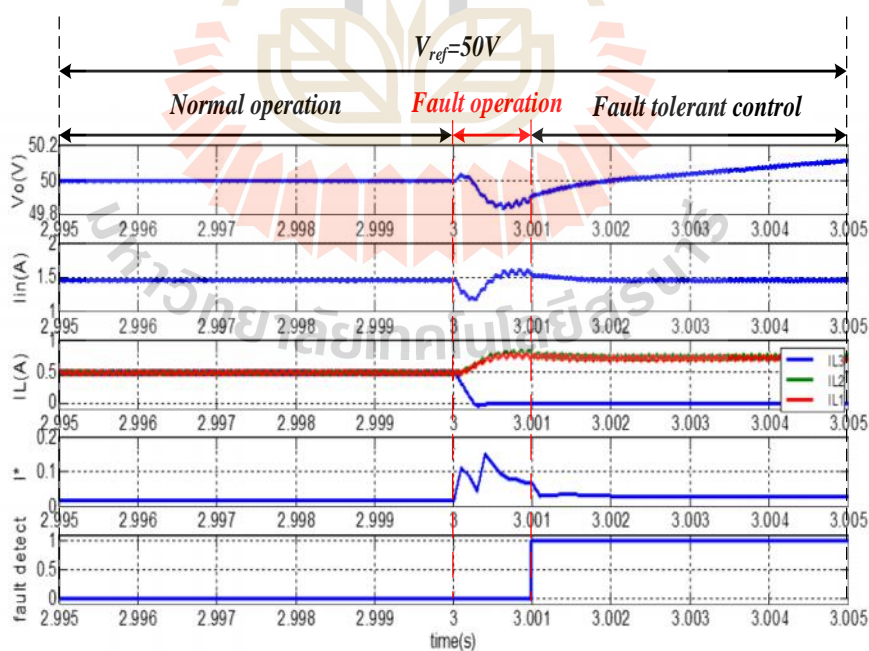
รูปที่ 5.82 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$

จากรูปที่ 5.81 และรูปที่ 5.82 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟท์สามขั้นเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 40V และมีการกระเพื่อมที่สูงขึ้น กระแสอินพุตมีการกระเพื่อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A ซึ่งการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_m = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสถานะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.022 A แต่เมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.08A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งแสดงได้ในรูปที่ 5.82 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจาก

สวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะปกติ (I_{ref}^*) เปรียบเทียบกับค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) โดยถ้า $I_{ปัจจุบัน}^*$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I_{ref}^* ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะปกติ ($1.5I_{ref}^*$) กรณี $V_{ref} = 40V$ คือ 0.033A ซึ่งจากรูปที่ 5.82 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุตในสถานะเกิดความผิดปกติ ($I_{ปัจจุบัน}^*$) มีค่ามากกว่า 0.033A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟลูตแบบสามขั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง โดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.82 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจร ซึ่งก็คือ สวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_1 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 นั้น จะทำให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมสวิตช์ S_2 ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากันและคงที่ประมาณ 0.43A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรเกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัด ต่อไปเป็นผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟลูตสามขั้นในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.83 และรูปที่ 5.84



รูปที่ 5.83 การควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$



รูปที่ 5.84 ภาพขยายการควบคุมวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

จากรูปที่ 5.83 และรูปที่ 5.84 จะเห็นได้ว่า เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตจะมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 50V และมีการกระแสที่เพิ่มขึ้น กระแสอินพุตมีการกระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.45A ซึ่งการกระแสที่เพิ่มขึ้นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตนั้นมาจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ทำให้การหักล้างกันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวไม่เป็นไปตามโครงสร้างของวงจร โดยจากโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ จะเหลือเพียงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} และตัวที่สอง i_{L2} ที่ยังไหลอยู่ในวงจร จากการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นทำให้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุต (I^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าประมาณ 0.024 A แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตจะมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.1A แล้วมีการลดลงประมาณ 0.045A แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงได้ในรูปที่ 5.84 โดยจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เคยได้กล่าวไป จะใช้ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ (I^*_{ref}) เปรียบเทียบกับค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) โดยถ้า $I^*_{ปัจจุบัน}$ มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของ I^*_{ref} ติดต่อกัน 10 ครั้ง แสดงว่าเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ดังนั้น 1.5 เท่าของค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะปกติ ($1.5I^*_{ref}$) กรณี $V_{ref} = 40V$ คือ 0.036A ซึ่งจากรูปที่ 5.84 เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ค่าการกระแสเพิ่มของกระแสอินพุตในสภาวะเกิดความผิดปกติ ($I^*_{ปัจจุบัน}$) มีค่ามากกว่า 0.036A อย่างต่อเนื่อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องโดยใช้เวลาประมาณ 0.001 วินาที หลังตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ โดยเริ่มจากการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากรูปที่ 5.84 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ หมายความว่าความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์ S_3 จากนั้นทำการสั่งให้สัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา เข้าควบคุมสวิตช์ทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจร ซึ่งก็คือ สวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 โดยให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่หนึ่งที่ไม่มีการเลื่อนเฟสสัญญาณเข้าควบคุมที่สวิตช์ S_1 และสัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมสวิตช์ S_2 จากการเกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 นั้น จะทำให้สวิตช์ตัวที่เกิดความผิด

พร้อมถูกเปิดวงจรออกไป ดังนั้น การสั่งให้สัญญาณพัลส์สัญญาณที่สองที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากสัญญาณพัลส์ตัวที่หนึ่งเข้าควบคุมสวิตช์ S_2 ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์นั้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดเท่ากัน และคงที่ประมาณ 0.72A กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจร เกิดการหักล้างกัน ทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับกรณีแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ และ $40V$

จากผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นในสภาวะเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรทั้งหมดที่ได้กล่าวมา พบว่าหลังจากตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะทำการตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ว่ามีค่าลดลงจนเป็นศูนย์หรือไม่ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นในสภาวะเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร เพื่อให้วงจรแปลงผันแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นสามารถทำงานต่อไปได้แม้ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร

5.7 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ โดยได้กล่าวถึงหลักการควบคุมที่อาศัยการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสที่เหมาะสม เมื่อวงจรอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นทำงานภายใต้สภาวะปกติและสภาวะความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรมันสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องกรณีวงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่างๆ โดยใช้เวลา ประมาณ 0.001 วินาที กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต กรณีเปลี่ยนแปลงโหลด และยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ สามารถกล่าวได้ว่า วงจรแปลงผันกำลังวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกตินั้นสามารถทำงานได้แม้ในสภาวะเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจร

บทที่ 6

การสร้างชุดทดสอบ

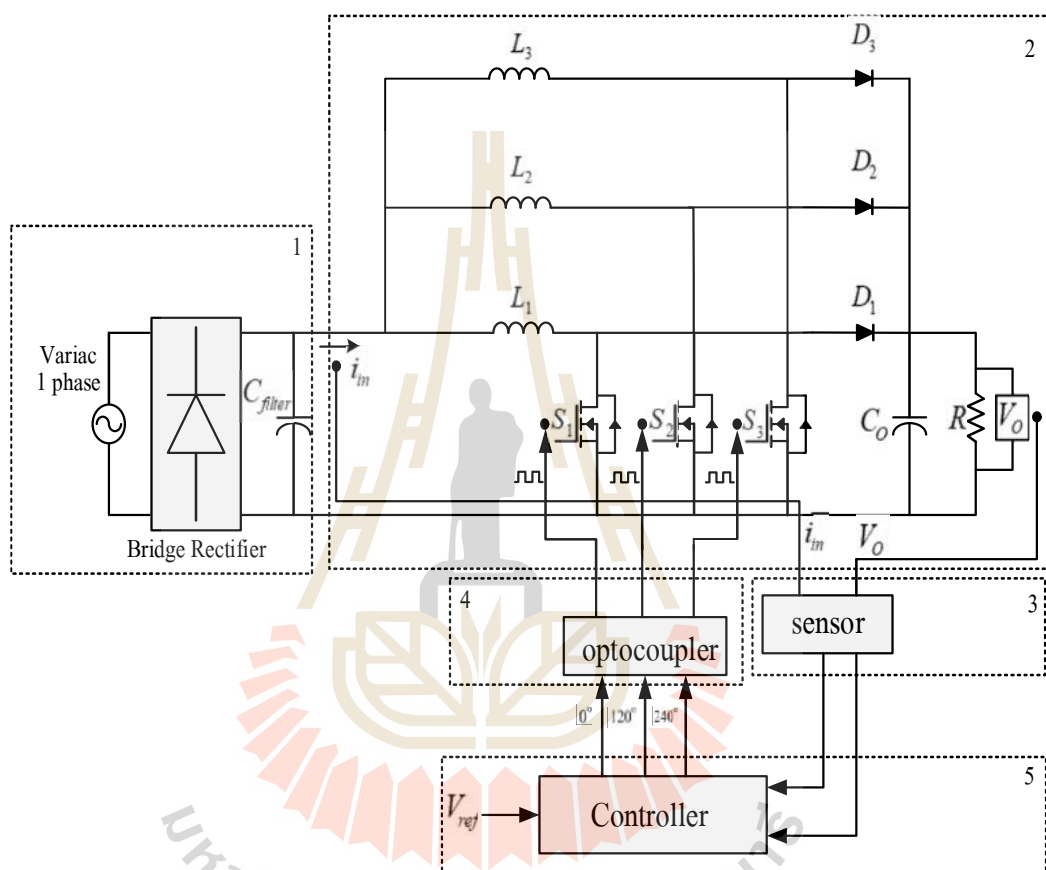
6.1 บทนำ

จากบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้นำเสนอการวิเคราะห์หลักการทำงาน และการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดในสภาวะต่าง ๆ เพื่อยืนยันสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดว่าสามารถทำงานได้แม้ในสภาวะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ $35 V_{dc}$, $40 V_{dc}$ และ $50 V_{dc}$ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ อัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้อง อัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นในสภาวะที่เกิดความผิดพลาดสามารถควบคุมวงจรได้ ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับใช้ยืนยันผลการทดสอบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด ตัวตรวจจับกระแสอินพุตรวมไปถึงตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณ และการควบคุมแรงดันเอาต์พุต

6.2 โครงสร้างของชุดทดสอบ

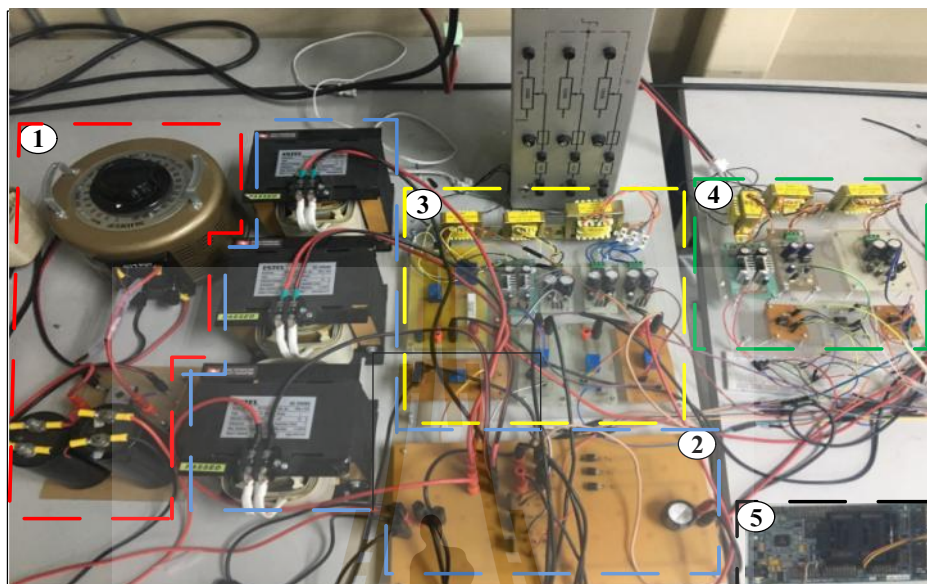
โครงสร้างของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ส่วนที่ 2 คือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟิวสต์สามชั้น ในส่วนที่ 3 คือตัวตรวจจับ ซึ่งมีตัวตรวจจับกระแสอินพุต i ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต V_o ที่ตกร่อมโหลดตัวต้านทาน R ส่วนที่ 4 เป็นวงจรขยายแรงดันแบบ

แยกโคคสัญญาณ และส่วนที่ 5 เป็นการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้เป็นตัวควบคุมพีไอ ทำการประมวลผลเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ซึ่งโครงสร้างของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแบ่งเป็น 5 ส่วนที่สำคัญแสดงได้ ดังรูป ที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

สำหรับชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 สำหรับรายละเอียดในการสร้างชุดทดสอบ ได้นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

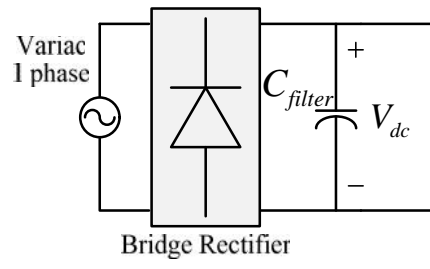


1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ
2. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้น
3. ตัวตรวจจับกระแสและแรงดัน
4. วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ
5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ eZdsp™ F28335

รูปที่ 6.2 ชุดทดสอบจริงของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

6.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

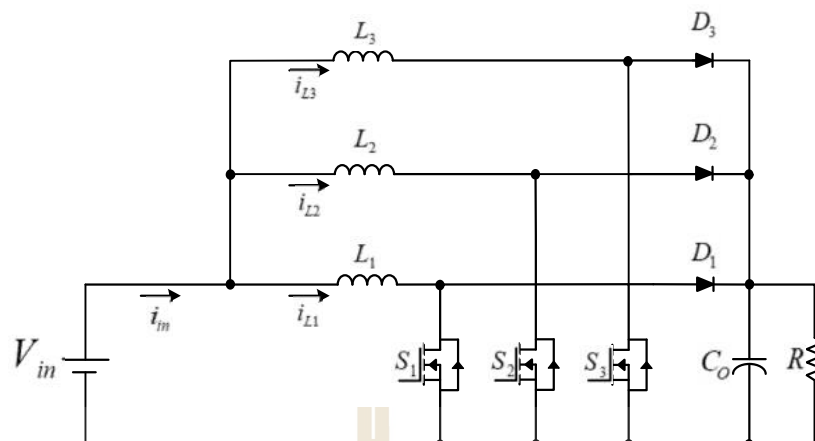
สำหรับการทดสอบชุดทดสอบนั้น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่พร้อมใช้งานนั้นมีข้อจำกัดเรื่องพิกัดของกระแสที่ต่ำ ซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้ไม่เกิน 6 A ทำให้ความสามารถในการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก จึงจำเป็นต้องสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความสามารถในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อป้อนให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด โดยการออกแบบเพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 6.3 ประกอบด้วย หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟสที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟสเพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจะนำไปใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันต่ำ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

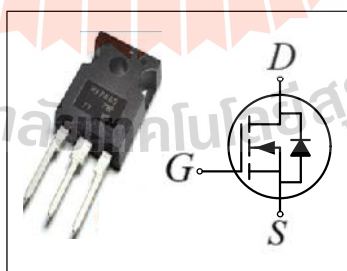


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 6.7 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น
ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดจะใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังที่เป็นลักษณะมอดูล ซึ่งจะคำนึงถึงพิกัดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ 2 A และค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ 50 V ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้มอดูลของมอสเฟต IRFP460N เป็นมอสเฟตที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 V และค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 13 A มอดูลของมอสเฟตดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.8



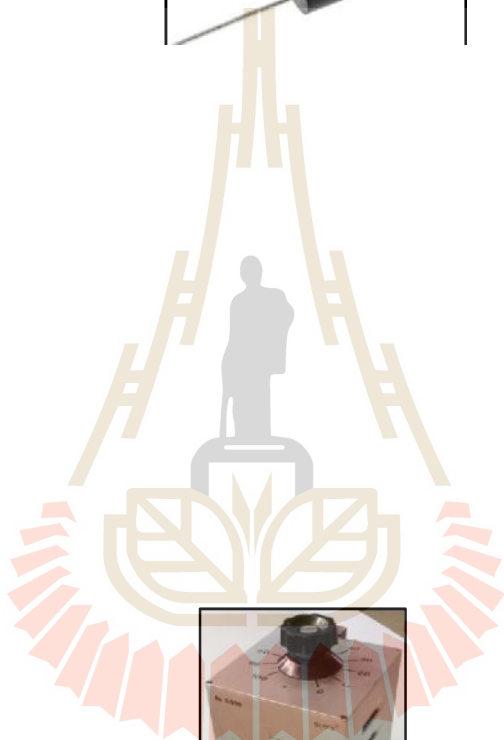
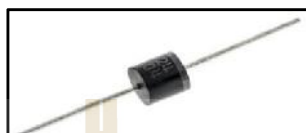
รูปที่ 6.8 มอดูลของมอสเฟตสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น
ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

การเลือกตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ต้องคำนึงถึงค่าการกระเพื่อมของกระแส โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งตัว



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟูลบรูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดสามารถสรุปเบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ

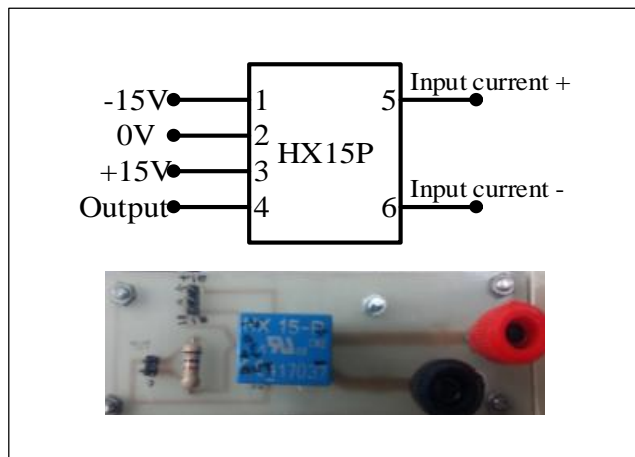
อุปกรณ์	สัญลักษณ์	เบอร์	ขนาด	พิกัด
มอสเฟต	S_1, S_2, S_3	IRFP460	-	13 A, 500 V
ตัวเหนี่ยวนำ	L_1, L_2, L_3	-	15 mH	10 A, 500 V
ตัวเก็บประจุ	C_o	-	560 μ F	450 V
ไดโอด	D_1, D_2, D_3	10A04-T	-	10 A, 400 V
โหลดตัวต้านทาน	R	-	100 Ω	120 W

6.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ

วงจรตรวจจับสัญญาณสร้างขึ้นสำหรับตรวจจับสัญญาณซึ่งจะถูกส่งไปประมวลผลยังชุดควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการทำงานของสวิทช์กำลัง โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ 3 ตัว คือ ตัวตรวจจับกระแสอินพุต i_m ตัวตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} และตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต V_o

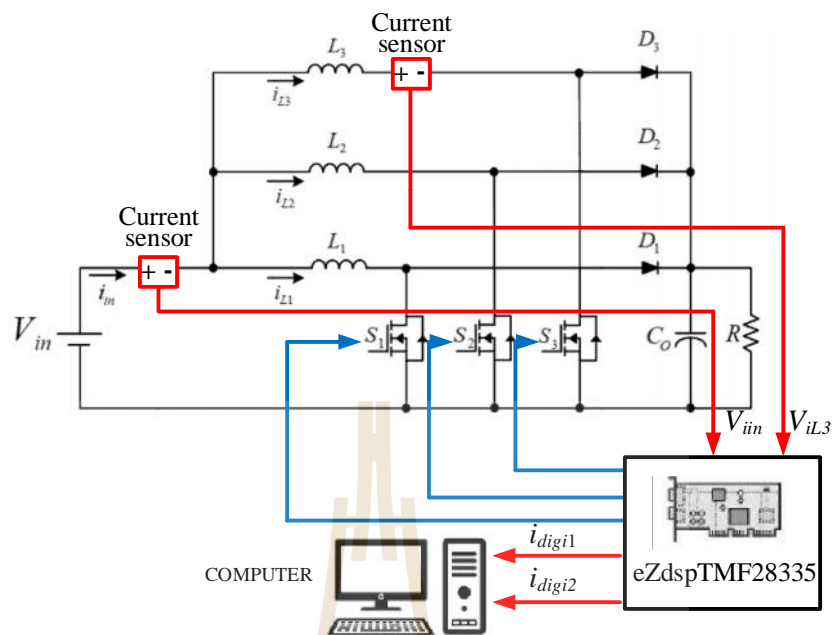
6.5.1 วงจรตรวจจับกระแส

การตรวจจับกระแสอินพุต i_m และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} ที่ปรากฏอยู่ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตส์ฟูลบรูสต์สามชั้น อาศัยตัวตรวจจับสัญญาณกระแส HX15P ที่มีพิกัดกระแส 15A จำนวนสองตัว โดยในการทดสอบชุดทดสอบจะกำหนดใช้กระแสไม่เกิน 10A ซึ่งตัวตรวจจับกระแสดังกล่าวนี้มีความพิกัดกระแสเพียงพอที่จะนำมาใช้งาน โครงสร้างวงจรตรวจจับกระแสอินพุตแสดงดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส

การปรับเทียบค่าการวัดของตัวตรวจจับกระแส แสดงได้ดังรูปที่ 6.14 โดยการปรับเทียบจะอาศัยการจ่ายสัญญาณควบคุมการทำงานให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ในค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ เพื่อให้ตัวตรวจจับกระแส (Current sensor) สามารถตรวจจับค่ากระแสอินพุต i_{in} และค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} จากนั้นตัวตรวจจับกระแสจะส่งค่าสัญญาณแรงดัน V_{iin} และ V_{iL3} ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 V ถึง 3 V ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP eZdsp™F28335 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการแปลงสัญญาณแรงดันไปเป็นสัญญาณดิจิทัล i_{digi1} และ i_{digi2} ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 4095 โดยในการปรับเทียบจะทำงานวัดค่ากระแสอินพุต i_{in} และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม i_{L3} เทียบกับค่าสัญญาณดิจิทัล i_{digi1} และ i_{digi2} โดยเริ่มจากการส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้งสามตัวที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0% และปรับเพิ่มขึ้นทีละ 5% เพื่อให้ได้กระแสอินพุตในช่วง 0A ถึง 1A จากการทดสอบปรับเทียบการวัดค่าตัวตรวจจับกระแสตัวที่หนึ่ง ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.2



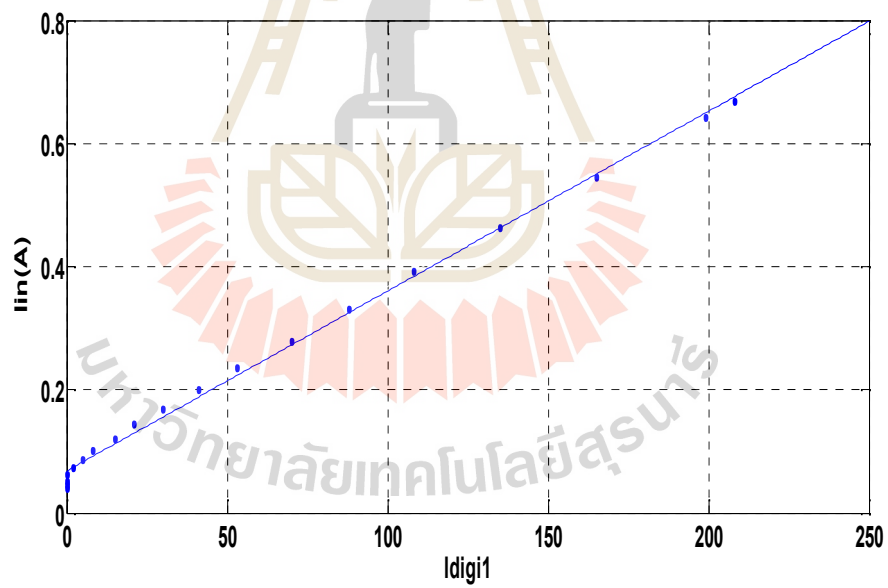
รูปที่ 6.14 การปรับเทียบค่าการวัดกระแสอินพุต

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบปรับเทียบการวัดตัวตรวจจับกระแสตัวที่หนึ่ง

i_{in} (A)				$i_{digi 1}$			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.0411	0.0410	0.039	0.0410	0	0	0	0
0.0455	0.0458	0.0457	0.0457	0	0	0	0
0.0518	0.0520	0.0516	0.0518	0	0	0	0
0.0617	0.0615	0.0619	0.0617	0	0	0	0
0.0730	0.0730	0.0724	0.0728	2	2	2	2
0.0862	0.0861	0.0863	0.0862	4	5	6	5
0.1024	0.1021	0.1021	0.1022	8	8	8	8
0.1205	0.1206	0.1207	0.1206	14	13	15	15
0.1435	0.1437	0.1436	0.1436	21	22	21	21
0.1694	0.1695	0.1696	0.1695	30	32	28	30
0.2003	0.2000	0.2000	0.2001	40	40	42	41
0.2367	0.2365	0.2368	0.2367	52	54	53	53

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับกระแสตัวที่หนึ่ง (ต่อ)

i_{in} (A)			$i_{digi 1}$				
0.2797	0.2795	0.2799	0.2797	69	71	70	70
0.3310	0.3312	0.3318	0.3310	87	88	89	88
0.3918	0.3916	0.3920	0.3918	105	110	109	108
0.4623	0.4627	0.4625	0.4625	136	134	135	135
0.5459	0.5458	0.5457	0.5458	164	166	165	165
0.6416	0.6416	0.6419	0.6417	200	200	199	199
0.6690	0.6688	0.6686	0.6688	207	209	208	208



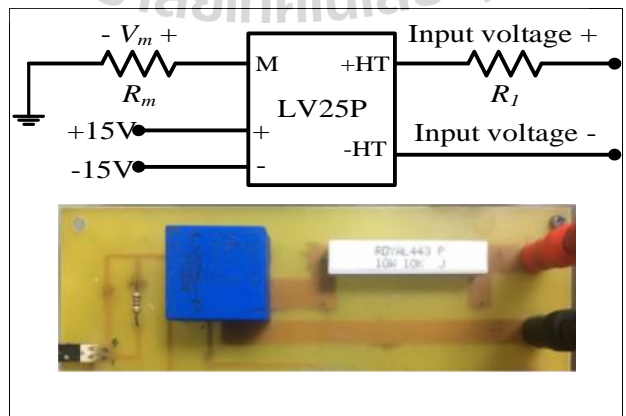
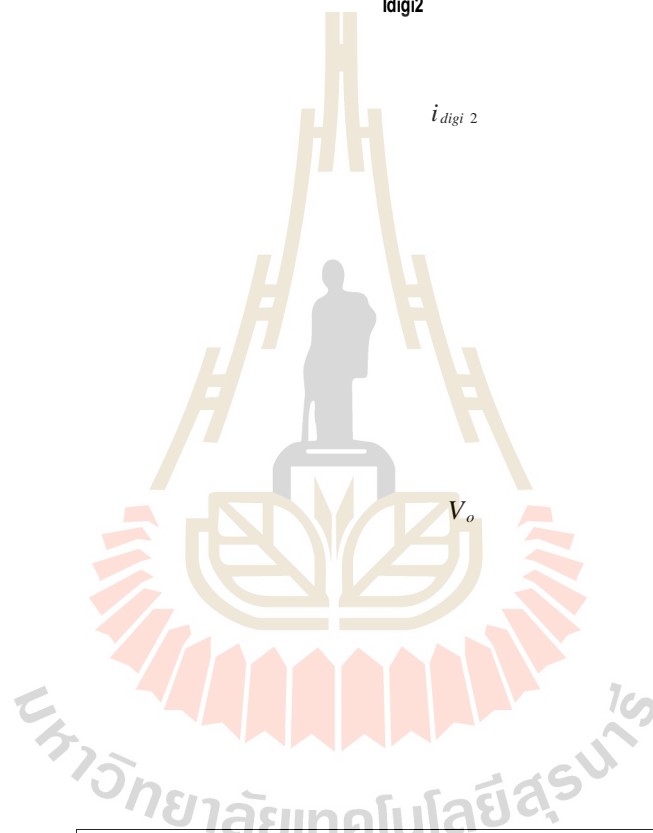
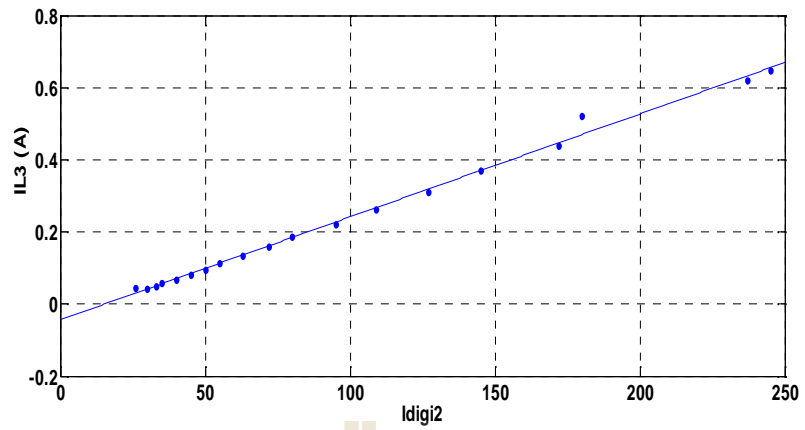
i_{in} $i_{digi 1}$

ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดค่าตัวตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม แสดง
ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สาม

i_{L3} (A)				$i_{digit 2}$			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.041	0.039	0.042	0.041	30	29	31	30
0.458	0.453	0.452	0.0454	27	35	34	26
0.0498	0.0495	0.0492	0.0495	34	33	32	33
0.0580	0.0581	0.0582	0.0581	34	35	36	35
0.0680	0.0681	0.0679	0.0680	40	41	39	40
0.081	0.082	0.083	0.082	44	45	46	45
0.0955	0.0954	0.0953	0.0954	51	50	49	50
0.1130	0.1132	0.1128	0.1130	55	57	53	55
0.1344	0.1339	0.1340	0.1341	64	62	61	63
0.1582	0.1581	0.1583	0.1582	72	73	71	72
0.1873	0.1876	0.1876	0.1875	81	80	80	80
0.2212	0.2211	0.2213	0.2212	95	94	96	95
0.2624	0.2621	0.2623	0.2623	109	108	110	109
0.3107	0.3109	0.3108	0.3108	128	126	126	127
0.3696	0.3699	0.3697	0.3697	146	143	145	145
0.4385	0.4385	0.4384	0.4385	173	172	172	172
0.5223	0.5224	0.5222	0.5222	180	180	181	180
0.6200	0.6203	0.6201	0.6201	237	236	236	237
0.6480	0.6481	0.6479	0.6480	246	244	245	245

จากตารางที่ 6.3 สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุต i_{L3} และค่า
สัญญาณดิจิทัล $i_{digit 2}$ ดังรูปที่ 6.16



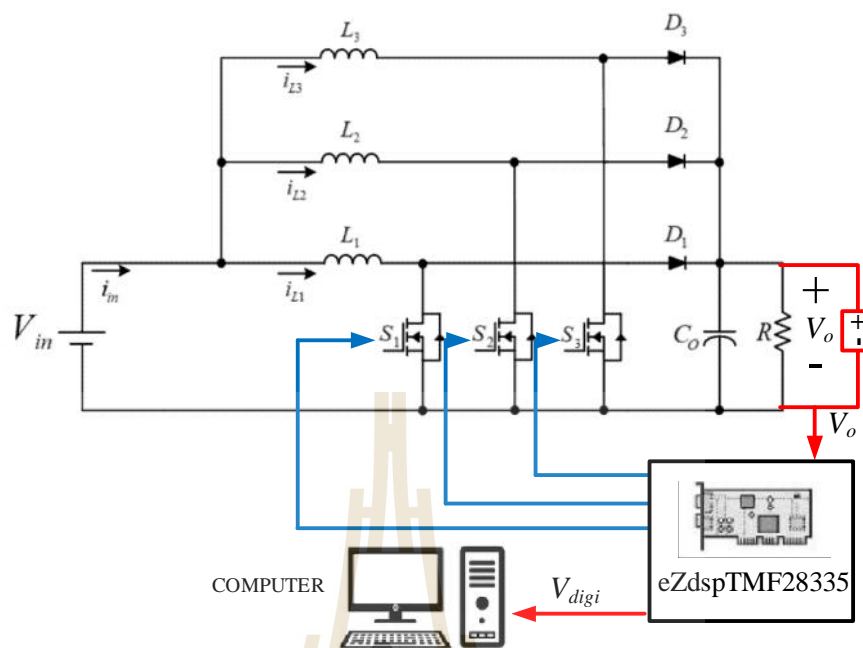
ภายในวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันดังรูปที่ 6.17 มีการเชื่อมต่อตัวต้านทาน R_1 เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสทางด้านอินพุตไหลเกิน 10mA เมื่อพิจารณาที่แรงดัน 100V ฉะนั้นสมการออกแบบค่าตัวต้านทาน R_1 เป็นดังสมการที่ (6.3)

$$R_1 = \frac{100}{10 \times 10^{-3}} = 10k\Omega \quad (6.3)$$

ตัวต้านทาน R_m ใช้ในการปรับสัญญาณแรงดันจากตัวตรวจจับแรงดัน V_m ให้มีค่าไม่เกิน 3V และกระแสไม่เกิน 25mA ฉะนั้นสมการออกแบบค่าตัวต้านทาน R_m มีดังสมการที่ (6.4)

$$R_m = \frac{3}{25 \times 10^{-3}} = 120\Omega \quad (6.4)$$

การปรับเทียบค่าการวัดตัวตรวจจับแรงดัน ดำเนินการเช่นเดียวกับการปรับเทียบตัวตรวจจับกระแส โดยอาศัยการจ่ายสัญญาณควบคุมทำงานของสวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 ในค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ เพื่อให้ตัวตรวจจับแรงดัน (Voltage sensor) สามารถตรวจจับแรงดันเอาต์พุต V_o จากนั้นตัวตรวจจับแรงดันจะส่งค่าสัญญาณแรงดัน V_m ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0V ถึง 3V ไปยังเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP eZdsp™ F28335 เบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงสัญญาณแรงดัน V_m ไปเป็นค่าสัญญาณดิจิทัล V_{digi} มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 4095 โดยในการปรับเทียบจะบันทึกค่าระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับค่าสัญญาณดิจิทัล V_{digi} โดยการทดสอบปรับเทียบจะปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0% แล้วเพิ่มขึ้นทีละ 5% เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตในช่วง 20V ถึง 100V จากผลการทดสอบการปรับเทียบการวัดตัวตรวจจับแรงดันได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.4



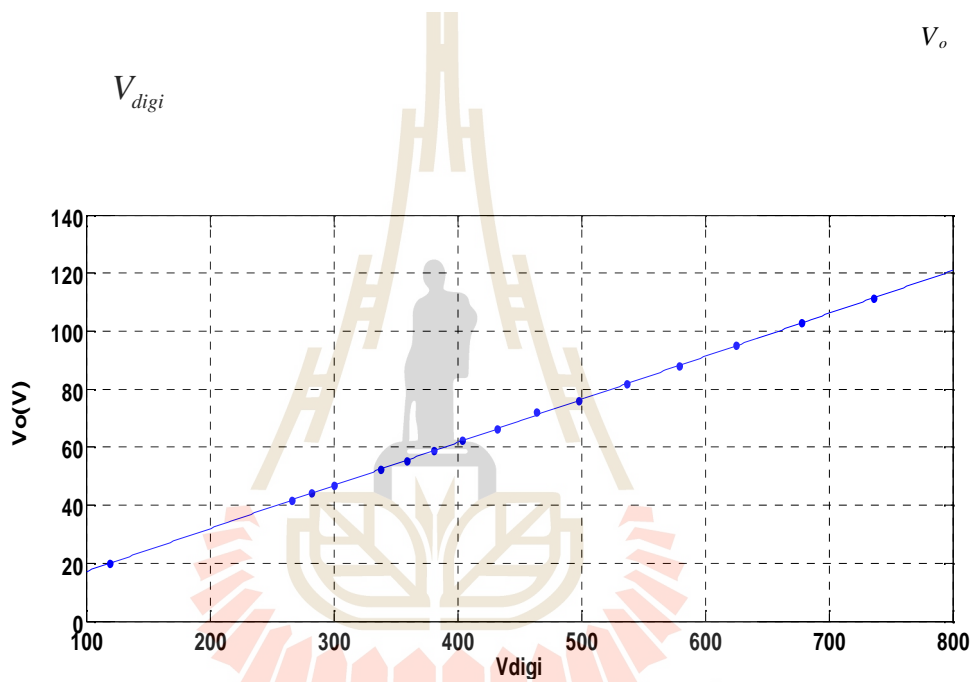
รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบค่าการวัดแรงดันเอาต์พุต

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับแรงดัน

V_o (V)				V_{digi}			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
19.82	19.89	19.83	19.83	118	119	120	119
41.67	41.68	41.65	41.67	226	226	224	266
44.22	44.25	44.16	44.20	281	283	282	282
46.73	46.78	46.68	46.73	298	300	302	300
52.37	52.39	52.40	52.39	338	337	339	338
55.39	55.38	55.35	55.38	359	340	398	359
58.72	58.74	58.72	58.72	380	381	382	381
62.35	62.32	62.33	62.33	402	404	406	404
66.46	66.35	66.41	66.41	431	431	434	432
71.95	71.97	72.03	71.96	465	467	462	464
76.12	76.16	76.06	76.12	497	498	450	498
81.85	81.83	81.85	81.84	537	536	538	537

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจ็ับแรงดัน (ต่อ)

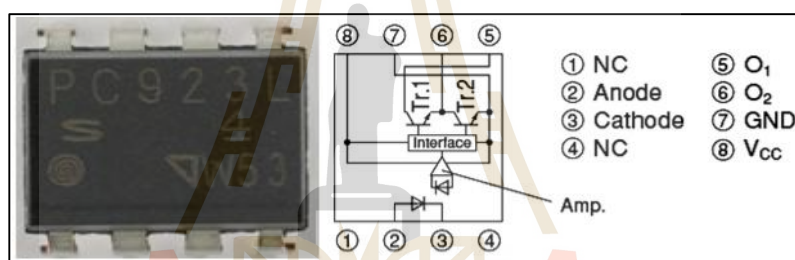
V_o (V)				V_{digi}			
88.01	88.02	88.07	88.05	578	579	580	579
94.97	94.95	95.03	94.96	264	265	265	625
102.79	102.76	102.79	102.79	678	678	675	678
111.34	111.27	111.30	111.30	736	735	738	736



$$V_o = 0.1483 V_{digi} + 2.3108$$

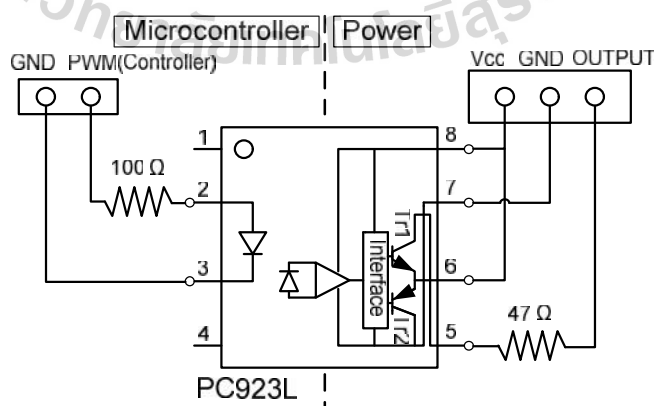
เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมขณะส่งสัญญาณขับขาเกตของ สวิตช์กำลัง ให้กับวงจรกำลัง หลังจากได้รับสัญญาณ PWM ที่ได้จากการประมวลผลของบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ จะติดปัญหาที่ทำให้สวิตช์กำลังไม่ทำงานคือ แรงดันเอาต์พุตของบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าแรงดันต่ำไม่เพียงพอในการขับขาเกตของสวิตช์กำลังให้ทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรที่สามารถขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจากบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สวิตช์กำลังในวงจรสามารถทำงานได้

วงจรแยกโคตแบบขยายสัญญาณใช้ไอซีออปโตเบอร์ PC923L เป็นวงจรแยกโคตที่มีการขยายสัญญาณในตัววงจร โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สวิตช์กำลังที่เลือกใช้ต้องการสัญญาณขนาด 13 V เพื่อขับให้ขาเกตของสวิตช์กำลังทำงาน โครงสร้างของไอซีออปโตเบอร์ PC923L แสดงดังรูปที่ 6.20



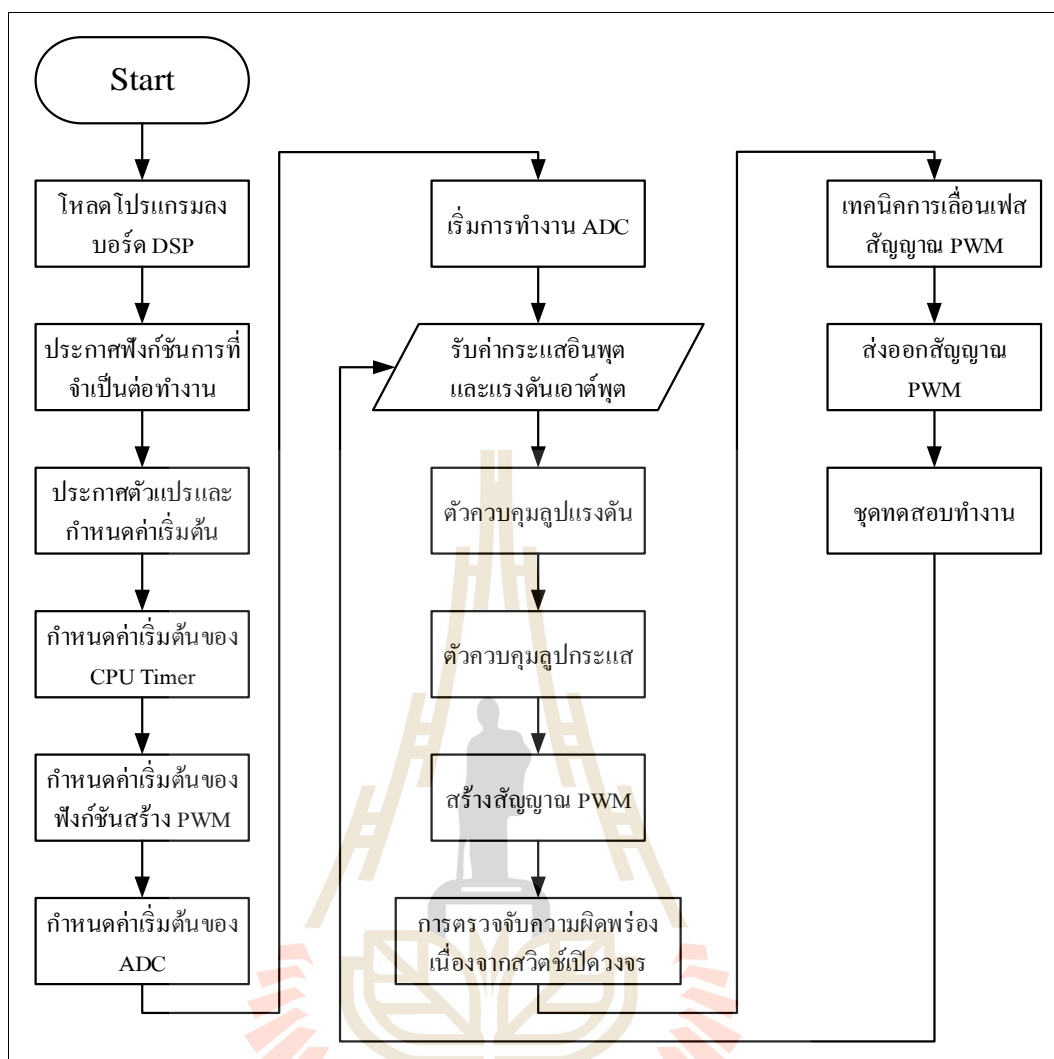
รูปที่ 6.20 โครงสร้างของไอซีออปโตเบอร์ PC923L

สำหรับการใช้งานวงจรแยกโคตแบบขยายสัญญาณ ต่อวงจรตามรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.21 การต่อวงจรของวงจรแยกโคตแบบขยายสัญญาณ





รูปที่ 6.23 ไคอะแกรมการเขียนโปรแกรมของตัวควบคุม

จากไคอะแกรมการทำงานของโปรแกรมควบคุม ดังรูปที่ 6.23 สามารถอธิบายโปรแกรมออกได้เป็น 5 ส่วนสำคัญด้วยกันดังนี้

ส่วนที่ 1 โปรแกรมภาษาซีสำหรับรับค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) และ กระแสอินพุต (i_{in} , i_{L3}) และทำการคำนวณปรับแก้ค่าดิจิทัลจาก ADC ให้เทียบเท่าค่ากระแส และแรงดันจริง แสดงดังนี้

Current_Iin1 = AdcMirror.ADCRESULT1; //รับค่าดิจิทัลของกระแส i_{in}

Current_IL3 = AdcMirror.ADCRESULT2; //รับค่าดิจิทัลของกระแส i_{L3}

Voltage_Vout = AdcMirror.ADCRESULT3; //รับค่าดิจิทัลของแรงดัน V_o

digi_il=Current_Iin1; //อัปเดตค่ากระแส i_{L1}

```

digi_i2=Current_IL3; //อัปเดตค่ากระแส  $i_{L3}$ 
digi_v=Voltage_Vout; //อัปเดตค่าแรงดัน  $V_o$ 
iin1=(0.0029*digi_i1)+0.0684; //ปรับแก้ค่ากระแส  $i_{in}$ 
iin2=(0.0029*digi_i2)-0.0434; //ปรับแก้ค่ากระแส  $i_{L3}$ 
vout=(0.1483*digi_v)+2.3108; //ปรับแก้ค่าแรงดัน  $V_o$ 

```

ส่วนที่ 2 โปรแกรมภาษาซีสำหรับการคำนวณของตัวควบคุมพีไอ แสดงดังนี้

```

// PI V loop
Verror = Vref-vout; //คำนวณค่าความผิดพลาดของแรงดัน  $V_o$ 
ExcV = Verror*Kpv; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Sumv2 = Sumv1 + Kiv*Verror*Ts; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
Iref= ExcV + Sumv2 ; //คำนวณกระแสอ้างอิงจากลูปแรงดัน

// PI I loop1
k1=p1/(p1+p2); //การถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับแหล่งจ่าย  $V_{in1}$ 
Iref1 = Iref*k1; //ปรับแก้กระแสอ้างอิง
Ierror1 = Iref1-iin1; //คำนวณค่าความผิดพลาดของกระแส  $i_{L11}$ 
ExcI1 = Ierror1*Kpi; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Sumi12 = Sumi11 + Kii*Ierror1*Ts; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
pis1= ExcI1 + Sumi12 ; //คำนวณสัญญาณอ้างอิงสำหรับสร้าง PWM

```

ส่วนที่ 3 โปรแกรมภาษาซีสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM โดยจะเป็นกระบวนการภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมด้านเท่า กับสัญญาณอ้างอิง แสดงดังนี้

```

// Phase shift technique
EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 1; // กำหนดให้ pwm1 ทำงานที่สถานะเริ่มต้น
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1; // คำสั่งเลื่อนเฟส pwm 2
EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0; // ให้ pwm2 มีลักษณะเหมือน pwm1
EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 7500/3; // ให้ pwm2 เลื่อนเฟสไป 120 องศา

```

```

EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;           // คำสั่งเลื่อนเฟส pwm 2
EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 7500*2/3;  // ให้ pwm3 เลื่อนเฟสไป 240 องศา

// convert PI single to DUTY

duty1=3750-(pis1*23.4375);                //แปลง pis1 เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ duty1
duty2=3750-(pis2*23.4375);                //แปลง pis2 เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ duty2
duty3=3750-(pis2*23.4375);                //แปลง pis2 เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ duty3

// DUTY limiter

if(duty1>3750){duty1=3750;}                //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่ต่ำกว่า 0
else if(duty1<750){duty1=750;}            //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่เกิน 0.7
else {duty1=duty1;}

if(duty2>3750){duty2=3750;}                //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่ต่ำกว่า 0
else if(duty2<750){duty2=750;}            //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่เกิน 0.7
else {duty2=duty2;}

if(duty3>3750){duty3=3750;}                //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่ต่ำกว่า 0
else if(duty3<750){duty3=750;}            //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่เกิน 0.7
else {duty3=duty3;}

// update DUTY

EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = duty3;         //อัปเดตสัญญาณ PWM สำหรับสวิตช์ S3
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = duty2;         //อัปเดตสัญญาณ PWM สำหรับสวิตช์ S2
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = duty1;         //อัปเดตสัญญาณ PWM สำหรับสวิตช์ S1

```

ส่วนที่ 4 โปรแกรมภาษาซีสำหรับอัลกอริทึมการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิด

วงจร

```

// Fault detection

n=n+1;

Iin_new_1=iin1;

if(n<500){if(Iin_new_1>Imax){Imax=Iin_new_1;}}

```

```

else{Imax=Imax;}

if(lin_new_1<Imin){Imin=lin_new_1;}

else{Imin=Imin;}

if(n>=500){Idiff=Imax-Imin; n=0; Imax=lin_new_1; Imin=lin_new_1;}

if(T>=3.49 && T<=3.5){Idiff_normal=Idiff;}

if(T>3.8){if(Fault_detect==0){ if(Idiff>(1.2*Idiff_normal)){f = f+1;}

else if(Idiff<=(1.2*Idiff_normal)){f = 0;}

if(f >= 5){Fault_detect=1; m=1;}

else if(f<5){Fault_detect=0;}if(Fault_detect>= 1){Fault_detect=1.0;

if(T>=4.0)

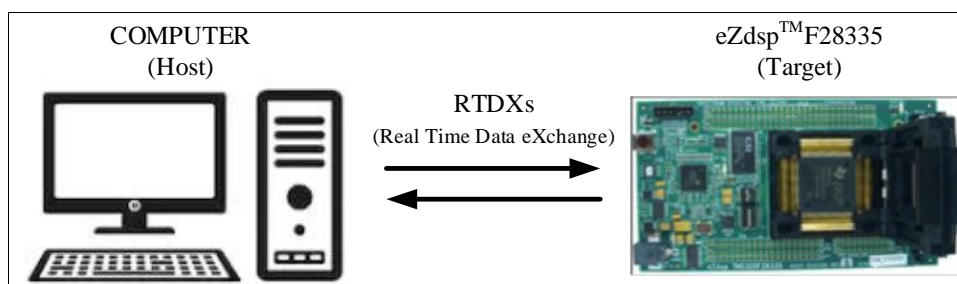
{duty3=3750;EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA=3750; // S3 open_circuit_fault}

```

นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมการทำงานในส่วนอื่น ๆ ที่เป็นเพียงการกำหนดค่าเริ่มต้น และการประกาศฟังก์ชันการทำงาน สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ในส่วนภาคผนวก ก.

