

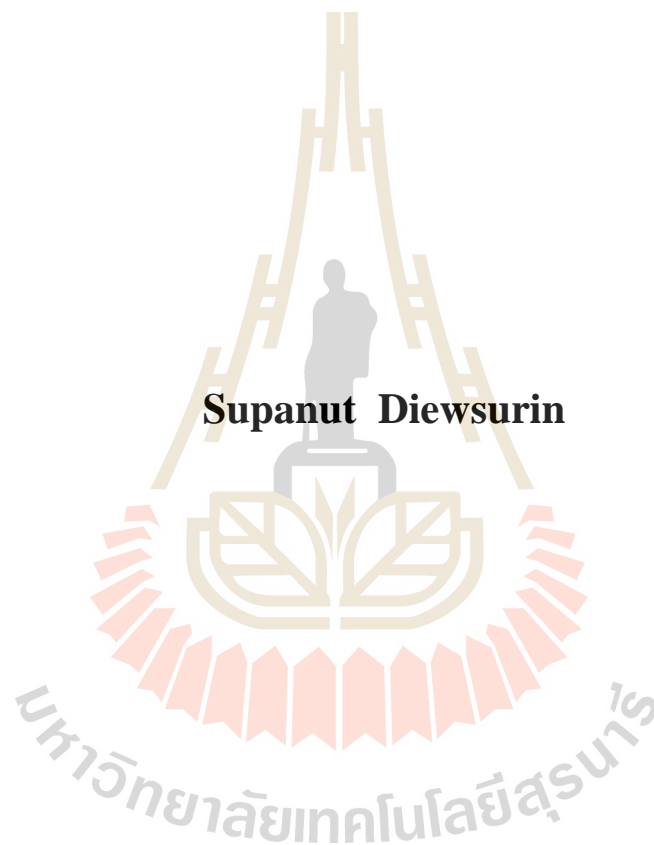
วิธีการตรวจวัดความผิดปร้องแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับ
วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น



นายสุภณัฐ เดียวสุรินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**AN OPEN-CIRCUIT FAULT DETECTION METHOD
FOR A THREE-STAGE CASCADED BOOST
CONVERTER**

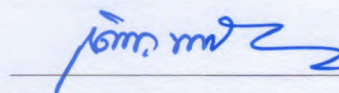


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

วิธีการตรวจจับความผิดพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจร
สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

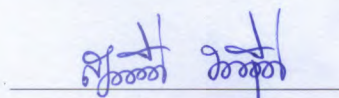
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



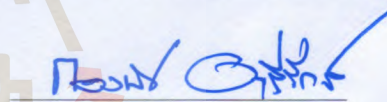
(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

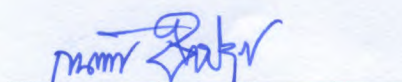


(รศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ชกร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภณัฐ เดี่ยวสุรินทร์ : วิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรมอเตอร์
คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น (AN OPEN-CIRCUIT FAULT DETECTION
METHOD FOR A THREE-STAGE CASCADED BOOST CONVERTER)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน, 236 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับ
วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ซึ่งวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น
สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงกว่าระดับแรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนที่
มีค่าค่อนข้างต่ำ กล่าวคือจาก 20V เพิ่มขึ้นเป็น 400V โดยที่ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ไม่สูงนัก
รวมถึงได้พัฒนาวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดย
อาศัยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งประกอบด้วย ควบคุมแรงดันหนึ่งรูป และควบคุมกระแสสองรูป
เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ตามต้องการ โดยมีการใช้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสเข้าช่วย
เพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างน่าพึงพอใจภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ รวมทั้งได้นำเสนอวิธีการ
ตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น
โดยอาศัยการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรดังกล่าวภายใต้สภาวะปกติและมีความผิดปกติของ
แบบสวิตช์เปิดวงจร พบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง
และรวดเร็ว นอกจากนี้การใช้สวิตช์สำรองช่วยให้วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นมี
ความคงทนต่อความผิดปกติสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีความผิดปกติของแบบสวิตช์
เปิดวงจรเกิดขึ้น ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วงจรมอเตอร์คอนเวอร์
เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น มีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 20 เท่า สามารถเพิ่มระดับแรงดันอินพุตที่
ค่อนข้างต่ำประมาณ 20V ให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงถึง 400V โดยตัวควบคุมพีไอร่วมกับ
เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น
สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป
วิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่นำเสนอสามารถตรวจจับความผิดปกติที่
เกิดขึ้นในวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยที่สวิตช์
สำรองจะทำงานแทนสวิตช์ที่เกิดความผิดปกติทันทีที่ตรวจจับได้ ส่งผลให้วงจรมอเตอร์คอนเวอร์
เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2562

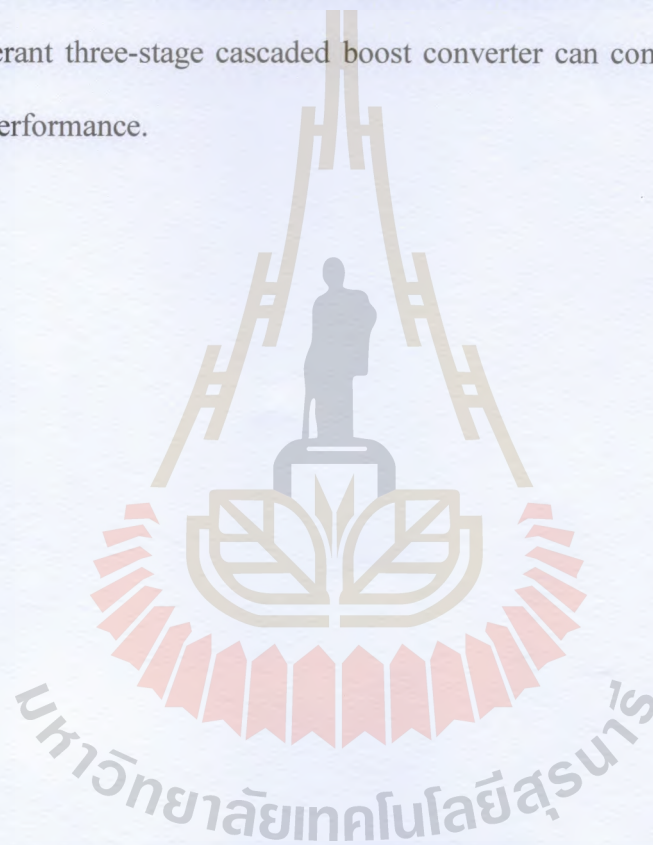
ลายมือชื่อนักศึกษา ศุภณัฐ เดี่ยวสุรินทร์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สุภารัตน์ ขวัญอ่อน

SUPANUT DIEWSURIN : AN OPEN-CIRCUIT FAULT DETECTION
METHOD FOR A THREE-STAGE CASCADED BOOST CONVERTER
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUDARAT KHWAN-ON, Ph.D.,
236 PP.

CASCADED BOOST CONVERTER/FAULT DETECTION/OPEN-CIRCUIT
FAULT/PI CONTROLLER

This thesis proposes an open-circuit fault detection method for a three-stage cascaded boost converter. The three-stage cascaded boost converter can boost the low input voltage generated from renewable energy sources about 20V up to the high output voltage level of 400V, without extreme duty cycle for the converter switches. The control strategy based on PI controller with one voltage-control loop and two current-control loops is developed for the three-stage cascaded boost converter in order to obtain the desired constant output voltage. The current weighting technique is employed, providing the satisfactory performance under different operating conditions. In addition, the fault detection method is proposed to detect the open-circuit switch fault for the three-stage cascaded boost converter. Based on the behavior investigation of the converter operating under normal and fault conditions, the fault detection technique is developed for the open-circuit switch fault. The faulty switch can be detected correctly and rapidly. By using the redundant switches, the fault-tolerant three-stage cascaded boost converter is achieved. As a result, the satisfactory performance of the converter can be obtained under the appearance of open-circuit switch fault. Simulation and experimental results show that the three-stage cascaded boost converter provides high step-up voltage conversion ratio of 20. The low input voltage about 20V is boosted to

the high output voltage level of 400V. The developed PI-controller with the current weighting technique for the three-stage cascaded boost converter can satisfactorily increase the output voltage at the desired constant levels under different operating conditions. The proposed open-circuit fault detection method can accurately and quickly detect the faulty switch of the three-stage cascaded boost converter. The redundant switch is activated to replace the failed switch as soon as the fault detected. The fault-tolerant three-stage cascaded boost converter can continue to operate with satisfactory performance.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature

ศุภณัฐ ใจดี

Advisor's Signature

วิวัฒน์ ใจดี

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

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

อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้ คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิชาการ และให้กำลังใจ ตลอดมา

ขอขอบคุณวิศวกรและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

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

ศุภณัฐ เตียวสุรินทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 บริบทศันำวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดพ่วง.....	10
2.4 สรุป.....	13
3 วงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น.....	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 โครงสร้างวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น.....	14
3.3 หลักการทำงานของวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น	19
3.4.1	พิจารณาช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส	20
3.4.2	พิจารณาช่วงที่สวิตช์ S หยุคนำกระแส	22
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์	28
3.6	สรุป	30
4	การควบคุมวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น	32
4.1	บทนำ	32
4.2	การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น	32
4.2.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปควบคุมแรงดัน (PI Voltage Loop)	33
4.2.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปควบคุมกระแส (PI Current Loop)	36
4.2.3	เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique)	41
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์	45
4.4	สรุป	50
5	การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น	52
5.1	บทนำ	52
5.2	พฤติกรรมของวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นในสภาวะปกติและเมื่อเกิดความผิดปกติ	52
5.3	การตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์	63
5.4	ผลการจำลองสถานการณ์	67
5.4.1	ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร	68
5.4.2	ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5	สรุป	102
6	การสร้างชุดทดสอบ.....	103
6.1	บทนำ.....	103
6.2	โครงสร้างชุดทดสอบ	103
6.3	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	105
6.4	วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น.....	107
6.5	วงจรตรวจจับสัญญาณ	110
6.5.1	วงจรตรวจจับกระแส.....	110
6.5.2	วงจรตรวจจับแรงดัน.....	113
6.6	วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญลักษณ์	116
6.7	การควบคุมแรงดันเอาต์พุตและการตรวจจับความผิดพลาด	117
6.8	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกัน สามขั้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอและวิธีการตรวจจับ ความผิดพลาด.....	123
6.9	สรุป	128
7	ผลการทดสอบ	129
7.1	บทนำ.....	129
7.2	ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม	129
7.3	ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม	137
7.4	ผลการทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิทช์เปิดวงจร.....	146
7.4.1	ผลการทดสอบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง โดยไม่มี การเกิดความผิดพลาดขึ้น	147
7.4.2	ผลการทดสอบชุดทดสอบเมื่อเกิดความผิดพลาด แบบสวิทช์ เปิดวงจรที่สวิทช์ S_1	151
7.4.3	ผลการทดสอบชุดทดสอบเมื่อเกิดความผิดพลาด แบบสวิทช์ เปิดวงจรที่สวิทช์ S_2	156

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.4.4 ผลการทดสอบชุดทดสอบเมื่อเกิดความผิดปกติของ แบบสวิตช์ เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3	162
7.5 สรุป	169
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	170
8.1 สรุป	170
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	172
รายการอ้างอิง	173
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. วงจรแปลงผันกำลัง ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่ม แรงดันสูง	176
ภาคผนวก ข. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335	186
ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษาซีสำหรับบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335	190
ภาคผนวก ง. การจำลองสถานการณ์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกัน สามขั้นแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่มีตัวควบคุมและมีวิธีตรวจจับความ ผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร	201
ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ ในระหว่างศึกษา	218
ประวัติผู้เขียน	236

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง7
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ 11
3.1	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการคำนวณในการออกแบบวงจร27
3.2	ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น27
4.1	ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมและวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น40
4.2	ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส43
4.3	ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น44
6.1	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับสร้างชุดทดสอบ 110
6.2	ตารางการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับกระแส 112
6.3	ตารางการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับแรงดัน 115
7.1	การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ 137
ก.1	อัตราขยายแรงดันของวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม 181
ก.2	อัตราขยายแรงดันของวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น 184
ก.3	การเปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันของวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมแบบเรียงต่อกันสองขั้น และแบบเรียงต่อกันสามขั้น 185

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างของระบบในงานวิจัยนี้..... 2
2.1	วงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองชั้น 10
3.1	วงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น 15
3.2	สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 นำกระแส 15
3.3	สวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 กับ S_3 หยุดนำกระแส..... 16
3.4	สวิตช์ S_1 กับ S_2 นำกระแส และ S_3 หยุดนำกระแส..... 16
3.5	สวิตช์ S_1 กับ S_3 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส..... 17
3.6	สวิตช์ S_2 นำกระแส และ S_1 กับ S_3 หยุดนำกระแส..... 17
3.7	สวิตช์ S_2 กับ S_3 นำกระแส และ S_1 หยุดนำกระแส..... 18
3.8	สวิตช์ S_3 นำกระแส และ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส..... 18
3.9	สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 หยุดนำกระแส..... 19
3.10	วงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม 19
3.11	โครงสร้างวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส 20
3.12	ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส..... 20
3.13	ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส..... 21
3.14	โครงสร้างวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส 22
3.15	ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส 23
3.16	ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส 24
3.17	ผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันและกระแส 29
3.18	ผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของแรงดันและกระแส..... 30
4.1	โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น 33
4.2	วงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นและวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์ แบบดั้งเดิม 34
4.3	แผนภาพการควบคุมลูปแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 วงจรบวสต์แบบเรียงต่อกันสามชั้นเทียบเคียงแบบดั้งเดิม สำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป.....	37
4.5 แผนภาพการควบคุมลูปกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ	38
4.6 ลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ชั้น	40
4.7 ลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกัน n ชั้น	41
4.8 เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส	41
4.9 โครงสร้างวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นที่มีตัวควบคุม ที่พัฒนาขึ้น	45
4.10 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref})	46
4.11 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{IN})	47
4.12 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R)	48
4.13 โครงสร้างวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ชั้นที่มีตัวควบคุม.....	49
4.14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีวงจรบวสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ชั้น	50
5.1 โครงสร้างวงจรสำหรับศึกษาพฤติกรรมความผิดพร่องแบบสวิทช์เปิดวงจร	53
5.2 พฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดพร่องที่สวิทช์ S_1	55
5.3 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดพร่องที่สวิทช์ S_1	56
5.4 พฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดพร่องที่สวิทช์ S_2	58
5.5 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดพร่องที่สวิทช์ S_2	59
5.6 พฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดพร่องที่สวิทช์ S_3	61
5.7 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดพร่องที่สวิทช์ S_3	62
5.8 โครงสร้างวงจรที่มีตัวควบคุมและวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิทช์ เปิดวงจร	64
5.9 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง.....	65
5.10 วิธีการตรวจจับความผิดพร่องที่สวิทช์ S_1	66
5.11 วิธีการตรวจจับความผิดพร่องที่สวิทช์ S_2	67
5.12 วิธีการตรวจจับความผิดพร่องที่สวิทช์ S_3	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13	โครงสร้างสำหรับการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพร้อม 68
5.14	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_1 70
5.15	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_1 71
5.16	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_1 73
5.17	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_1 74
5.18	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_1 75
5.19	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_1 76
5.20	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_2 78
5.21	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_2 79
5.22	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_2 81
5.23	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_2 82
5.24	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_2 84
5.25	ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดพร้อม ที่สวิตช์ S_2 85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติ ที่สวิตช์ S_3	87
5.27 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติ ที่สวิตช์ S_3	88
5.28 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติ ที่สวิตช์ S_3	89
5.29 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติ ที่สวิตช์ S_3	90
5.30 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดปกติ ที่สวิตช์ S_3	91
5.31 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดปกติ ที่สวิตช์ S_3	92
5.32 โครงสร้างสำหรับกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความ ผิดปกติ	93
5.33 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ภายใต้สภาวะ คงทนต่อความผิดปกติ.....	94
5.34 ภาพขยายรูปที่ 5.33.....	95
5.35 โครงสร้างสำหรับกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความ ผิดปกติ	96
5.36 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ภายใต้สภาวะ คงทนต่อความผิดปกติ.....	97
5.37 ภาพขยายรูปที่ 5.36.....	98
5.38 โครงสร้างสำหรับกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความ ผิดปกติ	99
5.39 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ภายใต้สภาวะ คงทนต่อความผิดปกติ.....	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.40 ภาพขยายรูปที่ 5.39.....	101
6.1 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น.....	104
6.2 ชุดทดสอบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น	104
6.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	105
6.4 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	105
6.5 มอดูลวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35	106
6.6 ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	106
6.7 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความ ผิดปร้อง	107
6.8 มอสเฟตกำลังสำหรับชุดทดสอบ	107
6.9 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับชุดทดสอบ.....	108
6.10 ตัวเก็บประจุสำหรับชุดทดสอบ.....	108
6.11 ไดโอดกำลังสำหรับชุดทดสอบ.....	109
6.12 โหลดตัวต้านทานสำหรับชุดทดสอบ.....	109
6.13 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....	111
6.14 วงจรไฟฟ้าสำหรับหาความสัมพันธ์ของตัวตรวจจับกระแส.....	111
6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ	113
6.16 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน	114
6.17 วงจรไฟฟ้าสำหรับหาความสัมพันธ์ของตัวตรวจจับแรงดัน	115
6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ	116
6.19 ไอซีออปโตเบอร์ PC923L.....	117
6.20 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญญาณ	117
6.21 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335	118
6.22 ไคอะแกรมการเขียนโปรแกรม	119
6.23 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP	124
6.24 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป	124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.25 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์และการทำแบบ ฮาร์ดแวร์ในรูป.....	125
6.26 ภาพขยายผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์ และการทำแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	126
6.27 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์และการทำแบบ ฮาร์ดแวร์ในรูป.....	127
7.1 ชุดทดสอบวงจรกรณีไม่มีตัวควบคุม.....	130
7.2 ชุดทดสอบวงจรกรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5	130
7.3 ผลการทดสอบวงจรกรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5	132
7.4 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5.....	133
7.5 ชุดทดสอบวงจรกรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.6	134
7.6 ผลการทดสอบวงจรกรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.6	135
7.7 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.6.....	136
7.8 ชุดทดสอบวงจรกรณีมีตัวควบคุม	138
7.9 ชุดทดสอบวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}	138
7.10 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}	139
7.11 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}	140
7.12 ชุดทดสอบวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต V_{IN}	141
7.13 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต V_{IN}	142
7.14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต V_{IN}	143
7.15 ชุดทดสอบวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน R	144
7.16 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน R	145
7.17 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน R	146
7.18 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร	147
7.19 ชุดทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง ร่วมกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาด	148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.20 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงพร้อมวิธีการตรวจจับ	149
7.21 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบ	149
7.22 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบ โดย V_{ref} เท่ากับ 200, 400 และ 300V ตามลำดับ	150
7.23 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1	151
7.24 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	152
7.25 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	153
7.26 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	153
7.27 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	154
7.28 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	155
7.29 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	155
7.30 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2	156
7.31 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	157
7.32 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	158
7.33 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	158
7.34 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	160
7.35 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	161
7.36 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	162
7.37 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3	162
7.38 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	164
7.39 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	165
7.40 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V	166
7.41 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	167
7.42 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	168
7.43 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V	169
ก.1 โครงสร้างวงจรมุสต์คอนเวอเตอร์แบบดั้งเดิม	177
ก.2 วงจรมุสต์คอนเวอเตอร์แบบดั้งเดิมในโหมดสวิตช์กำลังนำกระแส	177

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3	วงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมในโหมดสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส 178
ก.4	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ..... 179
ก.5	แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ..... 180
ก.6	โครงสร้างวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองชั้น 184
ก.7	วงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น 185
ข.1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 187
ง.1	แผนการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMDSDOCK28335 202
ง.2	ไอคอนการเข้าใช้งานซอฟต์แวร์ MATLAB และ โปรแกรม CCStudio v3.3..... 203
ง.3	การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด TMDSDOCK28335..... 203
ง.4	หน้าต่างโปรแกรม CCStudio v3.3..... 204
ง.5	การกำหนดค่าบล็อก RTDX Write..... 205
ง.6	การกำหนดค่าบล็อก RTDX Read..... 205
ง.7	โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ กับวิธีการตรวจจับความผิดพลาด..... 207
ง.8	แผนภาพระบบ RTDX การรับส่งข้อมูลบนโปรแกรม Simulink..... 208
ง.9	หน้าต่างโปรแกรม CCStudio v3.3..... 209
ง.10	การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335..... 209

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

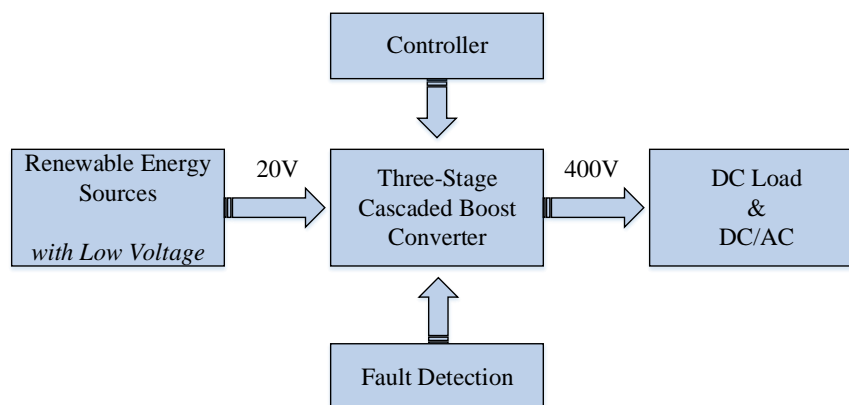
ในปัจจุบันมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากปัญหามลพิษที่เป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากพลังงานฟอสซิลต่าง ๆ ทำให้ในปัจจุบันพลังงานทดแทนเป็นระบบพลังงานที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น จึงมีการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทน วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมได้ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น เมื่อแรงดันอินพุตที่ได้จากพลังงานทดแทนมีค่าค่อนข้างต่ำและมีระดับแรงดันที่ไม่คงที่ รวมถึงผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น สภาพอากาศ ช่วงเวลา ฤดูกาล เป็นต้น วงจรดังกล่าวมีโครงสร้างวงจรที่ไม่ซับซ้อน ควบคุมการทำงานได้ง่าย อย่างไรก็ตามวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มระดับแรงดัน กล่าวคือเมื่อวงจรต้องทำงานด้วยอัตราขยายแรงดันที่สูงมากเพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ สวิตช์กำลังในวงจรจำเป็นต้องทำงานด้วยค่าวัฏจักรการทำงาน (duty cycle) ที่สูงมาก ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มสูงขึ้นด้วย รวมทั้งอาจไม่เหมาะสมสำหรับระบบที่ต้องการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงมาก ดังนั้นการนำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมมาเรียงต่อกัน จะช่วยให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นตามต้องการได้ โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไปได้ ทั้งนี้การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้คงที่ตามต้องการจะอาศัยตัวควบคุมพีไอ

เนื่องจากวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันหลายชั้น ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายตัว ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดหรือเสียหายที่อุปกรณ์ดังกล่าวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเกิดความเสียหายที่สวิตช์กำลังจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรอย่างมาก เนื่องจากสวิตช์กำลังทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจร อาจทำให้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการต่อไปได้ และหากวงจรดังกล่าวต้องทำงานภายใต้สภาวะความผิดพลาดของสวิตช์อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ๆ อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายที่ส่วนอื่น ๆ ของวงจรได้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับสวิตช์กำลังอาจพิจารณาได้สองลักษณะ ได้แก่ ความผิดพลาดแบบสวิตช์ปิดวงจร (short-circuit switch fault) และความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร (open-circuit switch fault) ซึ่งเมื่อมีความผิดพลาดแบบสวิตช์ปิดวงจรเกิดขึ้น จะมีกระแสไหลในวงจรสูงมาก ระบบป้องกันของวงจรจะทำหน้าที่

หยุดการทำงานของวงจรเมื่อมีค่ากระแสสูงเกินที่กำหนด ในขณะที่เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร กระบวนการควบคุมยังคงทำให้วงจรยังสามารถทำงานต่อไปภายใต้สมรรถนะที่ลดลง ดังนั้น การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร (open-circuit switch fault detection) อย่างถูกต้องและรวดเร็วจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้วงจรดังกล่าวได้รับผลกระทบจากความผิดปกตินั้นน้อยที่สุด รวมถึงยังคงสามารถทำงานต่อไปเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับ วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยแบ่งการดำเนินงานออกเป็นสามส่วนสำคัญ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันสูงถึง ประมาณ 20 เท่า กล่าวคือต้องการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ 400V เมื่อแรงดันอินพุตมีค่า ก่อนข้างต่ำประมาณ 20V โดยที่ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ไม่สูงมากนัก ส่วนที่สอง คือตัวควบคุม สำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยจะอาศัยตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในการเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ ทั้งนี้ตัวควบคุมพีไอจะประกอบด้วย ลูปควบคุมแรงดันหนึ่งลูป และลูปควบคุมกระแสสองลูป ทั้งนี้มีการใช้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique) เพื่อให้วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ส่วนที่สาม คือวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อสามารถ ตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับสวิตช์กำลังได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงระบุสวิตช์ที่เกิดความผิดปกติ แบบเปิดวงจรได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้สวิตช์สำรองทำงานแทนได้ทันที ส่งผลให้วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นทำงานในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ สามารถรักษาสมรรถนะการ ทำงานของวงจรได้ตามต้องการต่อไป ซึ่งโครงสร้างทั้งหมดจะแสดงดังรูปที่ 1.1

ในการดำเนินงานจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB&SIMULINK และผลการทดสอบเข้าช่วยแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้นใน การเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นให้ได้ตามต้องการ รวมถึงแสดงประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสำหรับ วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังได้แสดง ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้สภาวะความคงทน ต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยอาศัยการทำงานของสวิตช์สำรองที่จะทำงานแทนสวิตช์ที่ เกิดความผิดปกติทันทีที่ได้รับการตรวจจับความผิดปกติดังกล่าว



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้สูงขึ้นประมาณ 20 เท่า เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำ

1.2.2 เพื่อพัฒนาตัวควบคุมวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ

1.2.3 เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

1.2.4 เพื่อให้วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นมีความทนต่อความผิดปกติ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่มีความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตที่ใช้สำหรับวงจรที่พัฒนาขึ้น มาจากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แทนระบบแสงอาทิตย์ที่มีแรงดันต่ำ