6.8 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In Loop : HIL) เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 และโปรแกรม MATLAB Simulink โดยจะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผลควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมพีไอ และเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส ที่มีค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมดังการออกแบบในบทที่ 4 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ และจะอาศัยการสร้างโครงสร้างวงจรทระดับแรงดันแบบสองอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่มีค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 สร้างขึ้นภายในโปรแกรม MATLAB Simulink โดยอาศัยการเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยโปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) การทำงานของฮาร์ดแวร์ในลูปจะเป็นการรับส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchange) เชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม Simulink (Host) กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 (Target) แผนภาพการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 6.24

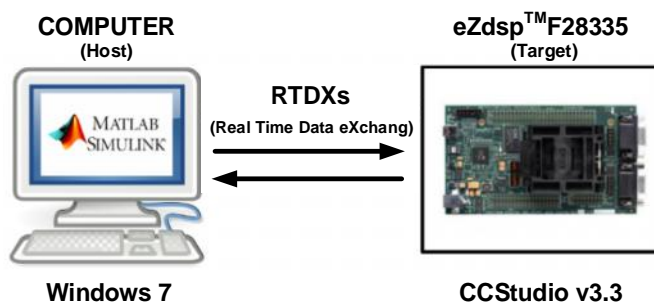


รูปที่ 6.24 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เป็นการจำลองสถานการณ์ที่ใช้บอร์ด DSP ทำหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูล โดยอาศัยการรับส่งข้อมูลผ่านทางช่องทางสื่อสารแบบ RTDX กับโปรแกรม MATLAB Simulink ภายในคอมพิวเตอร์ มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบการทำงานของคำสั่งตัวควบคุมภาษาซี ภายในบอร์ด DSP โดยโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงดังรูปที่ 6.25 รายละเอียดเพิ่มเติมการเชื่อมต่อและใช้งานการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงในภาคผนวก ง.

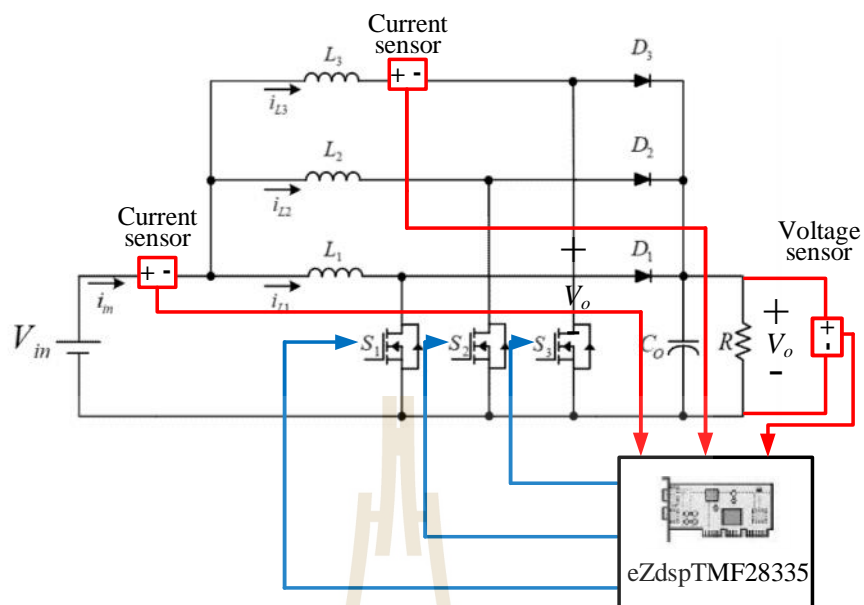
6.9 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In Loop : HIL) เป็นการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ทำงานร่วมกับโปรแกรม MATLAB Simulink โดยสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 เพื่อจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเลือกใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ซึ่งเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจะใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ที่ใช้โปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) เพื่อสร้างตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด หลักการทำงานของฮาร์ดแวร์ในลูปจะเป็นการรับส่งข้อมูลผ่านทางช่องทางสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchang) เชื่อมโยงโปรแกรม Simulink (Host) กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 (Target) โดยแผนภาพการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลแสดงได้ดังรูปที่ 6.25



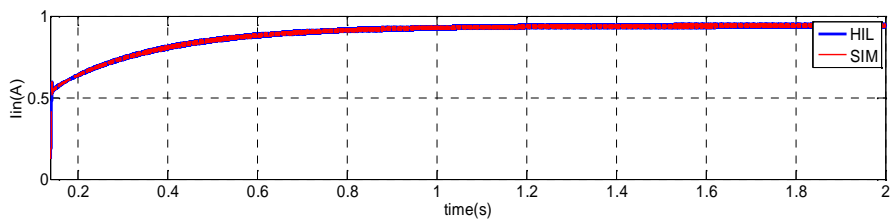
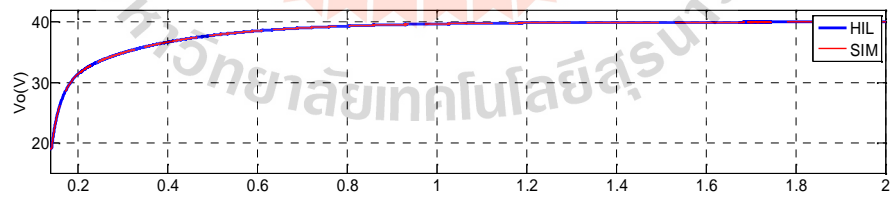
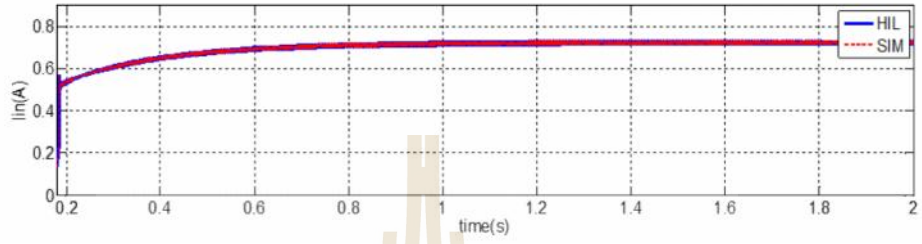
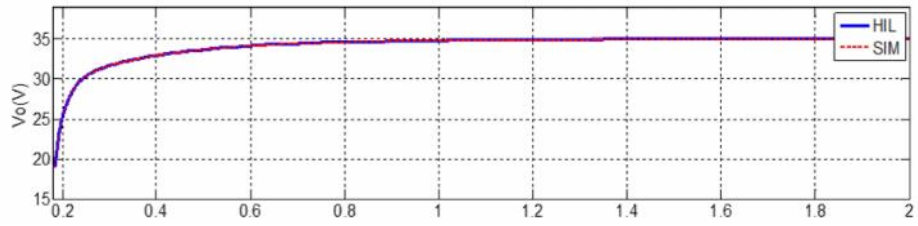
รูปที่ 6.25 แผนการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™F28335

สำหรับเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เป็นการจำลองสถานการณ์ที่ใช้บอร์ด eZdsp™F28335 ทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์ที่เป็นโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์กับฮาร์ดแวร์ที่เป็นบอร์ด eZdsp™F28335 ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ RTDX มีจุดประสงค์เพื่อทำให้การจำลองสถานการณ์มีความเสมือนจริง โดยการจำลองสถานการณ์จะให้ตัวควบคุมพีไอทำงานอยู่บนบอร์ด eZdsp™F28335 ที่เขียนคำสั่งการทำงานด้วยภาษาซี และทำการรับส่งข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์ (MATLAB, Simulink) กับระบบฮาร์ดแวร์ (บนบอร์ด eZdsp™F28335) ผ่านช่องทางการสื่อสาร RTDX โดยโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูป 6.26 ส่วนรายละเอียดการเชื่อมต่อและใช้งานฮาร์ดแวร์ในลูปแสดงใน ภาคผนวก ก.



รูปที่ 6.26 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ

การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด โดยกำหนดให้แรงดันอินพุต V_{in} มีค่าคงที่ 20V แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่ 40V และเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่เวลา 1.2 วินาที ผลการจำลองสถานการณ์ แสดงดังรูปที่ 6.27 ถึงรูปที่ 6.31 เป็นผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink กับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป



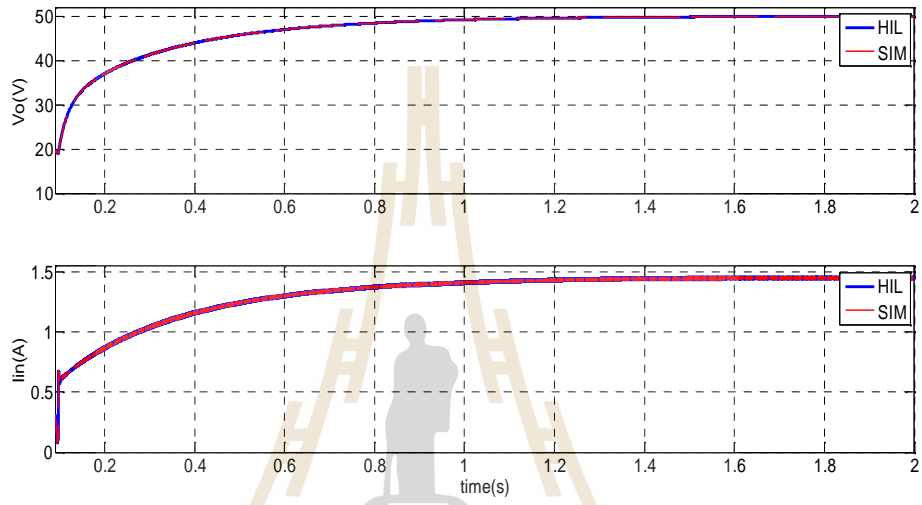
V_o

i_{in}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

V_o

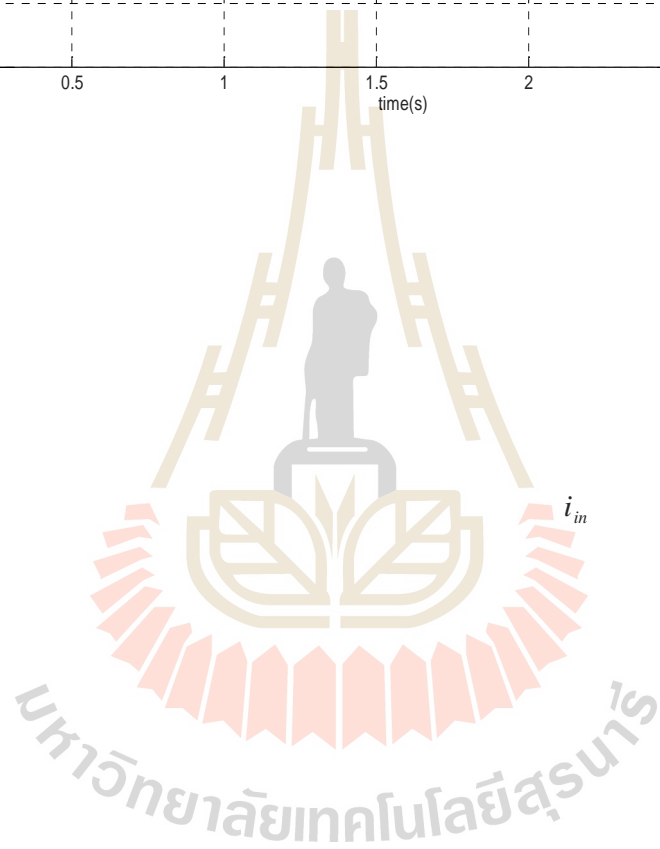
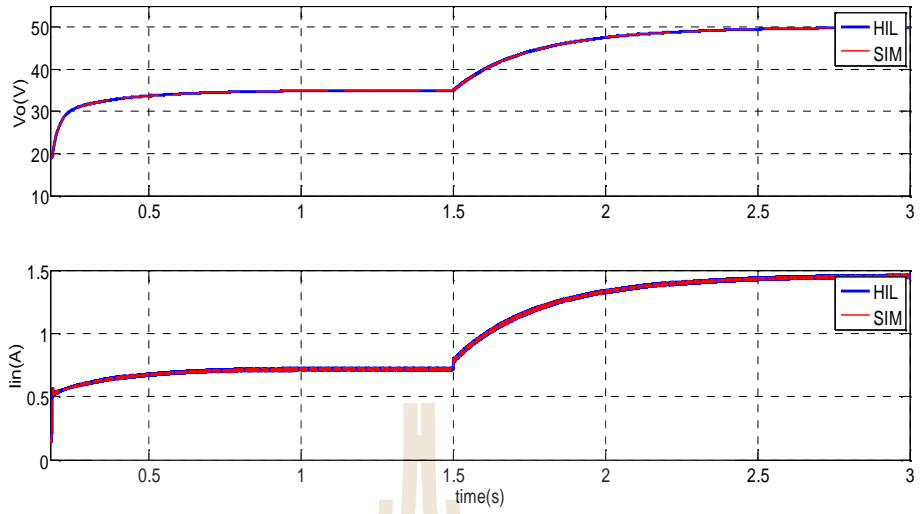
i_{in}



V_o

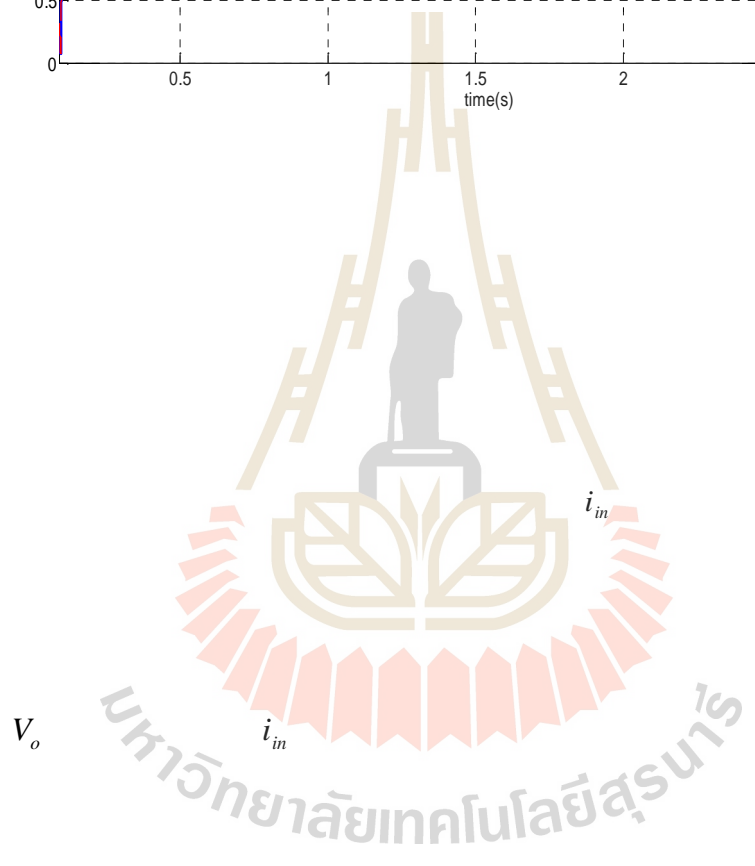
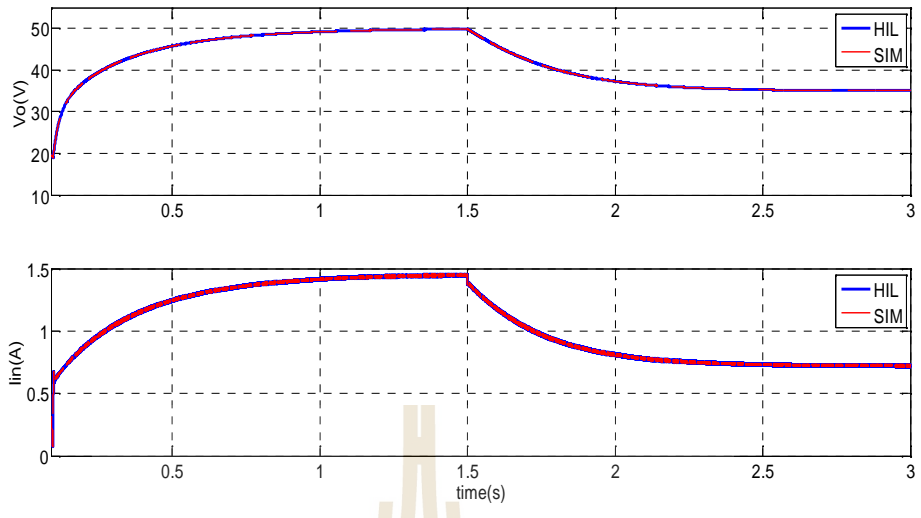
i_{in}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



V_o

i_{in}



V_o

i_{in}

i_{in}

จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อให้มั่นใจว่าตัวควบคุมพีไอที่ทำการออกแบบว่าสามารถใช้ได้กับระบบฮาร์ดแวร์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อเป็นการยืนยันผลจากการจำลองสถานการณ์กับชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ในบทที่ 7 จะนำเสนอผลการทดสอบจากชุดทดสอบ ณ จุดทำงานต่าง ๆ



บทที่ 7

ผลการทดสอบ

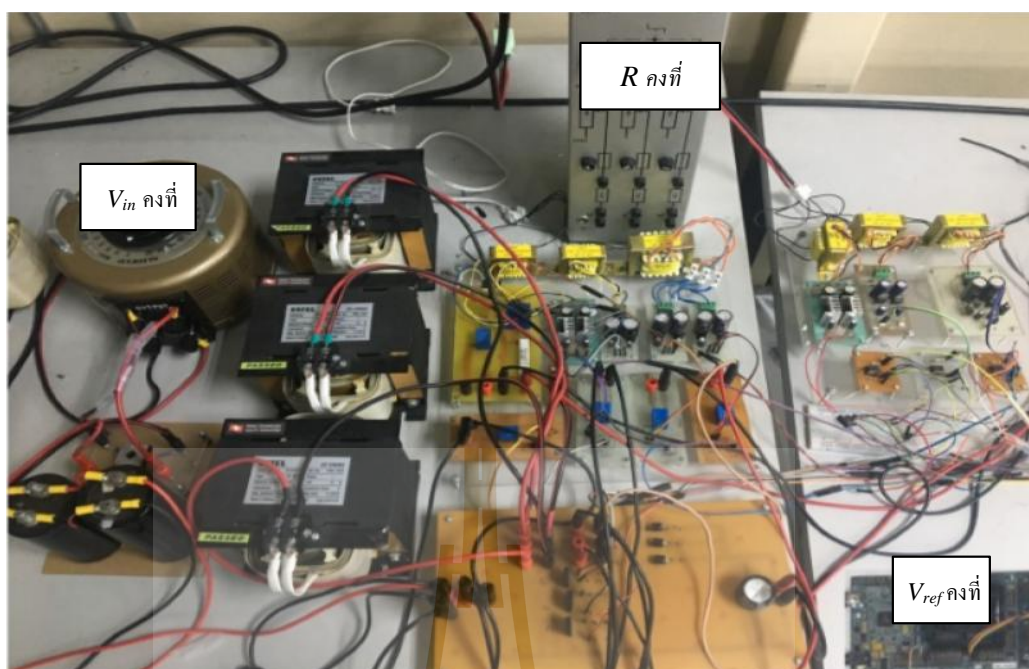
7.1 บทนำ

จากการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด ดังที่นำเสนอในบทที่ 6 โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรที่ได้ออกแบบไว้ดังบทที่ 3 และอาศัยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 มาใช้ในการควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ โดยจะทำการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อมีแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง 35V, 40V และ 50V ตามลำดับ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของวงจร ว่าสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้หรือไม่ พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงการเลื่อนเฟสของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา ในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ต่อจากนั้นจะทำการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร โดยให้เกิดความผิดพลาดขึ้นที่สวิตช์ S_1 ที่แรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 35V, 40V และ 50V ตามลำดับ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของวงจร ว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรมานั้น สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องหรือไม่ พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงการเลื่อนเฟสของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ที่เลื่อนเฟสกัน 120 องศา ในสภาวะที่วงจรทำงานปกติ ซึ่งจะเปลี่ยนเป็น 180 องศา ในสภาวะที่วงจรเกิดความผิดพลาด และเพื่อตรวจสอบว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสภาวะที่เกิดความผิดพลาดนั้น สามารถควบคุมให้วงจรทำงานภายใต้สภาวะที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรได้หรือไม่ จากนั้นดำเนินการซ้ำโดยให้ความผิดพลาดแบบเปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์ S_2 และ S_3 ตามลำดับ เพื่อยืนยันว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ตรวจจับความผิดพลาดนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างครอบคลุมไม่ว่าจะเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ตัวใด จากนั้นจะทำการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของวงจร ว่าตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปนั้นสามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการได้หรือไม่ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรมานั้นจะไม่เกิดการตรวจจับผิดพลาดจากกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตแบบทันทีทันใด จากนั้นจะทำการทดสอบเมื่อมี

การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต V_{in} เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของวงจร ว่าตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปยังสามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ตามที่ต้องการได้หรือไม่และขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิทช์เปิดวงจรนั้น ไม่เกิดการตรวจจับผิดพลาด เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันเอาต์พุต V_{in} เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน สุดท้ายเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน R เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o โดยจะนำเสนอผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต และกระแสอินพุต ที่เกิดขึ้นในวงจรทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิทช์เปิดวงจรนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง โดยจะไม่ตรวจจับผิดพลาดในกรณีมีการปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน R และตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณสามารถควบคุมให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นมีระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการได้ ทั้งนี้การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด ทำขึ้นเพื่อเป็นการยืนยันว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิทช์เปิดวงจรนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นในสถานะเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิทช์เปิดวงจรนั้นสามารถควบคุมให้วงจรทำงานต่อไปได้ แม้ในสถานะที่เกิดความผิดพลาดโดยไม่เสี่ยคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อม

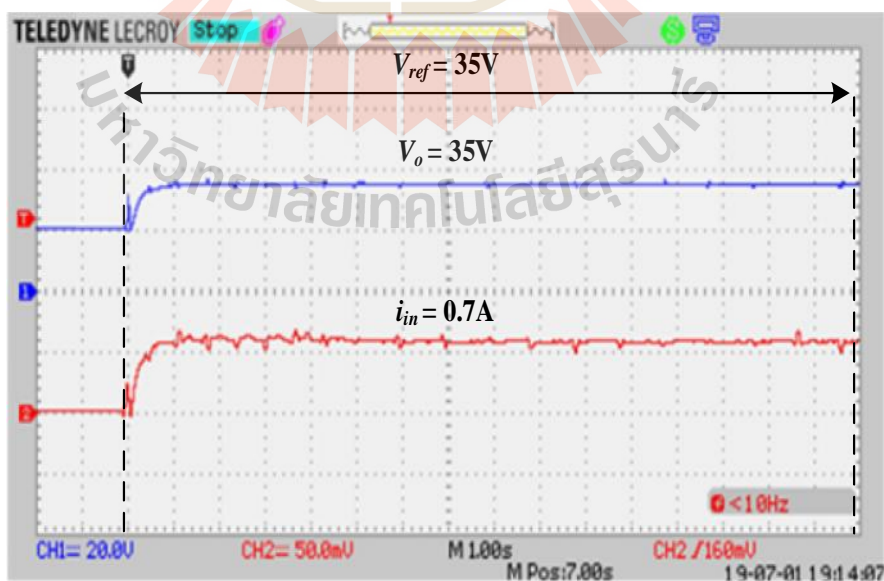
7.2 ผลการทดสอบวงจรเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวส์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด จะอาศัยชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 35V, 40V และ 50V ตามลำดับ ซึ่งจะอาศัยการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงภายในโปรแกรมที่บันทึกลงเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ และปรับระดับแรงดันแหล่งจ่าย V_{in} ให้มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V โดยมีผลการทดสอบวงจรแสดงดังต่อไปนี้

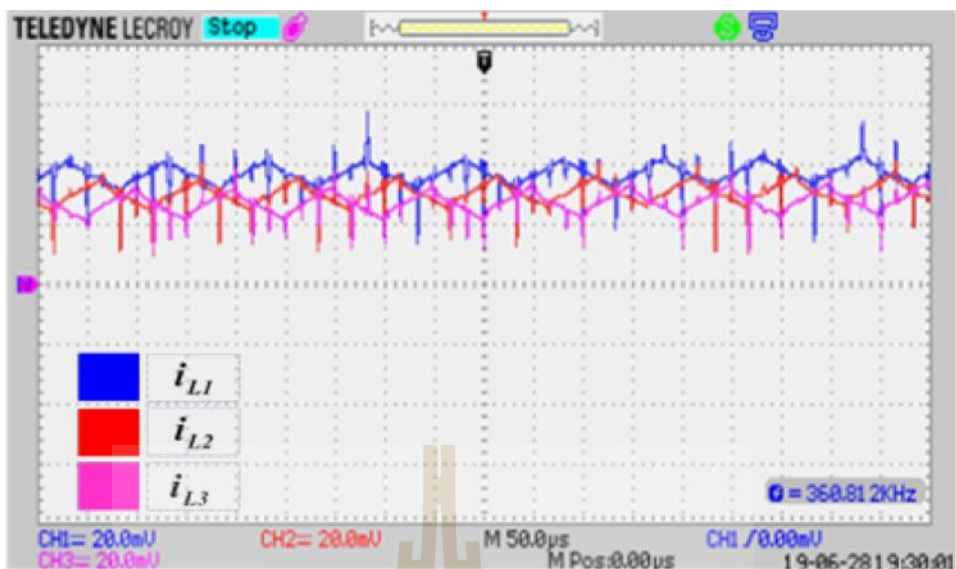


รูปที่ 7.1 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อ V_{ref} คงที่

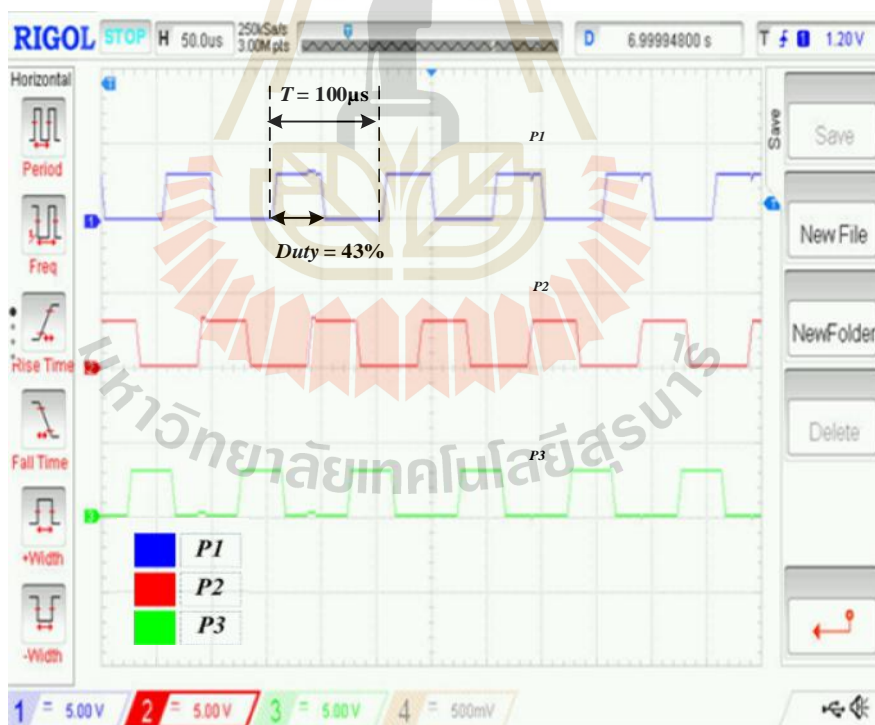
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 35V แสดงได้ดังรูปที่ 7.2 รูปที่ ถึง รูปที่ 7.4



รูปที่ 7.2 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณี $V_{ref} = 35V$

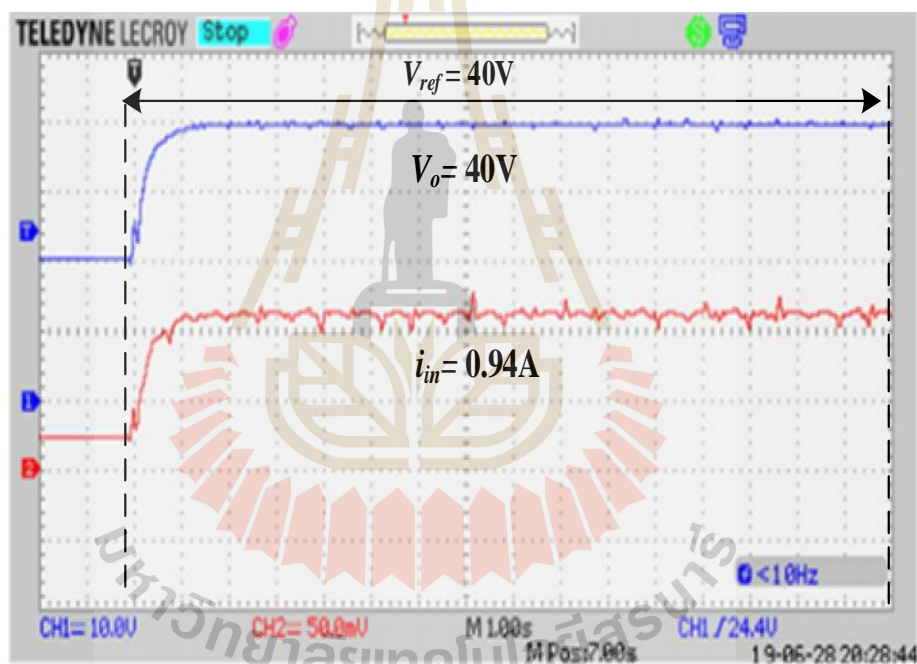


รูปที่ 7.3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 35\text{V}$

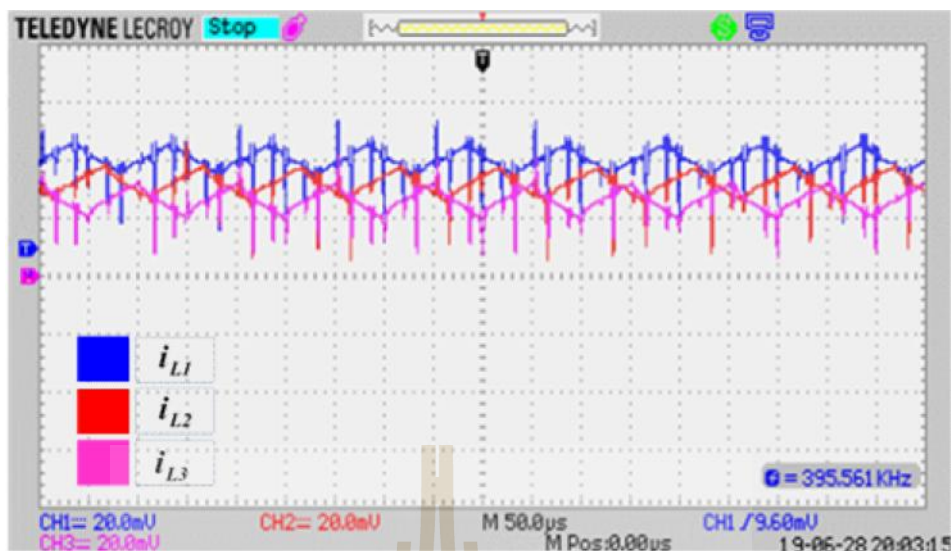


รูปที่ 7.4 สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 35\text{V}$

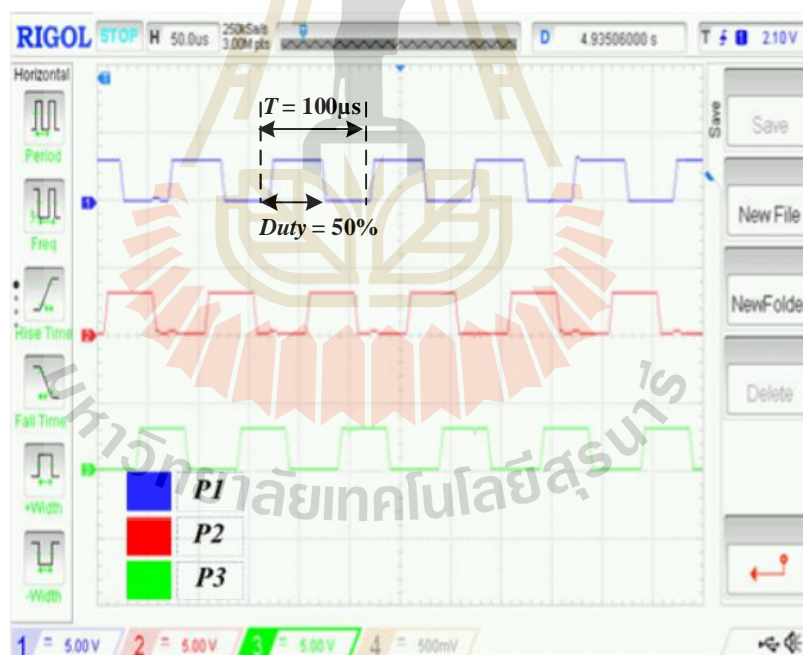
จากรูปที่ 7.2 ถึงรูปที่ 7.4 พบว่าผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 35V แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 35V กระแสอินพุต i_{in} มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.7A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.26A ตามโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ และมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา และมีช่วงเวลาการทำงานเท่ากันประมาณ 43% ของคาบเวลา ต่อไปเป็น ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์สามชั้นเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 40V ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.5 ถึงรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.5 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณี $V_{ref} = 40V$



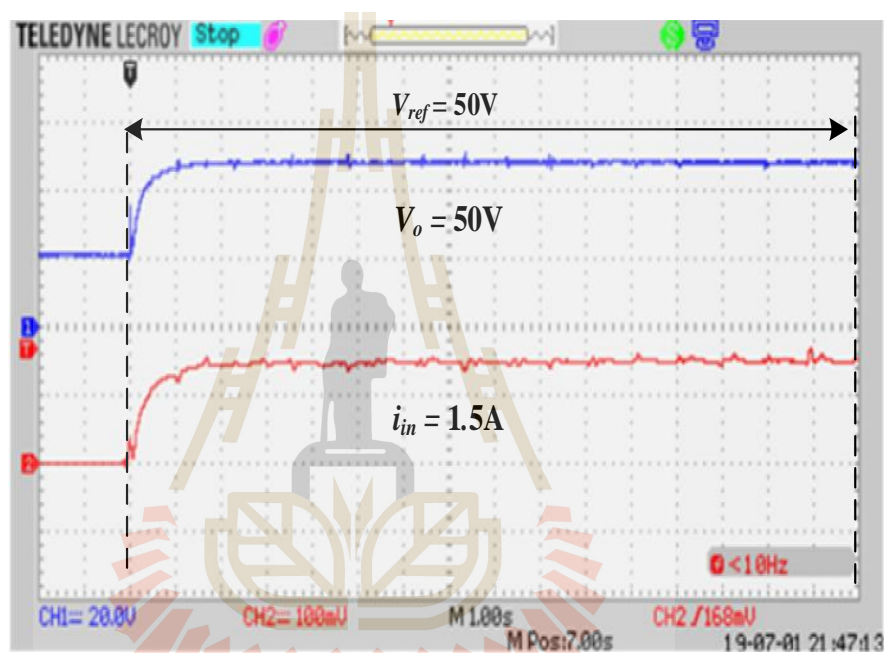
รูปที่ 7.6 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 35V$



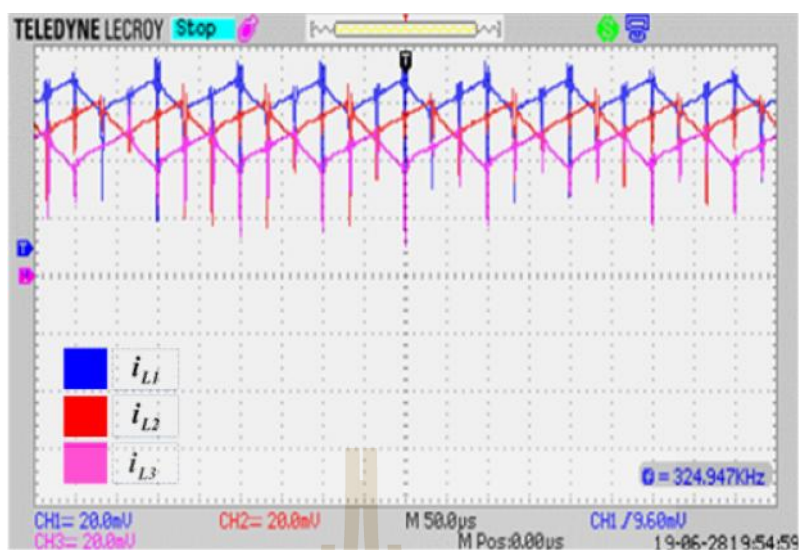
รูปที่ 7.7 สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 40V$

จากรูปที่ 7.5 ถึงรูปที่ 7.7 พบว่าผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 40V แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 40V กระแสอินพุต i_{in} มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.94A กระแส

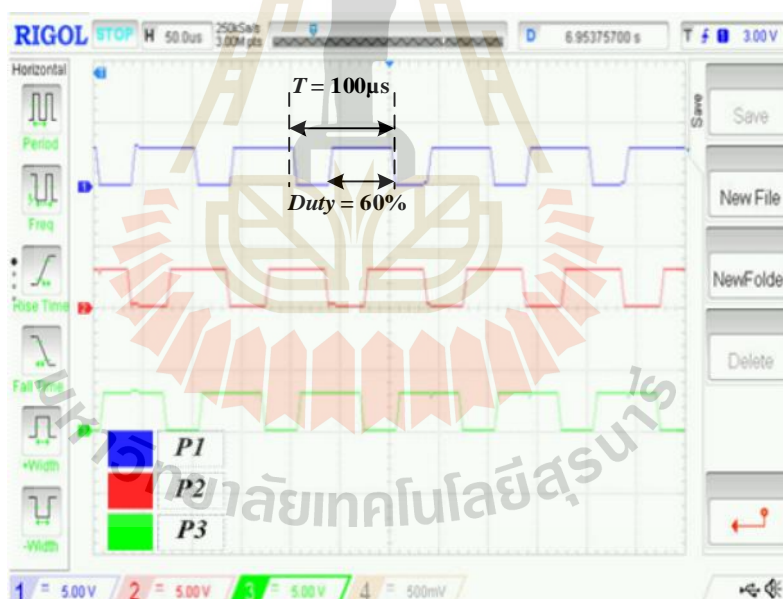
ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.3A ตามโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ และมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา และมีช่วงเวลาการทำงานเท่ากันประมาณ 50% ของคาบเวลา ต่อไปเป็น ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 50V ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.8 ถึงรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.8 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณี $V_{ref} = 50V$



รูปที่ 7.9 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 50V$



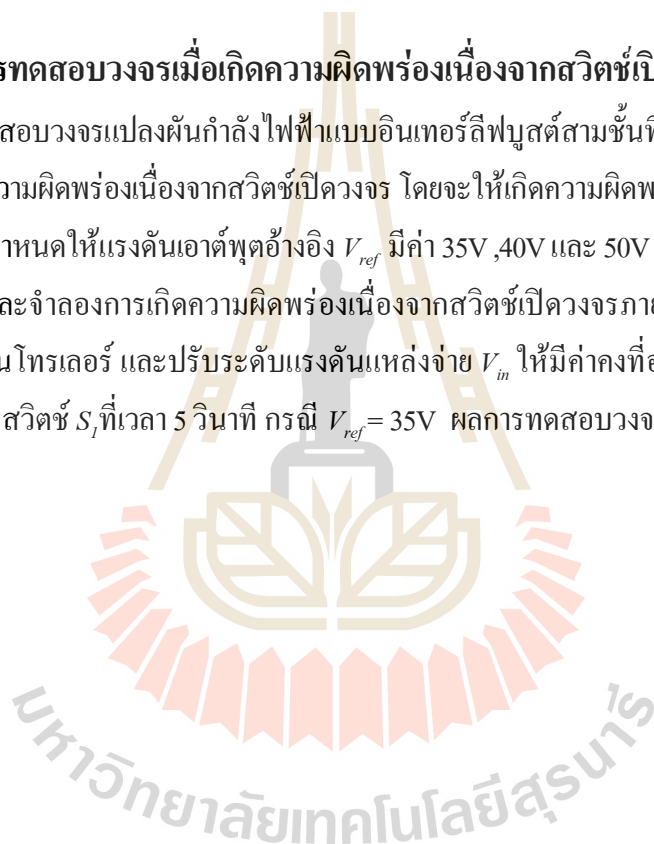
รูปที่ 7.10 สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัวกรณี $V_{ref} = 50V$

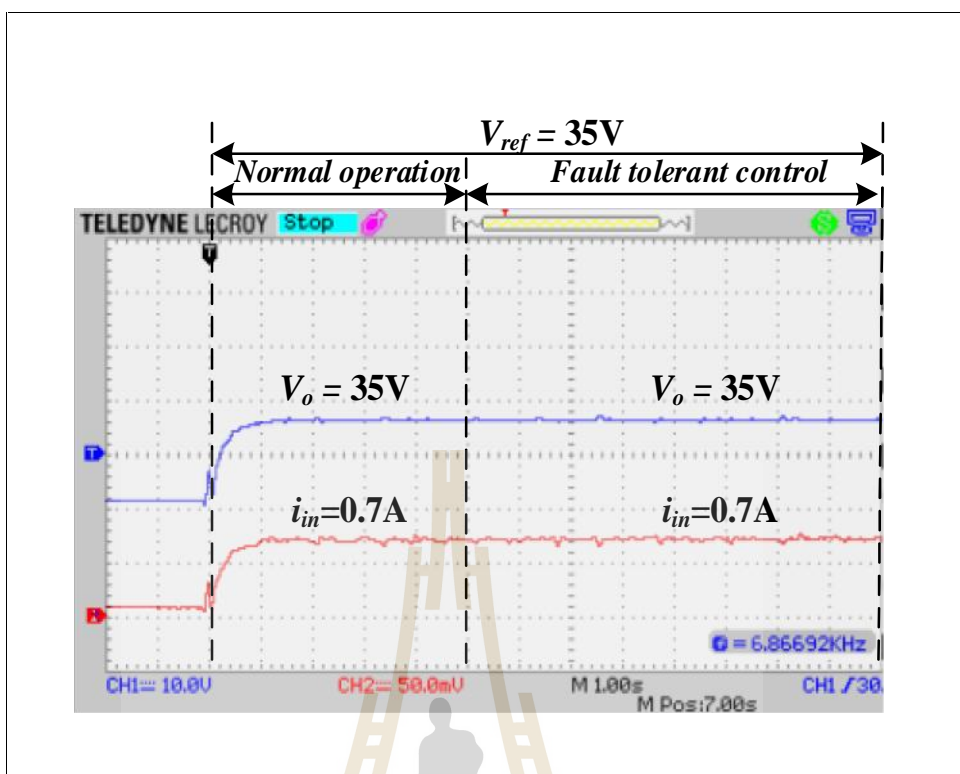
จากรูปที่ 7.8 ถึงรูปที่ 7.10 พบว่าผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 50V แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 50V กระแสอินพุต i_{in} มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.5A ตามโครงสร้างของวงจร $i_{in} = i_{L1} +$

$i_{L2} + i_{L3}$ และมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา และมีช่วงเวลาการทำงานเท่ากันประมาณ 60% ของคาบเวลา แสดงให้เห็นว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด และตัวควบคุมพีไอที่ใช้เทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ให้เหมาะสมกับวงจร สามารถควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้น ให้มีแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

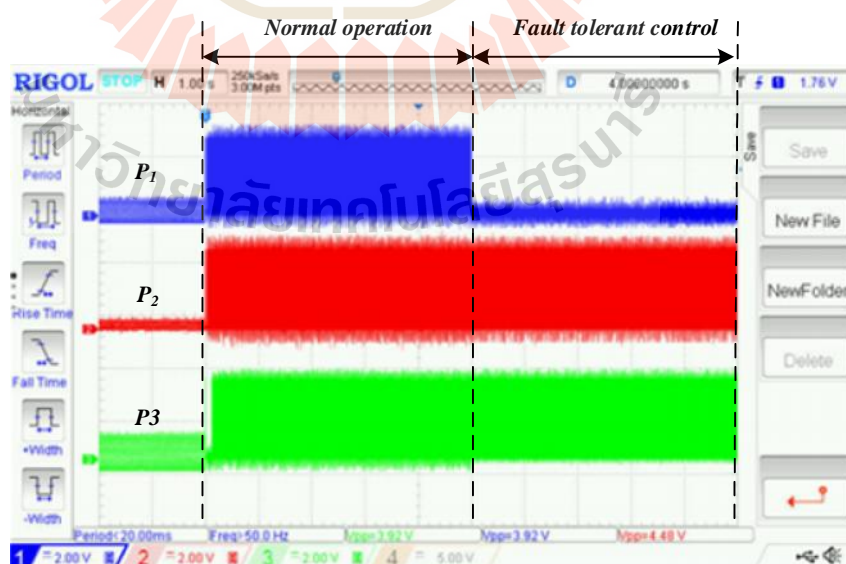
7.3 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร โดยจะทำให้เกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่า 35V, 40V และ 50V ซึ่งจะอาศัยการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงและจำลองการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรภายในโปรแกรมที่บันทึกลงเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ และปรับระดับแรงดันแหล่งจ่าย V_{in} ให้มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V โดยเริ่มจากความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 ที่เวลา 5 วินาที กรณี $V_{ref} = 35V$ ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 7.11 ถึงรูปที่ 7.15

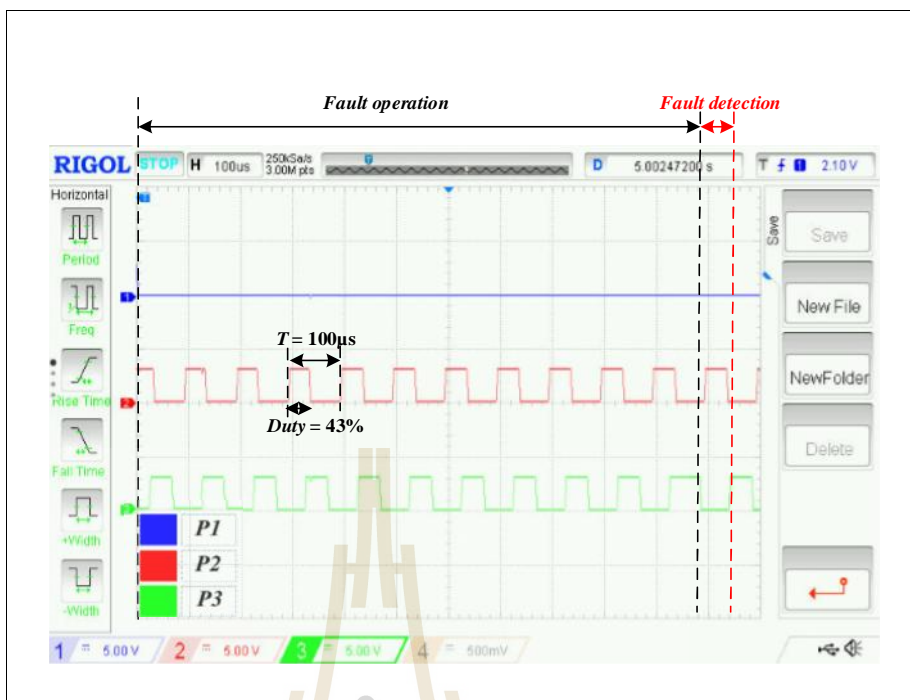




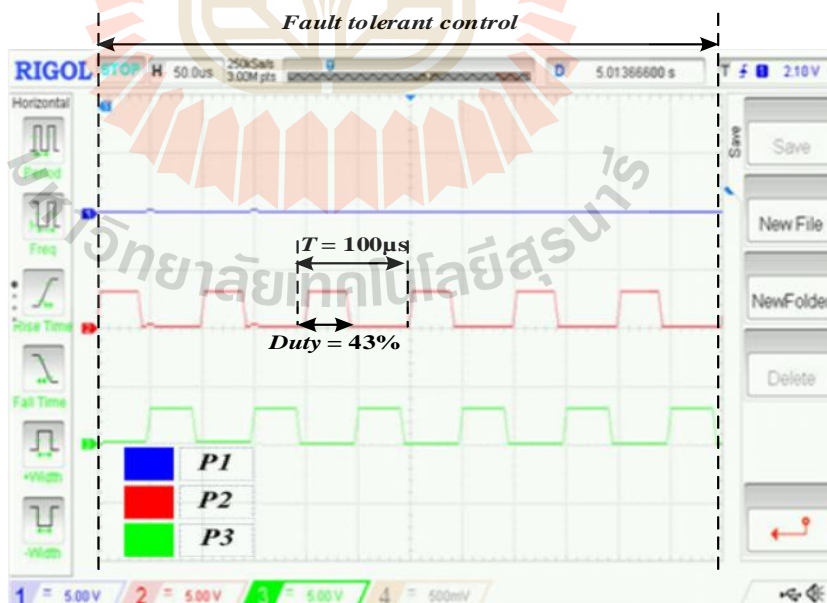
รูปที่ 7.11 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$



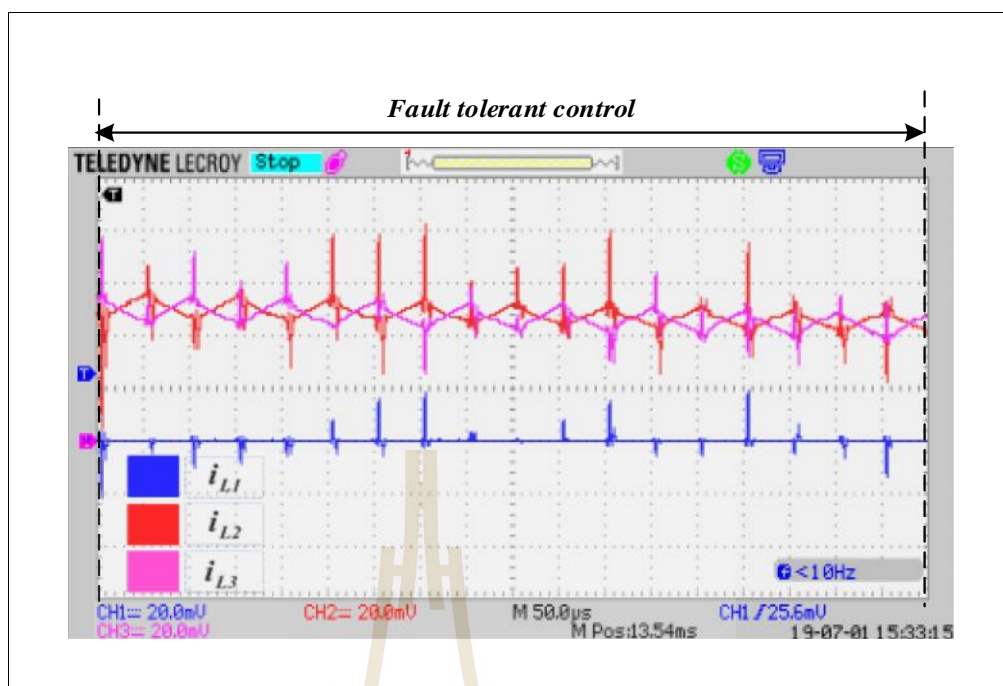
รูปที่ 7.12 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$



รูปที่ 7.13 สัญญาณพัลส์ระหว่างการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$

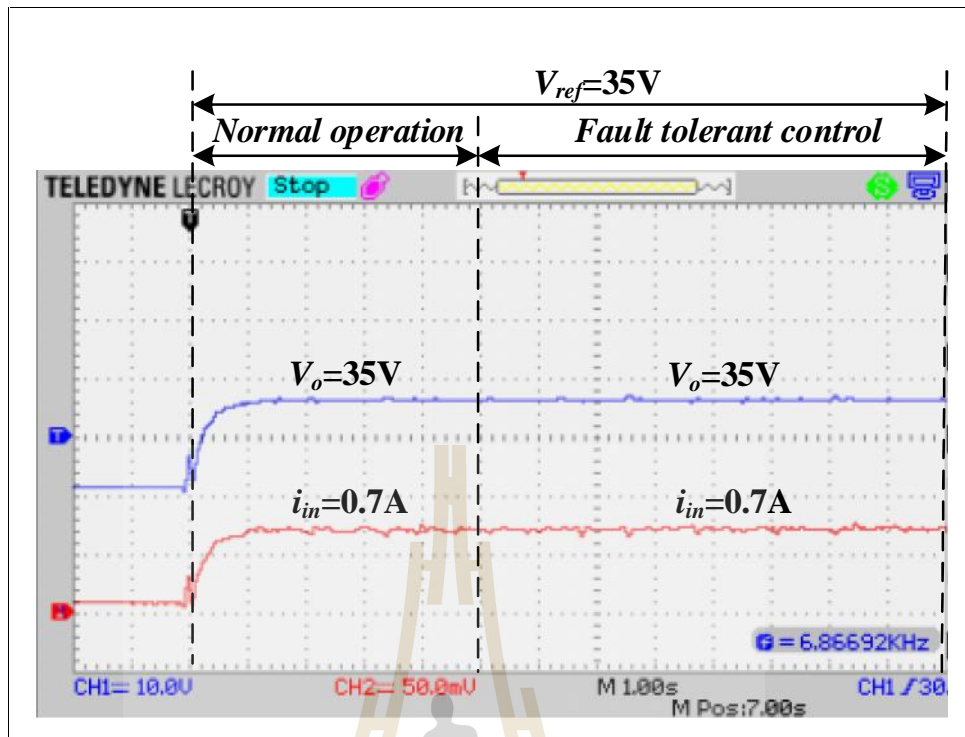


รูปที่ 7.14 สัญญาณพัลส์หลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$

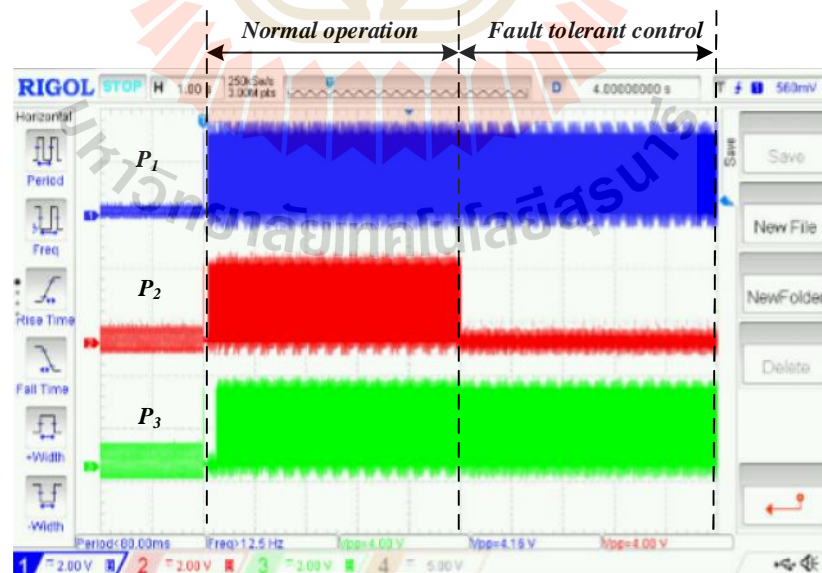


รูปที่ 7.15 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติ
กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$

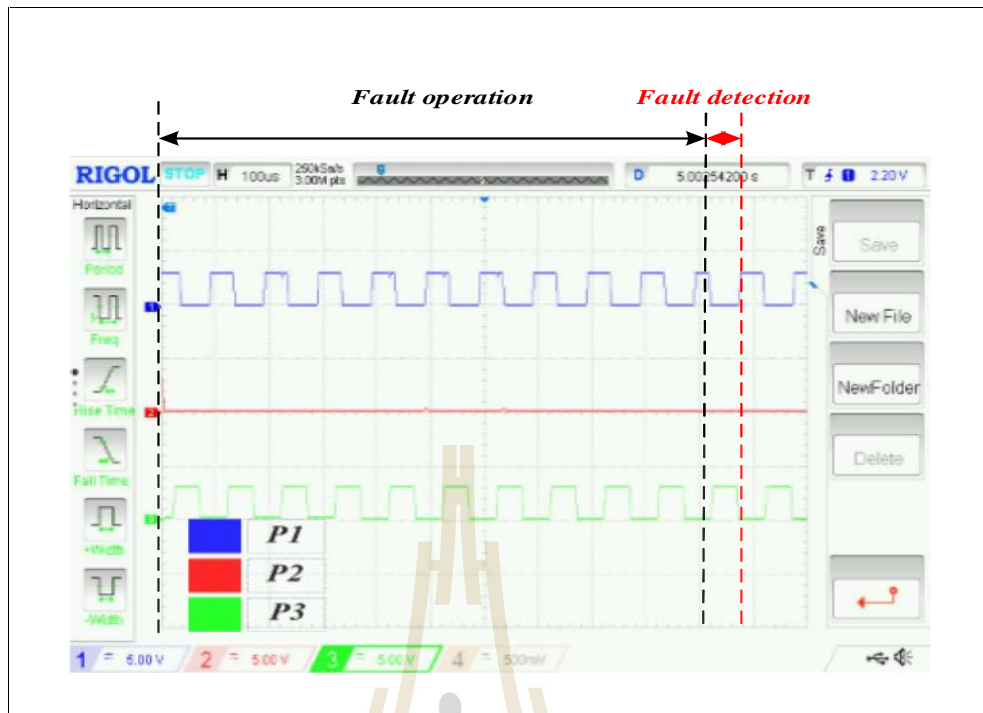
จากรูปที่ 7.12 ถึงรูปที่ 7.15 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 35V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.7A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับโดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 35V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.7A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.13 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.14 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.15 ต่อไปเป็นผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ แสดงได้ ดังรูปที่ 7.16 ถึงรูปที่ 7.19



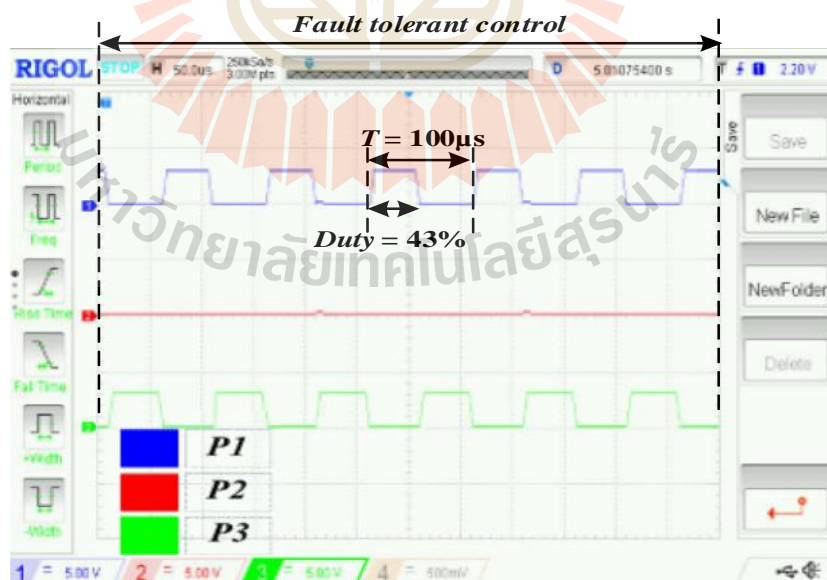
รูปที่ 7.16 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$



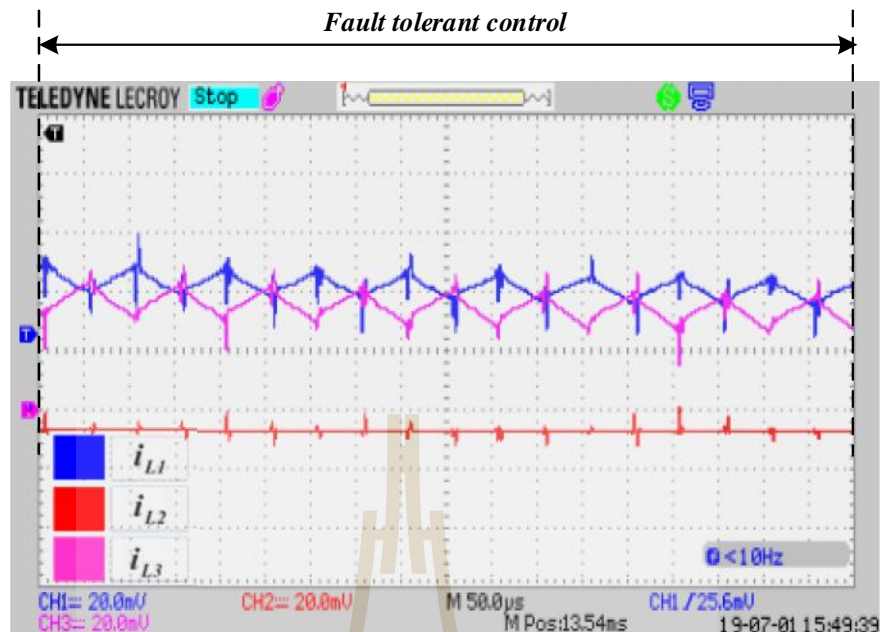
รูปที่ 7.17 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$



รูปที่ 7.18 สัญญาณพัลส์ระหว่างการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$

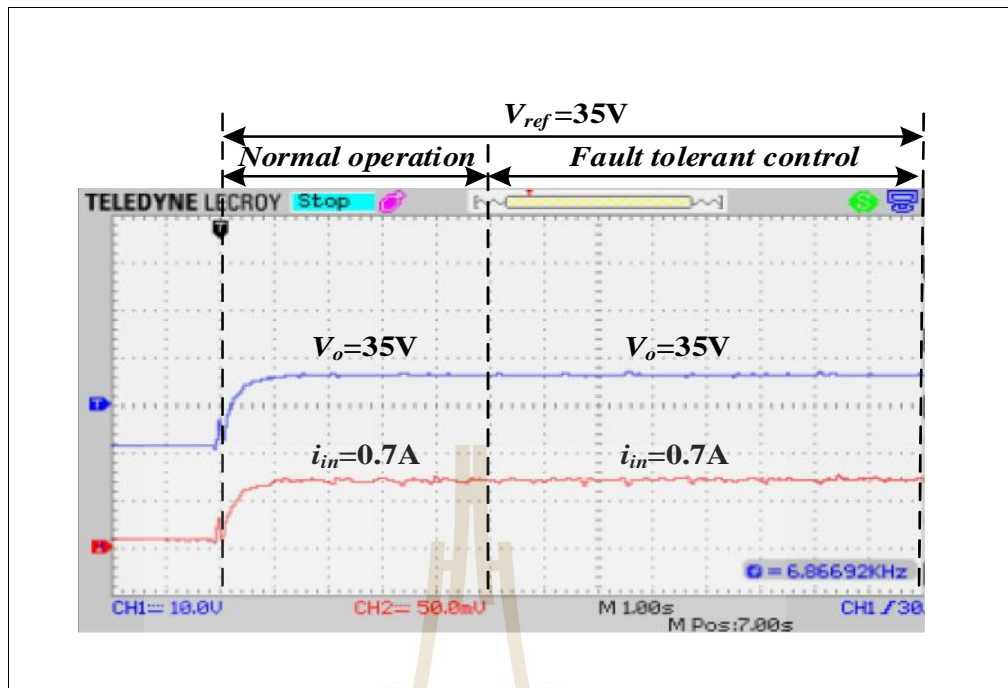


รูปที่ 7.19 สัญญาณพัลส์หลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$

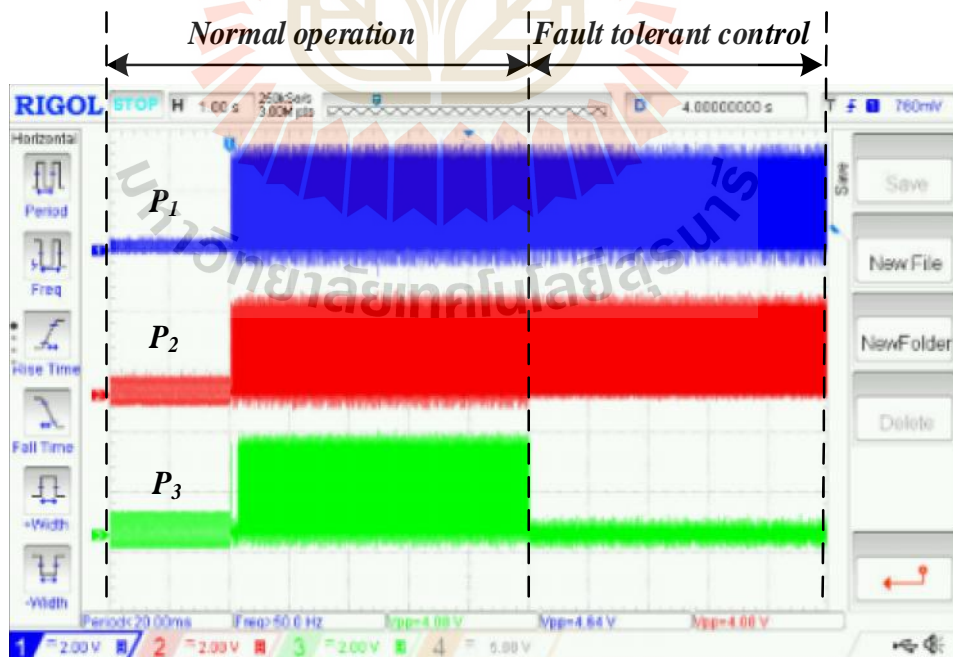


รูปที่ 7.20 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติของกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$

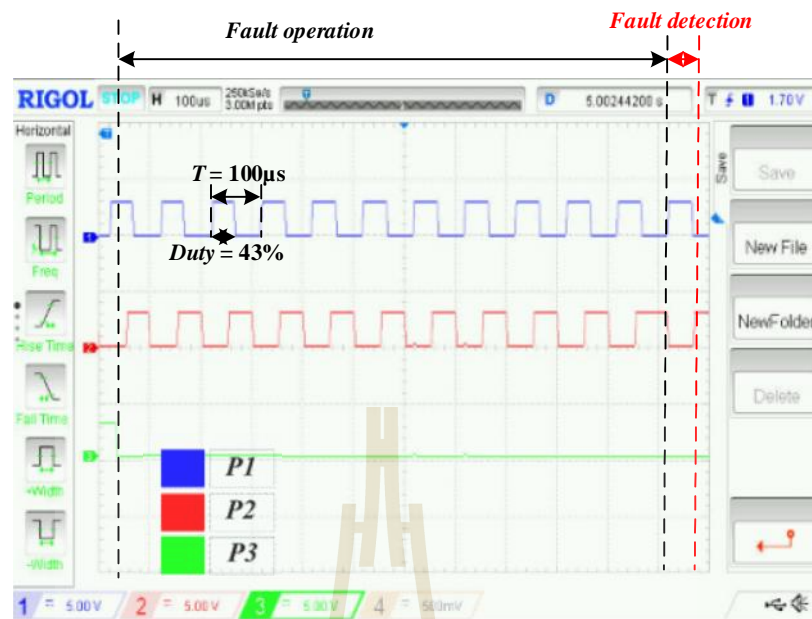
จากรูปที่ 7.16 ถึงรูปที่ 7.20 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิปูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 35V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.7A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 35V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.7A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.18 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.19 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.20 ต่อไปเป็น ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิปูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ แสดงได้ ดังรูปที่ 7.21 ถึงรูปที่ 7.25



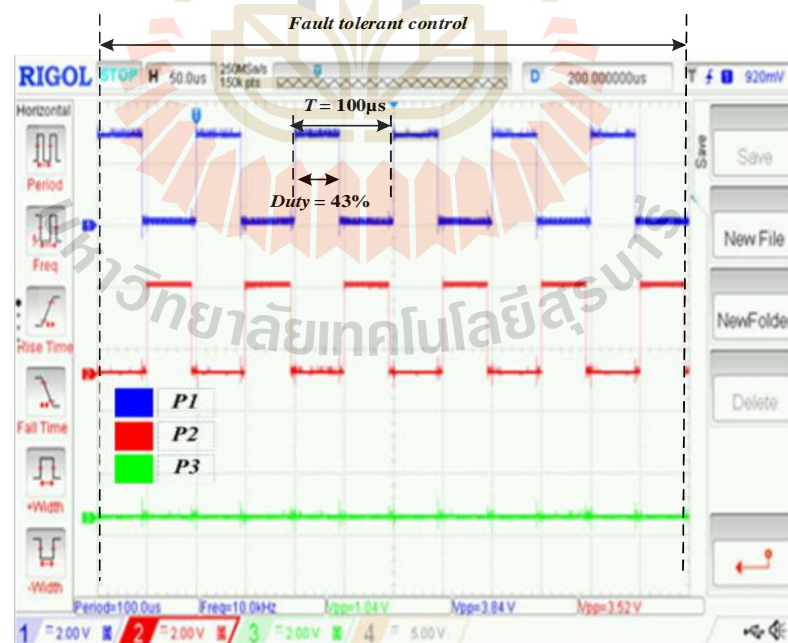
รูปที่ 7.21 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 35V$



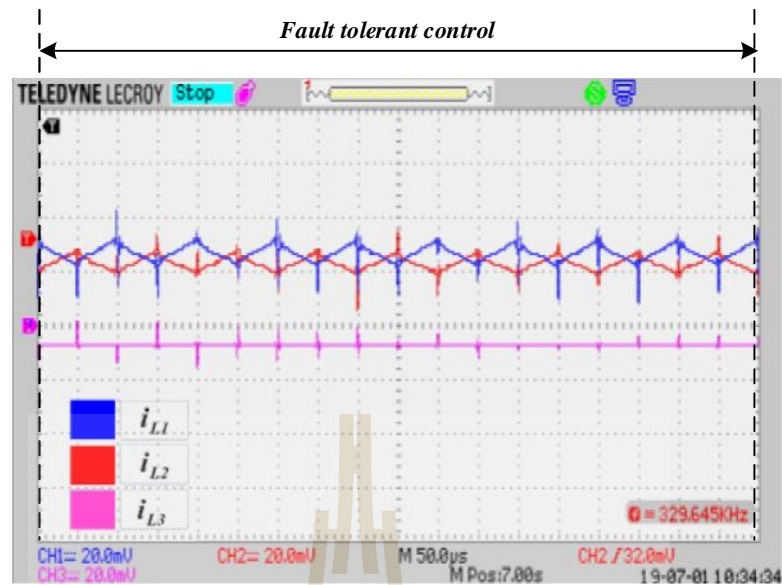
รูปที่ 7.22 สัญญาณพอสส์กรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$



รูปที่ 7.23 สัญญาณพัลส์ระหว่างการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35\text{V}$



รูปที่ 7.24 สัญญาณพัลส์หลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35\text{V}$

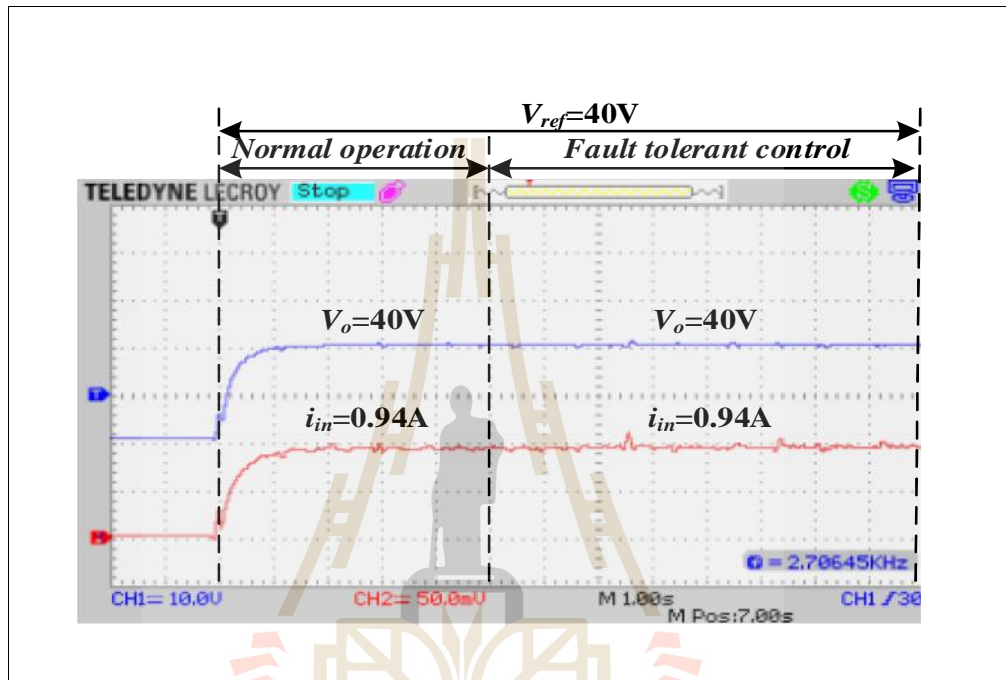


รูปที่ 7.25 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 35V$

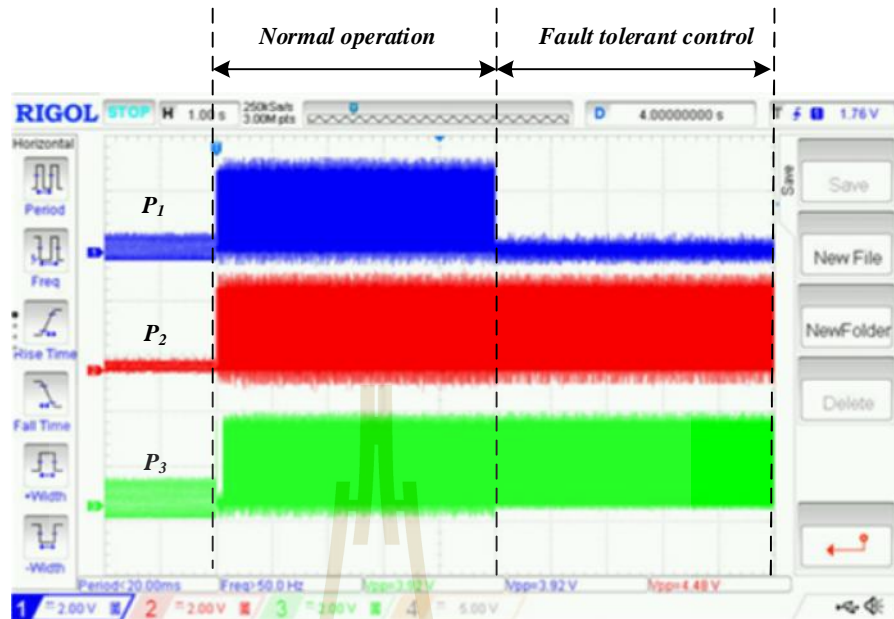
จากรูปที่ 7.21 ถึงรูปที่ 7.25 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิปบูสต์สามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 35V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 35V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.7A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 35V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.7A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.23 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.24 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสเฟอ้อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.25

จากผลการทดสอบที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 35V กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ที่ได้แสดงในรูป 7.12 ถึงรูปที่ 7.25 จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องไม่ว่าจะเกิดความผิดปกติขึ้นที่สวิตช์ตัวใดในวงจร ขั้นตอนวิธีที่ใช้ควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติสามารถควบคุมให้วงจรยังคง

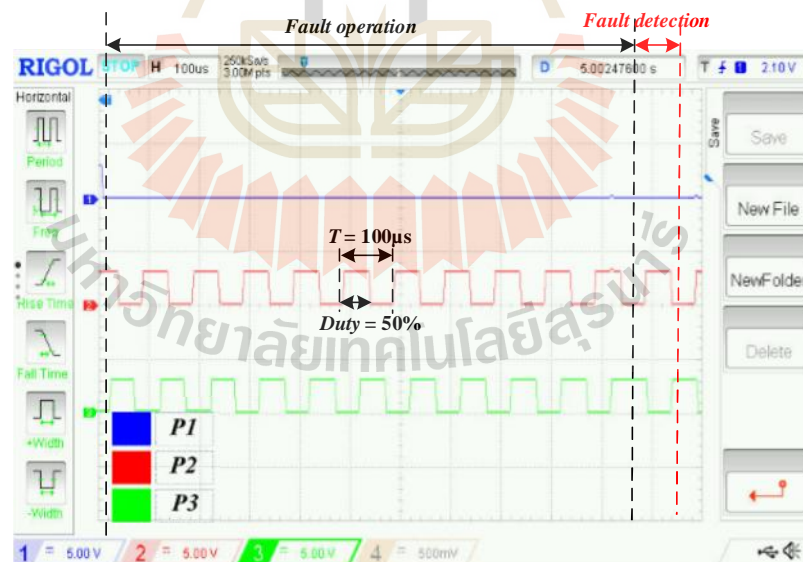
ทำงานต่อไปได้โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสเพื่อที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสถานะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตีสี่พุ่มส์ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 40V เกิดความผิดปกติขึ้นที่สวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 ตามลำดับ ต่อไปนี้



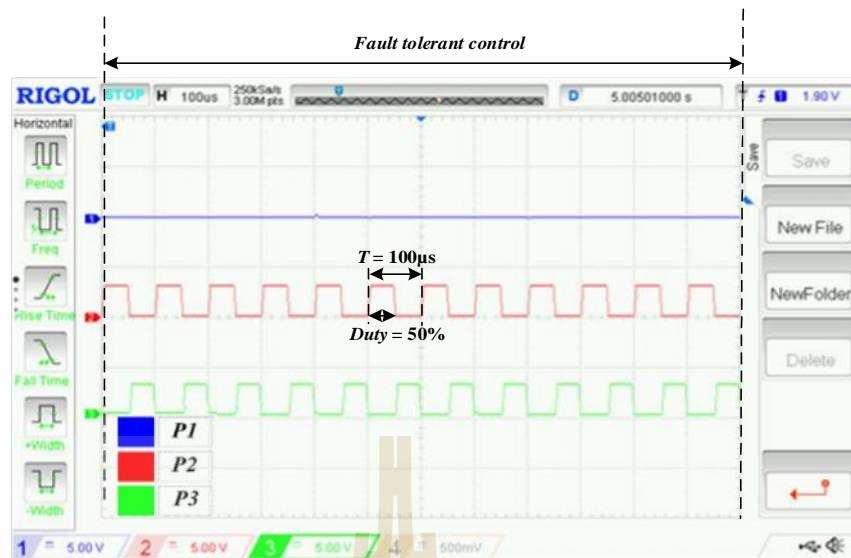
รูปที่ 7.26 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$



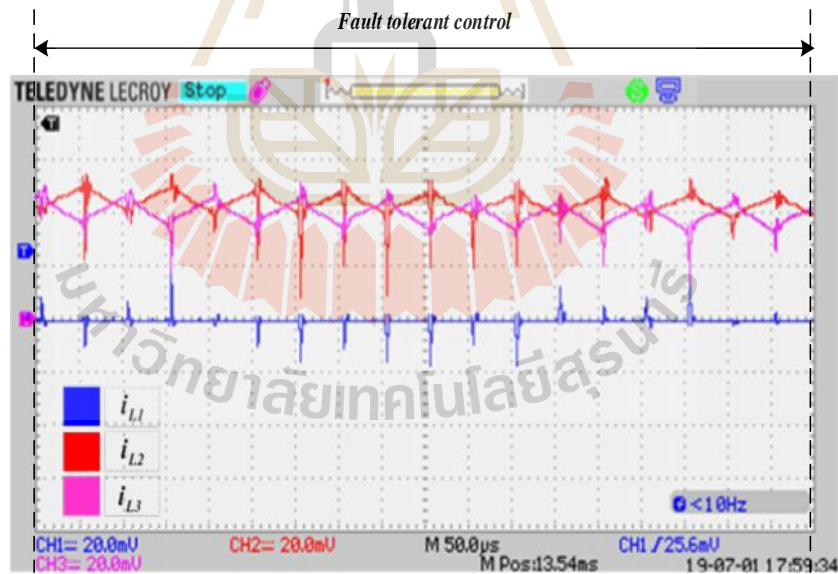
รูปที่ 7.27 สัญญาณพัลส์กระตุ้นเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$



รูปที่ 7.28 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$

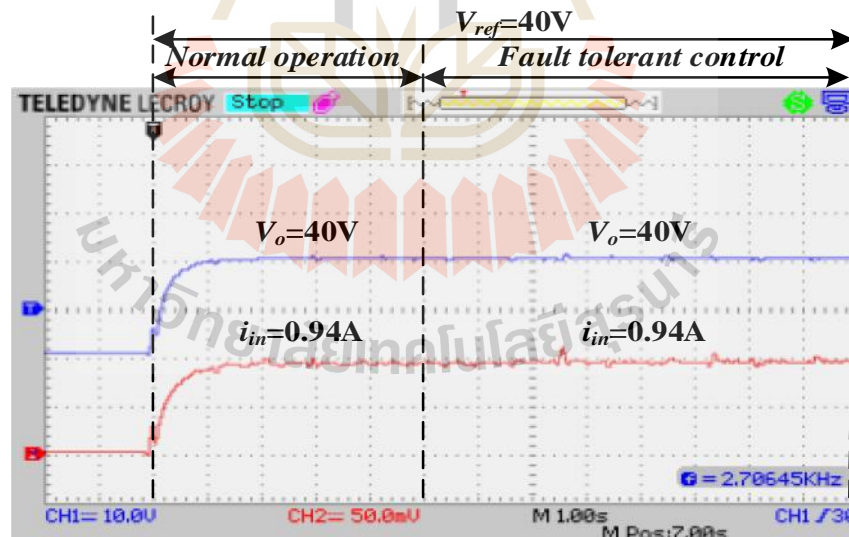


รูปที่ 7.29 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$

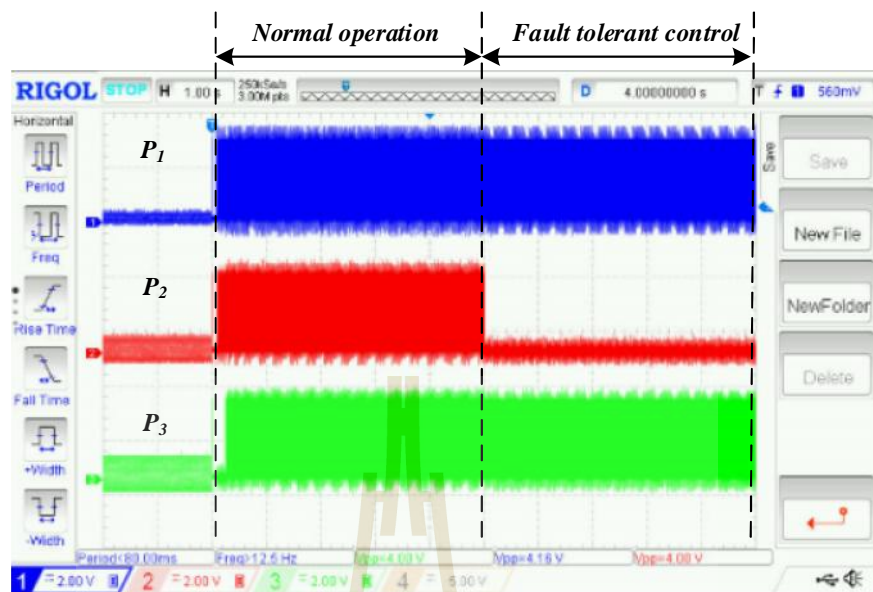


รูปที่ 7.30 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$

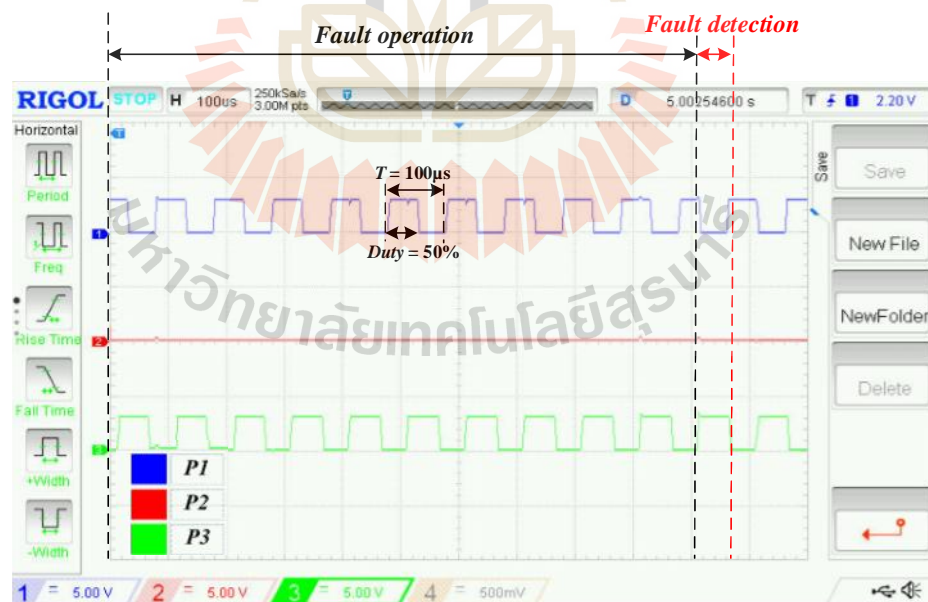
จากรูปที่ 7.26 ถึงรูปที่ 7.30 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 40V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.94A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 40V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.94A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.28 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.29 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.30 ต่อไปเป็นการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 7.31 ถึงรูปที่ 7.35