1.3.2 การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิง

1.3.3 การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบตัวควบคุมและวิธีตรวจจับความผิดปกติ อาศัยโปรแกรม MATLAB&SIMULINK

1.3.4 การตรวจจับความผิดปกติ พิจารณากรณีสวิตช์เปิดวงจร โดยที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้นของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

1.3.5 ในการทดสอบการทำงานของวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นจากวงจรเรียงกระแส เสมือนเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เฉพาะโหมดการทำงานต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode : CCM) เท่านั้น

1.4.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการพัฒนาตัวควบคุมให้สามารถเพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ โดยมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า

1.4.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยอาศัยการสังเกตพฤติกรรมการทำงานวงจรภายใต้สภาวะปกติและในสภาวะที่มีความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดดังกล่าว

1.4.4 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นให้มีความทนต่อความผิดพลาด โดยอาศัยการทำงานของสวิตช์

1.4.5 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะประเมินประสิทธิผลของการดำเนินงานต่าง ๆ โดยอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ และผลการทดสอบของชุดทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการทำงานจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

1.5.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

1.5.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีความทนต่อความผิดพลาด

1.5.5 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างชุดทดสอบจริงและแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ที่ใช้ร่วมกับบอร์ดดีเอสพี

1.5.6 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ระดับชาติหรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้มีการนำเสนอเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการทำวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมถึงการแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่มีในอดีต ประกอบด้วย ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง ในโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ จากนั้นได้ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติรูปแบบต่าง ๆ ที่ปรากฏในงานวิจัยในอดีต

บทที่ 3 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยอธิบายโครงสร้างของวงจรดังกล่าว รวมถึงการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจร รวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ปรากฏในวงจร เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสและการกระเพื่อมของแรงดัน

บทที่ 4 การควบคุมวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น บทนี้กล่าวถึงการควบคุมวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งได้อธิบายการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรดังกล่าว ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส จากนั้นดำเนินการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรดังกล่าว เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมในการควบคุมการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5 การตรวจจับความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น บทนี้กล่าวถึงการตรวจจับความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม โดยศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรดังกล่าวทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อนำพฤติกรรมที่ได้จากการสังเกตไปใช้เป็นแนวทางพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรดังกล่าว รวมทั้งได้กล่าวถึงวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ โดยอาศัยการทำงานของสวิตช์สำรอง เพื่อช่วยให้วงจรดังกล่าวยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6 การสร้างชุดทดสอบ บทนี้กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนสำคัญได้แก่ แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตกระแสตรงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันต่ำให้กับวงจร ต่อมาคือวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น และวงจรตรวจจับสัญญาณ ซึ่งใช้ในการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และ 3

รวมถึงตรวจจับแรงดันเอาต์พุต เพื่อใช้ในกระบวนการควบคุมการทำงานของวงจร สุดท้ายเป็นการควบคุมการทำงานและการตรวจจับความผิดพลาดของวงจร โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ของบริษัท TEXAS INSTRUMENT

บทที่ 7 ผลการทดสอบ บทนี้นำเสนอผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ขณะไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุม รวมถึงกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์แต่ละตัว โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สถานการณ์การทำงานเดียวกันในกรณีต่าง ๆ

บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่

ภาคผนวก ก. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง

ภาคผนวก ข. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ของบริษัท TEXAS INSTRUMENT

ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษาซีสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ของบริษัท TEXAS INSTRUMENT

ภาคผนวก ง. การจำลองสถานการณ์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่มีตัวควบคุมและมีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร

ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงและวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งในปริทัศน์วรรณกรรมได้นำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูง และวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในวงจร ซึ่งมีการคิดค้นและวิจัยอย่างต่อเนื่องจากอดีตมาจนถึงปัจจุบัน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง

จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Wuhua Li, Xiaodong Lv, Yan Deng, Jun Liu, Xiangning He	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไม่แยกกราวด์ สำหรับใช้ในระบบพลังงานทดแทน เพื่อแสดงวิธีแก้ปัญหาต่าง ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารุ่นใหม่
2013	Kuo-Ching Tseng and Chi-Chih Huang	บทความนี้เสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟกับเซลล์คูณแรงดัน สำหรับระบบพลังงานทดแทน เพื่อให้อัตราขยายแรงดันสูง และเพิ่มประสิทธิภาพวงจรให้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง (ต่อ)

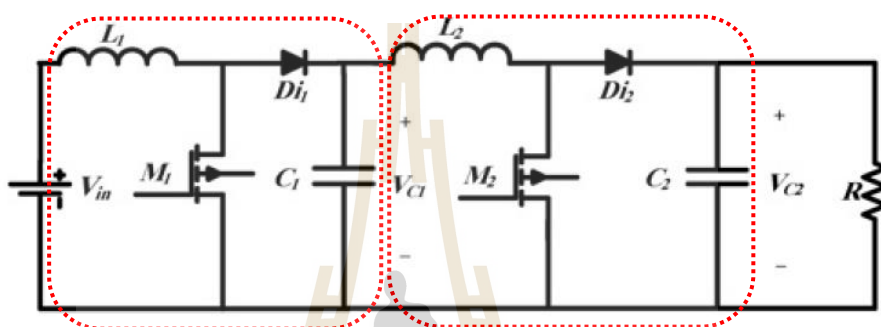
ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Roger Gules, Walter Meneghette dos Santos, Flavio Aparecido dos Reis, Eduardo Felix Ribeiro Romaneli, and Alceu Andr'e Badin	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่นำวงจรเซปิกมาประยุกต์ใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทน โดยจะแบ่งเป็นแบบไม่มีการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และมีการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ซึ่งแบบไม่มีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสามารถขยายแรงดันเป็น 10 เท่า ส่วนแบบมีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสามารถขยายแรงดันเป็น 20 เท่า
2015	M. Mohammadi, J. S. Moghani, J. Milimonfared and N. Safari	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบซอพต์สวิตช์โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกัน เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจรดังกล่าว
2015	Mohammad Lotfi Nejad , Behzad Poorali, Ehsan Adib, Ali Akbar Motie Birjandi	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างการต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ เพื่อลดกำลังงานสูญเสียลง โดยอาศัยวงจรบูสต์แบบเรียงต่อกันสองชั้นเป็นต้นแบบ
2015	Andre Elias Lucena da Costa, Romero Leandro Andersen Cabrera, and R. Ibarra	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้วงจรบูสต์กับวงจรบูสต์-ฟลายแบ็ครวมกัน เพื่อลดค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ และกำลังงานสูญเสียลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น
2015	Annop Nakpin, Sudarat Khwan-on	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาจากการนำเอาวงจรทบระดับแรงดันแบบเซลล์คูณมารวมกับวงจรทบระดับแรงดันแบบตั้งเดิน ทำให้วงจรสามารถมีอัตราขยายได้สูงประมาณ 20 เท่า
2016	Hongchen Liu, Fei Li, and Jian Ai	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์สองตัว กับตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันและเซลล์คูณแรงดัน สำหรับใช้ในระบบพลังงานทดแทน โดยที่ใช้สวิตช์สองตัวเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแส ส่วนตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันและเซลล์คูณแรงดันจะเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	Mahajan Sagar Bhasker, Rishi M. Kulkarni, Sanjeevikumar Padmanaban, Pierluigi Siano, and Frede Blaabjerg	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่นำเอาวงจรอินเทอร์ลิฟกับวงจรบูสต์แบบหลายชั้นมารวมกัน ซึ่งคือการเพิ่มตัวเก็บประจุและไดโอดเข้าในวงจรเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแส
2016	Masoume Amirbande, Keyvan Yari, Mojtaba Forouzesh, Alfred Baghrmian	บทความนี้เสนอวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ตัวเดียว โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันและเทคนิคสวิตช์ตัวเก็บประจุ สำหรับระบบพลังงานทดแทน เพื่อให้มีอัตราขยายที่สูงขึ้น และการกระเพื่อมของแรงดันลดลง
2016	Bin Wu , Shouxian Li, Yao Liu, and Keyue Ma Smedley Cabrera, and R. Ibarra	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไฮบริดบูสต์ ที่ใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทน เพื่อให้วงจรสามารถเพิ่มระดับแรงดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากตารางที่ 2.1 มีโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูงอยู่มากมาย โดยแต่ละ โครงสร้างจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบแยกกราวด์ (isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) ถ้าวางจรเป็นแบบแยกกราวด์นั้นจะต้องใช้หม้อแปลงกัลวานิก (galvanic transformer) ซึ่งหม้อแปลงจะมีอัตราการผันขดลวดสูง (large turn ratio) ซึ่งทำให้เกิดผลเสียต่อวงจร คือเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดของหม้อแปลง และเกิดการพุ่งเกิน (spike) เสี่ยงให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ภายในวงจร ทำให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบลดลง แต่ในแบบไม่แยกกราวด์นั้นจะอาศัยการทำงานของสวิตช์กำลังภายในวงจรเพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้น โดยสวิตช์กำลังจะทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) สูงกว่าแบบแยกกราวด์ จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้หม้อแปลง รวมถึงส่งผลให้วงจรมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่า ดังนั้นในปริทัศน์วรรณกรรมจะมุ่งเน้นเพียงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไม่แยกกราวด์เท่านั้น ทั้งนี้ได้นำโครงสร้างวงจรที่จะมาพัฒนาต่อในงานวิจัยมาแสดงดังต่อไปนี้

วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น (Two-Stage Cascaded Boost Converter) [Mohammad Lotfi Nejad , Behzad Poorali, Ehsan Adib, Ali Akbar Motie Birjandi, 2015] เป็นวงจรที่มีการต่อยอดพัฒนามาจากวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมที่มีเพียงขั้นเดียว โดยเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ, ไดโอดกำลัง, สวิตช์ และตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมอย่างละตัว เพื่อให้สามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้สูงขึ้น โดยที่ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ไม่สูงจนเกินไป ซึ่งมีโครงสร้างวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้นแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น

จากข้อมูลงานวิจัยในอดีตข้างต้น วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น ได้ถูกนำมาพัฒนาให้เป็นวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เนื่องจากวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า โดยที่ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ไม่สูงจนเกินไป และเหมาะสมสำหรับนำมาศึกษาพฤติกรรมการทำงาน เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในวงจรที่จะถูกกล่าวถึงในข้อห้ถัดไป

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	T. Park, and T. Kim	บทความนี้นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ต่ออยู่กับ วงจร AC/DC และ วงจร DC/AC โดยอาศัยการหาความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับความชันค่าต่อไป เพื่อตรวจจับความผิดปกติ
2012	M. Shahbazi, Ehsan Jamshidpour, Philippe Poure, S. Saadate and Mohammad R. Zolghadri	บทความนี้นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดและปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยวิธี FPGA หาความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในวงจร
2013	Eunice Ribeiro, Antonio J. Marques Cardoso, and Chiara Boccaletti	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่าย โดยจะอาศัยการพิจารณาอนุกรมที่แผงโซลาร์เซลล์และการฉายรังสีดวงอาทิตย์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวและหาผลต่างของแรงดันทั้งสอง เพื่อตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยนำไปเปรียบเทียบกับค่าโบลทซ์มันน์
2013	E. Jamshidpour, M. Shahbazi, P. Poure, E. Gholipour, and S. Saadate	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดและปิดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยวิธี FPGA และแบ่งอัลกอริทึมเป็น 2 แบบ ซึ่งแบบแรกจะหาความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณการสวิตช์เพื่อตรวจจับ ส่วนอีกแบบจะทำการเทียบคล้ายกับอันแรกแต่จะเปลี่ยนสัญญาณการสวิตช์เป็นสัญญาณการทริกของสวิตช์
2014	E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti	บทความนี้นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยการนำกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำกับสัญญาณการสวิตช์มาใช้วิธีสุ่มค่าและคงค่า เพื่อหาขอบเขตกระแสที่เปรียบเทียบกัน เพื่อใช้ตรวจจับความผิดปกติ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti	บทความนี้เสนอการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบฮาล์ฟบริดจ์ไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยการนำกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำกับสัญญาณการสวิตช์มาใช้วิธีสุ่มค่าและคงค่า เพื่อหาขอบเขตกระแสที่เปรียบเทียบกัน เพื่อใช้ตรวจจับความผิดพร่องของสวิตช์ทั้ง 2 ตัว
2014	E. Jamshidpour, M. Shahbazi, S. Saadate, P. Poure, and E. Gholipour	นำเสนอการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง โดยอาศัยการหาความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแล้วสร้างขอบเขตด้วยฟังก์ชันซิกนัม เพื่อใช้ตรวจจับความผิดพร่องภายในวงจร
2016	Yigeng Huangfu, Shengrong Zhuo, Fuxi Chen, and Shengzhao Pang	บทความนี้นำเสนอความคงทนต่อความผิดพร่องของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้วิธีคูณต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเพื่อตรวจจับความผิดพร่องของระบบ
2017	Elham Pazouki, Jose Alexis De Abreu-Garcia, Yilmaz Sozer	บทความนี้นำเสนอความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจรอินเวอร์ตีสฟที่มีตัวควบคุม ทั้งความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรและปิดวงจร โดยใช้วิธีสังเกตค่ากระแสอินพุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อตรวจจับความผิดพร่องของวงจร และเมื่อตรวจจับพบความผิดพร่องจะทำการปรับอัตราส่วนของตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมสวิตช์ตัวที่เหลือให้เหมาะสม
2018	Ehsan Jamshidpour, Philippe Poure, and Shahrokh Saadate	บทความนี้เสนอการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดและปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่นำมาต่อเรียงกัน โดยอาศัยการศึกษาพื้นฐานพฤติกรรมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง แล้วนำค่ากระแสดังกล่าวมาหาค่าความชันปกติ เพื่อใช้ตรวจจับความผิดพร่องของสวิตช์