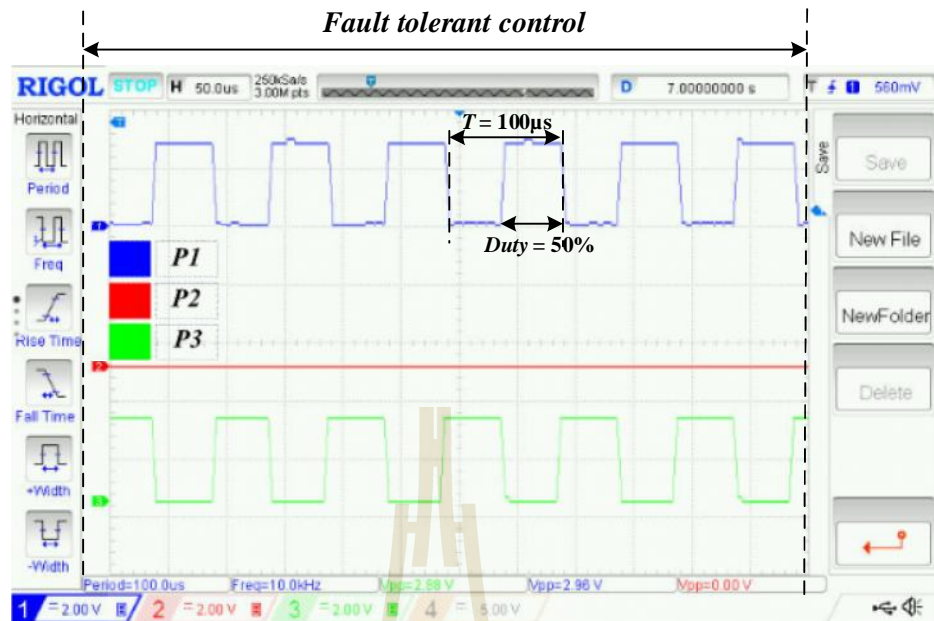
รูปที่ 7.31 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$



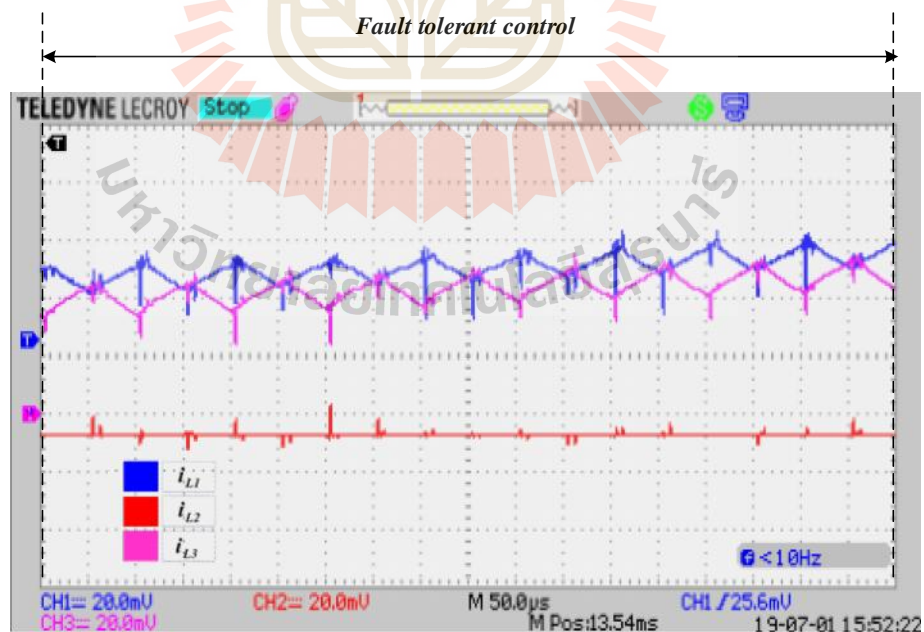
รูปที่ 7.32 สัญญาณพัลส์กระตุ้นเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$



รูปที่ 7.33 สัญญาณพัลส์ระหว่างการตรวจจับความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$

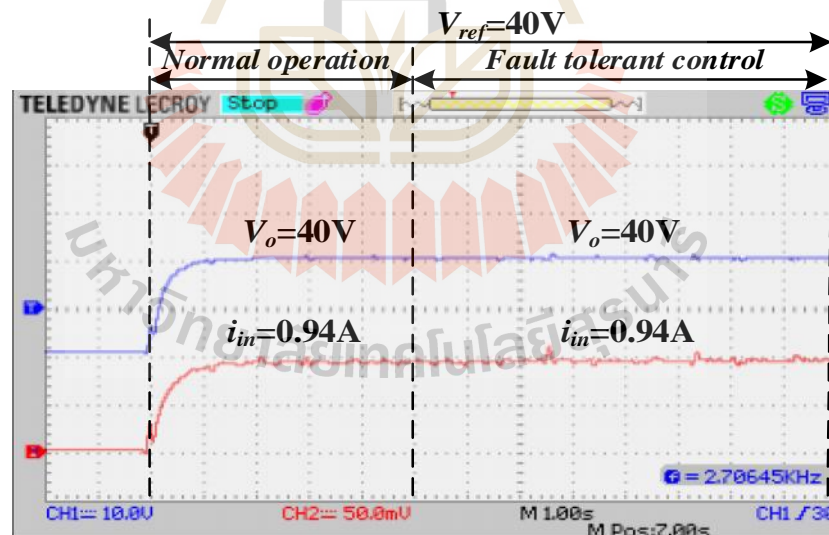


รูปที่ 7.34 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40\text{V}$

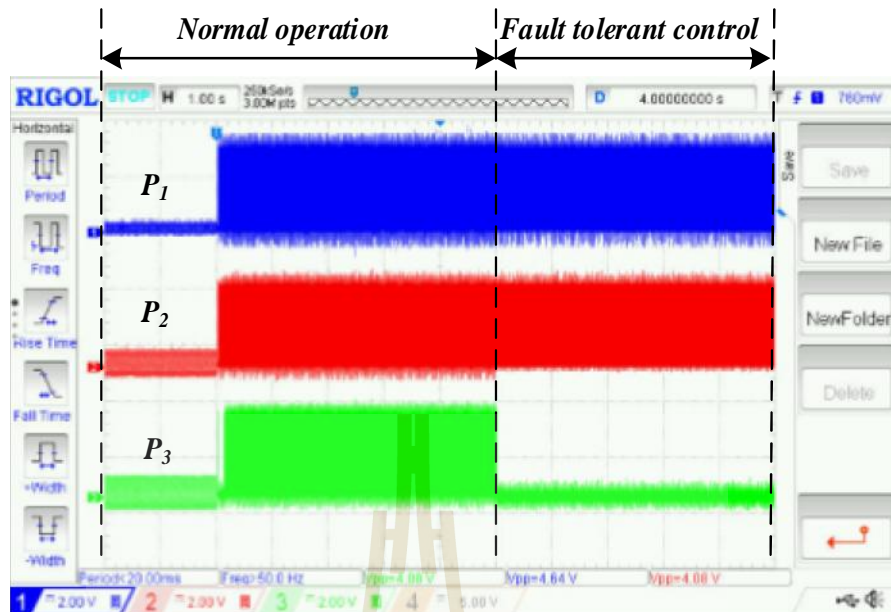


รูปที่ 7.35 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40\text{V}$

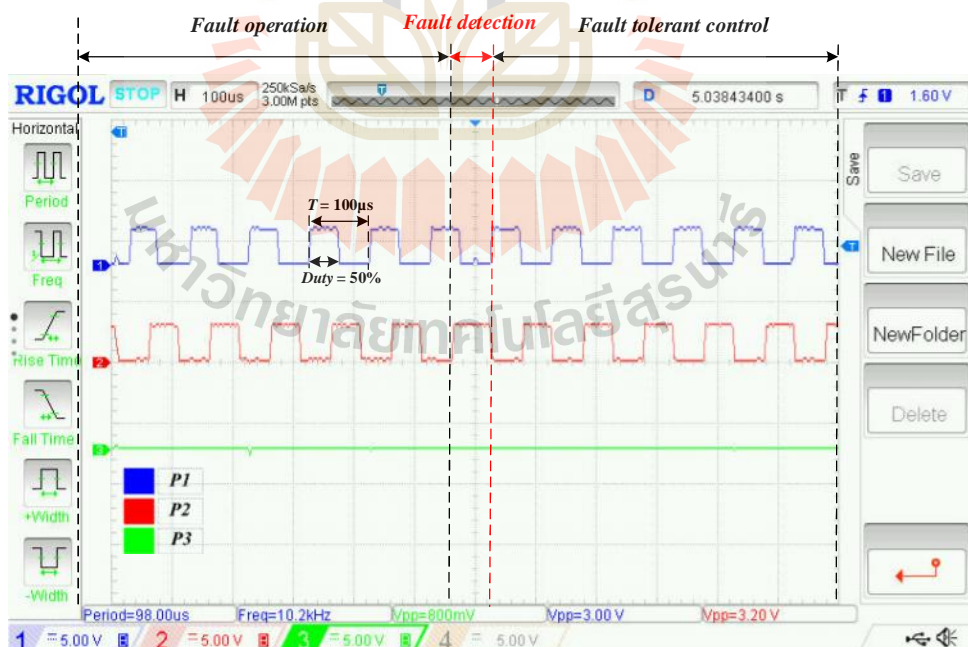
จากรูปที่ 7.31 ถึงรูปที่ 7.35 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 40V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.94A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 40V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.94A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.33 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.34 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.35 ต่อไปเป็นการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ แสดงได้ดังรูปที่ 7.36 ถึงรูปที่ 7.40



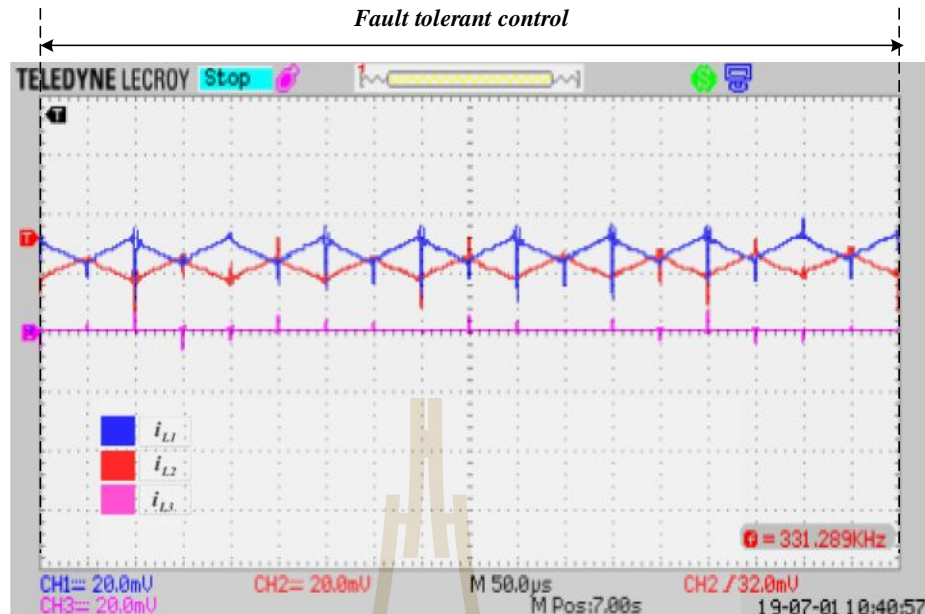
รูปที่ 7.36 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$



รูปที่ 7.37 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$



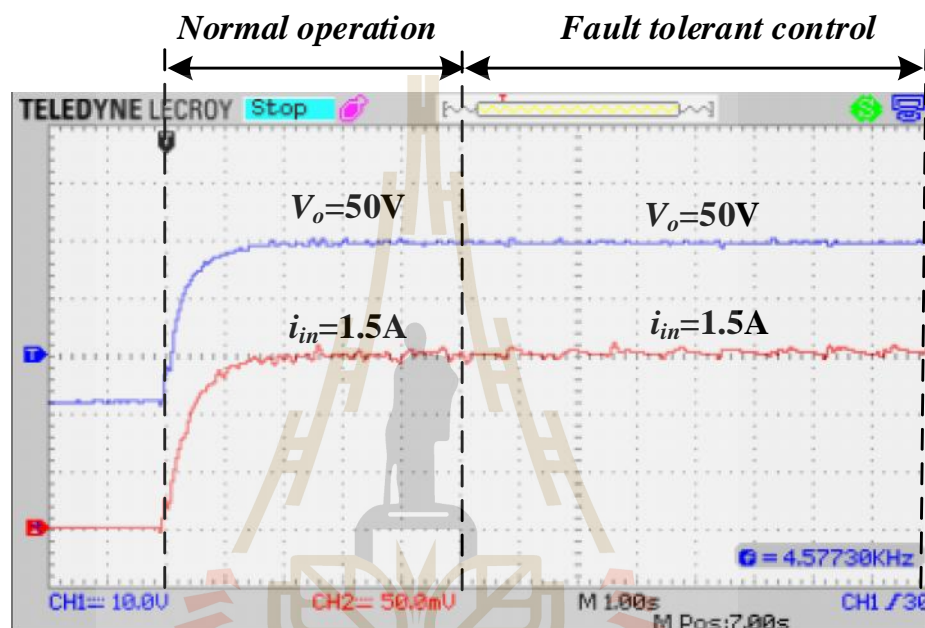
รูปที่ 7.38 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจับความผิดปกติและหลังจากตรวจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 40V$



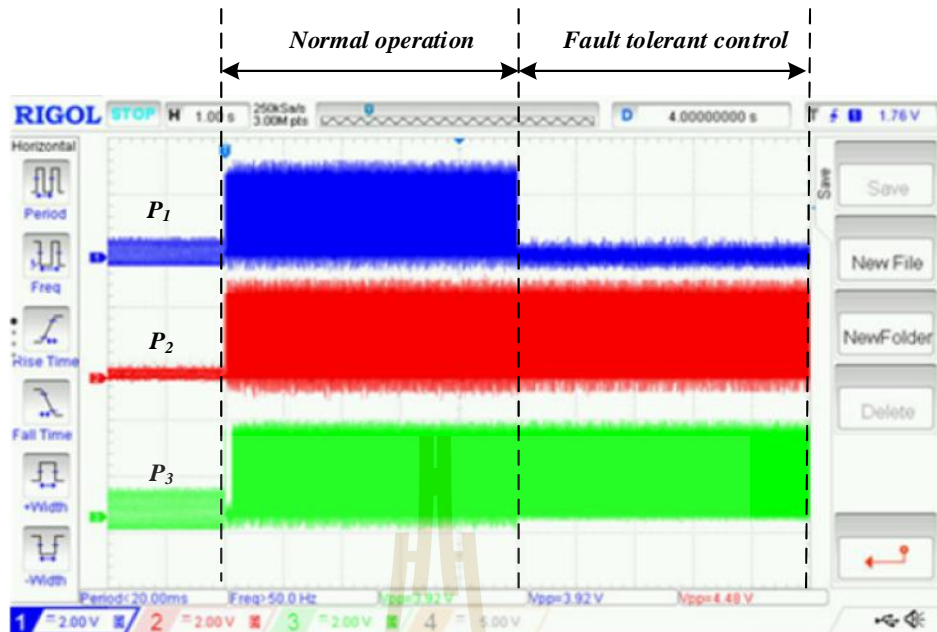
รูปที่ 7.39 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากการตรวจจับความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 40V$

จากรูปที่ 7.36 ถึงรูปที่ 7.39 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ฟลูตสามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 40V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 40V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.94A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 40V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.94A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.38 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.38 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.39 จากผลการทดสอบที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 40V กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ที่ได้แสดงในรูป 7.26 ถึงรูปที่ 7.39 จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องไม่ว่าจะเกิดความผิดปกติขึ้นที่สวิตช์ตัวใดในวงจร ขั้นตอนวิธีที่ใช้ควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติ

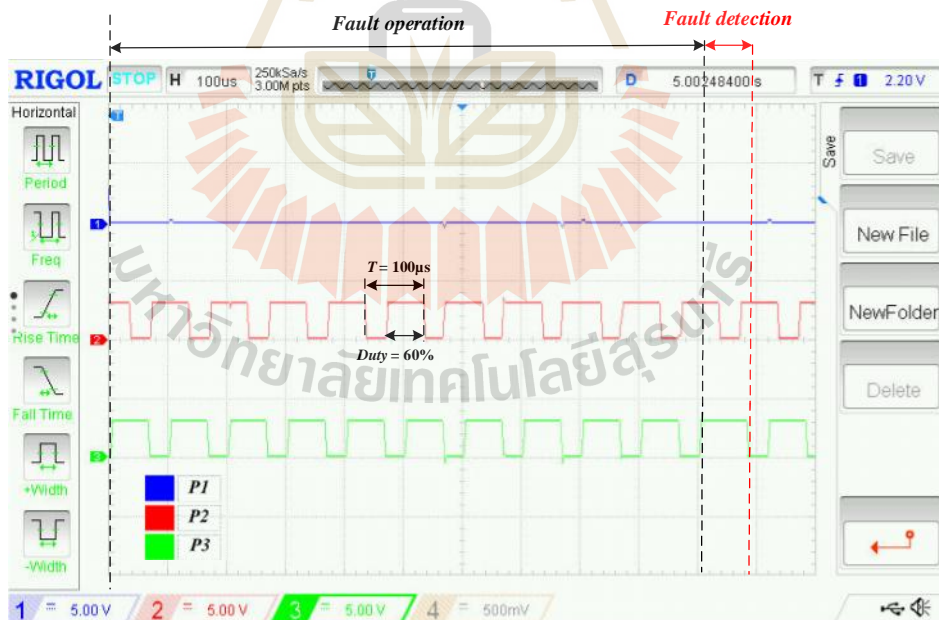
สามารถควบคุมให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสเฟืองที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสถานะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น ต่อไปเป็นการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟูลบริดจ์ที่มีความคงทนต่อความผิดปกติที่ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 50V เกิดความผิดปกติขึ้นที่สวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 ตามลำดับ สามารถแสดงได้ต่อไปนี้



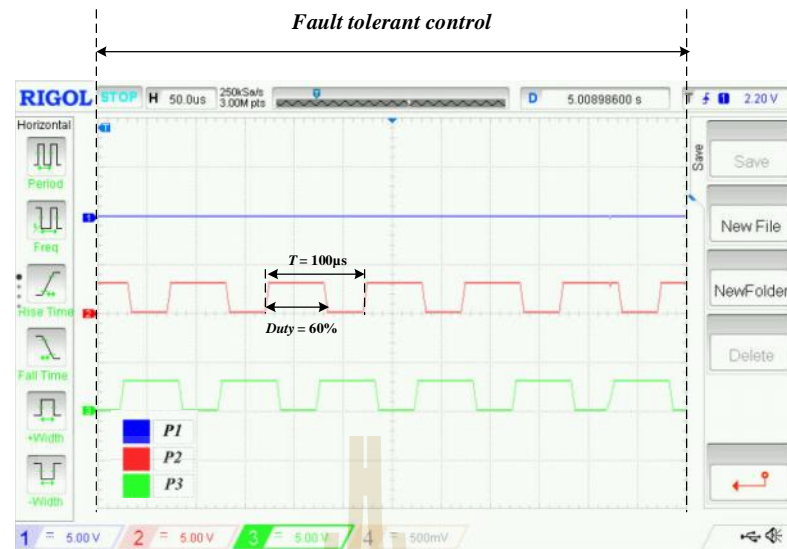
รูปที่ 7.40 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , เวลา 5 วินาที ที่ $V_{ref} = 50V$



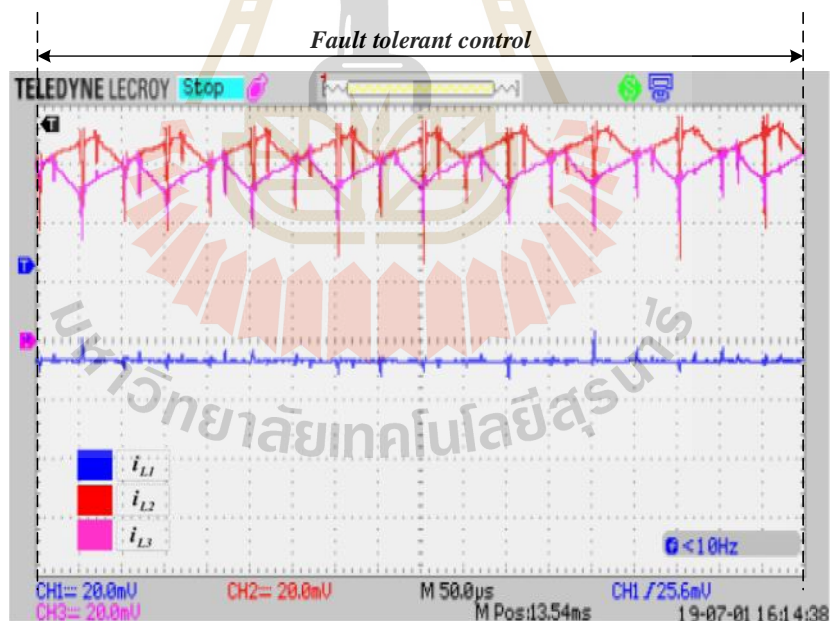
รูปที่ 7.41 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$



รูปที่ 7.42 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

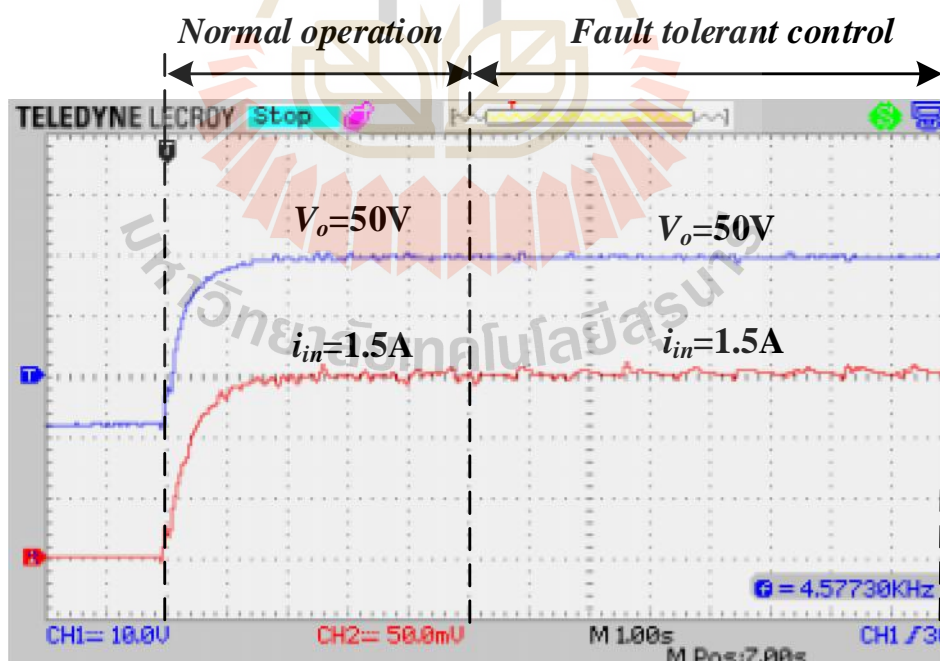


รูปที่ 7.43 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

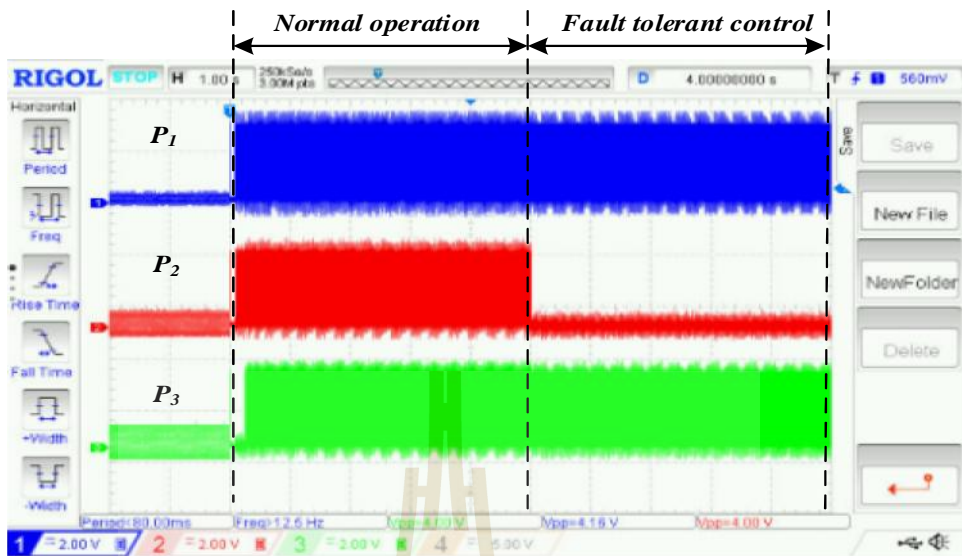


รูปที่ 7.44 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

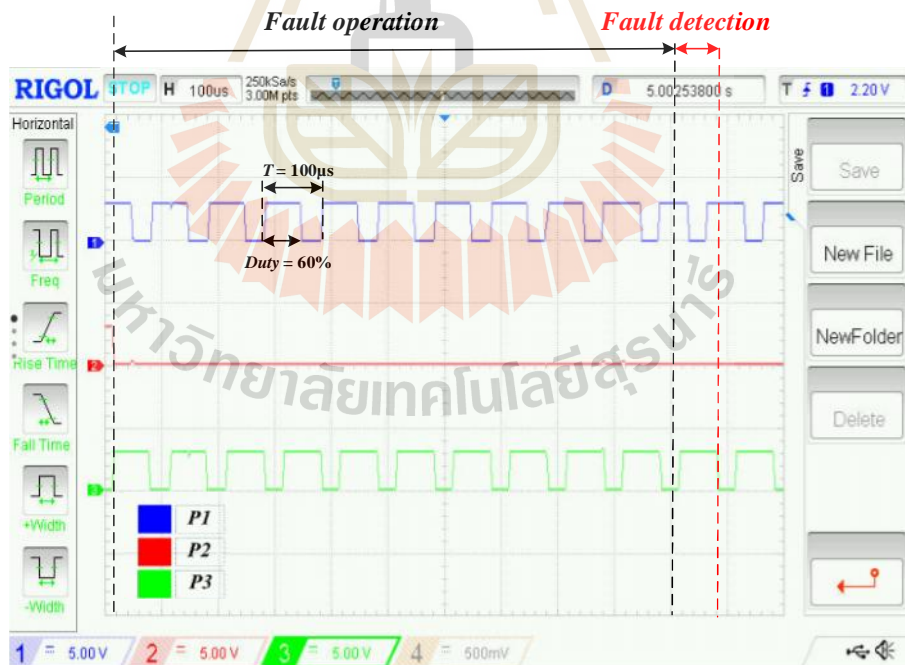
จากรูปที่ 7.40 ถึงรูปที่ 7.44 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 50V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 1.5A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 50V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 1.5A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.42 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.43 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.44 ต่อไปเป็นการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 7.45 ถึงรูปที่ 7.49



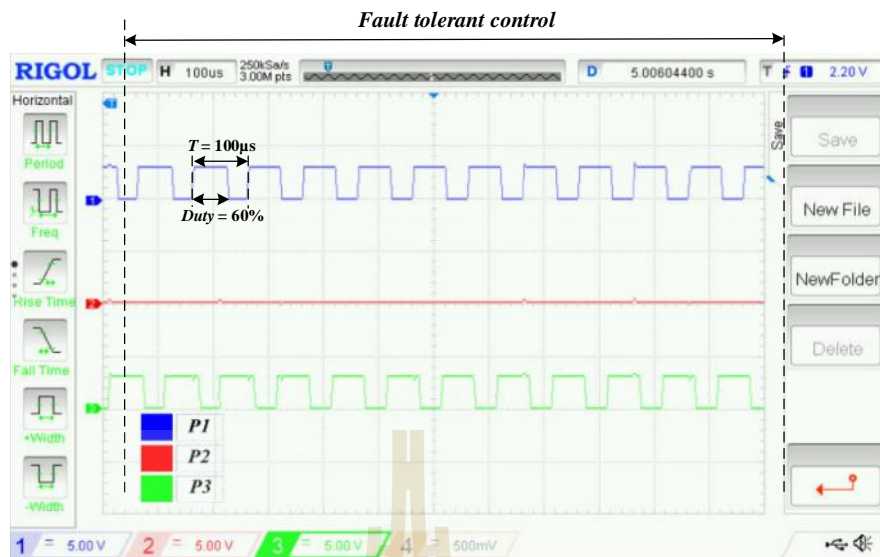
รูปที่ 7.45 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที
ที่ $V_{ref} = 50V$



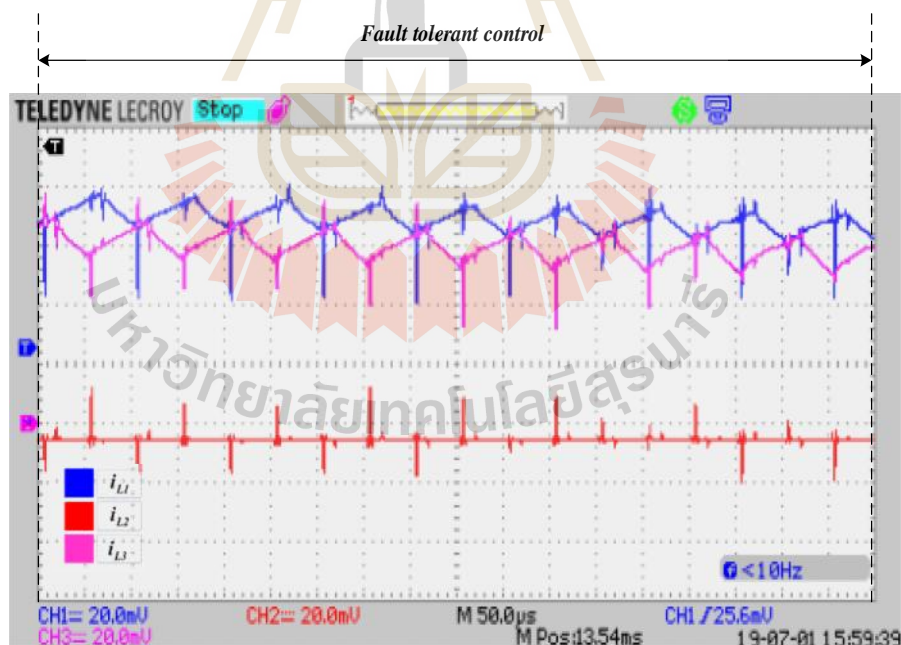
รูปที่ 7.46 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$



รูปที่ 7.47 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

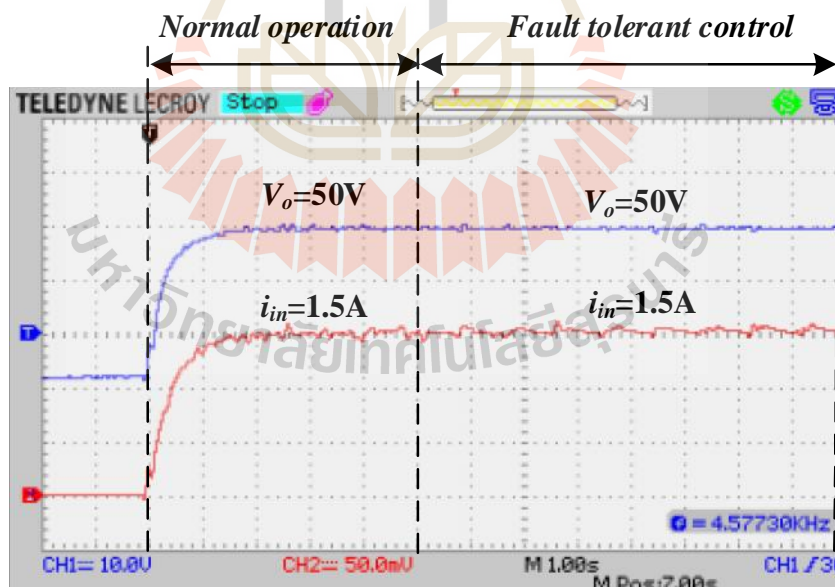


รูปที่ 7.48 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

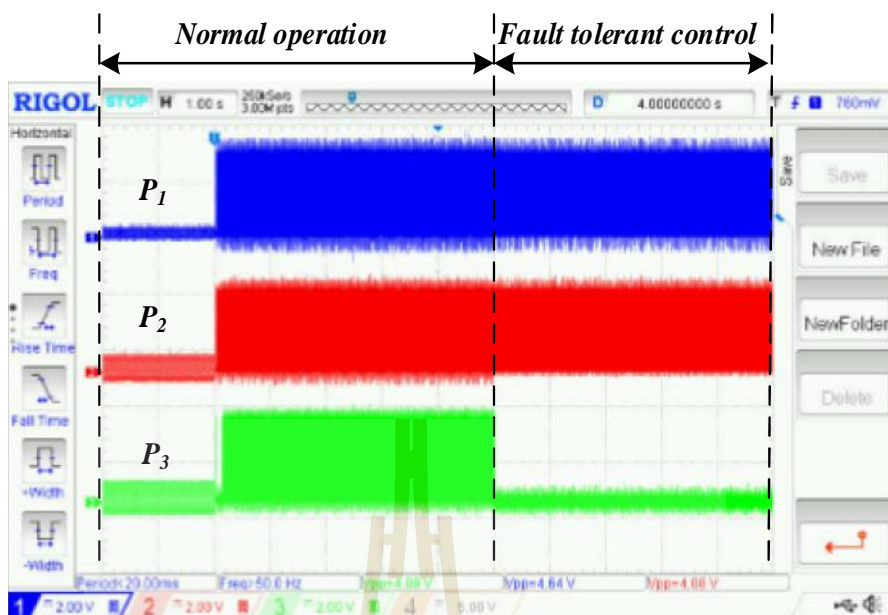


รูปที่ 7.49 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

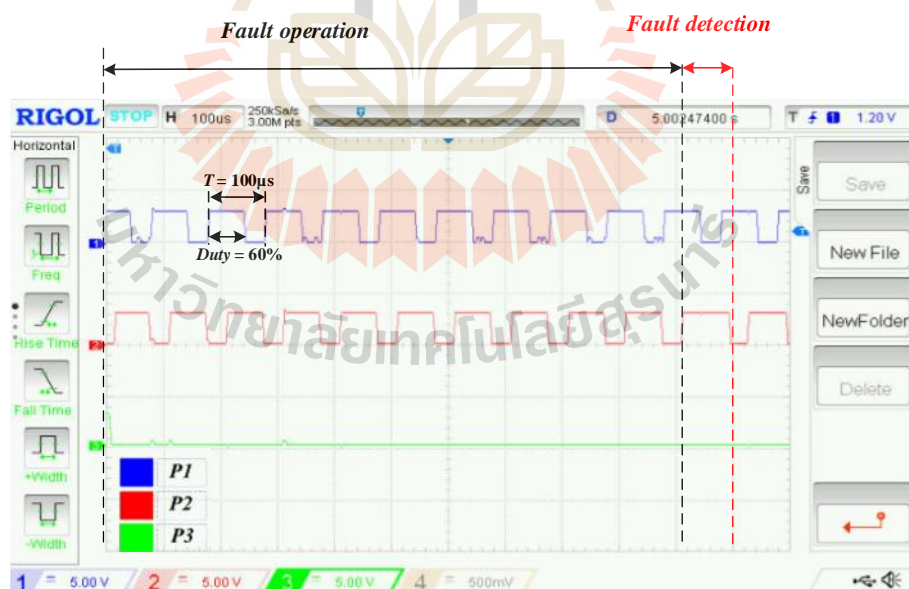
จากรูปที่ 7.45 ถึงรูปที่ 7.49 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 50V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 1.5A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 50V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 1.5A เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.47 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.48 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.49 ต่อไปเป็นการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดปกติเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ แสดงได้ดังรูปที่ 7.50 ถึงรูปที่ 7.54



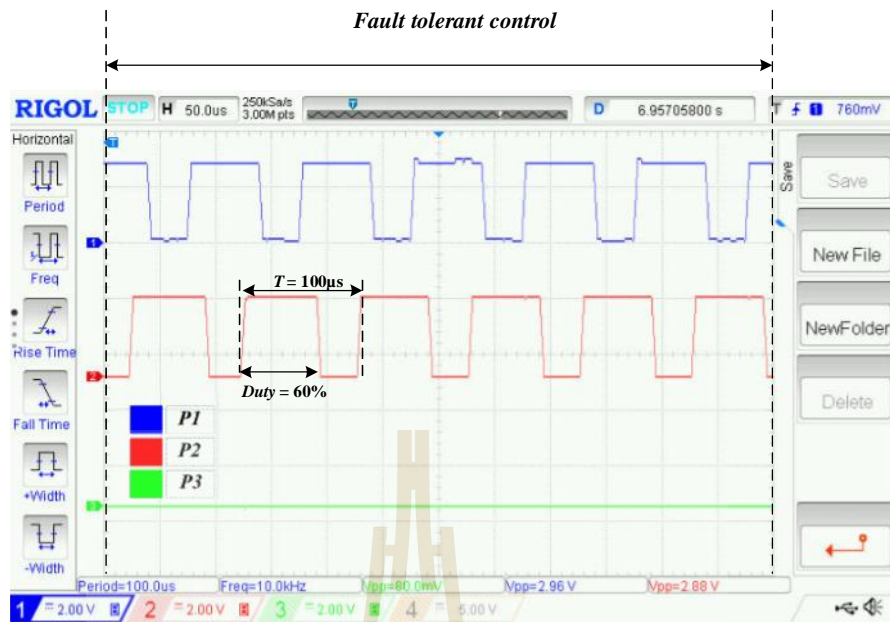
รูปที่ 7.50 แรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที
ที่ $V_{ref} = 50V$



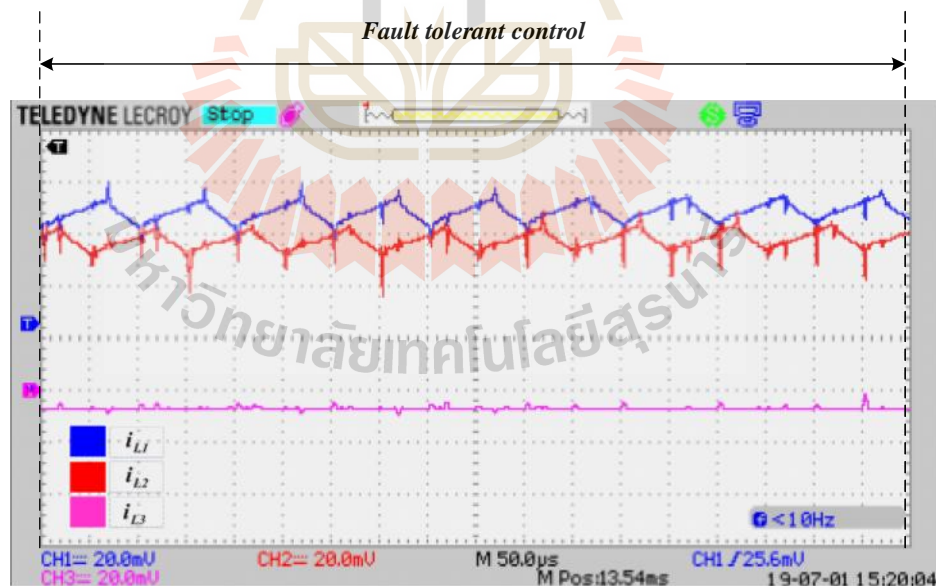
รูปที่ 7.51 สัญญาณพัลส์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที
ที่ $V_{ref} = 50V$



รูปที่ 7.52 สัญญาณพัลส์ช่วงการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3
เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$



รูปที่ 7.53 สัญญาณพัลส์หลังการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$



รูปที่ 7.54 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากการตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาทีที่ $V_{ref} = 50V$

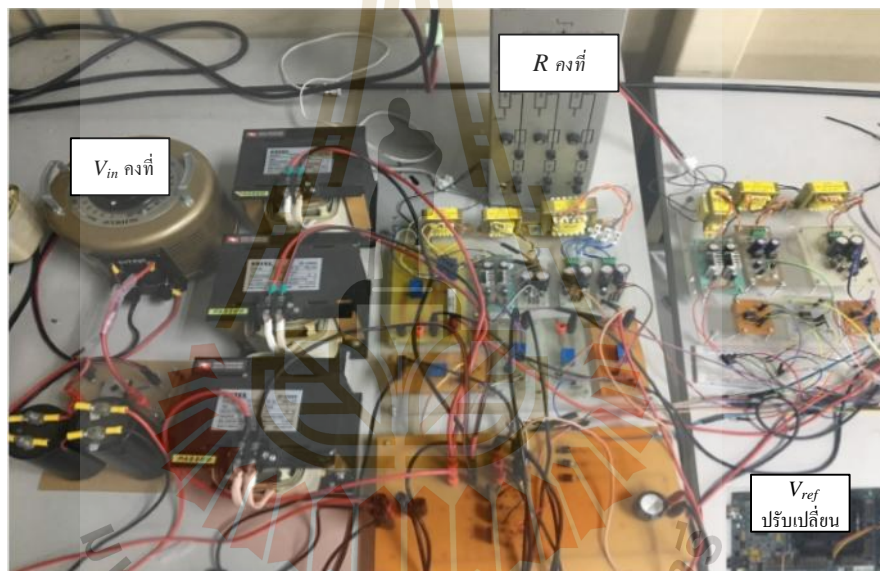
จากรูปที่ 7.50 ถึงรูปที่ 7.54 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 เวลา 5 วินาที ที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง $V_{ref} = 50V$ จะเห็นได้ว่า ในสภาวะปกติ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ 50V กระแสอินพุตมีค่าประมาณ 1.5A สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่เวลา 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตยังคงมีค่าประมาณ 50V และกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 1.5A เนื่องจากการตรวจจับความผิดพลาดใช้เวลาประมาณ 10 คาบเวลา หรือประมาณ 0.001 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.52 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์จากเดิมที่มีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เป็น 180 องศา เพื่อควบคุมสวิตช์ที่ยังคงทำงานอยู่ในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.53 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ ทำให้กระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ยังทำงานอยู่ในวงจรทั้งสองตัว เกิดการหักล้างกันดังแสดงได้ในรูปที่ 7.54 ซึ่งจากผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามขั้นที่มีความทนต่อความผิดพลาดที่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 50V กรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ที่ได้แสดงในรูป 7.40 ถึงรูปที่ 7.54 จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องไม่ว่าจะเกิดความผิดพลาดขึ้นที่สวิตช์ตัวใดในวงจร ขั้นตอนวิธีที่ใช้ควบคุมวงจรในสภาวะเกิดความผิดพลาดนั้นสามารถควบคุมให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถดูได้จากลักษณะการกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

7.4 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับค่าแรงดันเอาต์พุตแบบทันทีทันใด

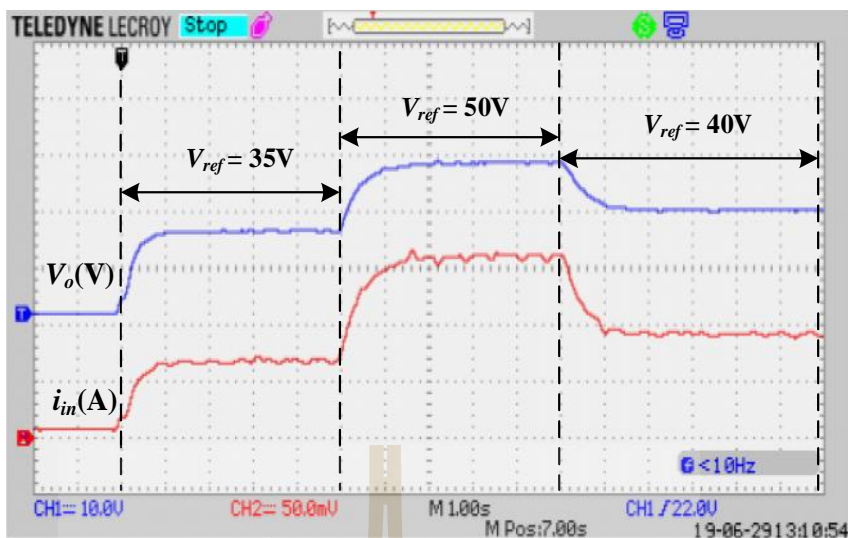
การทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับค่าแรงดันเอาต์พุตแบบทันทีทันใดจะอาศัยชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.55 โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีการปรับเปลี่ยน V_{ref} ซึ่งจะอาศัยการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงภายในโปรแกรมที่บันทึกลงเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ และปรับระดับแรงดันแหล่งจ่าย V_{in} ให้มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา เมื่อเริ่มการทดสอบวงจรในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 5 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่าอยู่ที่ 35V แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 35V กระแสอินพุต i_{in} มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.7A ต่อมาที่เวลา 5 ถึง 10 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงปรับค่าเพิ่มขึ้นจาก 35V เป็น 50V จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตปรับเพิ่มสูงขึ้นตามค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง

และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 50V กระแสอินพุต i_{in} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A และในช่วงท้ายที่เวลา 10 ถึง 15 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงปรับค่าลดลงจาก 50V เป็น 40V จะเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 40V ค่ากระแสอินพุต i_{in} มีค่าลดลงตามแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.8A

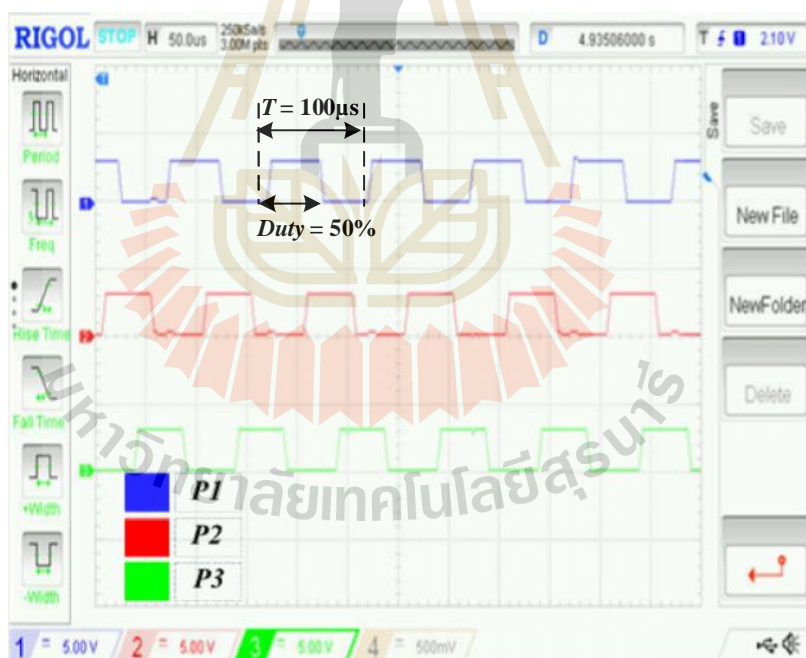
จากผลการทดสอบวงจรดังรูปที่ 7.56 และ 7.57 แสดงให้เห็นได้ว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดของวงจรไม่เกิดการตรวจจับจึงไม่มีเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์ และตัวควบคุมพีไอที่อาศัยเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณ สามารถควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟลูตต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดให้มีแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 7.55 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตฟลูตต์สามชั้นเมื่อให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีการปรับเปลี่ยน



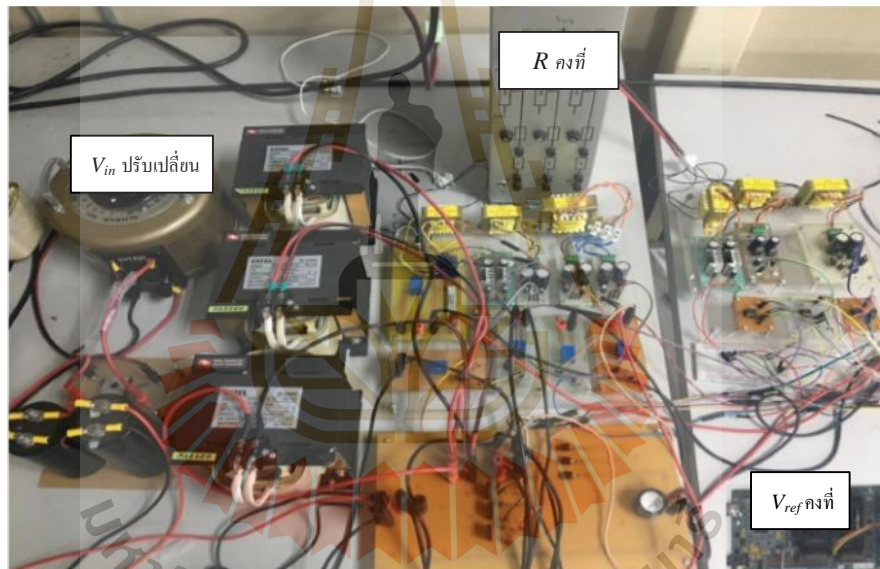
รูปที่ 7.56 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}



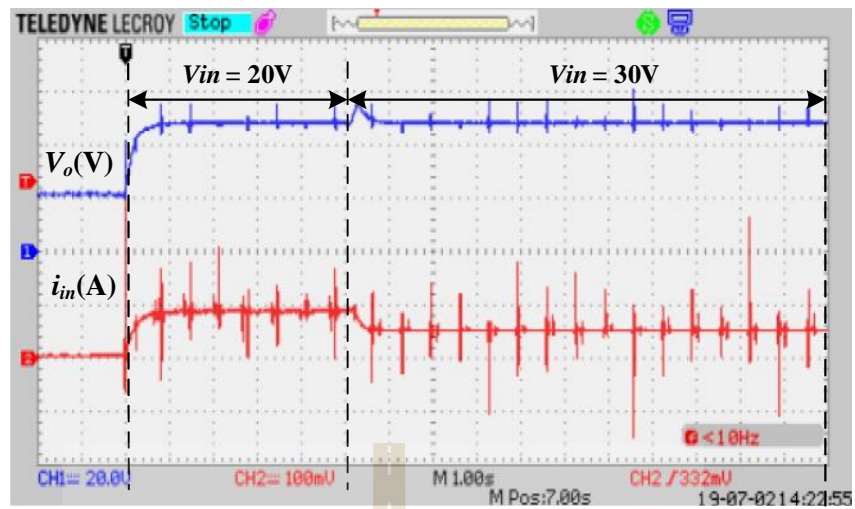
รูปที่ 7.57 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}

7.5 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

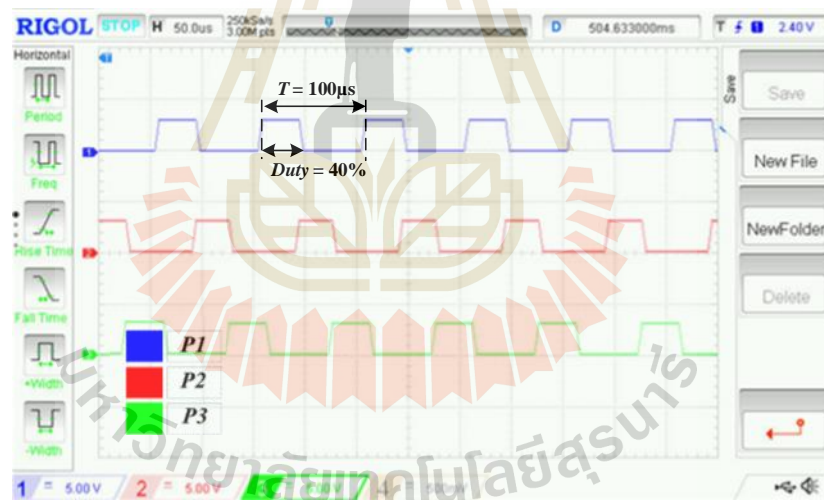
การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด กรณีเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in} มีการเปลี่ยนแปลง จะอาศัยชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 7.58 ในการทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น โดยจะทำการปรับระดับแรงดันอินพุต V_{in} โดยผู้ทำการทดลองจาก 20V เป็น 30V ทั้งนี้กำหนดให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} มีค่าอยู่ที่คงที่ 50V และ 40V ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1, P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดแสดงได้ดังต่อไปนี้



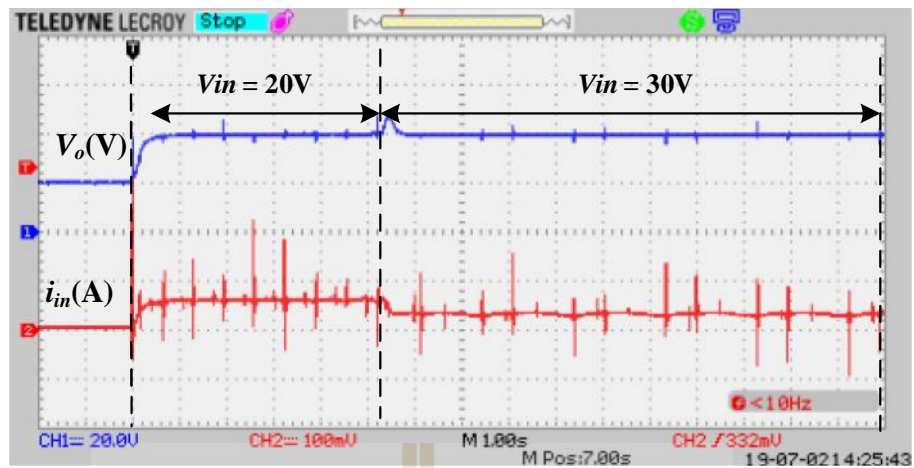
รูปที่ 7.58 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดเมื่อมีการปรับเปลี่ยน V_{in}



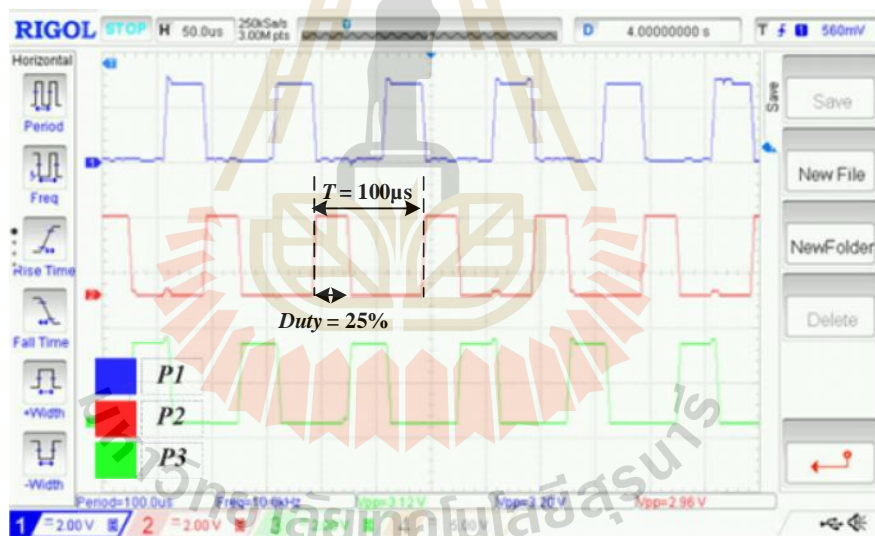
รูปที่ 7.59 ผลการทดสอบวงจรวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น
ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดเมื่อมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 50\text{V}$



รูปที่ 7.60 สัญญาณพัลส์หลังจากมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 50\text{V}$



รูปที่ 7.61 ผลการทดสอบวงจรแรงดันแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตี่ฟลูตต์สามชั้น
ที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดเมื่อมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 40\text{V}$



รูปที่ 7.62 สัญญาณพัลส์หลังจากมีการปรับเปลี่ยน V_{in} ที่ $V_{ref} = 40\text{V}$

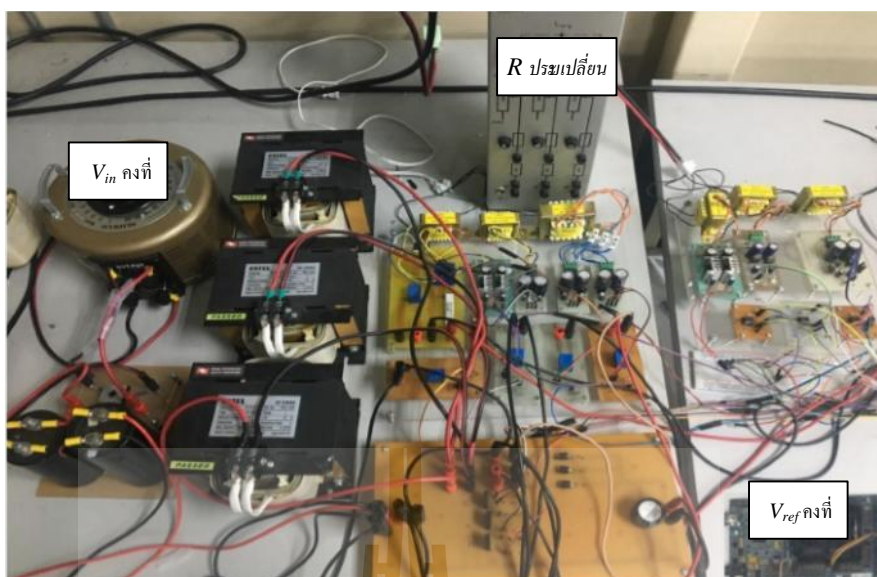
จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตี่ฟลูตต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด กรณีเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in} มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน แสดงได้ดังรูปที่ 7.58 และ 7.60 จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มการทดสอบวงจรที่เวลาประมาณ 0 ถึง 5 วินาที ระดับแรงดันอินพุต V_{in} มีค่า 20V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 50V และ 40V ตามลำดับ ค่ากระแสอินพุต i_{in} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A และ

0.7A ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา

จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต V_{in} แสดงดังรูปที่ 7.59 และรูปที่ 7.61 แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่มีการตรวจจับเกิดขึ้น ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้พร้อมทั้งเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นสามารถควบคุมให้วงจรทดสอบมีแรงดันเอาต์พุต V_o ค่าคงที่ตามที่ต้องการได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in}

7.6 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด กรณีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต อาศัยชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด แสดงดังรูปที่ 7.63 โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทานโดยผู้ทำการทดสอบจาก 100 เป็น 150 เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) ที่โหลดต้องการจาก 12.25W เป็น 8.167W จาก 16W เป็น 10.67W และจาก 25W เป็น 16.67W ตามลำดับค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} โดยแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in} แรงดันค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 20V และค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} คงที่เท่ากับ 35V 40V 50V ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ทั้งสามตัว P_1 , P_2 และ P_3 คือสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเลื่อนเฟสกัน 120 องศา ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้น แสดงดังต่อไปนี้

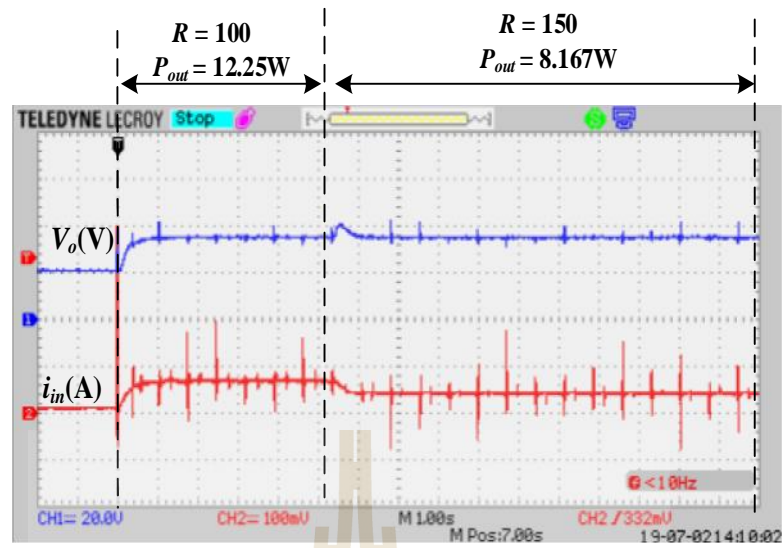


รูปที่ 7.63 ชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o

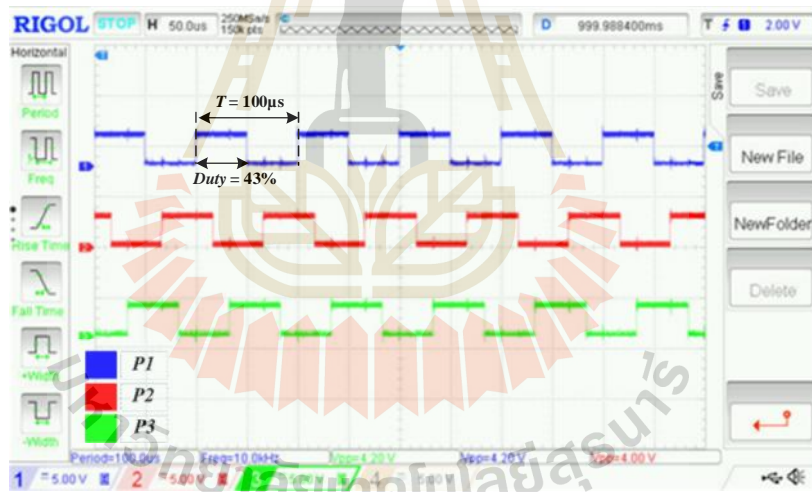
จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตัสเฟสสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 7.64 เห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นการทดสอบวงจรที่เวลาประมาณ 0 ถึง 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 35V กระแสอินพุต i_{in} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.7A ต่อมาที่เวลาประมาณ 5.5 วินาที มีการปรับลดค่าโหลดตัวต้านทานจาก 100 เป็น 150 ส่งผลให้โหลดต้องการกำลังไฟาลดลงจาก 12.25W เป็น 8.167W สังเกตเห็นได้ว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นและตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณ ยังคงสามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตัสเฟสสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดได้ โดยแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ 35V ในขณะที่กระแสอินพุต i_{in} มีค่าประมาณ 0.4A กรณีค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} เท่ากับ 40V เมื่อเริ่มต้นการทดสอบวงจรที่เวลาประมาณ 0 ถึง 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 40V กระแสอินพุต i_{in} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 0.8A ต่อมาที่เวลาประมาณ 5.5 วินาที มีการปรับลดค่าโหลดตัวต้านทานจาก 100 เป็น 150 ส่งผลให้โหลดต้องการกำลังไฟาลดลงจาก 16W เป็น 10.67W สังเกตเห็นได้ว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นและตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณ ยังคงสามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผัน

กำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดได้เช่นเดียวกับกรณีค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} เท่ากับ 35V โดยแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ 40V ในขณะที่กระแสอินพุต i_{in} มีค่าประมาณ 0.5A และสุดท้ายกรณีค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} เท่ากับ 50V เมื่อเริ่มต้นการทดสอบวงจรที่เวลาประมาณ 0 ถึง 5 วินาที แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 50V กระแสอินพุต i_{in} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A ต่อมาที่เวลาประมาณ 5.5 วินาที มีการปรับลดค่าโหลดตัวต้านทานจาก 100 เป็น 150 ส่งผลให้โหลดต้องการกำลังไฟฟ้าลดลงจาก 25W เป็น 16.67W สังเกตเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรนั้นไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นและตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณ ยังคงสามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดได้เช่นเดียวกับกรณีค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} เท่ากับ 35V และ 40V โดยแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ 50V ในขณะที่กระแสอินพุต i_{in} มีค่าประมาณ 1A

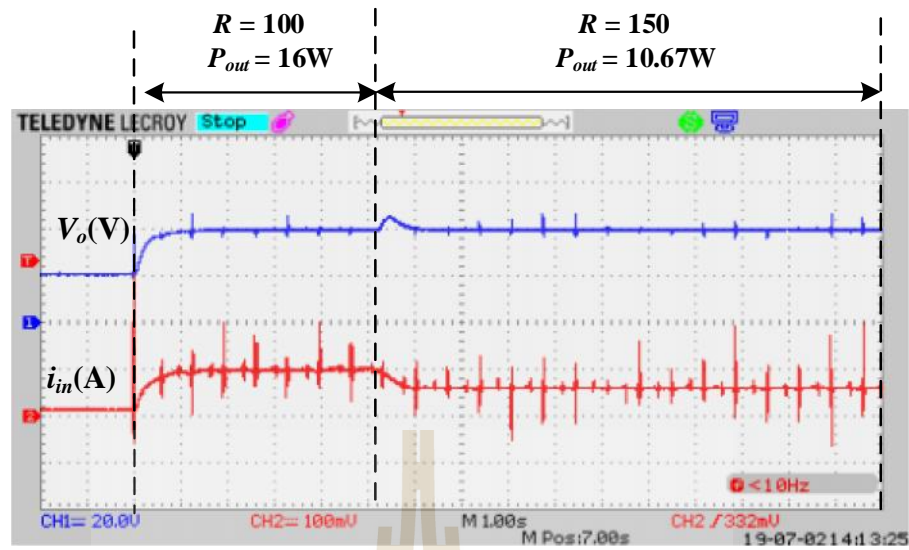
จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด กรณีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต โดยอาศัยการปรับโหลดตัวต้านทาน ที่ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} เท่ากับ 35V ,40V และ 50V ตามลำดับ ดังรูปที่ 7.64 ถึงรูปที่ 7.69 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรไม่เกิดการตรวจจับเกิดขึ้นและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณ สามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ได้ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่โหลดต้องการก็ตาม



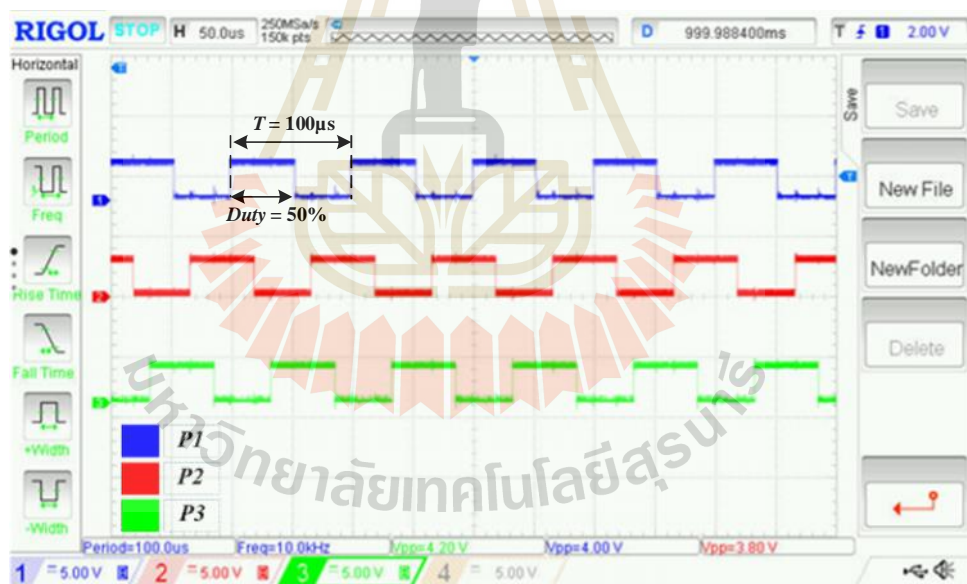
รูปที่ 7.64 ผลการทดสอบวงจร เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกรณี V_{ref} เท่ากับ 35V



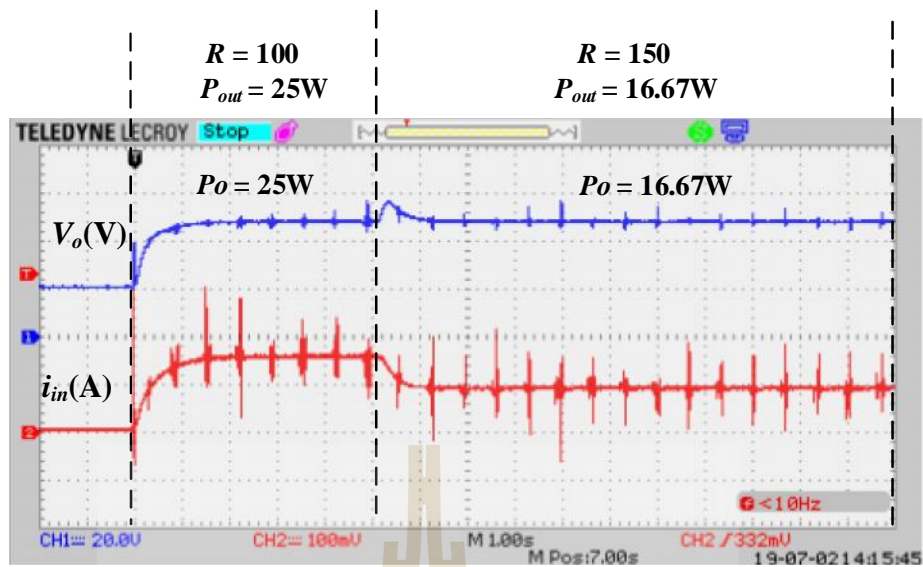
รูปที่ 7.65 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานกรณี V_{ref} เท่ากับ 35V



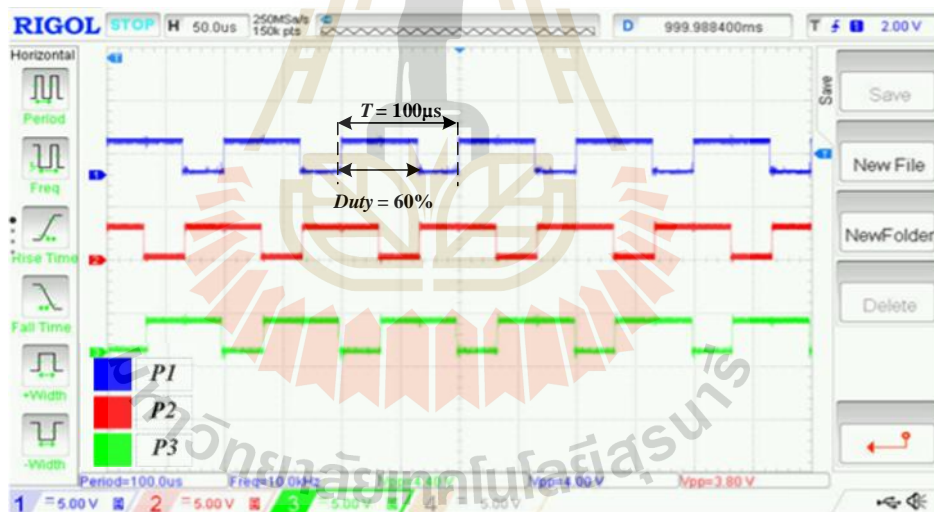
รูปที่ 7.66 ผลการทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกรณี V_{ref} เท่ากับ 40V



รูปที่ 7.67 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานกรณี V_{ref} เท่ากับ 40V



รูปที่ 7.68 ผลการทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกรณี V_{ref} เท่ากับ 50V



รูปที่ 7.69 สัญญาณพัลส์หลังจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานกรณี V_{ref} เท่ากับ 50V

7.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความทนต่อความผิดพลาด ในสภาวะทำงานปกติที่ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} เท่ากับ 35V, 40V และ 50V ตามลำดับ กรณีเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1, S_2 และ

S_3 ที่ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} เท่ากับ 35V, 40V และ 50V ตามลำดับ กรณีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง V_{ref} แบบทันทีทันใด กรณีเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in} มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน และสุดท้ายกรณีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o โดยอาศัยการปรับค่าโหลดตัวต้านทาน R ซึ่งจากผลการทดสอบวงจร แสดงให้เห็นแล้วว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดนั้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณที่ใช้ควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสต์สามขั้น นั้นสามารถควบคุมให้วงจรทำงานได้แม้ในสภาวะเกิดความผิดพลาด โดยวงจรสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น โดยเริ่มจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับบทที่ 2 จากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวงจรทระดับแรงดัน วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น เพื่อพิจารณาหาแนวทางการพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอินเทอร์ลิฟบูสต์แบบสามชั้น รวมถึงการควบคุมการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นในสถานะที่เกิดความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตทั้งสามหัวข้อทำให้ได้ทราบถึงโครงสร้างวงจรทระดับแรงดันและวิธีการตรวจจับความผิดปกติในรูปแบบต่างๆ ซึ่งได้นำวงจรทระดับแรงดันสวิตช์เดียวเป็นต้นแบบแล้วพัฒนาเป็นวงจรทระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟสองชั้นและพัฒนาไปสู่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น โดยอาศัยแนวคิดโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขนานกัน และอาศัยตัวควบคุมพีไอพร้อมทั้งเทคนิคการเลื่อนเฟสสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น

โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้น แสดงในบทที่ 3 เป็นโครงสร้างวงจรที่เกิดจากการพัฒนาโครงสร้างวงจรทระดับแรงดันสวิตช์เดียวที่นำมาขนานกัน เพื่อให้สามารถลดทอนการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ กระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุต และใช้เป็นวงจรสำหรับพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจร รวมถึงการพัฒนาไปสู่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติซึ่งมีความสามารถในการทำงานภายใต้สถานะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น นอกจากนี้ในบทที่ 3 ยังได้มีการแสดงการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรอินเทอร์ลิฟบูสต์สองชั้นและสามชั้น ลักษณะการทำงานของสวิตช์ภายในวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันของอุปกรณ์ภายในวงจร และได้แสดงผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อแสดงให้เห็นความสามารถในการลดทอนการกระเพื่อมของสัญญาณซึ่งเกิดจากการ

หักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแสดงผลการจำลองสถานการณ์ที่ค่าวัฏจักรการทำงานต่าง ๆ

ในบทที่ 4 ได้นำเสนอการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์สามชั้น โดยอาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอ ที่ได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมโดยอาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรทบระดับแรงดันแบบดั้งเดิม ร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณ เพื่อให้สัญญาณพัลส์ที่นำไปใช้ในการควบคุมสวิตช์มีเฟสที่เหมาะสม โดยได้แสดงผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อแสดงถึงความสามารถของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบ ร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสสัญญาณสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

ในบทที่ 5 ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์สามชั้น การตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ รวมถึงวิธีการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์สามชั้นในสภาวะที่เกิดความผิดปกติเพื่อให้สามารถทำงานต่อไปได้โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติการหักล้างกันของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์สามชั้นนั้นสามารถควบคุมให้วงจรทำงานต่อไปได้แม้จะอยู่ในสภาวะที่มีความผิดปกติเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นเพื่อเป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของอัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์แบบสามชั้น รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสและขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์สามชั้นให้ทำงานต่อไปได้แม้จะอยู่ในสภาวะที่มีความผิดปกติจึงจำเป็นต้องมีการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์แบบสามชั้นดังแสดงในบทที่ 6 เป็นการแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับสร้างชุดทดสอบ อีกทั้งยังทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปโดยใช้บอร์ด DSP รุ่น eZdsp™F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในการควบคุมการทำงานของโปรแกรมควบคุมที่พัฒนาขึ้น จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์แบบสามชั้น และผลการทดสอบชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์แบบสามชั้นที่แสดงไว้ในบทที่ 7 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ต์ลิฟิวสต์ที่มีความทนต่อความผิดปกตินั้นสามารถทำงานต่อไปได้แม้ในสภาวะที่เกิด

ความผิดพลาด ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้อง และตัวควบคุมแบบพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสที่ได้ออกแบบไปนั้น สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

8.2.1 ในการตรวจจับความผิดพลาดเนื่องจากสวิตช์เปิดวงจรควรสามารถระบุตำแหน่งของสวิตช์ที่เกิดความผิดพลาดได้อย่างแม่นยำ

8.2.2 อาจมีการใส่อุปกรณ์เพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

8.2.3 ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ควรแบบให้ค่าอัตราकरणห่วงมีค่าประมาณ 0.8 หรือ 0.9 ระบบจะมีการฟุ้งเกินแต่อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ และควรคำนึงถึงพจน์ที่เป็นซีโรในการออกแบบด้วย

8.2.4 อาจมีการเพิ่มตัวควบคุมพีโอลูบกระแสตามจำนวนวงจรที่นำมาต่อขนานเพื่อให้การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสามารถทำได้ดียิ่งขึ้น

8.2.5 อาจมีการประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมกับจำนวนวงจรที่นำมาต่อขนาน

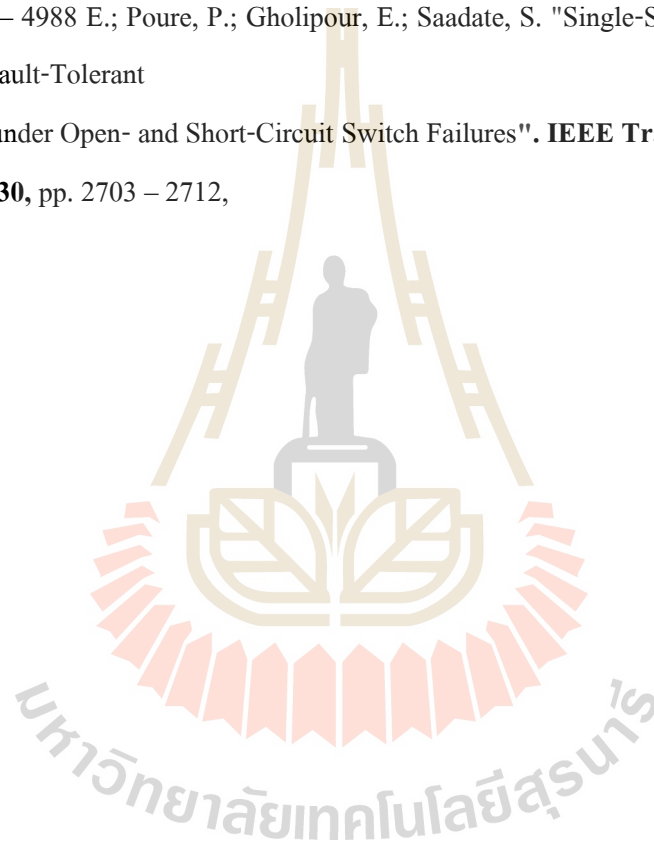
8.2.6 จำนวนของวงจรที่นำมาขนานกันของวงจรอินเทอร์ลีฟควรเลือกตามจุดประสงค์การใช้งานโดยคำนึงถึงพิกัดที่ต้องการใช้เนื่องจากคุณสมบัติหลักของวงจรอินเทอร์ลีฟคือการแบ่งกระแสที่ไหลผ่านวงจร

รายการอ้างอิง

- A. Gopi and R. Saravanakumar (2013) "High Boost Isolated DC-DC Converter with Controller"
Middle-East Journal of Scientific Research **15**, pp. 363-371.
- J.S.A Rahavi, T. Kanagapriya and R. Seyezhai, "Design and analysis of interleaved boost converter for renewable energy source," **ICCEET** **2012**, pp.447-451.
- Eunice Ribeiro, Student Member, IEEE, Antonio J. Marques Cardoso, Senior Member, IEEE, "Open-Circuit Fault Diagnosis in Interleaved DC-DC Converters," **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 29, NO. 6, JUNE 2014**
- K.C. Prasanna and T.S. Ramu, Optimal design of an interleaved dc-dc switch mode converter,
PCIM Asia (2015), 1-7.
- E. Ribeiro, A.J.M. Cardoso and C. Boccaleti, Open-circuit fault diagnosis in interleaved dc-dc converter, **IEEE Trans. Power Electron**, vol. **29**, no. **6**, Jun. **2014**, 3091-3102.
- W. Song and A.Q. Huang, Fault-tolerant design and control strategy for cascaded H-bridge multilevel converter-based statcom, **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. **57**, no. **8**, Aug. **2010**, 2700-2708.
- E. Jamshidpour, P. Poure and S. Saadate, Photovoltaic systems reliability improvement by real-time FPGA-based switch failure diagnosis and fault-tolerant dc-dc converter, **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. **62**, no. **11**, Nov. **2015**, 7247-7255.
- M. Gleissner, M.M. Bakran, "Design and Control of Fault-Tolerant Nonisolated Multiphase Multilevel DC-DC Converters for Automotive Power Systems", **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. **52**, no. **2**, pp. 1785-1795, March/April **2016**.
- F. Deng, Z. Chen, M. R Khan, R. Zhu, "Fault Detection and Localization Method for Modular Multilevel Converters", **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. **30**, no. **5**, pp. 2721-2732, **May 2015**.
- E. Pazouki, A. De Abreu-Garcia, Y. Sozer, "Fault diagnosis method for DC-DC converters base on the inductor current emulator", **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Sept. **2016**.

- C. Statcom, W. Song, A.Q. Huang, A. Cascaded, "Fault-tolerant design and control strategy for cascaded H-Bridge multilevel", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2700-2708, Nov. 2009.
- K. Park, Z. Chen, "Open-Circuit Fault Detection and Tolerant Operation for a Parallel-Connected SAB DC-DC Converter", *2014 Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1966-1972, March 2014
- S. Nie, X. Pei, Y. Chen, Y. Kang, "Fault Diagnosis of PWM DC-DC Converters Based on Magnetic Component Voltages Equation", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4978-4988, Sept 2014.
- V. Choudhary, E. Ledezma, R. Ayyanar, R.M. Button, "Fault tolerant circuit topology and control method for input-series and output-parallel modular DC-DC converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 1, pp. 402-411, Jan. 2008.
- Y. Lian, G. Adam, D. Holliday, S. Finney, "Modular input-parallel output-series DC_DC converter with fault detection and redundancy", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 6, pp. 1361- 1369, May 2016.
- S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, P. Tavner, "A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 5, pp. 1441-1451, Oct. 2009.
- T. Kamel, Y. Biletskiy, L. Chang, "Real-Time Diagnosis for Open-Circuited and Unbalance Faults in Electronic Converters Connected to Residential Wind Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 3, pp. 1781-1792, March 2016
- A. Ghazanfari, Y. A. R. I. Mohamed, "A Resilient Framework for Fault-Tolerant Operation of Modular Multilevel Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 2669-2678, May 2016.
- N. Teak, M. Macan, "Adaptive PWM Control Scheme of Interleaved Boost Converter for AC Traction Application", *2010 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. T9-72-T9-77, Sept 2010
- J. Poon, P. Jain, I. C. Konstantakopoulos, C. Spanos, S. K. Panda, S. R. Sanders, "Model-Based Fault Detection and Identification for Switching Power Converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1419-1430, Feb 2017.