จากตาราง 2.2 มีวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ถูกคิดค้นขึ้นหลายวิธี โดยรูปแบบของความผิดปกติถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบสวิตช์เปิดวงจร (Open-Circuit Switch Fault) และแบบสวิตช์ปิดวงจร (Short-Circuit Switch Fault) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปที่สวิตช์เกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรเท่านั้น เนื่องจากความผิดปกติดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร กล่าวคือวงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ภายใต้สมรรถนะที่ลดลง ควบคุมพยายามรักษาระดับแรงดันให้คงที่ตามต้องการแม้มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่สวิตช์ของวงจร ส่งผลให้สวิตช์ตัวอื่นรวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ทำงานหนักมากยิ่งขึ้น หากความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรไม่ถูกตรวจจับ จะส่งผลเสียหายต่อวงจรได้ในที่สุด ในขณะที่ความผิดปกติแบบสวิตช์ปิดวงจร จะส่งผลให้มีกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นอย่างมาก กระบวนการป้องกันระบบจากกระแสเกินพิกัดจะทำงานทันที เพื่อหยุดการทำงานของวงจรก่อนที่จะได้รับความเสียหายรุนแรง ดังนั้นในปริทัศน์วรรณกรรมจึงได้มุ่งเน้นวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรหากไม่ได้รับการแก้ไขความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร จะอาศัยการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยจุดมุ่งหมายคือสามารถตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์เกิดความเสียหายหรือชำรุดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว รวมถึงวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติดังกล่าว

2.4 สรุป

ในการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทั้งโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงและวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในวงจร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างวงจรสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันที่ค่อนข้างต่ำ และพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยจากการศึกษางานวิจัยในอดีตช่วยให้ทราบถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงในแบบต่าง ๆ โดยได้นำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมและแบบเรียงต่อกันสองขั้นมาเป็นแนวทางสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 3 และจากการศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรในกรณีต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรได้ ซึ่งจะได้นำกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 5

บทที่ 3

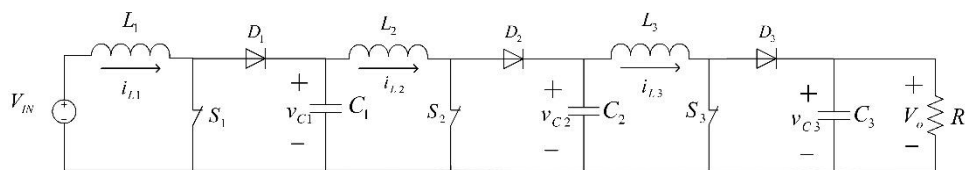
วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงานของวงจรมอเตอร์ดังกล่าว การหาอัตราขยายแรงดัน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ปรากฏในวงจร เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ รวมถึงได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรมอเตอร์ดังกล่าว โดยมีอัตราขยายแรงดันสูงถึงประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้ออกแบบ ช่วยให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด

3.2 โครงสร้างวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

จากการศึกษาวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามวงจรมอเตอร์ดังกล่าวสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามที่ต้องการที่ 400V ได้ เมื่อแรงดันอินพุตค่อนข้างต่ำประมาณ 20V แต่จะส่งผลให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของสวิตช์มีค่าที่สูงขึ้นตาม ซึ่งจะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพการทำงานลดลง จึงได้นำวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมที่มีเพียงขั้นเดียวมาต่อเรียงกันเป็นวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามที่ต้องการ โดยสามารถเพิ่มระดับแรงดันจาก 20V ให้มีแรงดันเอาต์พุตสูงถึงประมาณ 400V กล่าวคือสามารถเพิ่มระดับแรงดันได้ถึง 20 เท่า โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์แต่ละตัวไม่สูงมากนัก ทั้งนี้โครงสร้างวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน (V_N), สวิตช์สามตัว (S_1, S_2, S_3), ไดโอดสามตัว (D_1, D_2, D_3), ตัวเก็บประจุสามตัว (C_1, C_2, C_3), ตัวเหนี่ยวนำสามตัว (L_1, L_2, L_3) และโหลดตัวต้านทาน (R)



รูปที่ 3.1 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

3.3 หลักการทำงานของวงจรถบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

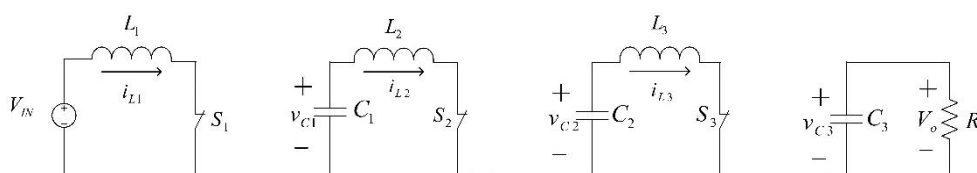
เนื่องจากวงจรถบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นประกอบด้วยสวิตช์ 3 ตัว ซึ่งมีช่วงที่สวิตช์แต่ละตัวทำงานพร้อมกันและไม่พร้อมกัน ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจร จำนวนโหมดการทำงานจะขึ้นกับจำนวนสวิตช์ภายในวงจร แสดงดังสมการที่ (3-1)

$$\text{Mode} = 2^n \quad (3-1)$$

จากสมการที่ (3-1) เมื่อวิเคราะห์การทำงานของวงจรถบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะสามารถแบ่งโหมดการทำงานออกเป็น 8 โหมดการทำงานดังนี้

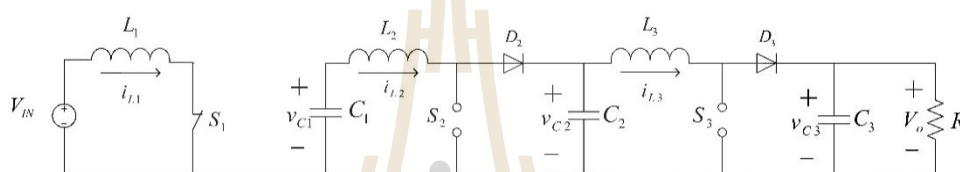
โหมดที่ 1 สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 นำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 พบว่า เมื่อสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 นำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_1 , D_2 และ D_3 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยในช่วงเวลานี้ แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 ตามลำดับ และตัวเก็บประจุ C_3 จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน R

รูปที่ 3.2 สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 นำกระแส

โหมดที่ 2 สวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 กับ S_3 หยุดนำกระแส

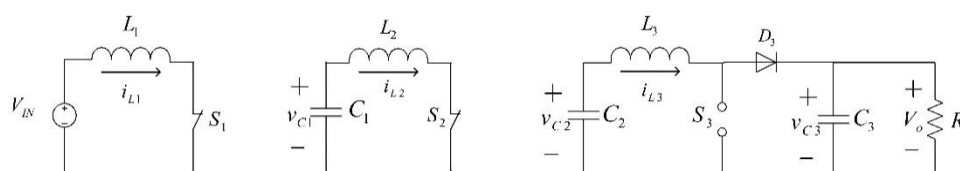
พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 กับ S_3 หยุดนำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3 พบว่า เมื่อสวิตช์ S_1 นำกระแส ในขณะที่ S_2 กับ S_3 หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน C_2 และ C_3 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_1 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่ D_2 และ D_3 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_1 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2



รูปที่ 3.3 สวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 กับ S_3 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 3 สวิตช์ S_1 กับ S_2 นำกระแส และ S_3 หยุดนำกระแส

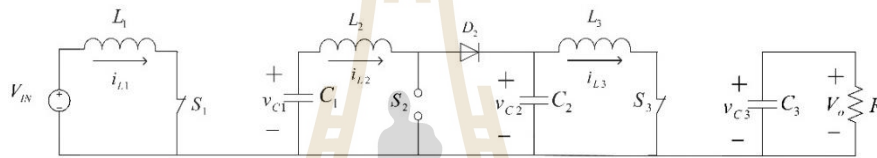
พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_1 กับ S_2 นำกระแส และ S_3 หยุดนำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4 พบว่า เมื่อสวิตช์ S_1 กับ S_2 นำกระแส และ S_3 หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน C_3 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_1 และ D_2 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่ D_3 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3



รูปที่ 3.4 สวิตช์ S_1 กับ S_2 นำกระแส และ S_3 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 4 สวิตช์ S_1 กับ S_3 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส

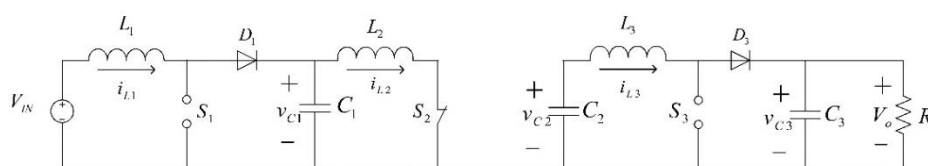
พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_1 กับ S_3 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 พบว่าเมื่อสวิตช์ S_1 กับ S_3 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน C_2 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_1 และ D_3 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่ D_2 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_1 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และตัวเก็บประจุ C_3 จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน R



รูปที่ 3.5 สวิตช์ S_1 กับ S_3 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 5 สวิตช์ S_2 นำกระแส และ S_1 กับ S_3 หยุดนำกระแส

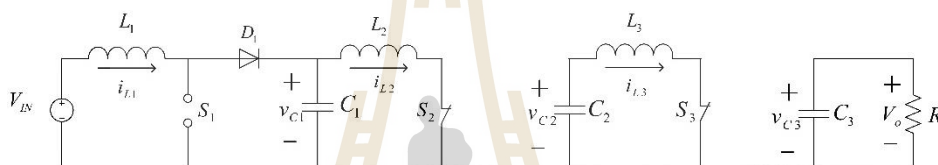
พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_2 นำกระแส และ S_1 กับ S_3 หยุดนำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6 พบว่าเมื่อสวิตช์ S_2 นำกระแส และ S_1 กับ S_3 หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_2 จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน C_1 และ C_3 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_2 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่ D_1 และ D_3 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_2 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3



รูปที่ 3.6 สวิตช์ S_2 นำกระแส และ S_1 กับ S_3 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 6 สวิตช์ S_2 กับ S_3 นำกระแส และ S_1 หยุดนำกระแส

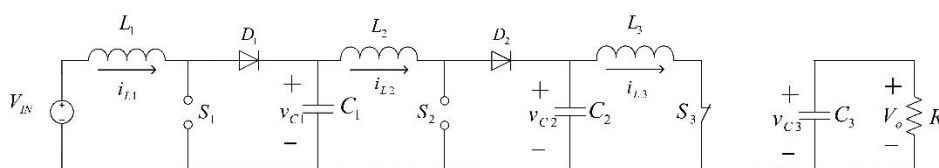
พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_2 กับ S_3 นำกระแส และ S_1 หยุดนำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7 พบว่าเมื่อสวิตช์ S_2 กับ S_3 นำกระแส และ S_1 หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน C_1 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_2 และ D_3 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่ D_1 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_2 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 และตัวเก็บประจุ C_3 จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน R



รูปที่ 3.7 สวิตช์ S_2 กับ S_3 นำกระแส และ S_1 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 7 สวิตช์ S_3 นำกระแส และ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส

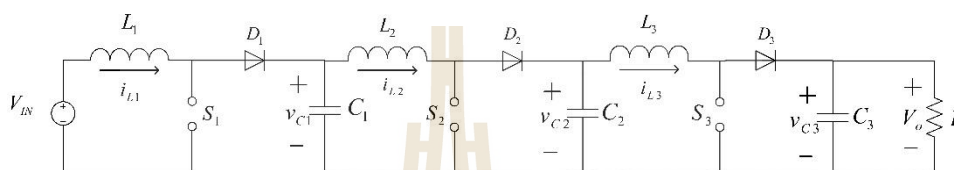
พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_3 นำกระแส และ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.8 พบว่าเมื่อสวิตช์ S_3 นำกระแส และ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_3 จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน C_1 และ C_2 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_3 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่ D_1 และ D_2 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_3 จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน R



รูปที่ 3.8 สวิตช์ S_3 นำกระแส และ S_1 กับ S_2 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 8 สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 หยุคนำกระแส

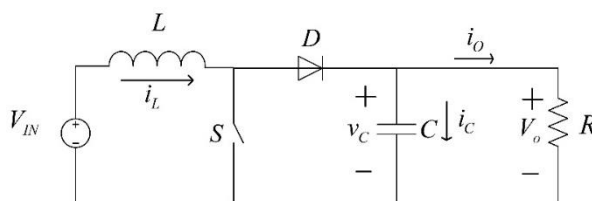
พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 หยุคนำกระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.9 พบว่า เมื่อสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 หยุคนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด D_1 , D_2 และ D_3 สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากการไหลโดยตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน V_{IN} จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1