- L. Costa, G. Buticchi, M. Liserre, "A Fault-Tolerant Series-Resonant DC-DC Converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 900-905, Feb 2017.
- E. Jamshidpour, P. Poure, E. Gholipour, S. Saadate, "Single-Switch DC-DC Converter With Fault - Tolerant Capability Under Open- and Short-Circuit Switch Failures", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2703-2712, May 2015.
- Nie, S.; Pei, X.; Chen, Y.; Kang, Y. "Fault Diagnosis of PWM DC-DC Converters Based on Magnetic Component Voltages Equation" *IEEE Trans. Power Electron.* 2014, 29, 4978 – 4988 E.; Poure, P.; Gholipour, E.; Saadate, S. "Single-Switch DC-DC Converter with Fault-Tolerant Capability under Open- and Short-Circuit Switch Failures". *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 30, pp. 2703 – 2712,

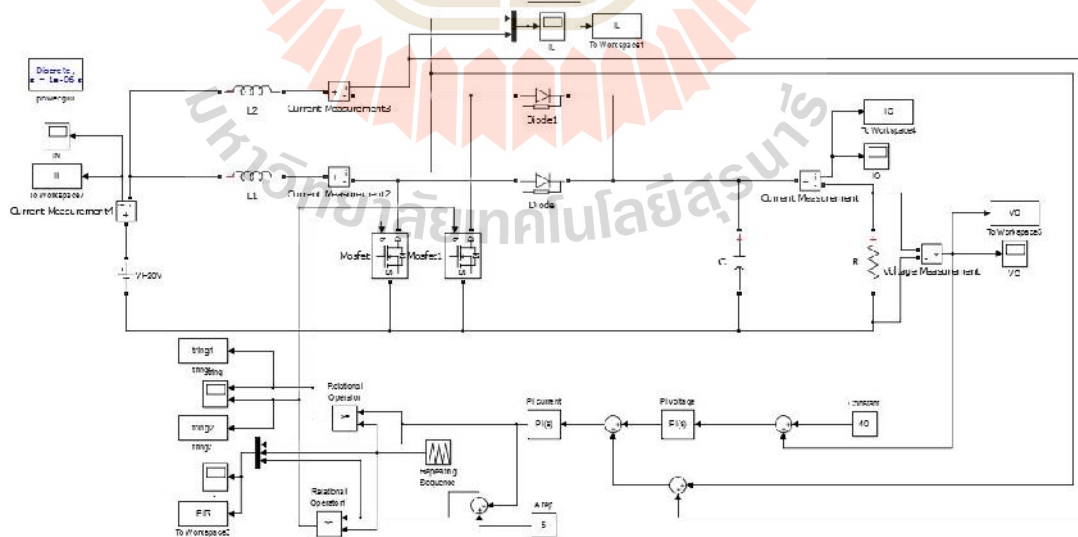
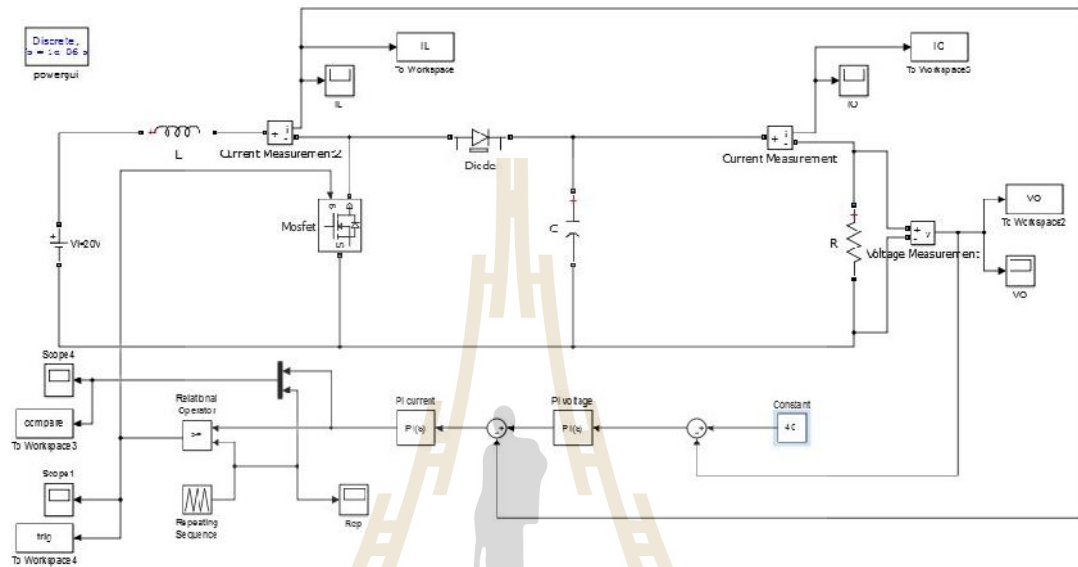


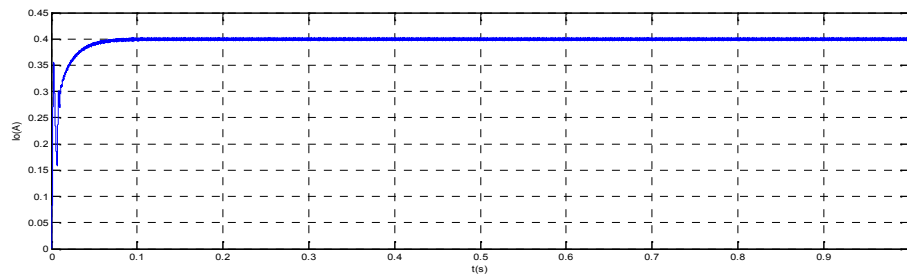
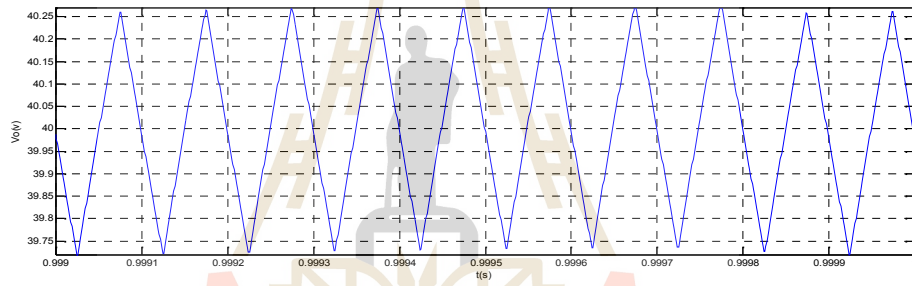
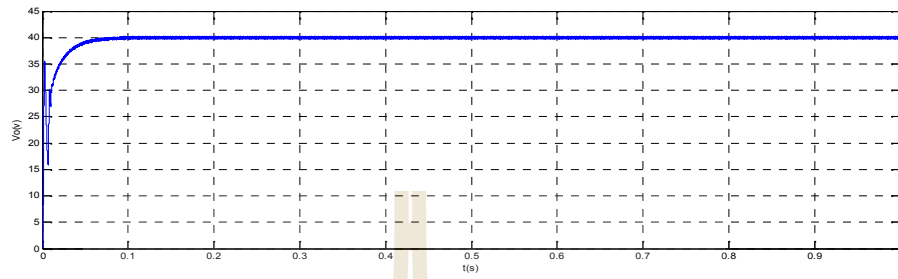


ภาคผนวก ก

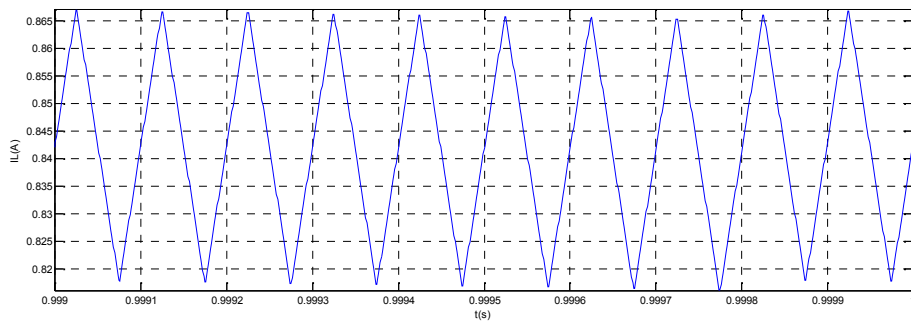
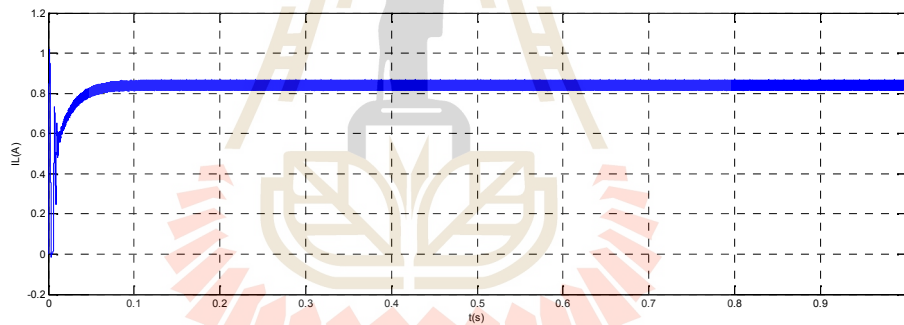
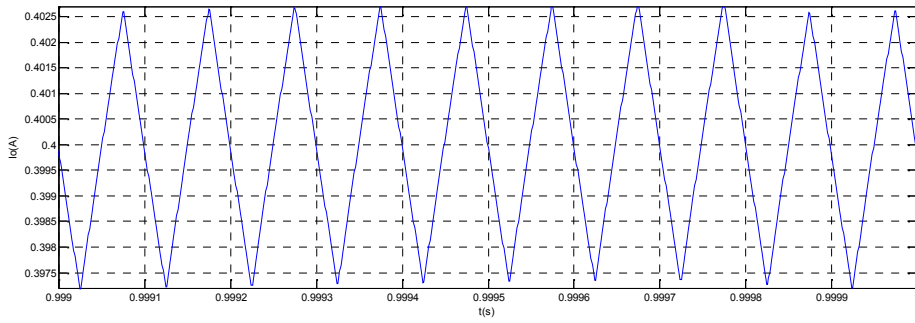
การเปรียบเทียบการงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบรูสต์และวงจรแปลงผัน
กำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบรูสต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

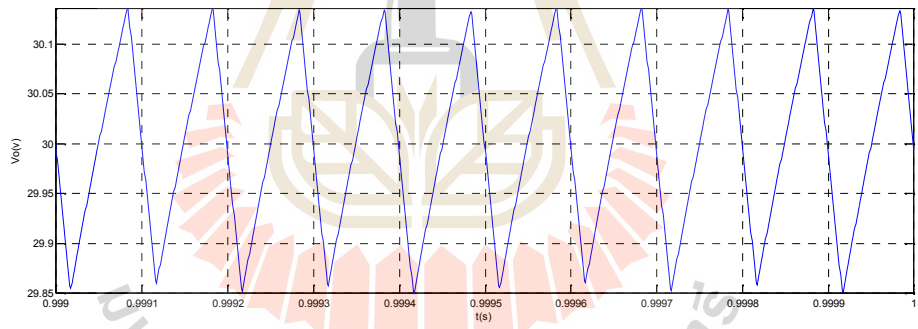
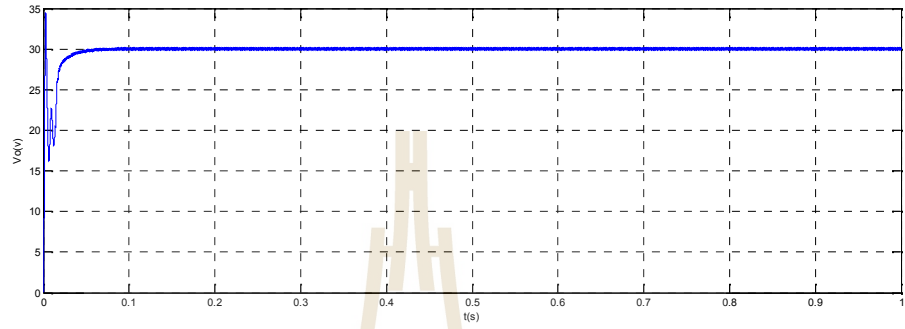




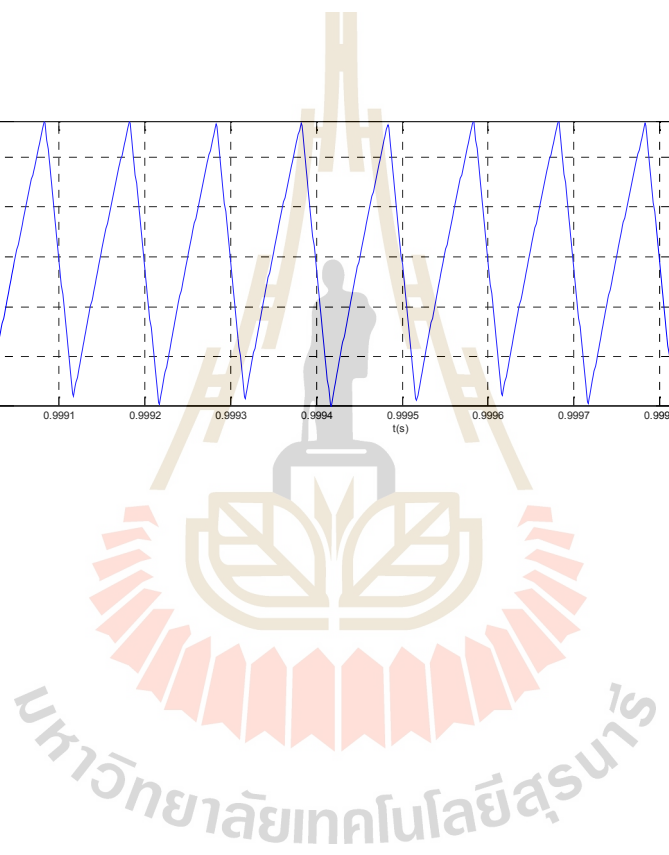
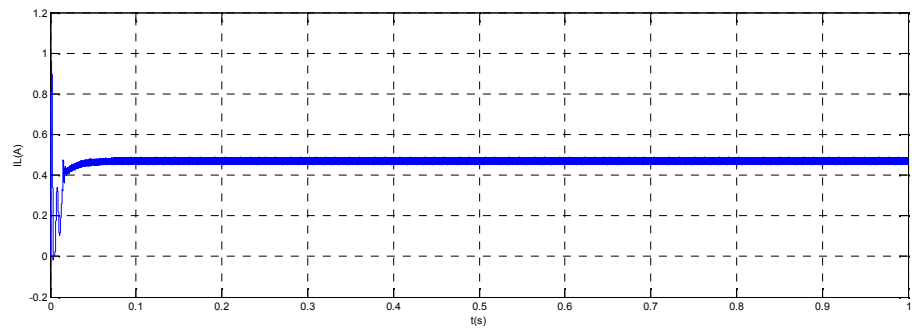
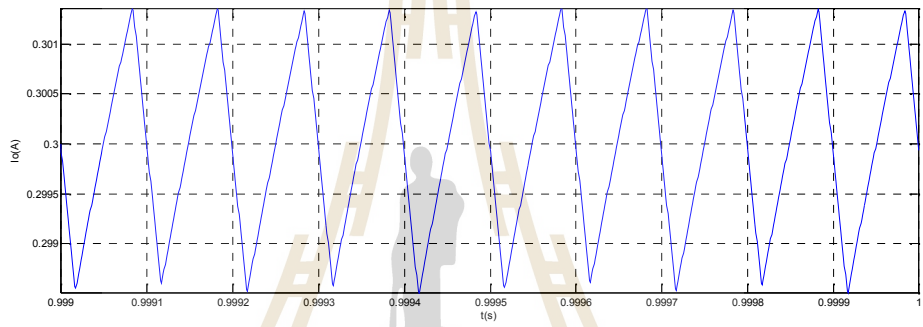
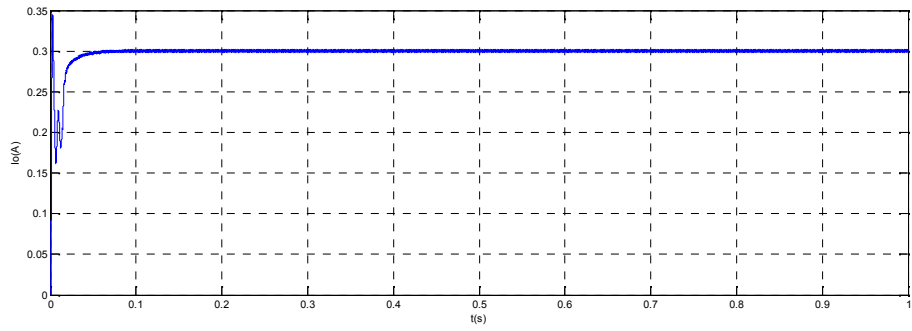
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

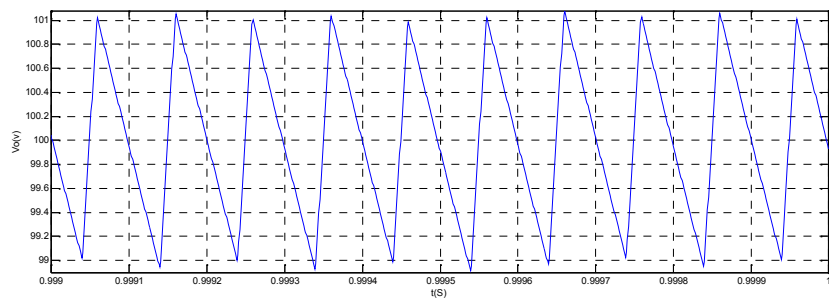
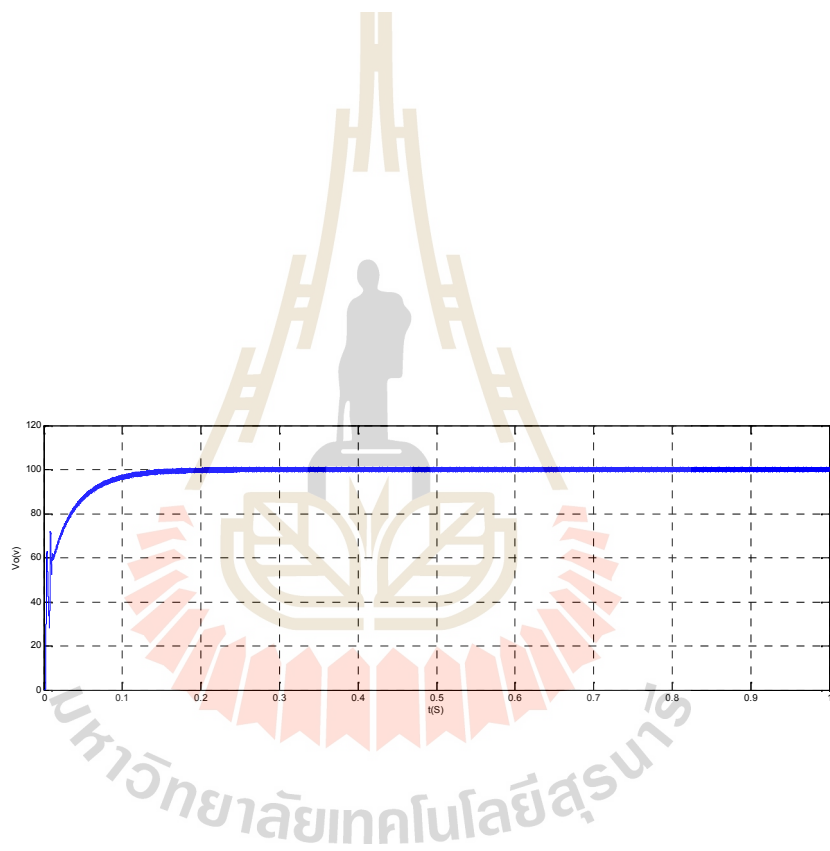
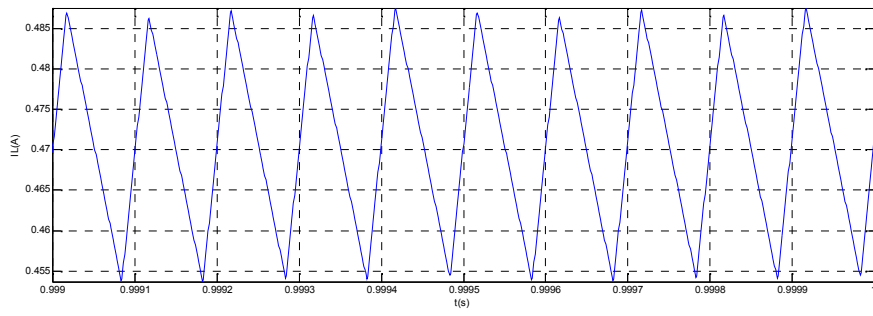


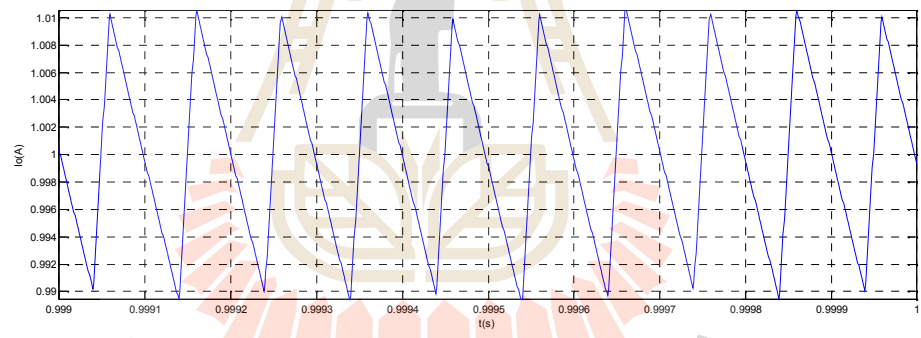
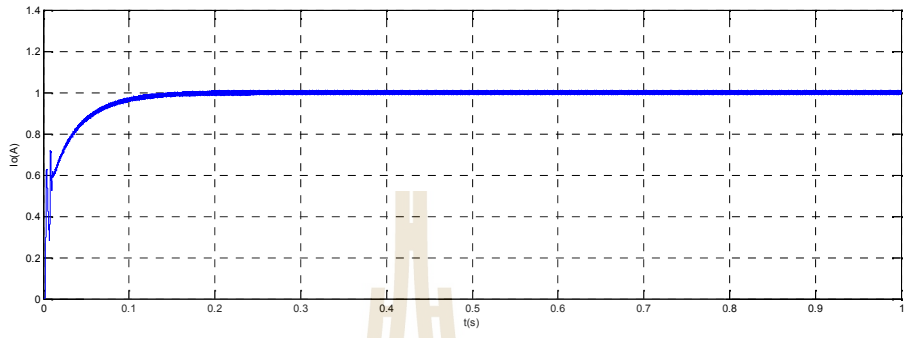
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



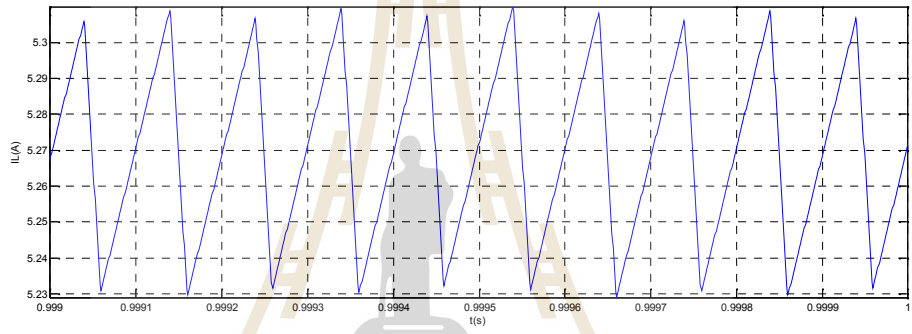
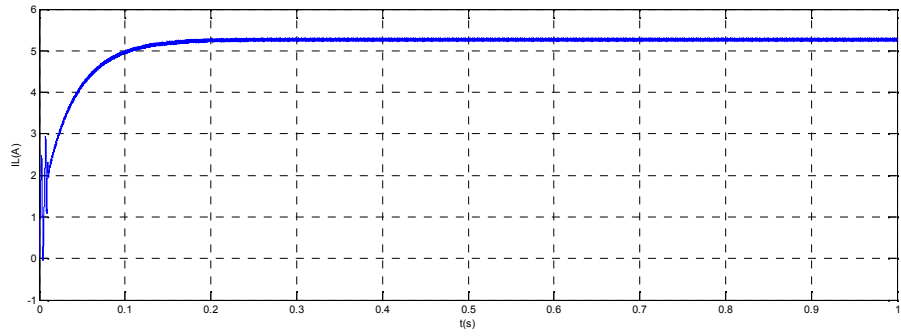
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





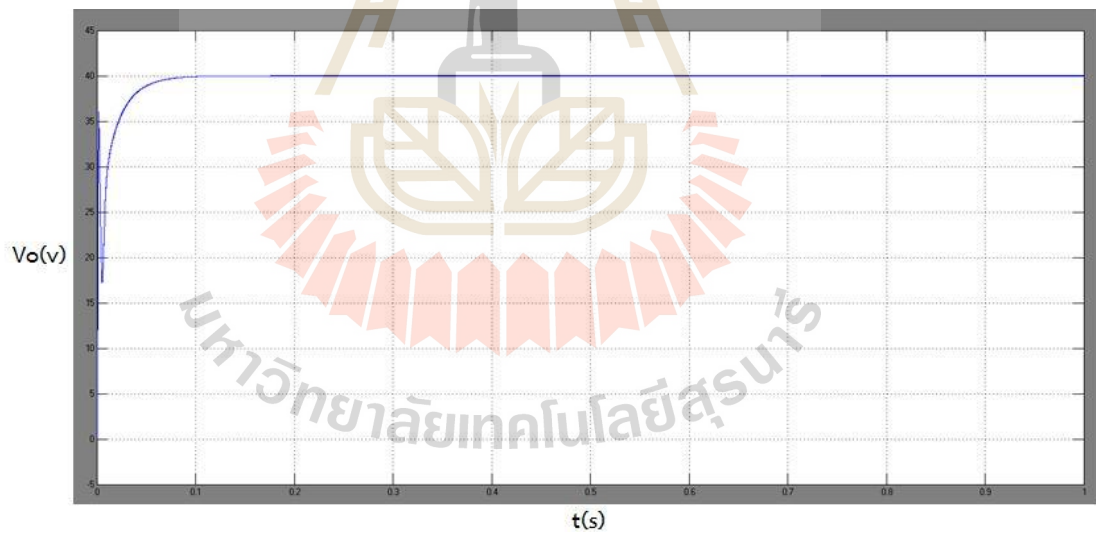


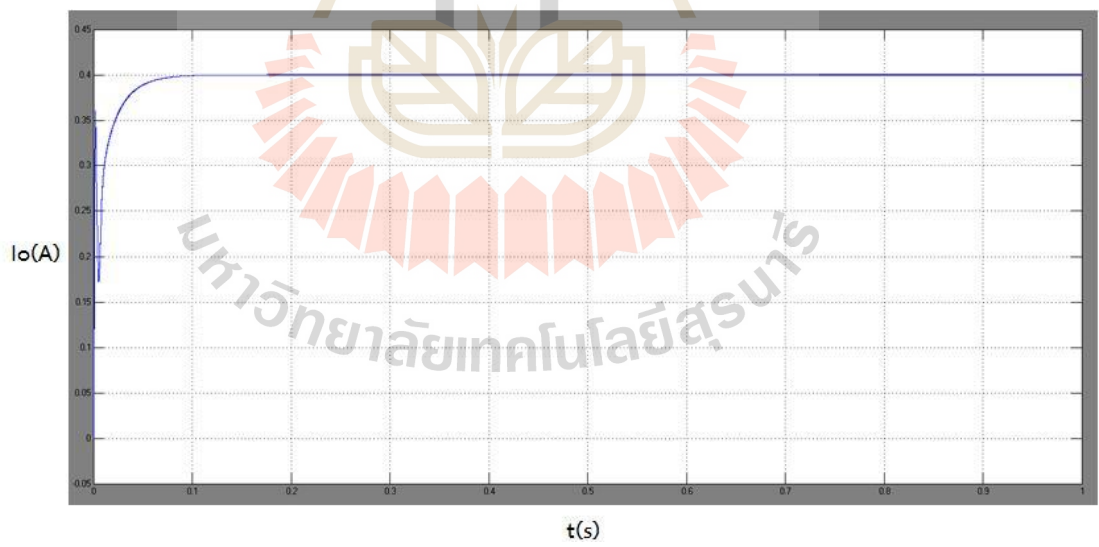
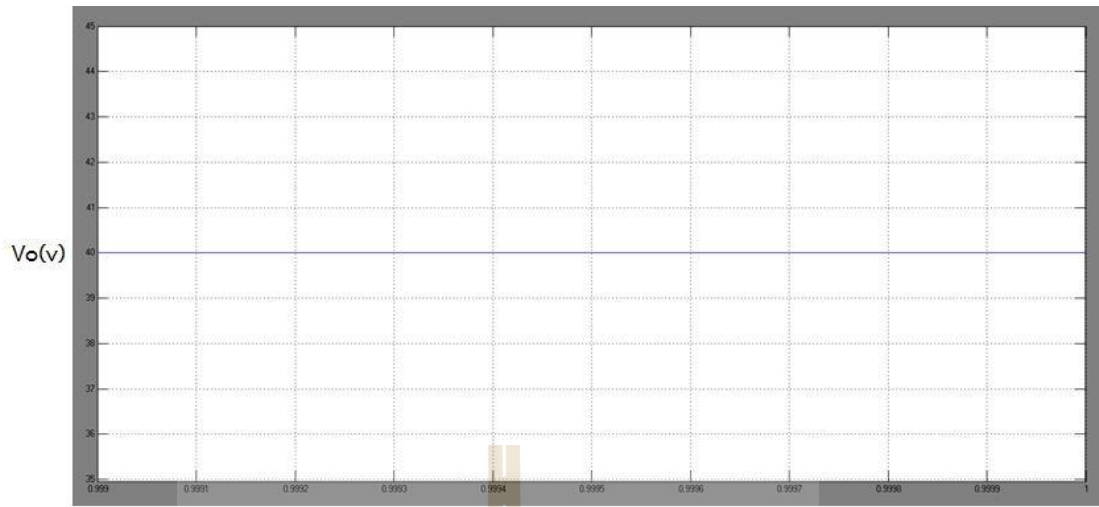
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

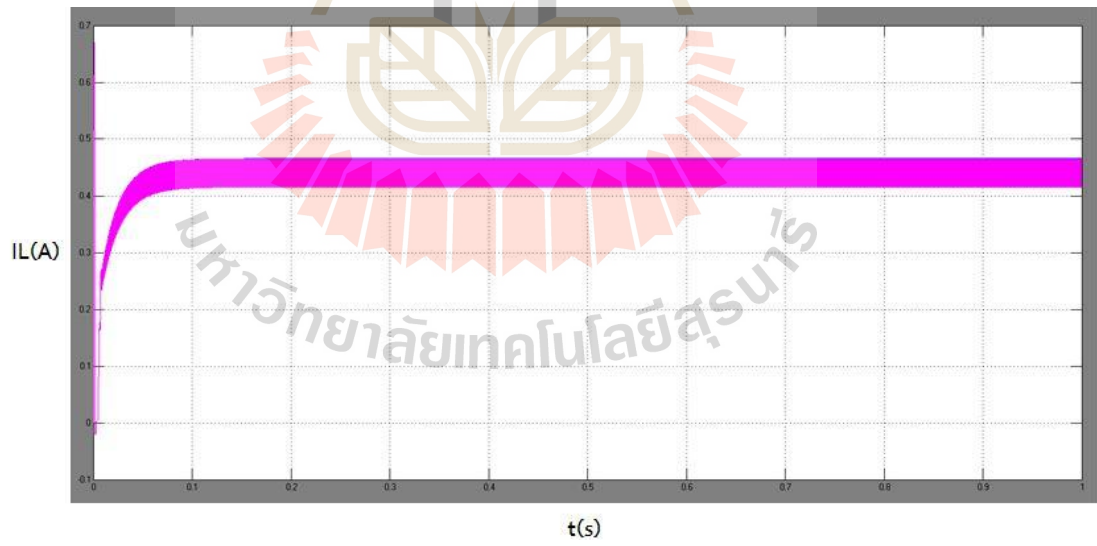
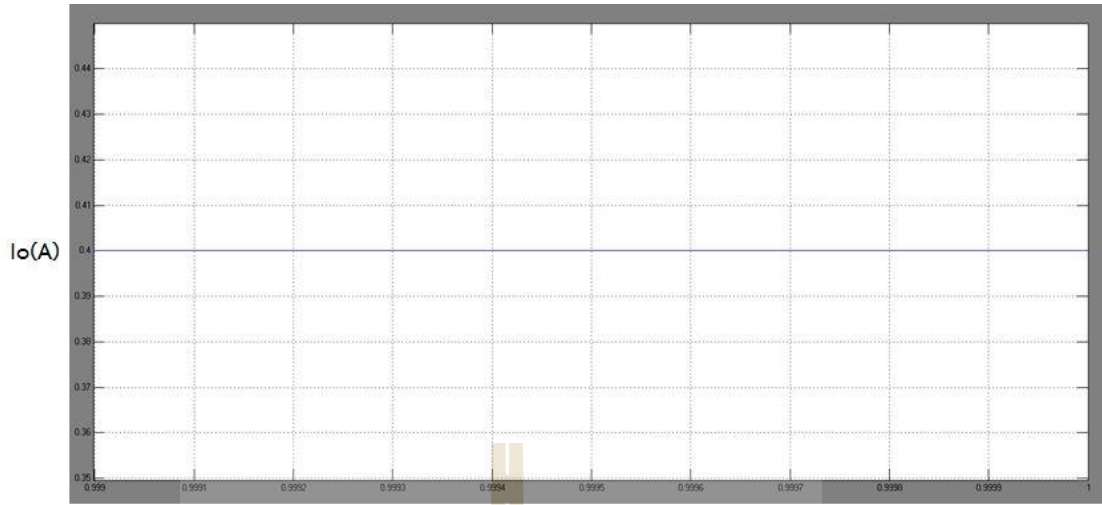


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

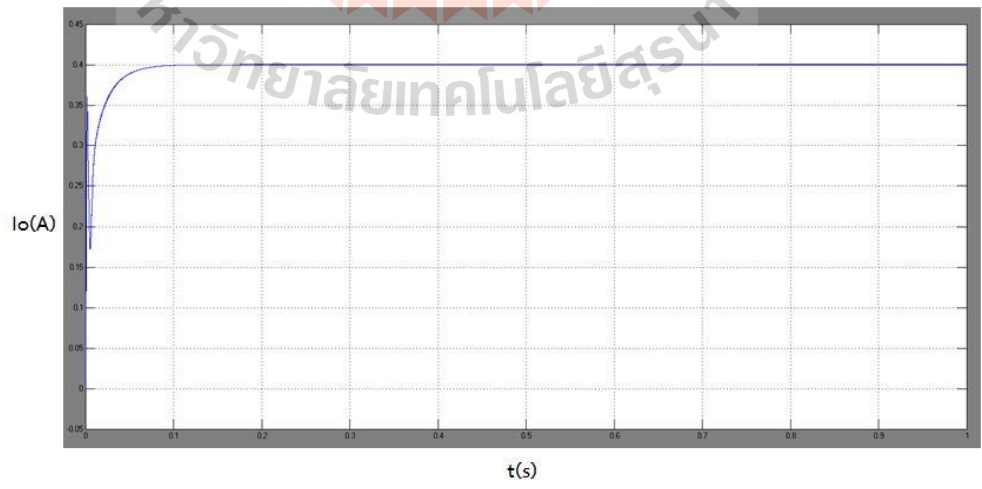
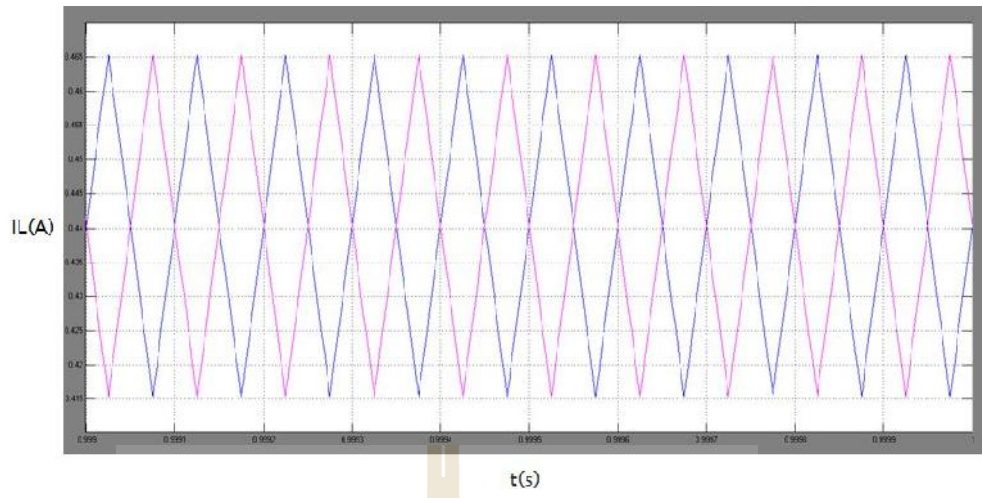
	$V_{ref} = 40V$	$V_{ref} = 30V$	$V_{ref} = 100V$
V_o (V)	39.99	29.9925	99.925
ΔV_o (%)	1.35	0.95	2.25
I_o (A)	0.3999	0.299925	0.99925
ΔI_o (%)	1.35	0.95	2.25
I_L (A)	0.841	0.47035	5.269
ΔI_L (%)	5.95	7.08	1.52



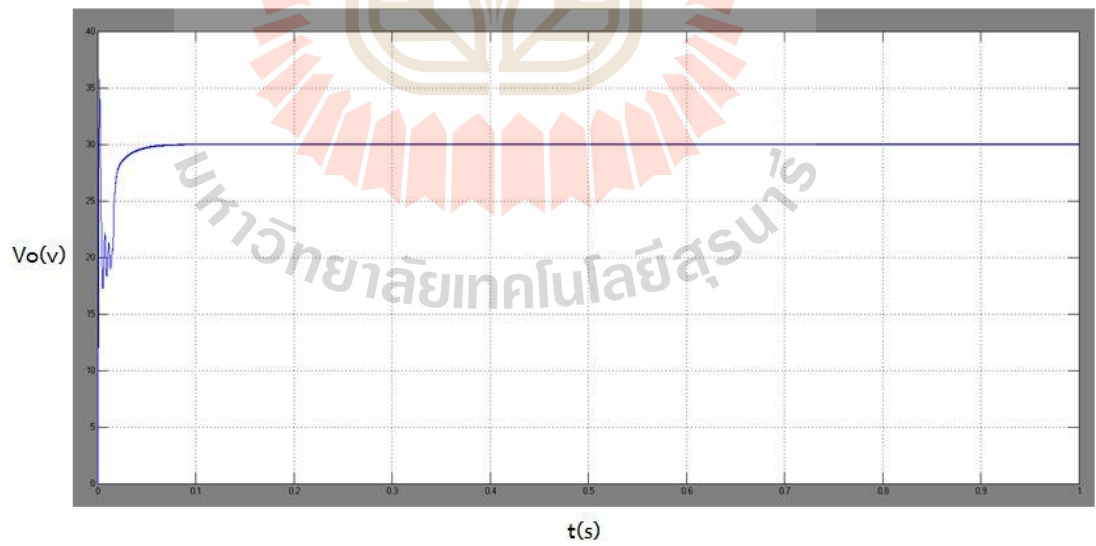
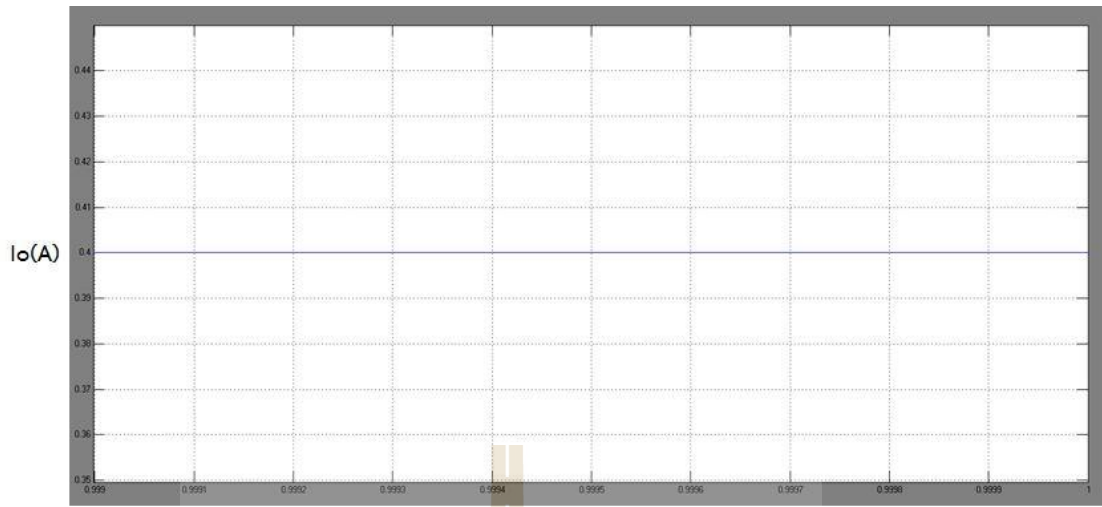




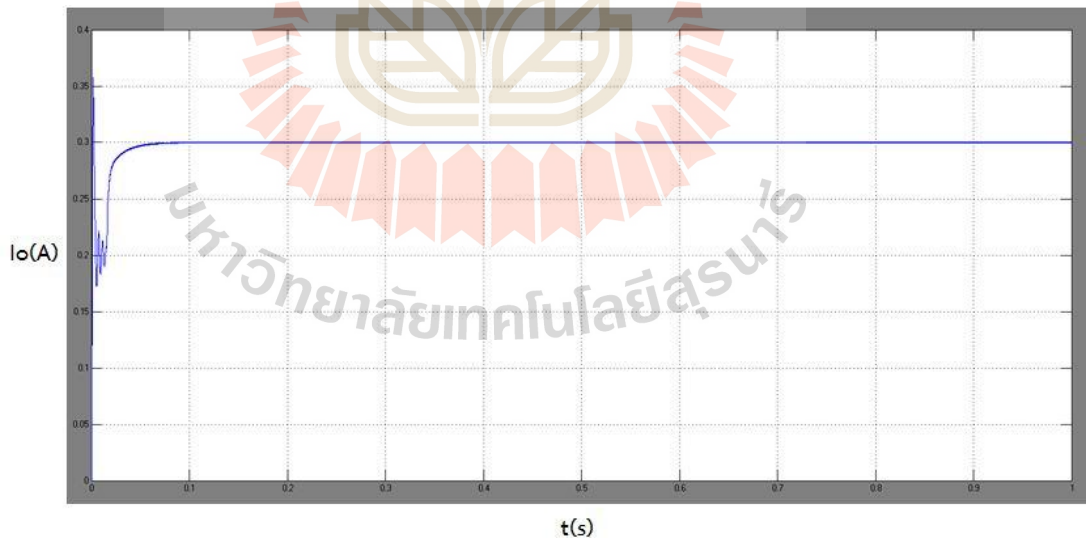
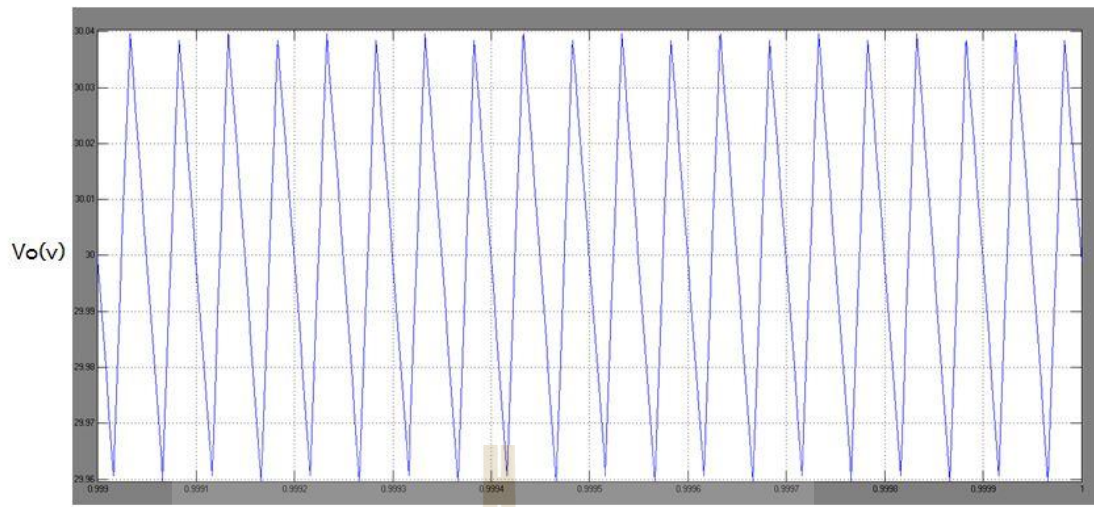
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



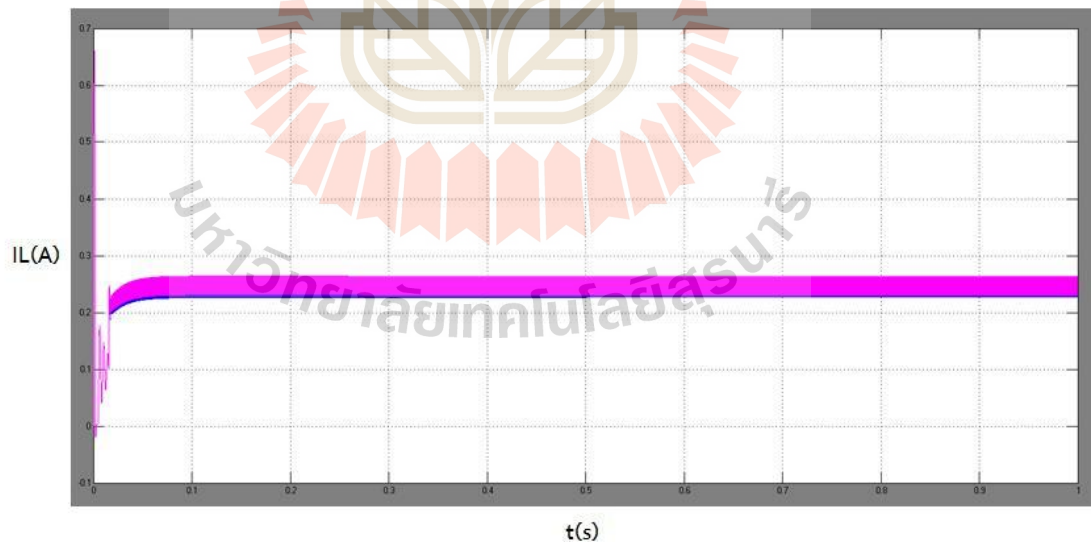
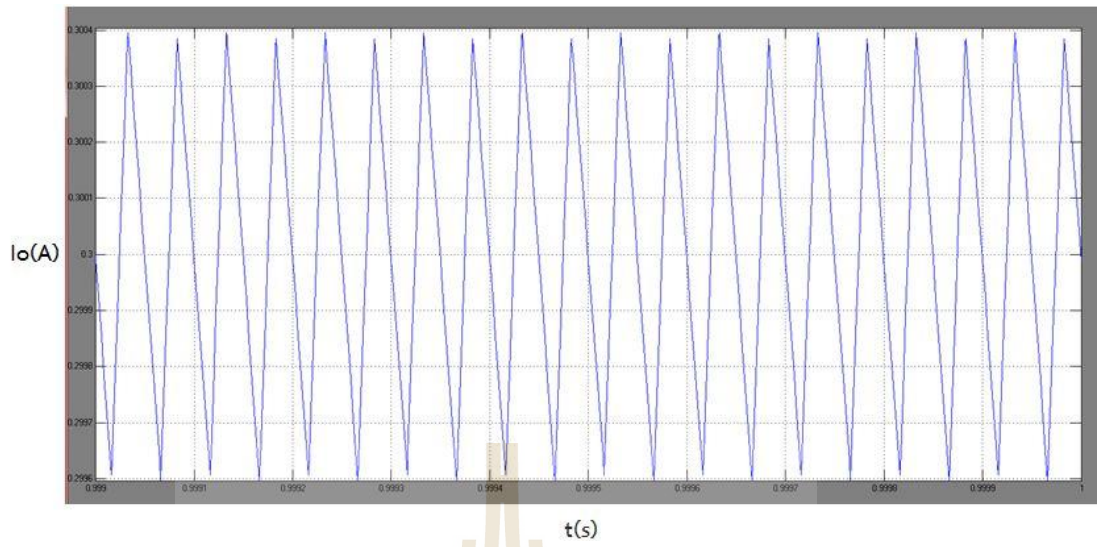
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

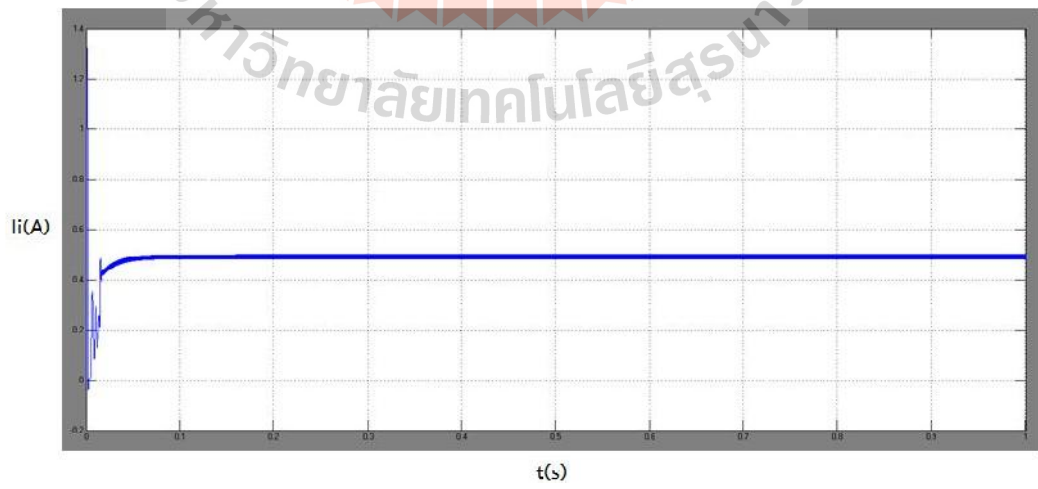
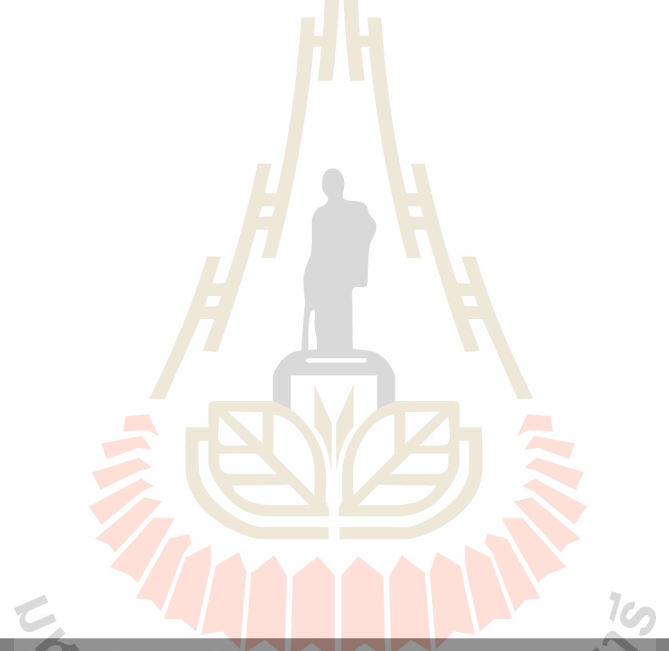
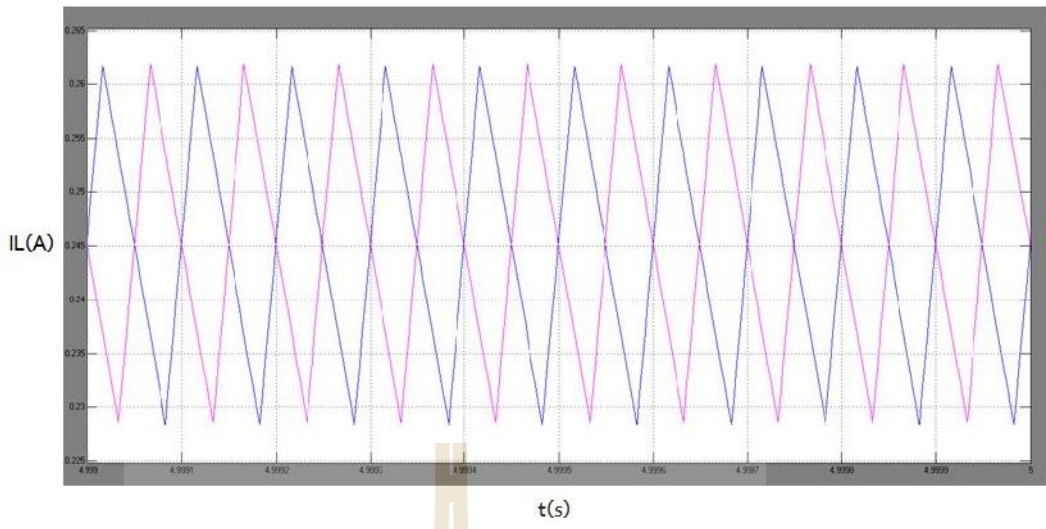


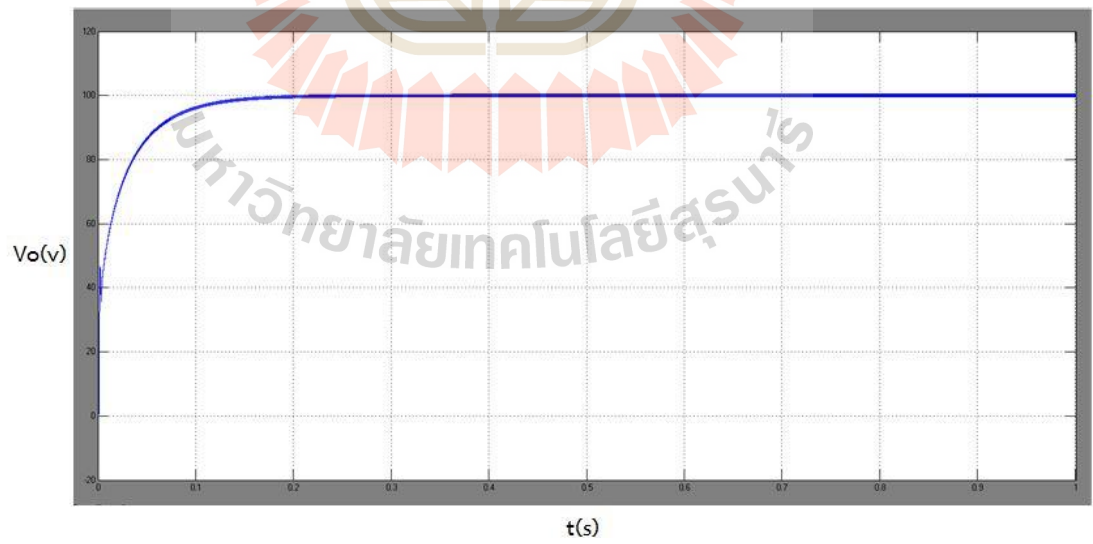
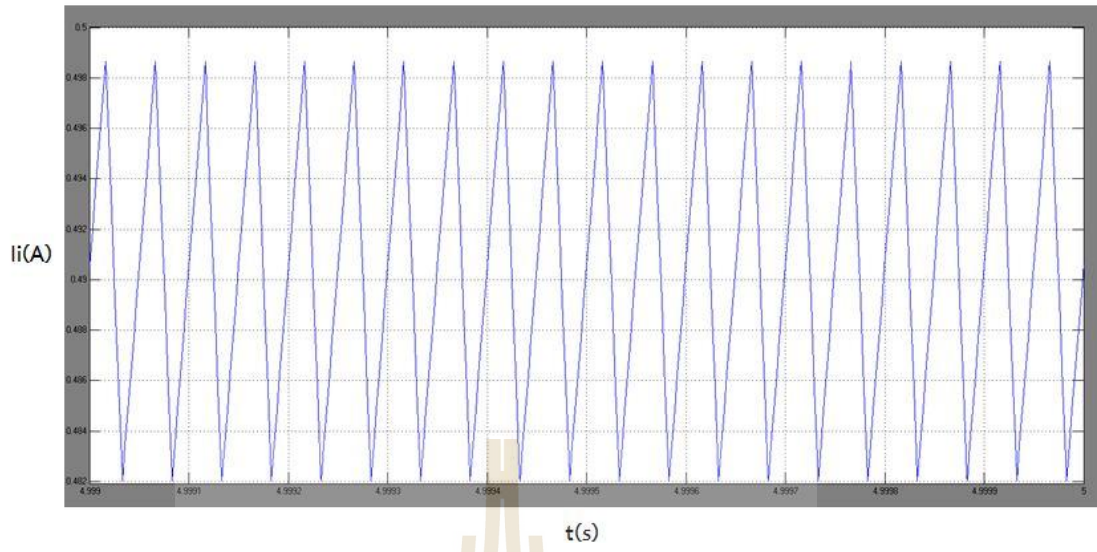
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

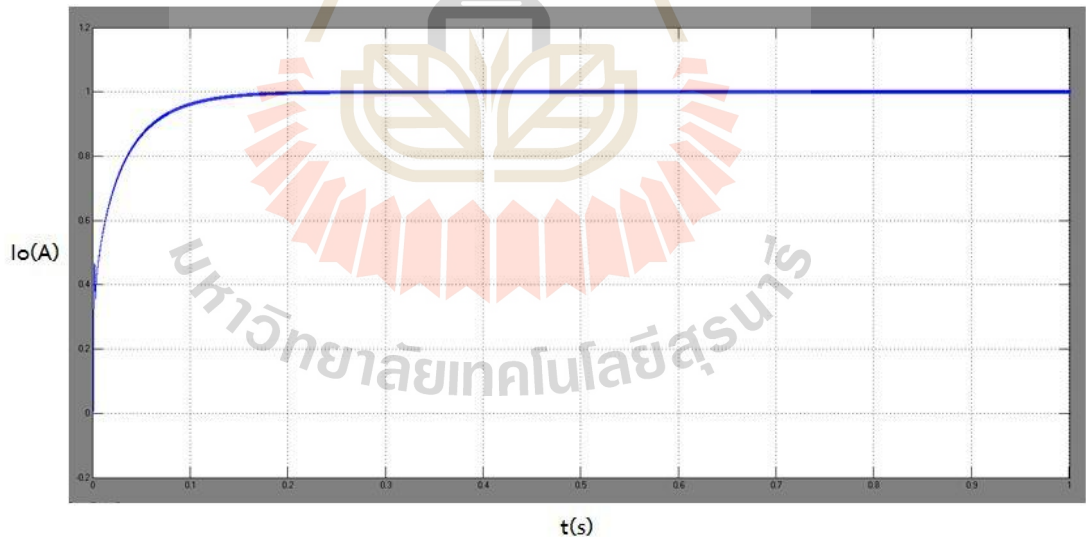
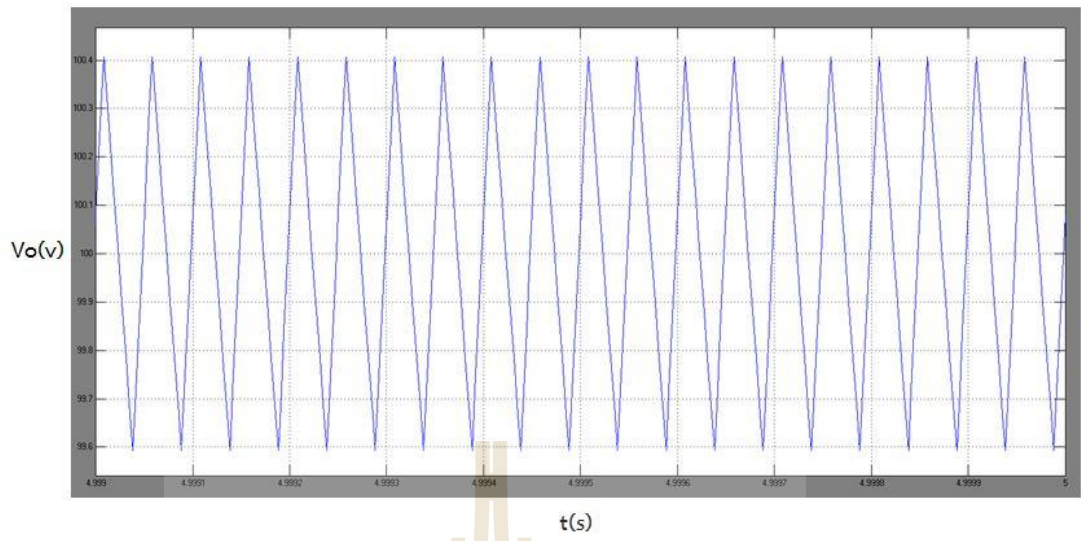


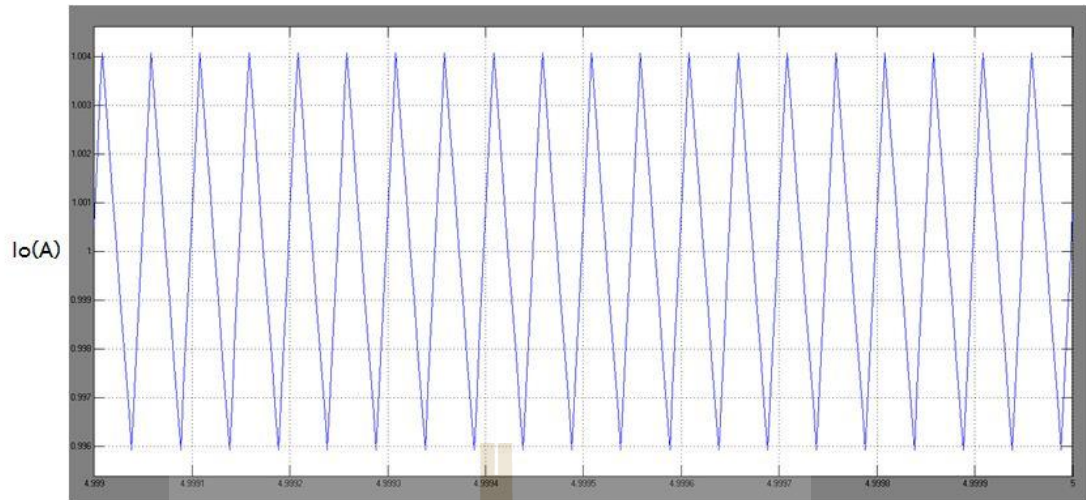
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



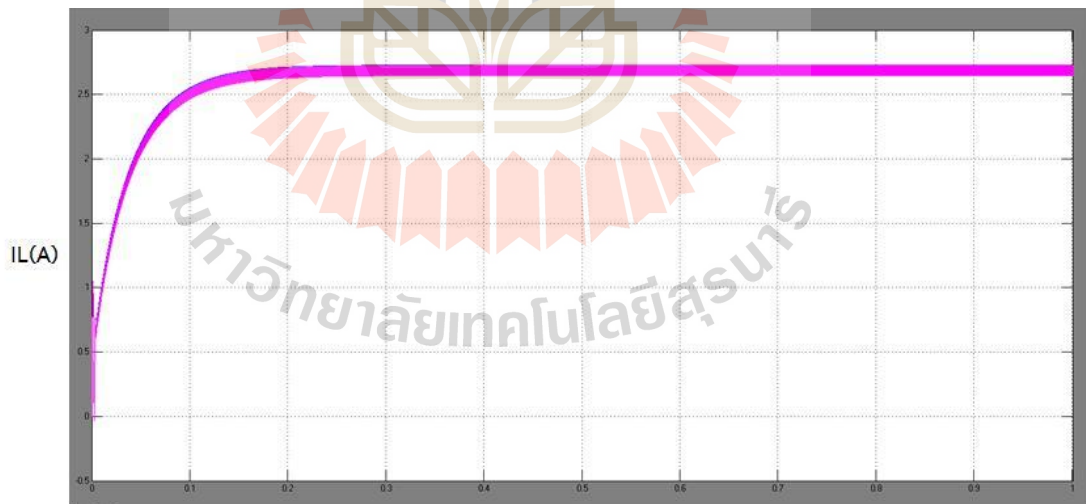






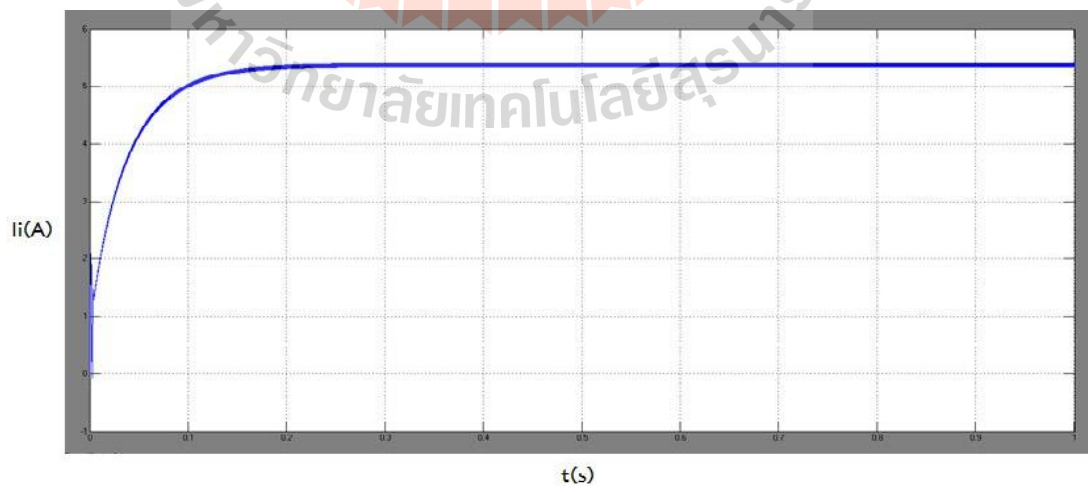
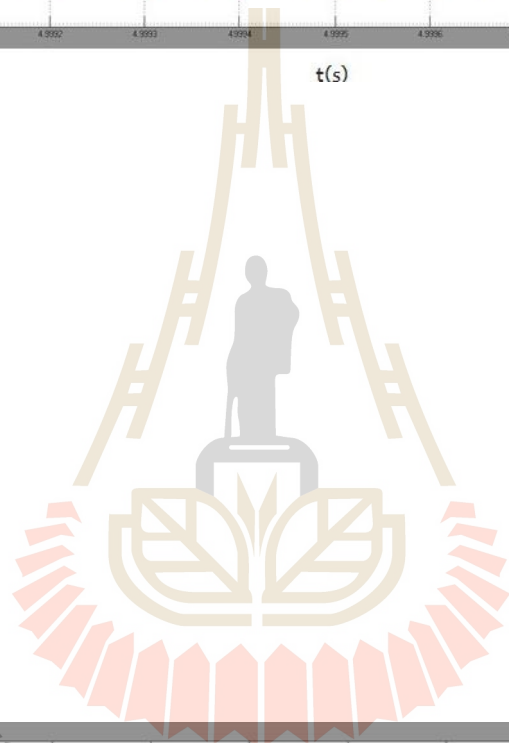
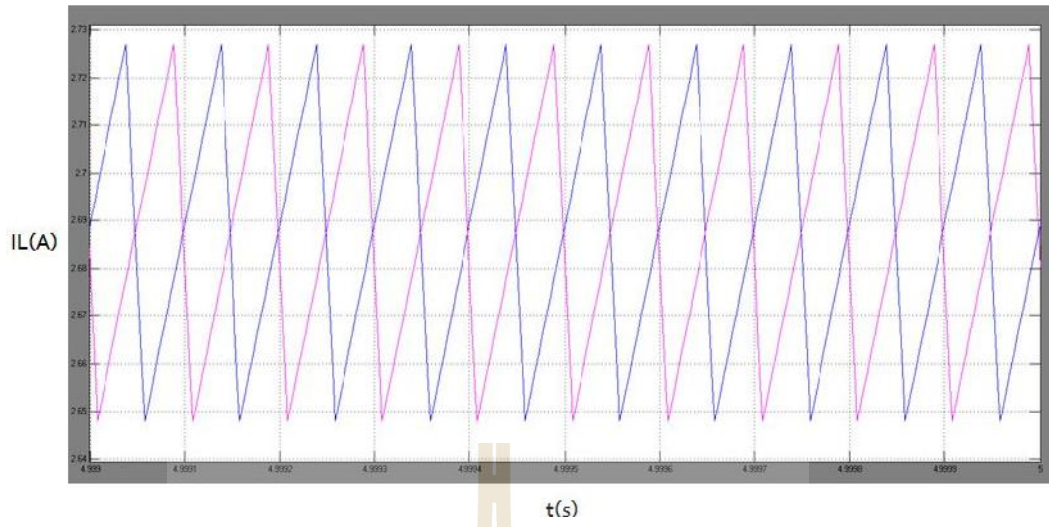


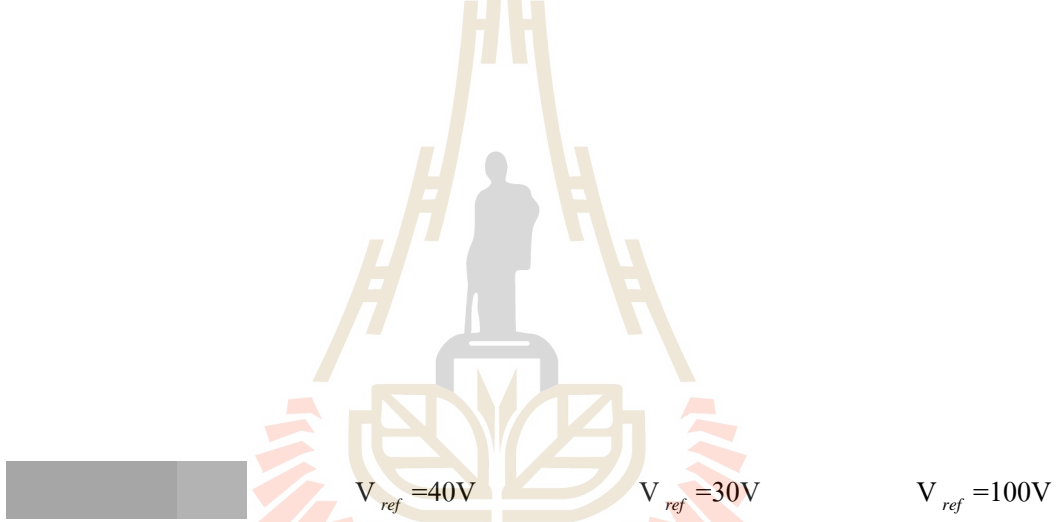
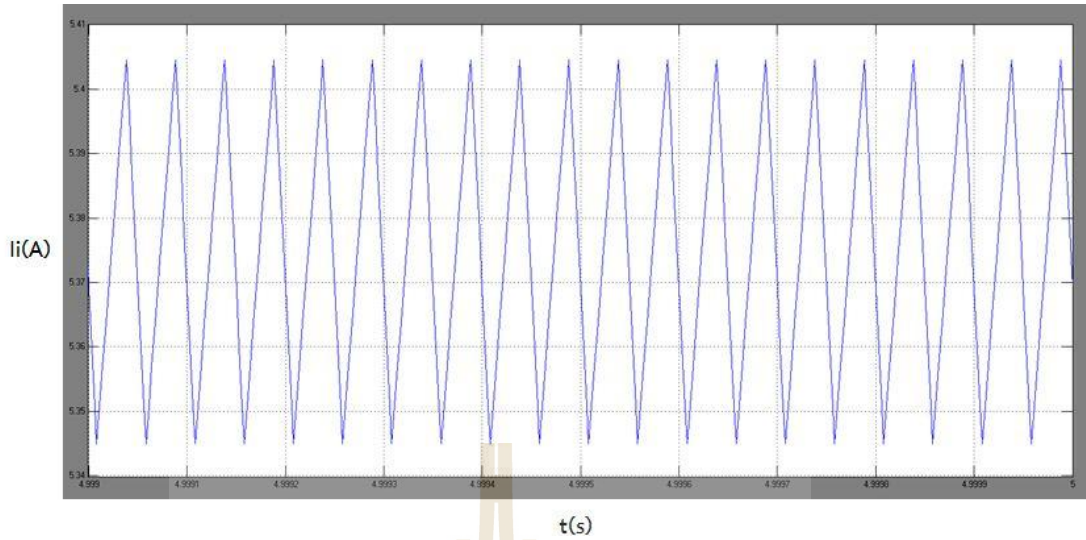
t(s)



t(s)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

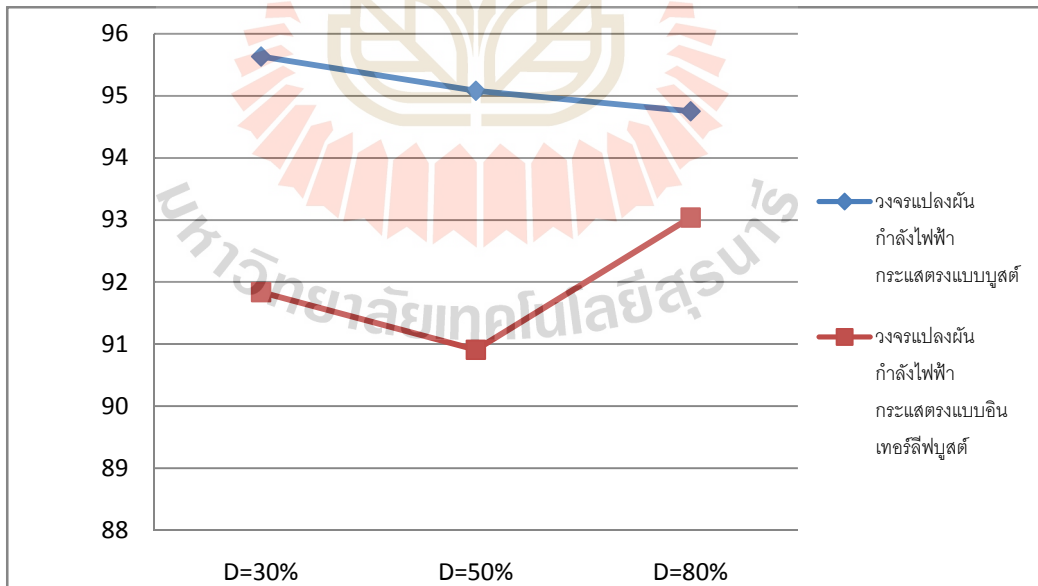


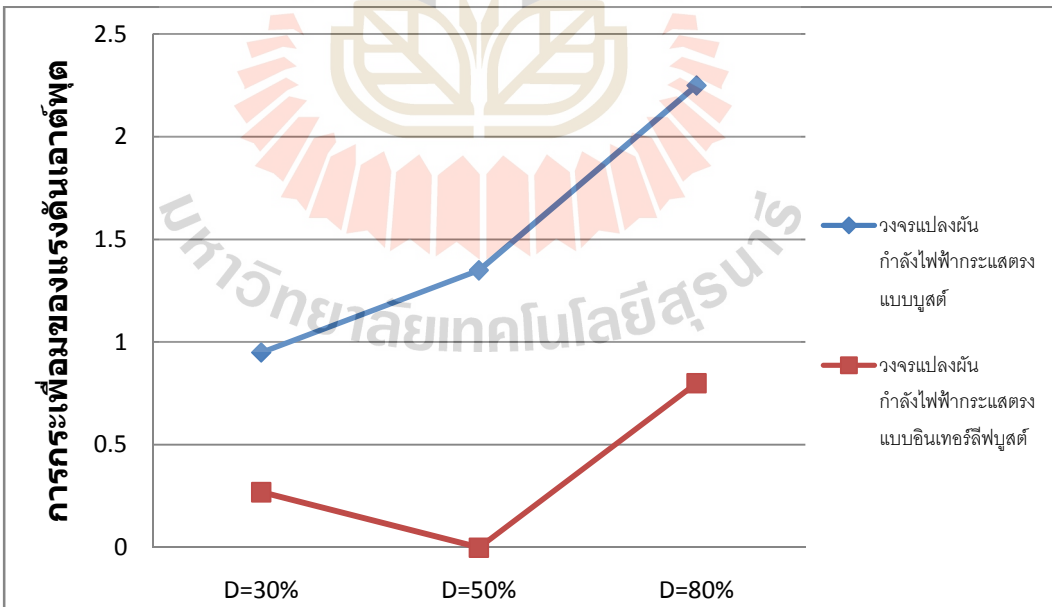
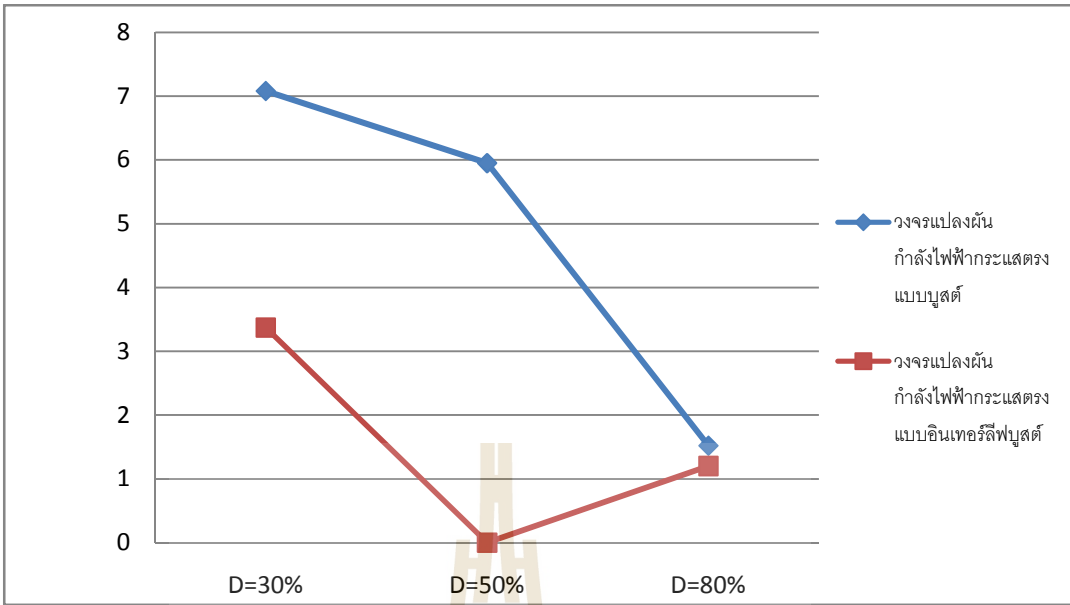


V_o (V)	40	30	100
ΔV_o (%)	0	0.27	0.8
I_o (A)	0.4	0.3	1
ΔI_o (%)	0	0.27	0.8
I_{L1} (A)	0.44	0.245	2.687
ΔI_{L1} (%)	11.36	13.88	2.9
I_{L2} (A)	0.44	0.245	2.687
ΔI_{L2} (%)	11.36	13.88	2.9
I_{in} (A)	0.88	0.49	5.374
ΔI_{in} (%)	0	3.37	1.2

I_{in} (A) V_o (V)

		วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงแบบบัสต์	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงแบบอินเทอร์ ลีฟบูสต์
ประสิทธิภาพ	$V_{ref} = 30V$	95.63	91.84
	$V_{ref} = 40V$	95.08	90.91
	$V_{ref} = 100V$	94.75	93.04
ΔI_{in} (%)	$V_{ref} = 30V$	7.08	3.37
	$V_{ref} = 40V$	5.95	0
	$V_{ref} = 100V$	1.52	1.2
ΔV_o (%)	$V_{ref} = 30V$	0.95	0.27
	$V_{ref} = 40V$	1.35	0
	$V_{ref} = 100V$	2.25	0.8
ΔI_{in} (%)	ΔI_L		





วิเคราะห์ผลการจำลองสถานการณ์

จากผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงเปิด ทำให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการทำงานของ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์เล็กน้อย การกระเพื่อมของกระแสอินพุตของวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ มี แนวโน้มลดลง เมื่อค่า Duty cycle(D) เพิ่มขึ้น แต่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ ลิฟบูสต์ ที่ Duty cycle(D) เท่ากับ 50 % จะมีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของกระแสอินพุตเท่ากับ 0 % เนื่องจากสัญญาณพัลส์ในการสับสวิทช์ทั้ง 2 ตัว มีการ On-Off สลับกันที่ครึ่งคาบเวลา ทำให้การ กระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว มีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การ กระเพื่อมของกระแสอินพุตเท่ากับ 0 A แต่ที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ ลิฟบูสต์มีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของกระแสอินพุตน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง แบบบวสต์ ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ดีกว่าวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ และการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ มี แนวโน้มลดลง เมื่อค่า Duty cycle(D) เพิ่มขึ้น แต่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ ลิฟบูสต์ ที่ Duty cycle(D) เท่ากับ 50 % จะมีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0% เนื่องจากสัญญาณพัลส์ในการสับสวิทช์ทั้ง 2 ตัว มีการ On-Off สลับกัน ที่ครึ่งคาบเวลา ทำให้การ กระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว มีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การ กระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0 V แต่ที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ ลิฟบูสต์มีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง แบบบวสต์ ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ ดีกว่าวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์

จากผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิด ทำให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการทำงานของ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบ อินเทอร์ลิฟบูสต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเพิ่มขึ้น แต่ที่วงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบ อินเทอร์ลิฟบูสต์เล็กน้อย การกระเพื่อมของกระแสอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง แบบบวสต์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ มีแนวโน้มลดลง เมื่ อค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเพิ่มขึ้น แต่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟบูสต์ ที่ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเท่ากับ 40 V จะมีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของกระแสอินพุตเท่ากับ 0 %

เนื่องจากสัญญาณพัลส์ในการสับสวิทช์ทั้ง 2 ตัว มีการ On-Off สลับกันที่ครึ่งคาบเวลา ทำให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว มีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตเท่ากับ 0 A แต่ที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์มีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของกระแสอินพุตน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์ดีกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ และการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเพิ่มขึ้น แต่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์ ที่ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเท่ากับ 40 V จะมีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0 % เนื่องจากสัญญาณพัลส์ในการสับสวิทช์ทั้ง 2 ตัว มีการ On-Off สลับกันที่ครึ่งคาบเวลา ทำให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว มีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0 V แต่ที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์มีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์ ดีกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 ระบบ คือ ระบบวงเปิดและระบบวงปิด โดยทำการวิเคราะห์ที่ค่า Duty cycle(D) เท่ากับ 50 % (ระบบวงเปิด) และค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเท่ากับ 40 V (ระบบวงปิด) เนื่องจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ (ตัวเหนี่ยวนำ L และตัวเก็บประจุ C) ที่ค่าเดียวกันในการจำลองสถานการณ์ ทำให้เห็นว่า เปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของกระแสอินพุตของระบบวงปิดมีค่าน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของกระแสอินพุตของระบบวงเปิด ซึ่งระบบวงปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์ จะมีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของกระแสอินพุตเท่ากับ 0 % เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว มีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ และเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตของระบบวงปิดมีค่าน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตของระบบวงเปิด ซึ่งระบบวงปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเทอร์ลิฟิวสต์ จะมีเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0 % เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว มีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์

สรุปผลการจำลองสถานการณ์

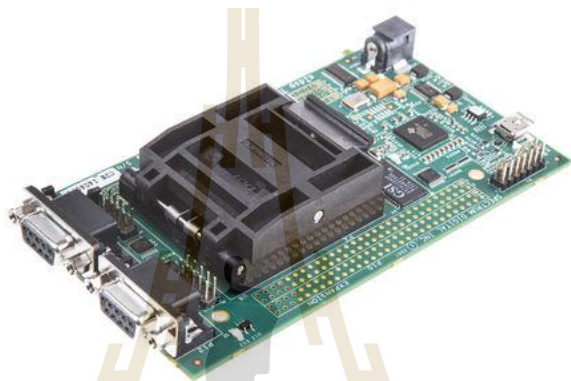
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์ลิฟิวสต์ เห็นว่า ประสิทธิภาพดีน้อยกว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ แต่สามารถทำให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุต และการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ให้มีค่าลดน้อยลงจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสต์ เกิดจากการที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว หักล้างกัน ซึ่งที่ duty cycle เท่ากับ 50 % (มีอัตราขยายแรงดันเอาต์พุตเป็น 2 เท่าของแรงดันอินพุต คือ แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 40 V) สัญญาณพัลส์ในการสับสวิทช์ทั้ง 2 ตัว มีการ On-Off สลับกันที่ครึ่งคาบเวลา ทำให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว มีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าเท่ากับ 0 A ซึ่งคิดเป็น 0 % ของกระแสอินพุต และการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 V ซึ่งคิดเป็น 0 % ของแรงดันเอาต์พุต



ภาคผนวก ข

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. ตัวรับสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ (Quadrature Encoder Pulse) จำนวน 2 ชุด
7. ePWM 12 ช่องสัญญาณ (6 โมดูล) สำหรับสร้างสัญญาณ PWM
8. Serial Peripheral Interface modules SPI จำนวน 1 ชุด (SPI-A)
9. Serial Communications Interface modules SCI จำนวน 3 ชุด (SCI-A,SCI-B,SCI-C)
10. ขาอินพุตและเอาต์พุตสำหรับเลือกโปรแกรมเพื่อใช้งานจำนวน 96 ขา

โมดูลการสร้างสัญญาณ PWM (enhanced PWM modules)

โมดูลการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ในการขับขาคงตัวในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM จำนวน 6 ชุด คือ ePWM1 – ePWM6 แต่ละชุดสามารถสร้างเอาต์พุตได้ 2 เอาต์พุต คือ ePWMxA และ ePWMxB นั่นคือสามารถสร้างสัญญาณ PWM ได้ทั้งหมด 12 สัญญาณ แต่ละชุดมีโหมดการนับของสัญญาณนาฬิกาทั้งหมด 3 โหมด คือ โหมดนับขึ้น (Count Up mode) โหมดนับลง (Count Down mode) และโหมดการนับขึ้น - ลง (Count Up-Down mode) สำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ของโมดูล ePWM จะใช้วิธีเปรียบเทียบเคาน์เตอร์ (Counter Compare) ของสัญญาณนาฬิกา กับข้อมูลหรือค่าในรีจิสเตอร์เพื่อสร้างเงื่อนไขสำหรับการกำหนดรูปแบบสัญญาณ PWM ให้มีลอจิกแตกต่างกันและมีความถี่ของสัญญาณที่ต้องการ ส่วนความถี่ของสัญญาณ PWM สามารถกำหนดได้ด้วยรีจิสเตอร์ *TBPRD* (ePWM Period Register) ที่มีขนาด 16 บิต ซึ่ง *TBPRD* จะอยู่ในช่วง 00000 – 65535 โดยมีความสัมพันธ์กับระบบสัญญาณนาฬิกา 150 MHz และรีจิสเตอร์ปรับคูณสัญญาณนาฬิกา *HSPCLKDIV* และ *CLKDIV* ดังสมการ (ข.1) โดยสัญญาณที่ถูกเปรียบเทียบแล้วจะถูกส่งออกทางขา GPIO2_EPWM2A เพื่อขับขาคงตัวในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

$$TBPRD = \frac{1}{2} \left[\frac{f_{SYSCLKOUT}}{f_{PWM} (HSPCLKDIV \times CLKDIV)} \right] \quad (ข.1)$$

โดยที่ <i>TBPRD</i>	คือ ค่าสูงสุดของตัวนับสัญญาณนาฬิกา
<i>HSPCLKDIV</i>	คือ ตัวปรับคูณความเร็วสูงสัญญาณนาฬิกา (high speed clock scalar)
<i>CLKDIV</i>	คือ ตัวปรับคูณสัญญาณนาฬิกา (clock scalar)
$f_{SYSCLKOUT}$	คือ ความถี่ของระบบสัญญาณนาฬิกา 150 MHz
f_{PWM}	คือ ความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ต้องการสร้าง (Hz)

การใช้งาน โมดูลแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล ADC (Analog to Digital Converter)

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 มีโมดูลสำหรับการแปลงแอนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีความละเอียด 12 บิต โดยรองรับสัญญาณแอนาลอกที่มีแรงดันไม่เกิน 3 V ซึ่งเมื่อรับสัญญาณที่อยู่ในช่วงแรงดันดังกล่าวแล้วจะทำการแปลงเป็นค่าดิจิตอล ตัวเลขที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 4095 สำหรับโมดูล ADC มีทั้งหมด 16 ช่องอินพุตสัญญาณ แบ่งเป็นพอร์ตชุด A 8ช่องสัญญาณ (ADCINA0 – ADCINA7) และพอร์ตชุด B 8ช่องสัญญาณเช่นกัน (ADCINB0 – ADCINB7) สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ 2 ช่องสัญญาณ คือ ADCINA0 สำหรับรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิปูสค์สามขั้น และ ADCINA1 รับสัญญาณกระแสอินพุต ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตลิปูสค์สามขั้น โดยสมการที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล แสดงได้ดังสมการ (ข.2)

$$Digital\ Values = \frac{V_{analog} \times 4095}{3} \quad (ข.2)$$

โดยที่ $Digital\ Values$ คือ ค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลง ADC
 V_{analog} คือ สัญญาณแรงดันแอนาลอก (V)



ภาคผนวก ค

โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมชุดทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟชุดที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

```
//  
// Lab8_1: TMS320F28335  
// (c) Frank Bormann  
//  
#####  
//  
// FILE: Lab8_1.c  
//  
// TITLE: DSP28335ControlCARD Analogue Input  
//  
// ADCIN_A0 , ADCIN_A1 connected to variable resistors VR1, VR2  
// on Peripheral Explorer Board (3.3V...0V)  
// ADC samples at 50KHz, hardware triggered by ePWM2  
// Voltages are displayed alternately on 4 LEDs LD1...LD4  
// (GPIO9, GPIO11, GPIO34 and GPIO49)  
// CPU Timer0 ISR every 100 ms  
// Watchdog active , cleared in ISR and main-loop  
//  
#####  
// Ver | dd mmm yyyy | Who | Description of changes  
// =====|=====|=====|=====|  
// 3.0 | 30 Jun 2009 | F.B. | Lab8_1 for F28335CC + peripheral explorer  
// 3.1 | 09 Nov 2009 | F.B. | Lab8_1 for F28335 and PE revision 5  
// =====|=====|=====|=====|  
#include "DSP2833x_Device.h"  
  
#if(CPU_FRQ_150MHZ)  
#define ADC_MODCLK 0x3  
#endif  
  
#if(CPU_FRQ_100MHZ)  
#define ADC_MODCLK 0x2
```

```

#endif

// external function prototypes
extern void InitAde(void);
extern void InitSysCtrl(void);
extern void InitPieCtrl(void);
extern void InitPieVectTable(void);
extern void InitCpuTimers(void);
extern void ConfigCpuTimer(struct CPUTIMER_VARS *, float, float);
extern void display_ADC(unsigned int);

// Prototype statements for functions found within this file.
void Gpio_select(void);
void Setup_ePWM(void);
interrupt void cpu_timer0_isr(void);
interrupt void adc_isr(void);           // ADC End of Sequence ISR

// Global Variables
unsigned int Voltage_VR1;
unsigned int Current_Iin1;
unsigned int Current_IL1;
unsigned int Current_IL2;
unsigned int Current_IL3;
unsigned int Voltage_Vout;

float digi_Iin1=0,digi_IL1=0,digi_IL2=0,digi_IL3=0,digi_v=0;
float iin1=0,il1=0,il2=0,il3=0,vout=0;

float Ts=1e-5;
float T=0;

float Vref=40;
float T1=3,Vref1=40;
float T2=6,Vref2=40;
float T3=9,Vref3=40;

float Verror=0.0;
float Excv=0,Sumv1=0,Sumv2=0;

```

```

float Kpv=3.999e-3,Kiv=0.17856; //Kpv=3.999e-3,Kiv=0.17856;

float Iref=0,Iref1=0,Iref2=0,Imax=0,Imin=1,Idiff=0,Idiff_normal=0,Iin_new_1=0;

float Ierror1=0,Ierror2=0;

//float p1=60,p2=40; // sourcepower

//float k1,k2;

float Kpi=3.75,Kii=9566.173; //Kpi=3.75,Kii=9566.173;

float Exci1=0,Sumi11=0,Sumi12=0,Exci2=0,Sumi21=0,Sumi22=0;

float pis1;

int n=0;m=0,Fault_detect=0,f=0;

int duty1=3750; // duty cycle 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125

int duty2=3750;

int duty3=3750;

#####

//
main code

#####

void main(void)
{
    InitSysCtrl(); // Basic Core Init from DSP2833x_SysCtrl.c

    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDCR= 0x00AF; // Re-enable the watchdog

    EDIS; // 0x00AF to NOT disable the Watchdog, Prescaler = 64

    DINT; // Disable all interrupts

    Gpio_select(); // GPIO9, GPIO11, GPIO34 and GPIO49 as output
                  // to 4 LEDs at Peripheral Explorer)

    Setup_ePWM0;

    InitPieCtrl(); // basic setup of PIE table; from DSP2833x_PieCtrl.c

```

```

InitPieVectTable(); // default ISR's in PIE

InitAdc(); // Basic ADC setup, incl. calibration

AdcRegs.ADCCTRL1.all = 0;

AdcRegs.ADCCTRL1.bit.ACQ_PS = 7; // 7 = 8 x ADCCLK

AdcRegs.ADCCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1; // 1=cascaded sequencer

AdcRegs.ADCCTRL1.bit.CPS = 0; // divide by 1

AdcRegs.ADCCTRL1.bit.CONT_RUN = 0; // single run mode

AdcRegs.ADCCTRL2.all = 0;

AdcRegs.ADCCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1; // 1=enable SEQ1 interrupt

AdcRegs.ADCCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 1; // 1=SEQ1 start from ePWM_SOCA trigger

AdcRegs.ADCCTRL2.bit.INT_MOD_SEQ1 = 0; // 0= interrupt after every end of sequence

AdcRegs.ADCCTRL3.bit.ADCCLKPS = 3; // ADC clock: FCLK = HSPCLK / 2 * ADCCLKPS

// HSPCLK =
75MHz (see DSP2833x_SysCtrl.c)
// FCLK =
12.5 MHz

AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 5; // 6 conversions from Sequencer 1

AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0; // Setup ADCINA0 as 1st SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 1; // Setup ADCINA1 as 2nd SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 2;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 3;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 4;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 5;

EPwm4Regs.TBCTL.all = 0xC030; // Configure timer control register

/*
bit 15-14 11: FREE/SOFT, 11 = ignore emulation suspend
bit 13 0: PHSDIR, 0 = count down after sync event
bit 12-10 000: CLKDIV, 000 => TBCLK = HSPCLK/1
bit 9-7 000: HSPCLKDIV, 000 => HSPCLK = SYSCLKOUT/1
bit 6 0: SWFSYNC, 0 = no software sync produced