รูปที่ 3.9 สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 หยุคนำกระแส

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

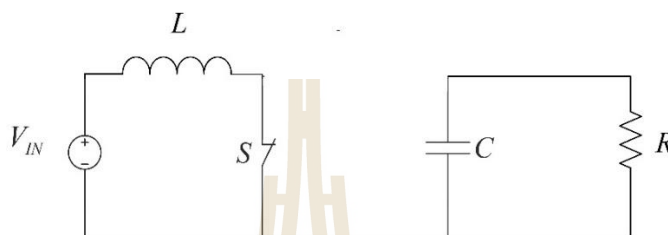
ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยการออกแบบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมเข้าช่วย ซึ่งมีวิธีการพิจารณาวงจรที่คล้ายคลึงกัน โดยในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมหรือแบบเรียงต่อกันสามขั้นนั้น จะช่วยให้การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำภายในวงจรอยู่ในขอบเขตที่พอใจ รวมถึงส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การพิจารณาเพื่อออกแบบค่าพารามิเตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่สวิตช์นำกระแสและช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส โดยโครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

3.4.1 พิจารณาช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส

ช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส ตัวเก็บประจุ C จะคายประจุ เพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ให้กับโหลดตัวต้านทาน (R) ส่งผลให้ไดโอดมีลักษณะการทำงานแบบไบอัสย้อนกลับ เนื่องจากไม่สามารถนำกระแสได้ และแรงดันอินพุต V_{IN} จะให้พลังงานแก่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 ซึ่งโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 3.11

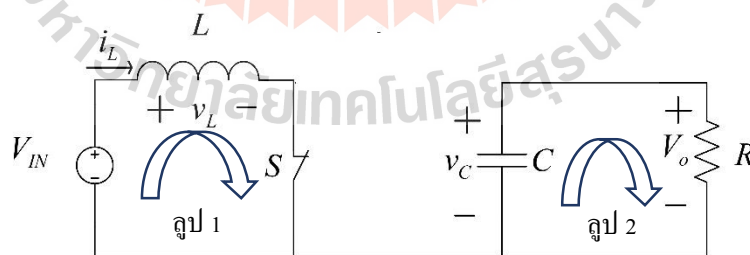


รูปที่ 3.11 โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตามลำดับดังนี้

กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL)

ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมออกเป็น 2 ลูปการทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส

ลูปที่ 1 : $-V_{IN} + v_L = 0$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{IN}}{L}$$

$$\text{รูปที่ 2 : } V_o = v_C$$

พิจารณาในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส $dt = dT$ โดยที่ d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S และ T คือ คาบของการสวิตช์จะให้ความสัมพันธ์ดังนี้

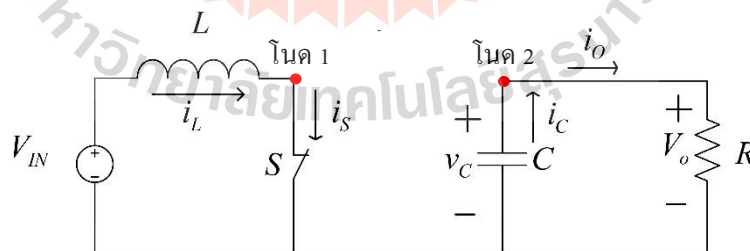
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{dT} = \frac{V_{IN}}{L}$$

จะได้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ดังนี้

$$\Delta i_{L,om} = \frac{V_{IN}}{L} dT \quad (3-2)$$

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL)

ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส สามารถพิจารณากฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรรูปที่ 3.13
เวอร์เตอร์แบบคั้งเดิมออกเป็น 2 โหนดการทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S นำกระแส

$$\text{โหนด 1 : } i_L = i_S$$

$$\text{โหนด 2 : } i_C = i_O$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{V_o}{RC}$$

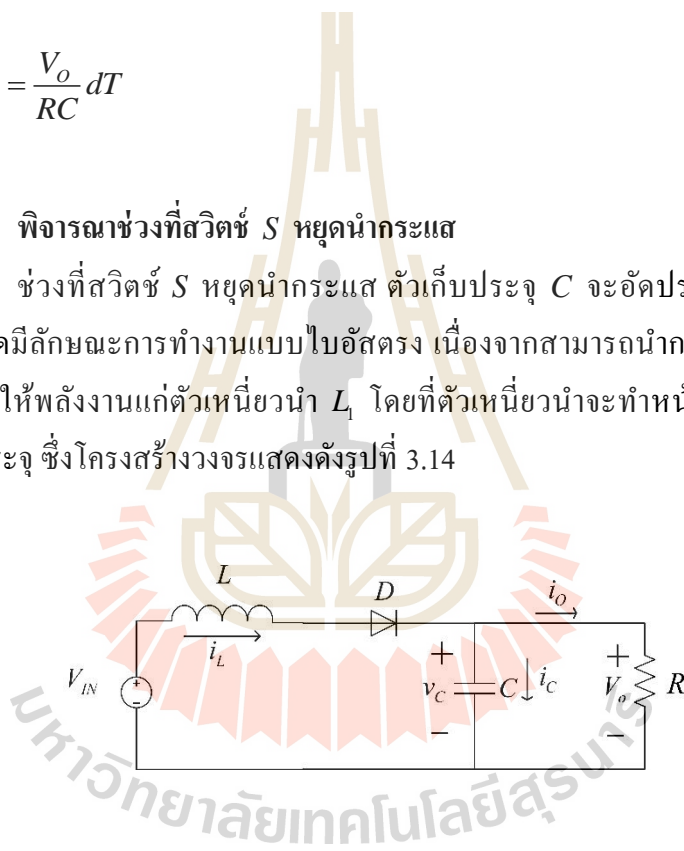
จะได้การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C ดังนี้

$$\frac{\Delta v_C}{\Delta t} = \frac{\Delta v_C}{dT} = \frac{V_o}{RC}$$

$$\Delta v_{C,on} = \frac{V_o}{RC} dT \quad (3-3)$$

3.4.2 พิจารณาช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส

ช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C จะอัดประจุ เพื่อเก็บพลังงาน ส่งผลให้ไดโอดมีลักษณะการทำงานแบบไบอัสตรง เนื่องจากสามารถนำกระแสได้ และแรงดันอินพุต V_{IN} จะให้พลังงานแก่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 โดยที่ตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่เหนี่ยวนำกระแสให้กับตัวเก็บประจุ ซึ่งโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 3.14

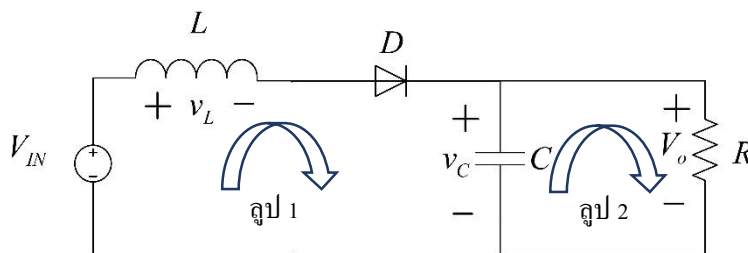


รูปที่ 3.14 โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ในช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตามลำดับ ดังนี้

กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL)

ในช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมออกเป็น 2 รูปการทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส

$$\text{ลูปที่ 1: } -V_{IN} + v_L + v_C = 0$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{IN} - v_C}{L}$$

$$\text{ลูปที่ 2: } V_o = v_C$$

พิจารณาในช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส $dt = (1-d)T$ โดยที่ d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S และ T คือ คาบของการสวิตช์จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

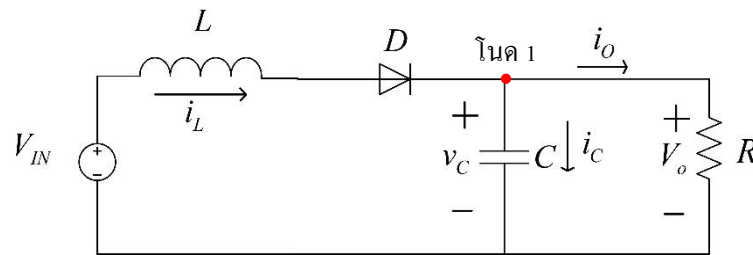
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-d)T} = \frac{V_{IN} - v_C}{L}$$

จะได้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ดังนี้

$$\Delta i_{L,off} = \frac{V_{IN} - v_C}{L} (1-d)T \quad (3-4)$$

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL)

ในช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส สามารถพิจารณากฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมออกเป็น 1 โนดการทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์ S หยุดนำกระแส

โนด 1 : $i_L = i_C + i_o$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L - i_o}{C}$$

จะได้การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C ดังนี้

$$\frac{\Delta v_C}{\Delta t} = \frac{\Delta v_C}{(1-d)T} = \frac{i_L - i_o}{C}$$

$$\Delta v_{C,off} = \frac{i_L - i_o}{C} (1-d)T \quad (3-5)$$

ในการพิจารณาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม จะพิจารณาจากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ของทั้งสองโหมดการทำงาน จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-6) และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถหาได้จากสมการที่ (3-7)

$$\Delta i_{L,on} = \Delta i_{L,off}$$

$$\frac{V_{IN}}{L} dT = -\left(\frac{V_{IN} - v_C}{L}\right)(1-d)T$$

$$V_o = \frac{V_{IN}}{1-d} \quad (3-6)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (3-7)$$

ในการพิจารณาออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะพิจารณาจากสมการที่ (3-2) และ (3-3) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$L = \frac{dV_{IN}}{f_s \Delta i_L} \quad (3-8)$$

$$C = \frac{di_o}{f_s \Delta v_C} \quad (3-9)$$

โดย f_s คือ ความถี่ของสวิตช์ มีค่าเท่ากับ 10kHz

จากสมการที่ (3-6) สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นดังแสดงในรูปที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$v_{C1} = \frac{V_{IN}}{(1-d_1)}$$

$$v_{C2} = \frac{v_{C1}}{(1-d_2)}$$

$$v_{C3} = \frac{v_{C2}}{(1-d_3)}$$

โดย d_1, d_2, d_3 คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_1, S_2, S_3 ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถเขียนสมการแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นได้ดังสมการที่ (3-10)

$$V_o = \frac{V_{IN}}{(1-d_1)(1-d_2)(1-d_3)} \quad (3-10)$$

ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น แสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_1 = \frac{d_1 V_{IN}}{f_s \Delta i_{L1}} \quad (3-11)$$

$$C_1 = \frac{i_{L2} d_1}{f_s \Delta v_{C1}} \quad (3-12)$$

$$L_2 = \frac{d_2 v_{C1}}{f_s \Delta i_{L2}} \quad (3-13)$$

$$C_2 = \frac{i_{L3} d_2}{f_s \Delta v_{C2}} \quad (3-14)$$

$$L_3 = \frac{d_3 v_{C2}}{f_s \Delta i_{L3}} \quad (3-15)$$

$$C_3 = \frac{i_o d_3}{f_s \Delta v_{C3}} \quad (3-16)$$

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะพิจารณาวงจรดังกล่าวเป็นวงจรในอุดมคติ คือไม่มีกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นภายในวงจร โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นจะแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการคำนวณในการออกแบบวงจร

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{IN}	แรงดันอินพุต	20V
V_O	แรงดันเอาต์พุต	400V
P_O	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	100W
R	โหลดตัวต้านทาน	1600Ω
d_1	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์	0.6
d_2		0.6
d_3		0.6875
i_{L1}	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	5A
i_{L2}		2A
i_{L3}		0.8A
v_{C1}	แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	50V
v_{C2}		125V
v_{C3}		400V
Δi_{L1}	ค่าการกระเพื่อมของกระแส	0.08A (1.6% i_{L1})
Δi_{L2}		0.16A (8% i_{L2})
Δi_{L3}		0.12A (15% i_{L3})
Δv_{C1}	ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน	0.24V (0.48% v_{C1})
Δv_{C2}		0.096V (0.077% v_{C2})
Δv_{C3}		0.034V (0.085% v_{C3})

จากตารางที่ 3.1 เมื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
L_1	ตัวเหนี่ยวนำ	15mH
L_2		18.75mH