```

```

bit 5-4   11:   SYNCSELE, 11 = sync-out disabled
bit 3     0:   PRDL, 0 = reload PRD on counter=0
bit 2     0:   PHSEN, 0 = phase control disabled
bit 1-0   00:   CTRMODE, 00 = count up mode
*/

EPwm4Regs.TBPRD = 2999;    // TPRD +1 = TPWM / (HSPCLKDIV * CLKDIV * TSYSCLK)
                               //                                     = 20 ?s / 6.667 ns

EPwm4Regs.ETPS.all = 0x0100;    // Configure ADC start by ePWM2
/*
bit 15-14  00:   EPWMxSOCB, read-only
bit 13-12  00:   SOCBPRD, don't care
bit 11-10  00:   EPWMxSOCA, read-only
bit 9-8    01:   SOCAPRD, 01 = generate SOCA on first event
bit 7-4    0000: reserved
bit 3-2    00:   INTCNT, don't care
bit 1-0    00:   INTPRD, don't care
*/

EPwm4Regs.ETSEL.all = 0x0A00;    // Enable SOCA to ADC
/*
bit 15     0:   SOCBEN, 0 = disable SOCB
bit 14-12  000:   SOCBSEL, don't care
bit 11     1:   SOCAEN, 1 = enable SOCA
bit 10-8   010:   SOCASEL, 010 = SOCA on PRD event
bit 7-4    0000: reserved
bit 3      0:   INTEN, 0 = disable interrupt
bit 2-0    000:   INTSEL, don't care
*/

EALLOW;
PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr;
PieVectTable.ADCINT = &adc_isr;
EDIS;

```

```

InitCpuTimers(); // basic setup CPU Timer0, 1 and 2
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0,150,10); // 1e-5=10*1e-6

PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1; // CPU Timer 0
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6 = 1; // ADC

IER |=1;

EINT;
ERTM;

CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS = 0; // start timer0

while(1)
{
    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDKEY = 0x55; // service WD #1
    EDIS;
}
}
void Gpio_select(void)
{
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0; // GPIO15 ... GPIO0 = General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1; // ePWM1A active
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1; // ePWM2A active
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1; // ePWM3A active

    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all = 0; // GPIO31 ... GPIO16 = General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0; // GPIO47 ... GPIO32 = General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0; // GPIO63 ... GPIO48 = General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0; // GPIO79 ... GPIO64 = General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPCMUX2.all = 0; // GPIO87 ... GPIO80 = General Purpose I/O

    GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0;

    GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0; // GPIO63-32 as inputs

```



```

    GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0;          // GPIO87-64 as inputs
    EDIS;
}

void Setup_ePWM(void)
{
    EPwm1Regs.TBCTL.all = 0;             // default status
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0;      // CLKDIV = 1
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 1;   // HSPCLKDIV = 2
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2;     // up - down mode

    EPwm1Regs.AQCTLA.all = 0x0060;      // set ePWM1A on CMPA up
                                           // / / clear
ePWM1A on CMPA down

    EPwm1Regs.TBPRD = 3750;              // 3750=10KHz - PWM signal
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750/2;  // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125

    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0;      // CLKDIV = 1
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 1;   // HSPCLKDIV = 2
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2;     // up - down mode

    EPwm2Regs.AQCTLA.all = 0x0060;      // set ePWM1A on CMPA up
                                           // / / clear
ePWM1A on CMPA down

    EPwm2Regs.TBPRD = 3750;              // 3750=10KHz - PWM signal
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750/2;  // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125

    EPwm3Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0;      // CLKDIV = 1
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 1;   // HSPCLKDIV = 2
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2;     // up - down mode

```

```

EPwm3Regs.AQCTLA.all = 0x0060;           // set ePWM1A on CMPA up
                                           // / / clear

ePWM1A on CMPA down

EPwm3Regs.TBPRD = 3750;                   // 3750=10KHz - PWM signal
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750/2;      // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125

EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = 1;         // generate a syncout if CTR = 0

EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;           // enable phase shift for ePWM2
EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = 0;         // syncin = syncout
EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 7500/3;    // 1/3 phase shift

EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;           // enable phase shift for ePWM3
EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 7500*2/3;  // 2/3 phase shift
}

interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
// CpuTimer0.InterruptCount++;
static int up_down = 1;
EALLOW;
SysCtrlRegs.WDKEY = 0xAA; // service WD #2
EDIS;

if(up_down)
{
    if(EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA < EPwm1Regs.TBPRD) EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA;
    else up_down = 0;
}
else
{

```

```

if(EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA > 0) EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA;

    else up_down = 1;
}

if(up_down)
{
    if(EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA < EPwm1Regs.TBPRD) EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA;
    else up_down = 0;
}
else
{
    if(EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA > 0) EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA;
    else up_down = 1;
}
if(up_down)
{
    if(EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA < EPwm1Regs.TBPRD) EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA;
    else up_down = 0;
}
else
{
    if(EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA > 0) EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA;
    else up_down = 1;
}

PicCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;

digi_in1 = Current_Iin1;
digi_IL1 = Current_IL1;
digi_IL2 = Current_IL2;
digi_IL3 = Current_IL3;
digi_v = Voltage_Vout;

```

```

//iin1=[(2.5741*digi_in1)+0.0094866]*3.3/4095;
iin1=2.0744e-3*digi_in1+7.645e-6-0.1;
//iin2=(0.0029*digi_i2)-0.0434; Use for IL1

//vout=[(42.159*digi_v)-0.11162]*3.3/4095;
vout=0.03397*digi_v-8.995e-5-5.0;

// PI V loop
Verror = Vref-vout;           // Verror
ExcV = Verror*Kpv;           //Kp
Sumv2 = Sumv1 + Kiv*Verror*Ts; //Ki
Iref= ExcV + Sumv2 ;

//PI I loop1
//k1=p1/(p1+p2);

//Iref1 = Iref*k1;

Ierror1 = Iref-iin1;         // Verror lin=IL1+IL2+IL3;
ExcI1 = Ierror1*Kpi;        //Kp
Sumi12 = Sumi11 + Kii*Ierror1*Ts; //Ki
pis1= ExcI1 + Sumi12 ;

if(pis1>=0.95){
    pis1=0.95;
}

// PI I loop2

// k2=p2/(p1+p2);

// Iref2 = Iref*k2;

// Ierror2 = Iref2-iin2;     // Verror
// ExcI2 = Ierror2*Kpi;     //Kp
// Sumi22 = Sumi21 + Kii*Ierror2*Ts; //Ki
// update variable
Sumv1 = Sumv2;

```

```

Sumi11= Sumi12;//
Sumi21= Sumi22;

// convert PI single to DUTY

duty1=3750-(pis1*3750); // duty1=3750-(pis*468.75); duty1=3750-(pis1*23.4375);

duty2= duty1;

duty3= duty1;

//duty2=3750-(pis2*23.4375);

// DUTY limiter

if(duty1>3750){duty1=3750;}
else if(duty1<1125){duty1=1125;}
else{duty1=duty1;}

if(duty2>3750){duty2=3750;}
else if(duty2<1125){duty2=1125;}
else{duty2=duty2;}

if(duty3>3750){duty3=3750;}
else if(duty3<1125){duty3=1125;}
else{duty3=duty3;}

EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = duty1; // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = duty2; // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = duty3; // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125*/

```

```

//          EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 1875;    // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125
//          EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 1875;    // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125
//          EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 1875;    // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125

T=T+Ts;

if(T>T1&&T<T2){Vref=Vref1;}
if(T>T2&&T<T3){Vref=Vref2;}
if(T>T3){Vref=Vref3;}

//fault Detection//
// n=n+1;
n=n+1;
lin_new_1=iin1;
if(n<500){
    if(lin_new_1>Imax){
        Imax=lin_new_1;
    }
    else
    {
        Imax=Imax;
    }
    if(lin_new_1<Imin){
        Imin=lin_new_1;
    }
    else
    {
        Imin=Imin;
    }
}

if(n>=500){

    Idiff=Imax-Imin;
    n=0;
    Imax=lin_new_1;
}

```



```

    Imin=Iin_new_1;

}

if(T==3.0){
    Idiff_normal=Idiff;
}
if(T>3.5){

    if(Fault_detect==0){
        if(Idiff>(1.2*Idiff_normal)){

            f = f+1;
        }
        else if(Idiff<=(1.2*Idiff_normal)){
            f = 0;
        }
    }
}

if(f >= 5){
    Fault_detect=1;
}
else if(f<5){
    Fault_detect=0;
}

if(Fault_detect>= 1){
    Fault_detect=1.0;
    //      c1=0;
    //      c2=1;
}

if(T==4.0){
    //      duty3=3750;
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA=3750-(3750*0); // S3 open_circuit_fault
}

if(T>=4.5){
    //      duty1=3750;

```

```

//      duty2=3750;

//      duty3=3750;

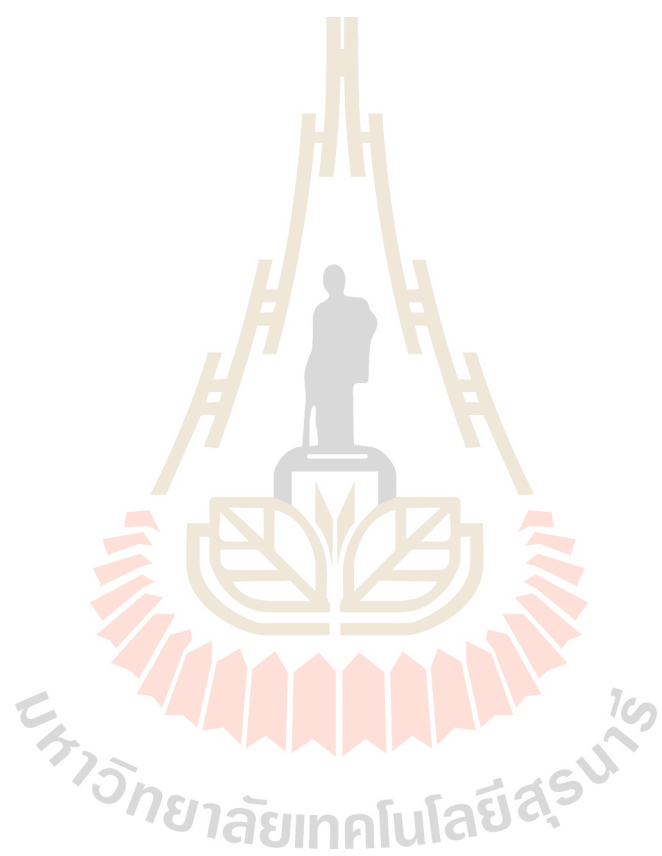
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-(3750*0); // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-(3750*0); // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-(3750*0); // 30%=2625 , 50%=1875 , 70%=1125*/
    }
}

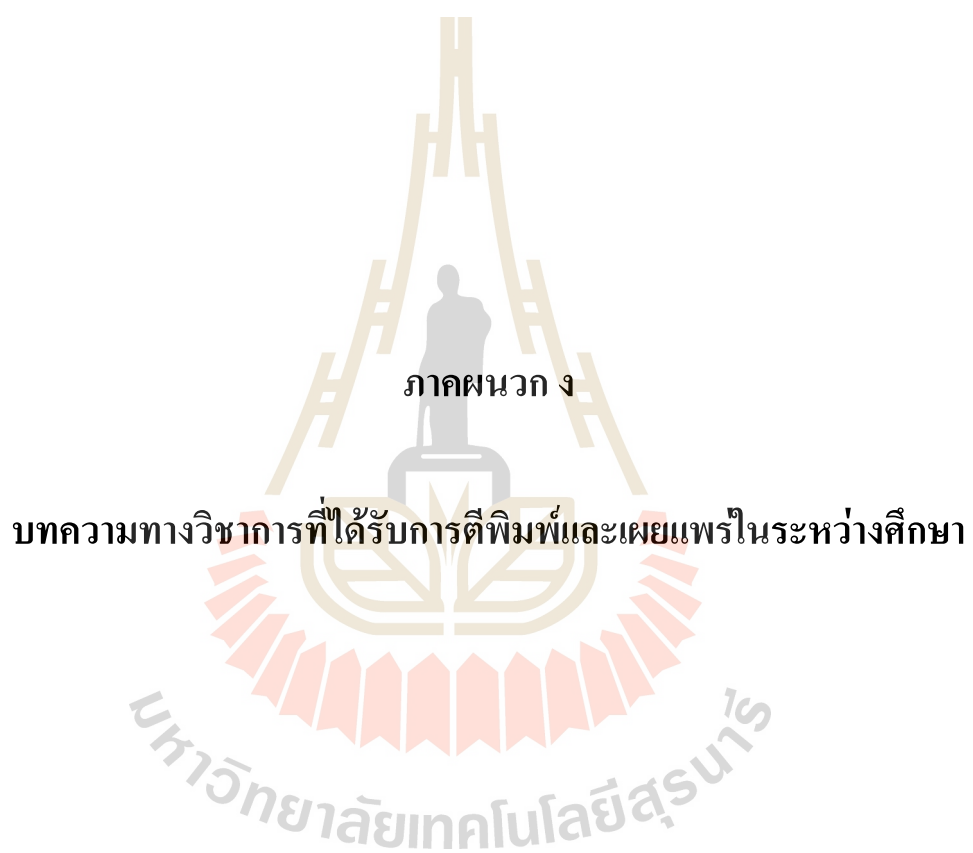
interrupt void adc_isr(void)
{
    Voltage_VR1 = AdcMirror.ADCRESULT0; // store results global
    Current_Iin1 = AdcMirror.ADCRESULT1;
    Voltage_Vout = AdcMirror.ADCRESULT2;
    Current_IL1 = AdcMirror.ADCRESULT3;
    Current_IL2 = AdcMirror.ADCRESULT4;
    Current_IL3 = AdcMirror.ADCRESULT5;
//    Voltage_Vout = AdcMirror.ADCRESULT5;
    // Reinitialize for next ADC sequence
    AdcRegs.ADCCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reset SEQ1
    AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1; // Clear INT SEQ1 bit
    AdcRegs.ADCCTRL2.bit.RST_SEQ2 = 1; // Reset SEQ2
    AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ2_CLR = 1; // Clear INT SEQ2 bit

    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Acknowledge interrupt to PIE
}

//=====
// End of SourceCode.
//=====

```





รายนามบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

S. Khwan-on and S. Sakulchotruangdet, "**Three-Phase Interleaved Boost Converter with Fault Tolerant Control Strategy for Renewable Energy System Applications**" 2016

International Electrical Engineering Congress (iEECON), Chiang Mai, 2016, pp. 1-4.

ศิริวรรณ สกุดโชติเรืองเดช และสุชาติรัตน์ ขวัญอ่อน “การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟเวอ์สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น วันที่ 19 – 21 พฤศจิกายน 2557



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสท์สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
The Interleaved Boost Converter Control for Renewable Energy System Applications

พิริวรรณ สกุลโชติเรืองเดช และ สุดาวัฒน์ ขวัญอ่อน*

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *email : sudarat_kh@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟบูสท์สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน ซึ่งมีแรงดันอินพุตต่ำ เพื่อต้องการให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงตามต้องการและมีการกระเพื่อมเพียงเล็กน้อย โดยโครงสร้างวงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์เป็นแบบสองชั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้งสองตัวให้เหมาะสม ในบทความนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการการทำงานของวงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์แบบสองชั้น วงจรดังกล่าวจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟส โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างง่ายตระกูล AVR ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการควบคุมการทำงานของวงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการและเกิดการหักล้างของกระแสเพื่อมในวงจร

สำคัญ วงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์ พลังงานทดแทน การเลื่อนเฟส การหักล้างของกระแสเพื่อม

Abstract

This paper presents the interleaved boost converter with its control strategy for renewable energy system applications, where the generated voltage is quite low. A high output voltage with small ripples is required from the converter. Therefore, the power switches need to be controlled properly. In this paper, the interleaved boost converter topology and its principle operation are presented. This converter employs the PI controller with a phase-shift technique by using a simple AVR microcontroller. The simulation and experimental results are shown to demonstrate the effectiveness of the interleaved boost converter with its control strategy in order to achieve the desired output voltage and the ripple cancellation.

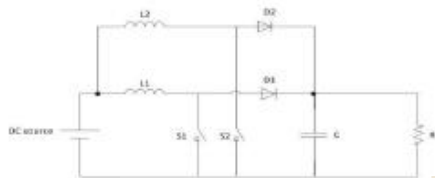
Keywords: interleaved boost converter, renewable energy, phase shift, ripple cancellation

1. บทนำ

ในปัจจุบันแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ได้รับความสนใจอย่างมากในการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากช่วยปัญหาการขาดแคลนพลังงานและไม่สร้างมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ [1] จึงอาจนำไปใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่นัก จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงเพียงพอต่อการใช้งาน โดยอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเข้าช่วย เช่น วงจรบูสท์แบบดั้งเดิม ซึ่งวงจรนี้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ควบคุมการทำงานได้ง่าย มีอัตราขยายแรงดันหลายเท่าขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) อย่างไรก็ตาม การใช้งานวงจรบูสท์แบบดั้งเดิม อาจประสบปัญหาเรื่องการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสในวงจร ส่งผลให้เกิดความร้อนและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าสูงในอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง [2] การแก้ปัญหาการกระเพื่อมสัญญาณจำเป็นต้องออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก อีกแนวทางหนึ่งคือการใช้วงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์จะช่วยลดการกระเพื่อมของสัญญาณและเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร [3]

ในบทความนี้จะศึกษาวงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์แบบสองชั้นเพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสในวงจร และควบคุมการทำงานของวงจรดังกล่าว เพื่อสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการทั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทนที่กำเนิดแรงดันค่อนข้างต่ำได้ โครงสร้างและหลักการการทำงานของวงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์จะปรากฏในหัวข้อถัดไป จากนั้นจะเป็นการอธิบายการควบคุมการทำงานของวงจรโดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอและเทคนิคการเลื่อนเฟสของสัญญาณพัลส์สำหรับสวิตช์ในวงจร จากนั้นจะเป็นผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างง่ายตระกูล AVR เข้าช่วยในการควบคุมการทำงานของวงจรอินเทอร์ลีฟบูสท์

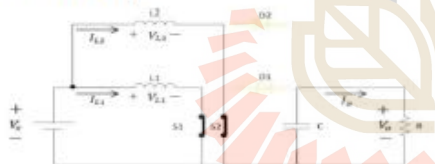
2. โครงสร้างและหลักการทางของวงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์
 วงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์แบบสองขั้ว เป็นวงจรที่นำวงจรบูสต์แบบ
 ดั้งเดิมมาต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรแปลงกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตีสฟิวสต์

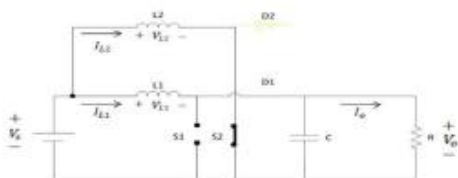
เนื่องจากวงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์ประกอบด้วยสวิตช์สองตัว จึงแบ่ง
 การทำงานในสภาวะอยู่ตัวได้เป็น 4 โหมด ซึ่งการทำงานของสวิตช์ S1
 และ S2 จะทำงานโดยสลับเฟสกัน 180 องศา ซึ่งค่าเฟสที่เลื่อนไปของ
 สัญญาณพัลส์สำหรับสวิตช์ S1 และ S2 สามารถคำนวณได้จากสูตร $\frac{2\pi}{N}$
 เมื่อ N คือ จำนวนขั้วของวงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์

ในโหมดการทำงานแรก สวิตช์ S1 และ S2 นำกระแส ส่วนไดโอด
 D1 และ D2 ไม่นำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 2 จะมีการสะสม
 พลังงานในขั้วเหนี่ยวนำทั้งสอง และกระแสที่ไหลผ่านขั้วเหนี่ยวนำทั้ง
 สองจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขั้วเก็บประจุทำหน้าที่จ่ายกระแสไปยังโหลด
 แทนแหล่งจ่ายด้านอินพุต



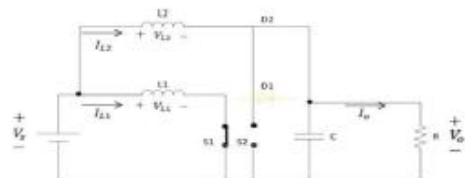
รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์ เมื่อ S1, S2 นำกระแส และ D1, D2 ไม่นำกระแส

ในโหมดการทำงานที่ 2 จะเห็นว่า D1 และ S2 นำกระแส ในขณะที่
 ที่ S1 และ D2 ไม่นำกระแส แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านขั้ว
 เหนี่ยวนำ L2 จะเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขั้วเหนี่ยวนำ L1 จะ
 ลดลง



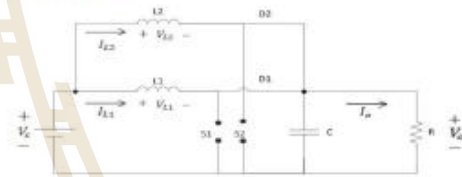
รูปที่ 3 วงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์ เมื่อ D1, S2 นำกระแส และ S1, D2 ไม่นำกระแส

โหมดการทำงานที่ 3 จะเห็นว่า S1 และ D2 นำกระแส ในขณะที่
 D1 และ S2 ไม่นำกระแส แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านขั้ว
 เหนี่ยวนำ L1 จะเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขั้วเหนี่ยวนำ L2 จะ
 ลดลง



รูปที่ 4 วงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์ เมื่อ S1, D2 นำกระแส และ D1, S2 ไม่นำกระแส

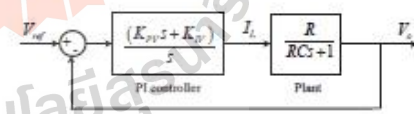
ในโหมดการทำงานสุดท้าย สวิตช์ S1 และ S2 จะไม่นำกระแส
 ส่วนไดโอด D1 และ D2 จะนำกระแส แสดงได้ดังวงจรในรูปที่ 5 ขั้ว
 เหนี่ยวนำทั้งสองจะคายพลังงาน ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านขั้ว
 เหนี่ยวนำทั้งสองจะลดลง



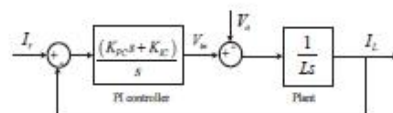
รูปที่ 5 วงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์ เมื่อ S1, S2 ไม่นำกระแส และ D1, D2 นำกระแส

3. การควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์

การออกแบบตัวควบคุมของวงจรอินเวอร์ตีสฟิวสต์จะใช้ตัวควบคุม
 แบบที่ไอเช่นเดียวกับวงจรบูสต์แบบดั้งเดิม ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุม
 แรงดันและอุปกรณ์ควบคุมกระแสดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 6 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันของตัวควบคุมแบบพีไอ



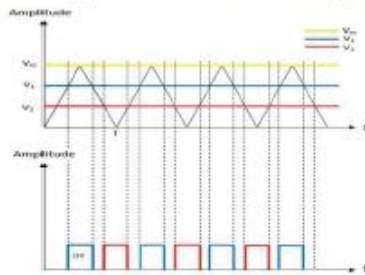
รูปที่ 7 อุปกรณ์ควบคุมกระแสของตัวควบคุมแบบพีไอ

โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบที่ไอของทั้งสองอุปกรณ์หาได้จาก
 ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์อุปกรณ์ในวงจร ดังสมการที่ 1 และ 2

$$K_{PV} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R}, K_{PV} = \omega_n^2 C \quad (1)$$

$$K_{PC} = \frac{2\zeta\omega_n L}{V_{in}}, K_{PC} = \frac{\omega_n^2 L}{V_{in}} \quad (2)$$

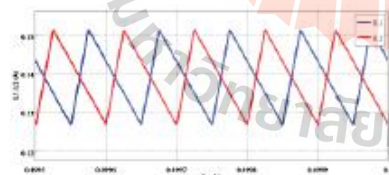
ตัวควบคุมแบบพีไอจะสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับสวิตช์หนึ่งตัวเท่านั้น ส่วนสัญญาณพัลส์สำหรับสวิตช์ที่เหลือจะใช้เทคนิคการเลื่อนเฟส 180 องศา [4] ดังแสดงในรูปที่ 8 สัญญาณคือสัญญาณพัลส์สำหรับ S1 และสีแดงคือสัญญาณพัลส์สำหรับ S2 โดยที่ D คือค่าวัฏจักรหนึ่งที



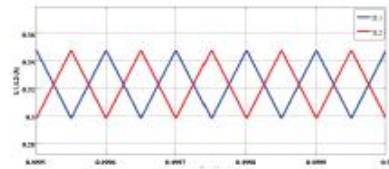
รูปที่ 8 การสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับ S1, S2 ด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟส 180 องศา

4. ผลการจำลองสถานการณ์

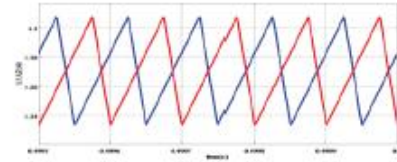
ในการจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์ตสี่เฟสจะใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK เมื่อแรงดันอินพุตเป็น 15V ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองเท่ากับ 15mH ตัวเก็บประจุเท่ากับ 125uF และโหลดตัวต้านทานเท่ากับ 100Ω และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอเอทีได้จากสมการที่ 1 และ 2 ทั้งนี้ทำการจำลองสถานการณ์โดยควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ระดับ 15V, 30V และ 60V ซึ่งสัมพันธ์กับ $D=0.25$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ กระแสกระแสที่โหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองแสดงดังรูปที่ 9-11 ตามลำดับ



รูปที่ 9 กระแสที่โหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัว เมื่อ $D = 0.25$

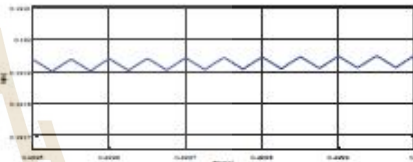


รูปที่ 10 กระแสที่โหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัว เมื่อ $D = 0.5$

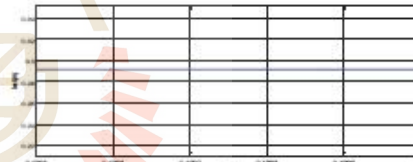


รูปที่ 11 กระแสที่โหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัว เมื่อ $D = 0.65$

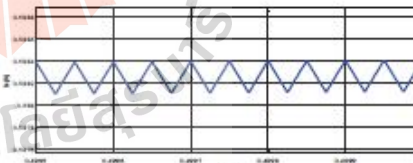
ผลการจำลองสถานการณ์ในส่วนของกระแสเอาต์พุตเมื่อ กับ $D=0.25$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ แสดงดังรูปที่ 12-14 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีที่ $D=0.5$ จะไม่ปรากฏการกระเพื่อมของกระแส เนื่องจากเกิดการหักล้างอย่างสมบูรณ์ของกระแสกระแสที่โหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง ในขณะที่กรณีอื่นๆ การหักล้างของกระแสที่โหลไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้จะเห็นว่าตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากกระแสเอาต์พุต



รูปที่ 12 กระแสเอาต์พุตเมื่อ $D = 0.25$



รูปที่ 13 กระแสเอาต์พุตเมื่อ $D = 0.5$

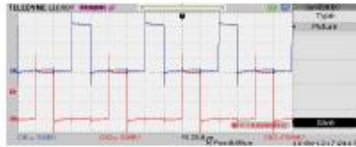


รูปที่ 14 กระแสเอาต์พุตเมื่อ $D = 0.65$

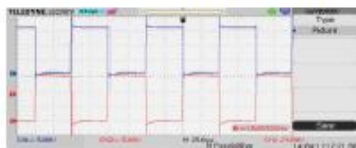
5. ผลการทดสอบ

ดำเนินการสร้างชุดทดสอบโดยใช้ตัวพารามิเตอร์ของวงจรและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอเอทีกับการจำลองสถานการณ์และใช้บอร์ด AVR ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ที่เหมาะสมให้กับสวิตช์ทั้งสองของวงจร รูปที่ 15-17 แสดงผลการ

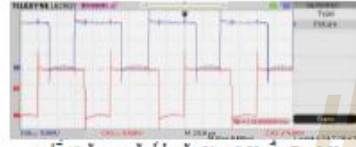
ทดสอบสัญญาณพัลส์เมื่อ $D=0.25$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ
จะเห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์ทั้งสองมีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา



รูปที่ 15 สัญญาณพัลส์สำหรับ S1 และ S2 เมื่อ $D = 0.25$

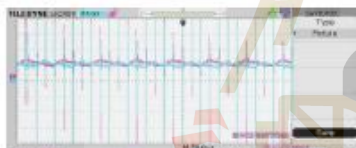


รูปที่ 16 สัญญาณพัลส์สำหรับ S1 และ S2 เมื่อ $D = 0.5$

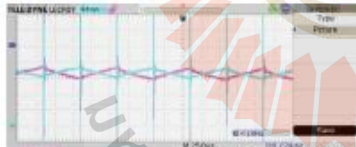


รูปที่ 17 สัญญาณพัลส์สำหรับ S1 และ S2 เมื่อ $D = 0.65$

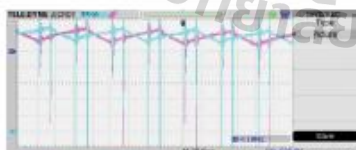
รูปที่ 18-20 แสดงกระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง
เมื่อ $D=0.25$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ



รูปที่ 18 ผลทดสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัว เมื่อ $D = 0.25$

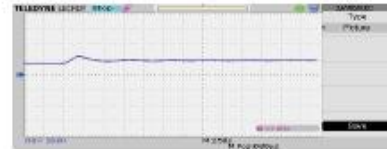


รูปที่ 19 ผลทดสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัว เมื่อ $D = 0.5$

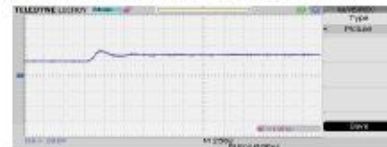


รูปที่ 20 ผลทดสอบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัว เมื่อ $D = 0.65$

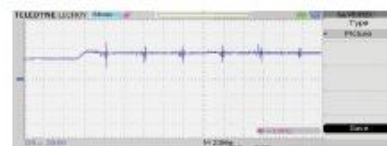
รูปที่ 21-23 แสดงผลการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ค่าต่างๆ
สอดคล้องกับกรณี $D=0.25$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ พบว่า
สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามแรงดันอ้างอิงได้



รูปที่ 21 ผลทดสอบแรงดันเอาต์พุต เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 20 V



รูปที่ 22 ผลทดสอบแรงดันเอาต์พุต เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 30 V



รูปที่ 23 ผลทดสอบแรงดันเอาต์พุต เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 42 V

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับ โครงสร้างและหลักการทํางานของ
วงจรอินเวอร์สรีฟูลต์ รวมถึงการควบคุมแรงดันเอาต์พุตโดยใช้ตัว
ควบคุมแบบที่โอร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสของสัญญาณพัลส์ 180
องศา เพื่อป้องกันกับสวิตช์ทั้งสองของวงจร การจำลองสถานการณ์และ
การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน สามารถ
ควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการได้ เมื่อ $D=0.5$ จะไม่ปรากฏการ
กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองอย่างสมบูรณ์ ส่วนกรณี
อื่นๆ พบว่าการหักล้างของกระแสและแรงดันกระแสที่ไหลยังไม่สมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.J.S Newlin, R. Ramalakshmi and S. Rajasekaran, "A performance comparison of interleaved boost converter and conventional boost converter for renewable energy application," ICGHPC 2013, pp. 1-6.
- [2] O.Hegazy, J. Mierlo and P. Lataire, "Analysis, control and comparison of DC/DC boost converter topologies for fuel cell hybrid electric vehicle applications," EPE 2011, pp. 1-10.
- [3] J.S.A Rahavi, T. Kanagapriya and R. Seyezhai, "Design and analysis of interleaved boost converter for renewable energy source," ICCEET 2012, pp.447-451.
- [4] W. Li, J. Xiao, Y. Zhao and X. He, "PWM plus phase angle shift (PPAS) control scheme for combined multiport DC/DC converters," IEEE Power Electron., vol. 27, no. 3, March 2012, pp. 1479-1489.



Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

Procedia Computer Science 00 (2016) 000–000

Procedia

Computer Science

www.elsevier.com/locate/procedia

The 2016 International Electrical Engineering Congress

Three-Phase Interleaved Boost Converter with Fault Tolerant Control Strategy for Renewable Energy System Applications

Siriwat Sakulchotruangdet^a, Sudarat Khwan-on^{a*}

^aSchool of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

Abstract

This paper presents a fault tolerant control strategy for a three-phase interleaved boost converter applied to renewable energy systems. The structural and operational characteristics of the three-phase interleaved boost converter are described. By interleaving the switching circuit patterns, the input current and the output voltage ripples can be significantly decreased without increasing the switching losses, resulting in the satisfactory converter efficiency. The power and current ratings of each switching components can be lowered. The fault tolerant control strategy with Proportional Integral (PI) controller plus a phase-shift technique for the three-phase interleaved boost converter under healthy and faulty operating conditions is detailed. The simulation results are shown to demonstrate the effectiveness of fault tolerant control capability for the three-phase interleaved boost converter under normal and open-circuited switch failure operations.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Selection and/or peer-review under responsibility of the organizers of the 2016 International Electrical Engineering Congress

Keywords: Interleaved boost converter; Fault tolerant control; Renewable energy; Open-circuit fault; PI controller

1. Introduction

In recent years, renewable energy such as photovoltaic system becomes an increasingly important source of energies. However, the voltage levels obtained from such energy source are typically low and unregulated. Hence a suitable converter is required in order to increase and regulate the output voltage level. A dc-dc boost converter is widely used for boosting the low input voltage generated from PV arrays up to a higher voltage level to supply load. An interleaved boost converter is considered as a good solution for high-power applications with low input voltage and high input current. Interleaved boost converters have been employed to increase the output power and to decrease the input current and output voltage ripples, leading to size reduction

* Corresponding author. Tel.: +66-44-224-400; fax: +66-44-224-601.

E-mail address: sudarat_kh@sut.ac.th

widely used for boosting the low input voltage generated from PV arrays up to a higher voltage level to supply load. An interleaved boost converter is considered as a good solution for high-power applications with low input voltage and high input current. Interleaved boost converters have been employed to increase the output power and to decrease the input current and output voltage ripples, leading to size reduction of input inductors and output filter capacitor. Compared to the classical boost converter, the interleaved boost converter provides several advantages such as lower input current ripple and output voltage ripple, higher efficiency, lower electromagnetic emission and improved reliability [1]. In addition, the reliability and continuity of operation are major concerns for renewable energy systems. It is known that the presence of faults in power converters can lead up to malfunction and consequently reduce the renewable energy system performances. In order to obtain the satisfactory system performance and to improve reliability of the converter, the fault diagnostic and fault-tolerant strategies need to be taken into account [2]. In [3] the redundancy components are added to the system to provide the improved reliability. Based on converter topology reconfiguration, the bidirectional switches are required for each phase of the multiple- interleaved boost converter in order to isolate the faulty switch and to connect to one redundant switch for the whole system [4].

In this paper, a three-phase interleaved boost converter with its fault-tolerant control strategy is investigated. The converter reliability has been improved without reconfiguring topological circuitry. By employing fault tolerant control technique, the converter can continue to operate with satisfactory performances under faulty operations. In addition, input current and output voltage ripples can be decreased, nearly the same amplitude as in healthy operating conditions.

2. Three-phase interleaved boost converter

The three-phase interleaved boost converter configuration is shown in Fig. 1(a), which consists of three identical boost inductors, L_1 , L_2 and L_3 , power switches, S_1 , S_2 , and S_3 , and power diodes D_1 , D_2 , and D_3 . Each converter phase is linked by an output filter capacitor, C , delivering power to the load, R . As can be seen in Fig. 1(a), the three-phase interleaved boost converter can be structured by three elementary boost converters interconnected in parallel. Due to interleaving operation, the input current and output voltage ripples can be significantly reduced and the power rating can be enlarged. The reduction in the size of inductors and output filter capacitor can be obtained.

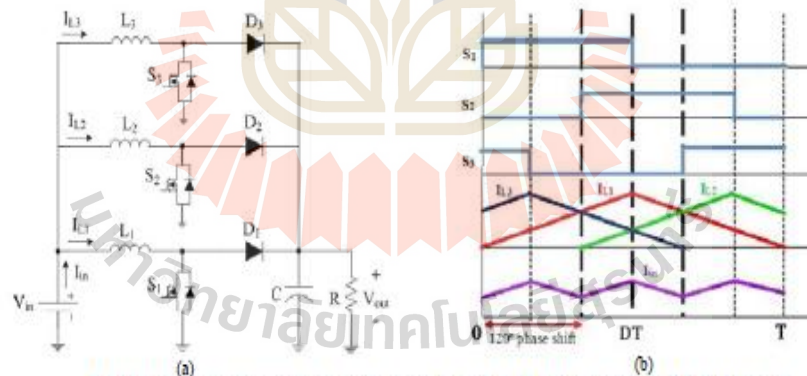


Fig. 1 (a) Three-phase interleaved boost converter configuration (b) Timing diagram with 120° phase shift

The input current I_{in} of the converter is the sum of the currents flowing through the inductors. Therefore, the input current can be shared among the parallel phases, leading to lower current rating of converter components. High reliability and efficiency in the system can be obtained. The power switches S_1 , S_2 , and S_3 operate in the interleaved manner, with the same duty cycle D and a phase-shift angle of 120° . As a result, the average values of the inductor currents I_{L1} , I_{L2} and I_{L3} are nearly the same with a phase difference of 120° . The input current and output voltage ripples can be minimized due to the ripple cancellation. The timing diagram of switching signals is shown in Fig. 1(b), when the power switches operate with 120° phase shift from each other.

3. Fault Tolerant Control Strategy

In order to regulate the output voltage and to decrease the ripples of the three-phase interleaved boost converter operating under normal and fault conditions, the control strategy based on the Proportional Integral (PI) controller plus phase-shift technique is employed, as shown in Fig. 2. To meet the performance specifications, the parameter gains for the PI voltage and current loops are designed as can be expressed in Eq. (1).

$$K_{PV} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R}, \quad K_{IV} = \omega_n^2 C, \quad K_{PC} = \frac{2\zeta\omega_n L}{V_m}, \quad K_{IC} = \frac{\omega_n^2 L}{V_m} \quad (1)$$

Using the appropriate close-loop PI controller design, the converter can operate satisfactorily and the current sharing of the converter can be adequately balanced. In order to reduce the oscillation of the ripple current, the phase-shift technique with $2\pi/n$, where n is the number of phase, is employed. Therefore, the switching signals generated from the PI controller with pulse width modulation (PWM) need to be phase-shifted by 120° for the power switches of the three-phase interleaved boost converter operating under healthy condition. As can be seen in Fig. 2, only one current loop is used to balance the inductor currents in each parallel phase, saving costs of current sensors compared with using three current loops. Another advantage lies in fault tolerant capability. If one phase of the converter fails to operate due to the open-circuited switch fault, the remaining phases can continue operation. Unfortunately, the ripples will significantly increase and the inductor currents will unbalance. To overcome these converter degraded performances, the fault tolerant control strategy is employed without reconfiguring the converter circuitry. The switching signals for the remaining healthy switches need to be rearranged with 180° degrees phase shift.

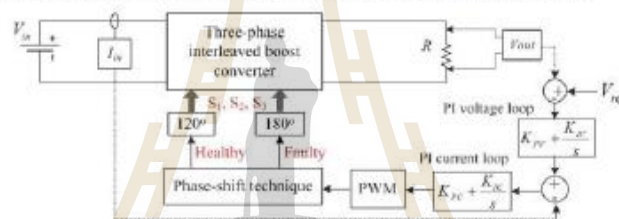


Fig. 2 Fault tolerant control strategy for a three-phase interleaved boost converter

4. Simulation Results

The simulations of three-phase interleaved boost converter under normal and fault operating conditions have been carried out by using Matlab-Simulink. The converter parameters are $V_{in} = 20V$, $L_1 = L_2 = L_3 = 15mH$, $C = 125\mu F$, $R = 100\Omega$. The switching frequency is chosen at $10kHz$. The desired output voltage $V_{out} = 80V$ are set, with a duty cycle around 0.75 . Fig. 3 shows the waveforms of output voltage, V_{out} , inductor currents, I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} , and input current, I_{in} . As can be seen under healthy operation, the output voltage is regulated well with a small ripple. The average values and current ripples of I_{L1} , I_{L2} and I_{L3} are nearly the same. By interleaving operation, the input current ripple has decreased due to ripple cancellation characteristics.

At the time $t = 1.7s$ the open-circuited fault occurs in S_3 . The converter continues to operate with only two active phases without modifying the control strategy. The inductor current I_{L3} associated with the faulty phase suddenly drops to zero whereas the remaining currents I_{L1} and I_{L2} flowing through the healthy phases are unbalance. The overloading current occurs in one phase, probably leading to the failure in corresponding switch located in this phase. The input current and output voltage ripples have increased significantly, resulting in large power losses.

After that at time approximately $2.7s$, the modified fault-tolerant control strategy based on 180° phase shift switching signals is introduced to the converter. As can be seen in Fig. 3, the output voltage is kept constant at the desired level. The inductor currents I_{L1} and I_{L2} are equally shared between the healthy phases. Both input current and output voltage ripples are significantly reduced, providing the better performances compared with the fault operation situation. Therefore, fault tolerant control strategy is useful to avoid serious input current and output voltage ripples and imbalance in remaining healthy inductor currents of three-phase interleaved boost converter.

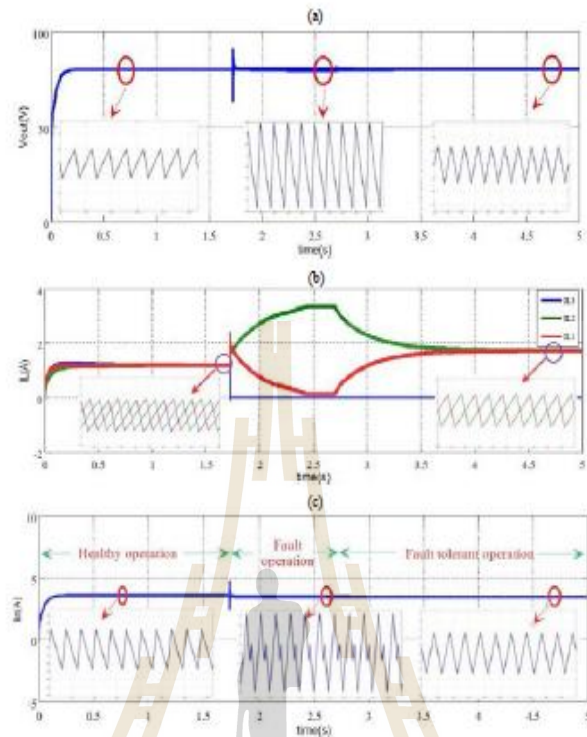


Fig. 3 Converter waveforms (a) output voltage (b) inductor currents (c) input current

5. Conclusion

This paper has presented the three-phase interleaved boost converter with fault tolerant control strategy for renewable energy system applications. The converter reliability has been improved based on reconfiguration of control strategy for healthy and faulty operations. The PI controller with only one current loop and a unique voltage loop is employed. The proper phase-shift technique is applied to the converter for ripple cancelation. The converter behaviors both normal and open-circuit fault operations have been investigated. The simulation results show the effectiveness of the fault tolerant control strategy. Reliability and satisfactory converter performances can be achieved. The input current and output voltage ripples significantly decreased, providing the similar converter performances compared with healthy operation. In addition, equal inductor current sharing can be obtained even using only one PI current loop control. In the future, a fast open-circuit fault detection technique and a correct switch-fault identification method will be studied. Experimental implementation will be set up to realistically verify the proposed fault-tolerant three-phase interleaved boost converter.

References

- [1] K.C. Prasanna and T.S. Ramu, Optimal design of an interleaved dc-dc switch mode converter, *PCIM Asia* (2015), 1-7.
- [2] E. Ribeiro, A.J.M. Cardoso and C. Boccaletti, Open-circuit fault diagnosis in interleaved dc-dc converter, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, Jun. 2014, 3091-3102.
- [3] W. Song and A.Q. Huang, Fault-tolerant design and control strategy for cascaded H-bridge multilevel converter-based statcom, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 57, no. 8, Aug. 2010, 2700-2708.
- [4] E. Jamshidpour, P. Poure and S. Saadate, Photovoltaic systems reliability improvement by real-time FPGA-based switch failure diagnosis and fault-tolerant dc-dc converter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, Nov. 2015, 7247-7255.

ประวัติผู้เขียน

นายศิริวรรณ สกุลโชติเรืองเดช เกิดเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2535 เริ่มต้นศึกษาระดับชั้นอนุบาลจากโรงเรียนมารดาคุณธิร์กษ์ ชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนมารดาคุณธิร์กษ์ ชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมารดาคุณธิร์กษ์ จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2557 ในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในรายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental of Electrical Engineering Laboratory) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Laboratory) ปฏิบัติการดิจิทัลลอจิก (Digital Logic Laboratory) ปฏิบัติการระบบควบคุม (Control System Laboratory) ปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontrollers Laboratory) ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยมีความสนใจในงานด้าน การพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในระหว่างทำวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ แสดงในภาคผนวก ง.