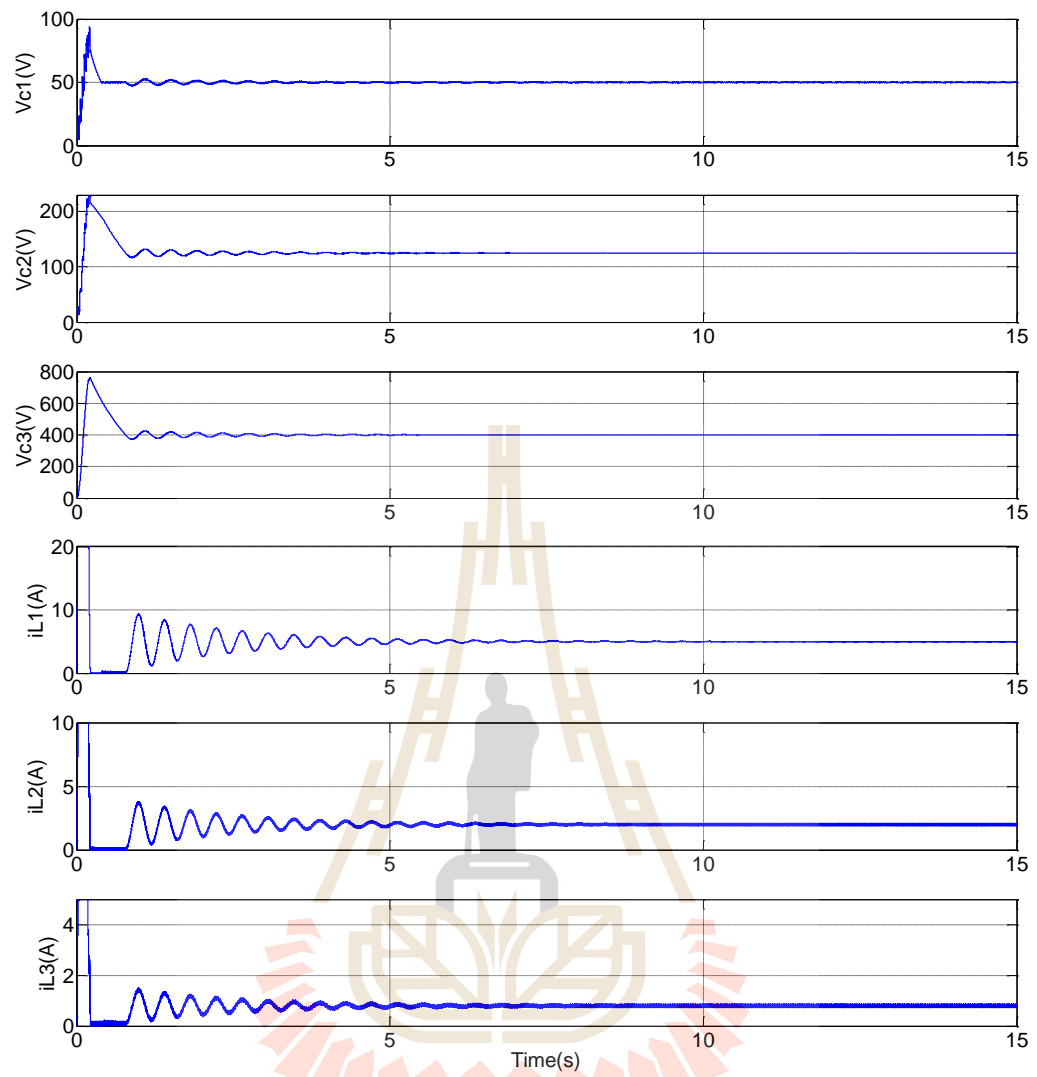
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น (ต่อ)

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
L_3	ตัวเหนี่ยวนำ	70mH
C_1, C_2, C_3	ตัวเก็บประจุ	500 μ F

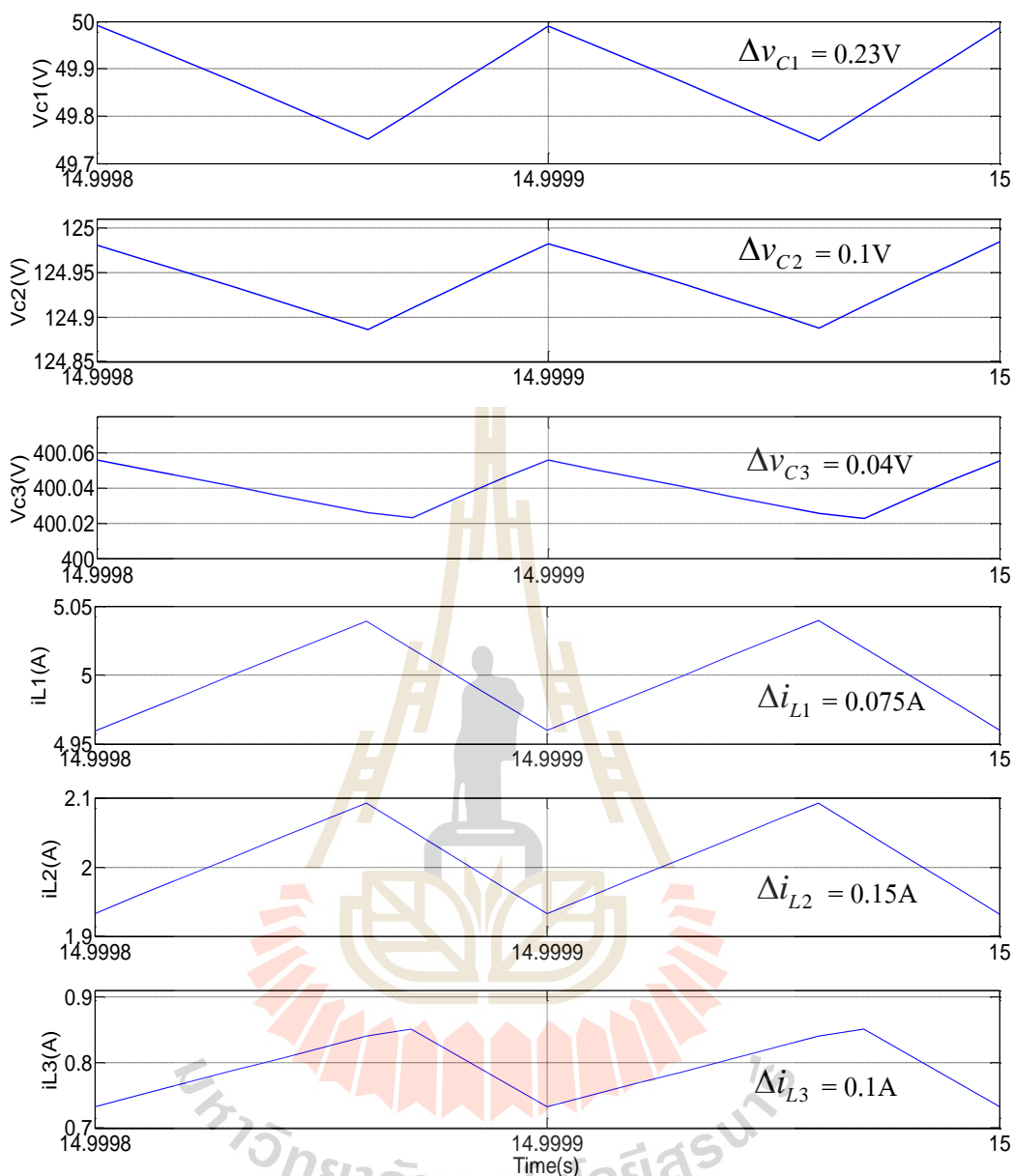
3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามที่ต้องการ โดยที่มีแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำ รวมถึงการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ อยู่ในขอบเขตที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้การจำลองสถานการณ์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

จากการจำลองสถานการณ์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 3.17 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ ค่าแรงดัน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} จะมีผลสอดคล้องกันกับค่าที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 50V, 125V และ 400V ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 20 เท่า โดยเพิ่มแรงดันจาก 20V เป็น 400V และในส่วนของกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ก็มีผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ในส่วนของการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะแสดงดังรูปที่ 3.18 โดยจะพบว่าค่าการกระเพื่อม Δv_{C1} , Δv_{C2} และ Δv_{C3} มีค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1 เพียงเล็กน้อย ซึ่งผลดังกล่าวยังอยู่ในขอบเขตที่พึงพอใจ และส่วนค่าการกระเพื่อม Δi_{L1} , Δi_{L2} และ Δi_{L3} นั้นมีผลที่สอดคล้องกับขอบเขตที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นจากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการและค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้มีความเหมาะสมสำหรับวงจรดังกล่าว



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันและกระแส



รูปที่ 3.18 ผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของแรงดันและกระแส

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโครงสร้างวงจรรูปสแต็คคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น โดยมีการวิเคราะห์โหมคการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้อยู่ในขอบเขตที่พึงพอใจ รวมถึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามต้องการเมื่อมีแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่ง

อัตราขยายแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์ยังแสดงการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ พบว่าสอดคล้องกับขอบเขตที่กำหนดไว้ ดังนั้นในบทถัดไปจะได้กล่าวถึงการควบคุมการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อให้วงจรดังกล่าวสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป



บทที่ 4

การควบคุมวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

4.1 บทนำ

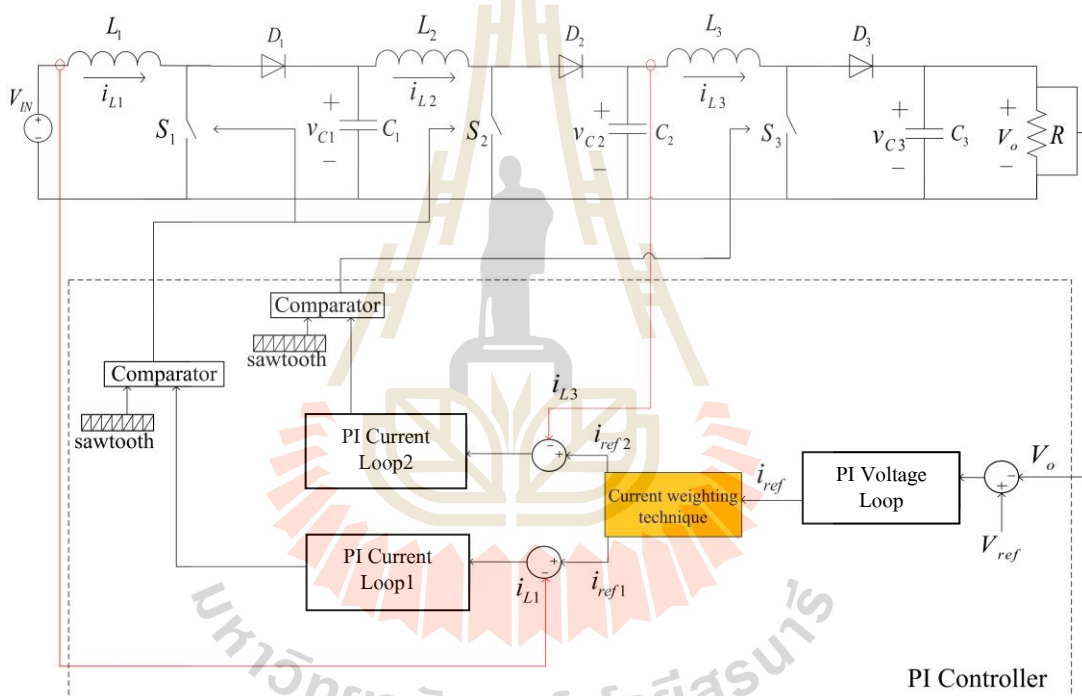
จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น ในบทที่ 4 ได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ เข้าช่วยในการควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้มีค่าคงที่ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่แตกต่างกัน โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วยลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตหนึ่งลูป (PI Voltage Loop) และลูปควบคุมกระแสสองลูป (PI Current Loops) เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละตัว และอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique) เข้าช่วยปรับค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป เพื่อให้วงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรมอเตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะมีตัวตรวจจับแรงดัน และตัวตรวจจับกระแส วัดค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) และวัดค่ากระแส (i_{L1} , i_{L3}) เพื่อส่งค่าที่วัดได้ไปยังตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วย ลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตหนึ่งลูป เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการ และลูปควบคุมกระแสสองลูปเพื่อควบคุมกระแส i_{L1} และ i_{L3} เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสวิตช์ (S_1 , S_2 , S_3) ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสเข้าช่วยปรับค่ากระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป

โครงสร้างการควบคุมวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น แสดงดังรูปที่ 4.1 กระบวนการควบคุมเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ก่อนนำเข้าสู่ลูปควบคุมแรงดัน ซึ่งลูปควบคุมแรงดันจะสร้างกระแสอ้างอิงสำหรับลูปควบคุมกระแส (i_{ref}) แต่เนื่องจากวิธีการควบคุมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยลูปควบคุมกระแสสองลูป ดังนั้นจำเป็นต้องมีการถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิงให้เหมาะสม โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

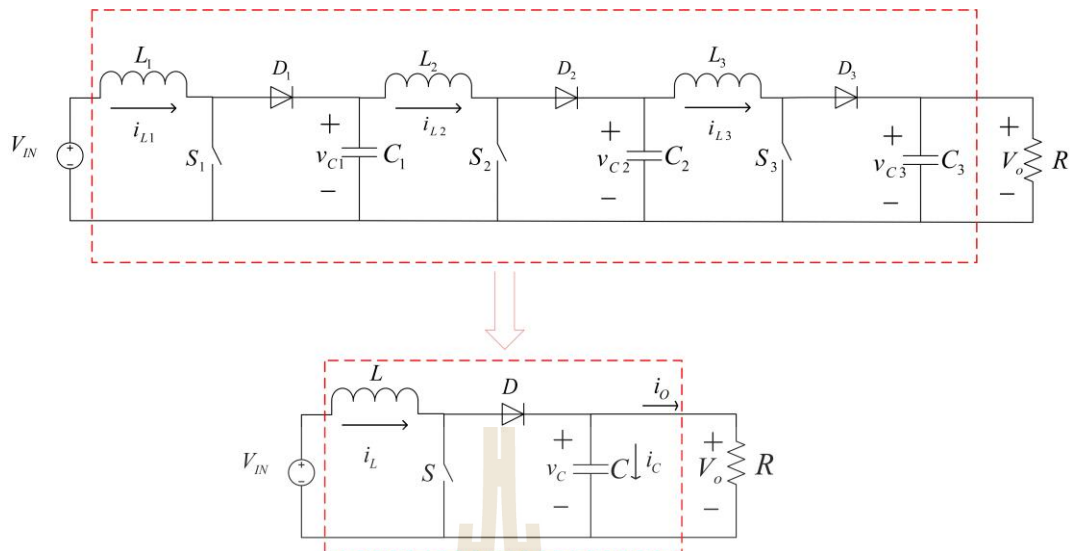
เพื่อปรับกระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป (i_{ref1}, i_{ref2}) ค่ากระแสอ้างอิงดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสทั้งสองตัว (i_{L1}, i_{L3}) ตามลำดับ ซึ่งลูปควบคุมกระแสแต่ละลูปจะสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (sawtooth) โดยลูปควบคุมกระแสลูปที่หนึ่งจะได้สัญญาณสำหรับการควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 ส่วนลูปควบคุมกระแสลูปที่สองจะได้สัญญาณสำหรับการควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_3 ทั้งนี้จะได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดัน และการออกแบบตัวควบคุมลูปกระแส อธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปควบคุมแรงดัน (PI Voltage Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นได้อาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม โครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นกับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นและวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

พิจารณาโครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) พิจารณาการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมในขณะที่สวิตช์ S ไม่นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = (1-d(t))i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R}$$

พิจารณาเมื่อ $d = 0$

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R} \quad (4-1)$$

ทำการแปลงลาปลาซได้ดังนี้

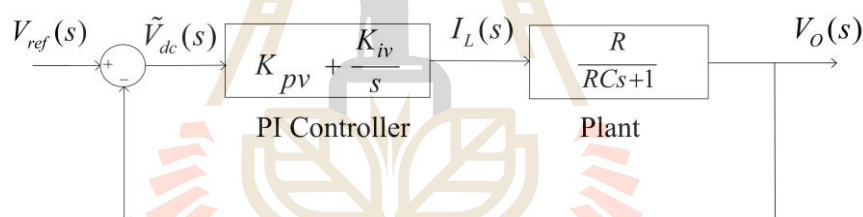
$$CsV_o(s) = I_L(s) - \frac{V_o(s)}{R} \quad (4-2)$$

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์ของระบบดังสมการที่ (4-3)

$$\frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{RCs+1} \quad (4-3)$$

$$G_{CV}(s) = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \quad (4-4)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้แผนภาพการควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพการควบคุมลูปแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพในรูปที่ 4.3 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดัน

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right)\left(\frac{R}{RCs+1}\right)}{1 + \left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right)\left(\frac{R}{RCs+1}\right)}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_{pv}Rs + K_{iv}R}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R+1}{RC}\right)s + \left(\frac{K_{iv}R}{RC}\right)} \quad (4-5)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{pv} และ K_{iv} ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปรองแรงดัน จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดกับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (4-5) และ (4-6) ตามลำดับ

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-6)$$

โดย ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

$$\omega_n \text{ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ โดยที่ } \omega_n = \frac{1}{RC}$$

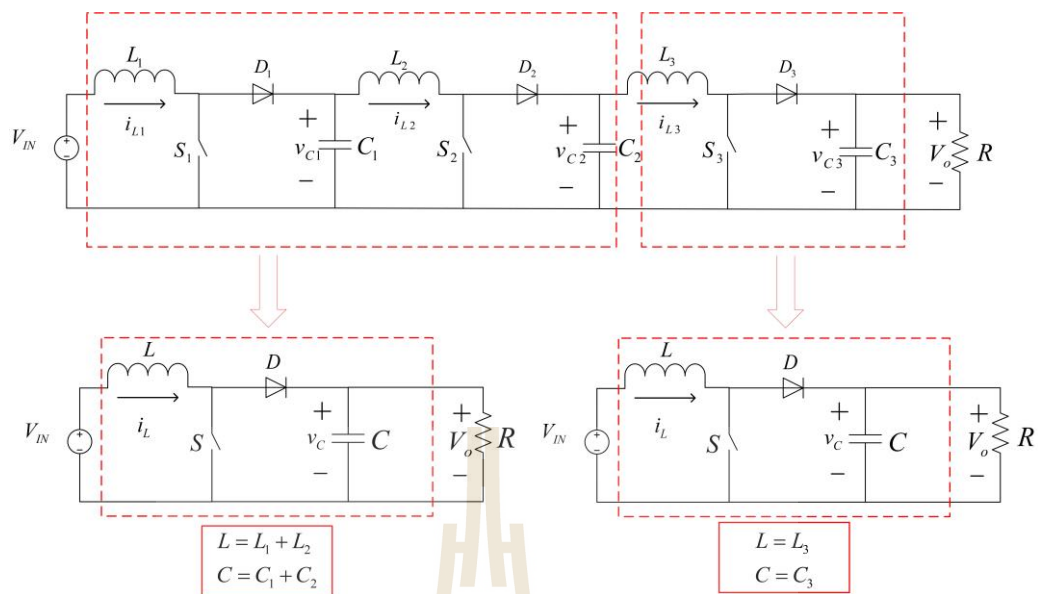
ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ของลูปรองแรงดันแสดงได้ดังสมการที่ (4-7) และ (4-8) ตามลำดับ

$$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R} \quad (4-7)$$

$$K_{iv} = \omega_n^2 C \quad (4-8)$$

4.2.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปรองกระแส (PI Current Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปรองกระแสของวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นจะทำการออกแบบในลักษณะเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปรองแรงดัน โครงสร้างของวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นและวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นและวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรบัสต์แบบเรียงต่อกันสามขั้นเทียบเคียงแบบดั้งเดิมสำหรับรูปควบคุมกระแสทั้งสองรูป

พิจารณาโครงสร้างของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นและวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ในรูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นว่าวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นประกอบด้วยรูปกระแสสองรูป โดยที่รูปควบคุมกระแสรูปที่หนึ่งได้นำตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุตัวที่หนึ่งกับสอง (L_1, L_2, C_1, C_2) มาพิจารณาร่วมกัน ในขณะที่รูปควบคุมกระแสที่สองจะพิจารณาเพียงตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุตัวที่สามเท่านั้น (L_3, C_3) เมื่อใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) พิจารณาการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมขณะที่สวิตช์เปิดวงจรจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_{IN}(t) = (1 - d(t))v_o(t) + v_L(t)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{IN}(t) - (1 - d(t))v_o(t)$$

พิจารณาเมื่อ $d = 0$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{IN}(t) - v_o(t) \quad (4-9)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (4-9) ได้ดังสมการที่ (4-10)

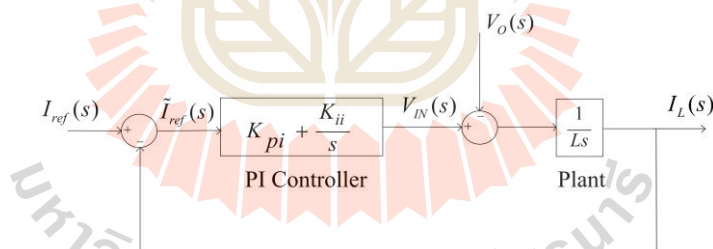
$$LsI_L(s) = V_{IN}(s) - V_O(s) \quad (4-10)$$

ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลาซต์สำหรับวงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกัน
สามขั้นในส่วนของควบคุมกระแสดังนี้

$$\frac{I_L(s)}{V_{IN}(s) - V_O(s)} = \frac{1}{Ls} \quad (4-11)$$

$$G_{CC} = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (4-12)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้แผนภาพการควบคุมกระแสด้วย
ตัวควบคุมพีไอดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพที่แสดงดังรูปที่ 4.5 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบ
ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอในลูปกระแส

$$\frac{I_L(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right)(V_{IN})\left(\frac{1}{Ls}\right)}{1 + \left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right)(V_{IN})\left(\frac{1}{Ls}\right)} \quad (4-13)$$

$$\frac{I_L(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{K_{pi}V_{IN}s + K_{ii}V_{IN}}{s^2 + K_{pi}\left(\frac{V_{IN}}{L}\right)s + K_{ii}\left(\frac{V_{IN}}{L}\right)} \quad (4-14)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{pi} และ K_{ii} ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูกระแส จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกับลูประดัน โดยจะเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังแสดงในสมการ (4-14) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานที่ปรากฏในสมการที่ (4-15)

$$G(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (4-15)$$

โดยที่ ω_{ni} คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของลูกระแส มีค่าเท่ากับ $\omega_{ni} = N\omega_n$ หน่วยเป็น rad/s
 N คือ จำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติสำหรับลูกระแส เมื่อเทียบกับลูประดัน
 ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง

จะได้ความสัมพันธ์ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ สำหรับลูควบคุมกระแสแสดงดังต่อไปนี้

$$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{IN}}$$

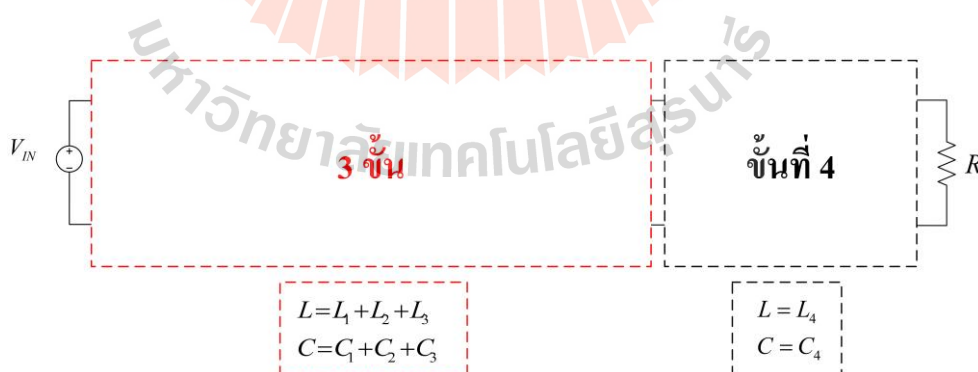
$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2L}{V_{IN}}$$

จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมจะได้ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นแสดงดังตารางที่ 4.1

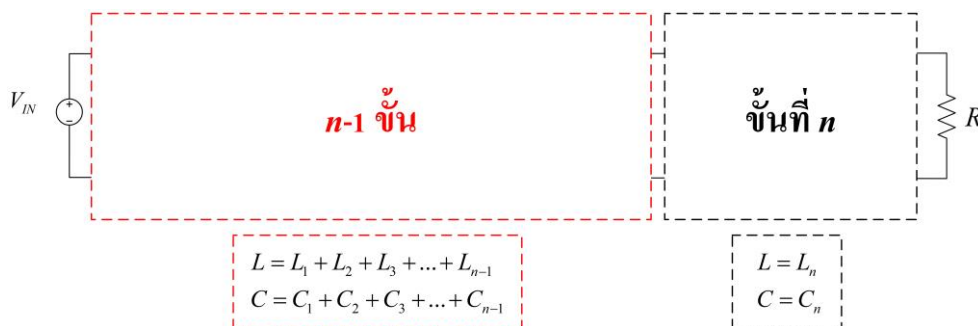
ตารางที่ 4.1 ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบคั้งเดิมและวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น

วงจรมุสค์แบบคั้งเดิม	วงจรมุสค์แบบเรียงต่อกันสามชั้น
$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R}$	$K_{pv} = 2\zeta\omega_n (C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{R}$
$K_{iv} = \omega_n^2 C$	$K_{iv} = \omega_n^2 (C_1 + C_2 + C_3)$
$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni} L}{V_{IN}}$	$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_{ni} (L_1 + L_2)}{V_{IN}}$
	$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_{ni} L_3}{V_{IN}}$
$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{IN}}$	$K_{ii1} = \frac{\omega_{ni}^2 (L_1 + L_2)}{V_{IN}}$
	$K_{ii2} = \frac{\omega_{ni}^2 L_3}{V_{IN}}$

จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปกระแสสามารถนำไปใช้กับวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันที่มากกว่าสามชั้นได้ โดยที่ลูปควบคุมกระแสมีเพียงแค่สองลูปคั้งเดิม ซึ่งสามารถพิจารณาวจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบคั้งเดิมกับวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันที่มากกว่าสามชั้นได้คั้งรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยจากรูปที่ 4.6 เป็นการพิจารณาวจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ชั้น ส่วนรูปที่ 4.7 พิจารณาวจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกัน n ชั้น



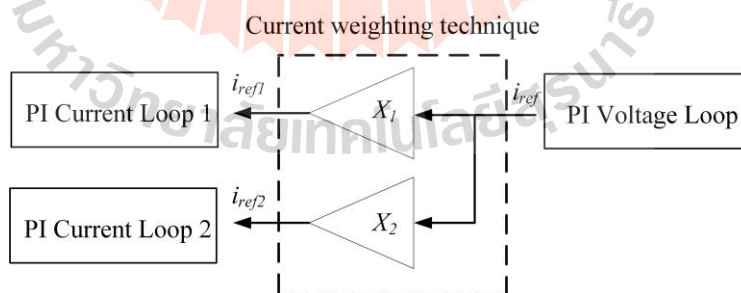
รูปที่ 4.6 ลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรมุสค์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ชั้น



รูปที่ 4.7 ลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกัน n ชั้น

4.2.3 เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น จะมีลูปควบคุมกระแสสองลูป ซึ่งค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากลูปควบคุมแรงดันอาจยังมีค่าที่ไม่เหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป เนื่องจากลูปควบคุมกระแสลูปที่หนึ่งนั้น จะนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวที่หนึ่งและสอง (S_1, S_2) แต่ลูปควบคุมกระแสลูปที่สองจะนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวที่สาม (S_3) เท่านั้น ดังนั้นจึงได้อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique) เพื่อช่วยปรับกระแสอ้างอิงให้เหมาะสมยิ่งขึ้นสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูปดังปรากฏในรูปที่ 4.1 โดยโครงสร้างของเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

จากรูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เห็นได้ว่าการรับค่ากระแสอ้างอิง (i_{ref}) จากลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตนำมาปรับคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก (X_1, X_2) เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักแล้ว (i_{ref1}, i_{ref2}) และจะถูกส่งไปยังลูปควบคุมกระแสทั้งสอง

ดูไปตามลำดับ โดยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4-16) และ (4-17)

$$i_{ref1} = X_1 i_{ref} \quad (4-16)$$

$$i_{ref2} = X_2 i_{ref} \quad (4-17)$$

โดยที่ X_1 คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง i_{ref1}
 X_2 คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง i_{ref2}

โดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$X_1 = \frac{i_{L1} + i_{L2}}{i_{total}} \quad (4-18)$$

$$X_2 = \frac{i_{L3}}{i_{total}} \quad (4-19)$$

โดยที่ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) และค่ากระแสทั้งหมด (i_{total}) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$i_{L1} = \frac{V_o}{(1-d_1)(1-d_2)(1-d_3)R} \quad (4-20)$$

$$i_{L2} = \frac{V_o}{(1-d_2)(1-d_3)R} \quad (4-21)$$

$$i_{L3} = \frac{V_o}{(1-d_3)R} \quad (4-22)$$

$$i_{total} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} \quad (4-23)$$

โดยในการออกแบบหาอัตราส่วนอ้างอิงหรือค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงสำหรับการแบ่งกระแสให้เหมาะสมและค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอจะแสดงดังตารางที่ 4.2 ทั้งนี้จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นในบทที่ 3 จะมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนคือ ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{IN}	แรงดันอินพุต	20V
V_O	แรงดันเอาต์พุต	400V
L_1, L_2, L_3	ตัวเหนี่ยวนำ	15mH, 18.75mH, 70mH
C_1, C_2, C_3	ตัวเก็บประจุ	560 μ F
d_1	วัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_1	0.6
d_2	วัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_2	0.6
d_3	วัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_3	0.6875
R	โหลดตัวต้านทาน	1600 Ω
f_s	ความถี่สวิตช์	10kHz

หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับคำนวณเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสแล้ว ทำการคำนวณเพื่อหาค่าตัวควบคุมพีไอทั้งรูปแรงดัน และรูปกระแสทั้งสองรูป รวมถึงค่าถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิง ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้ทำการออกแบบสามารถนำไปใช้กับกรณีแรงดันเอาต์พุตอื่น ๆ ได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ไ้ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับวงจรมูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
$K_{pv} = 2\zeta\omega_n(C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{R}$	0.000563
$K_{iv} = K\omega_n^2(C_1 + C_2 + C_3)$	0.0465
$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_{ni}(L_1 + L_2)}{V_{IN}}$	0.1695
$K_{ii1} = \frac{\omega_{ni}^2(L_1 + L_2)}{V_{IN}}$	5.2549
$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_3}{V_{IN}}$	0.7032
$K_{ii2} = \frac{\omega_{ni}^2L_3}{V_{IN}}$	43.5965
X_1	0.85
X_2	0.15

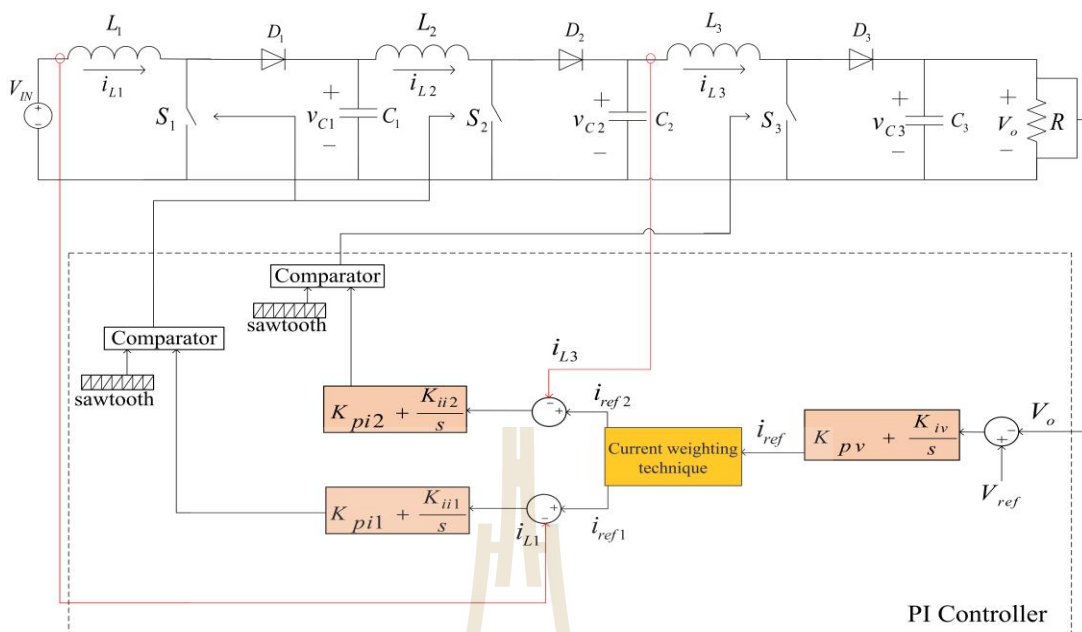
โดยที่ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดัน ($\omega_n = \frac{1}{RC}$)

K คือ ค่าอัตราขยายที่เกิดจากการปรับจูน เพื่อช่วยให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วยิ่งขึ้น ($K = 200$)

ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแส ($\omega_{ni} = \omega_n N$)

N คือ ความเร็วการทำงานลูปกระแสเมื่อเทียบกับลูปแรงดัน ซึ่งกำหนดมีค่าเท่ากับ 100 เท่า

โครงสร้างวงจรมูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสแสดงดังรูปที่ 4.9



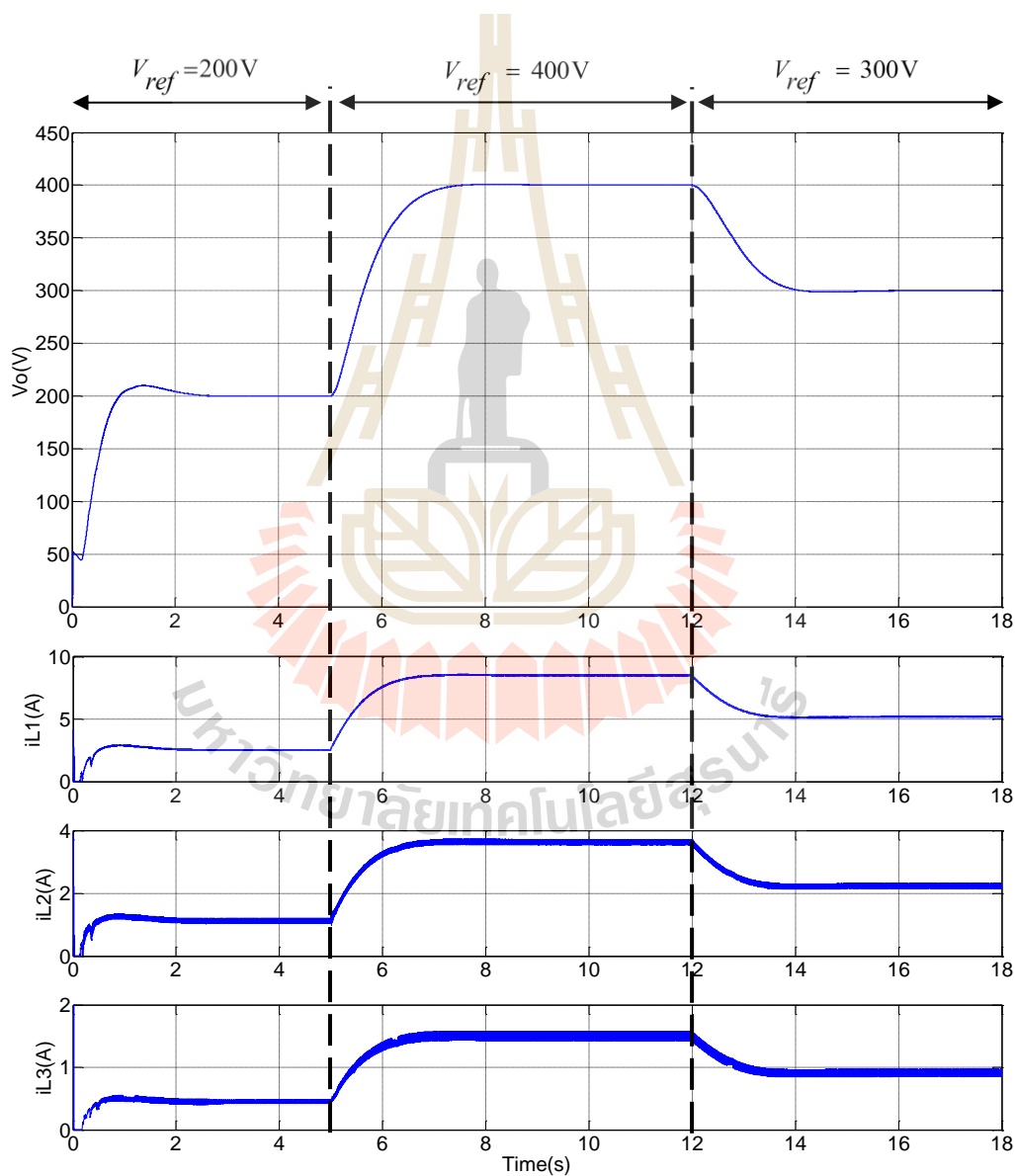
รูปที่ 4.9 โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมพีไออาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วย เพื่อแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ รวมถึงมีการแบ่งกระแสอ้างอิงได้อย่างเหมาะสม โดยการจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมจะอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 4.3 เพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดสอบการควบคุมวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 7 ต่อไป โดยการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังต่อไปนี้

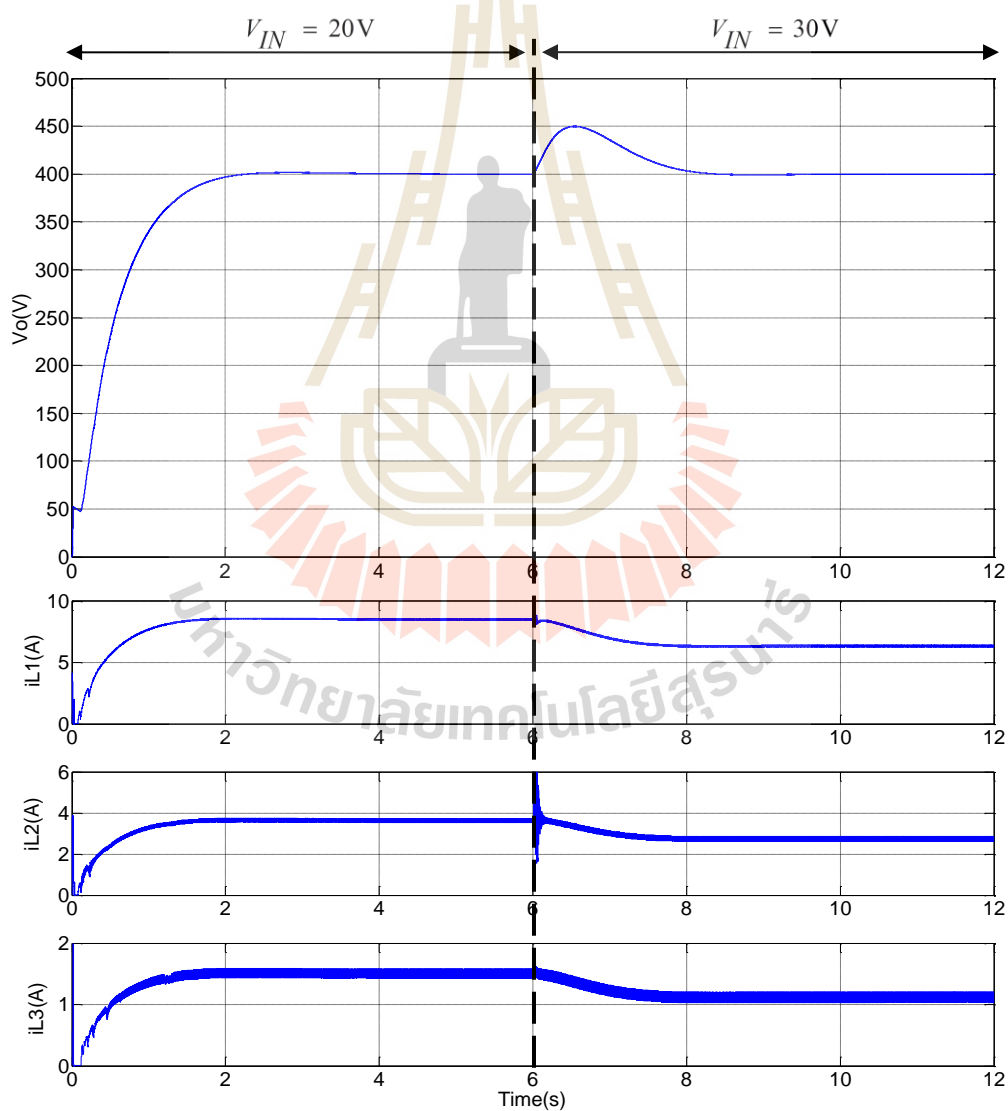
การจำลองสถานการณ์กรณีที่ 1 เป็นการจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงของวงจร โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิง (V_{ref}) เท่ากับ 200V 400V และ 300V ที่เวลา $t = 0$, $t = 5$ และ $t = 12$ วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้มีค่าแรงดันอินพุต (V_{IN}) เท่ากับ 20V ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์ผลของแรงดันเอาต์พุต (V_o) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าในช่วงวินาทีที่ 0 ถึง 5 ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตเป็น 200V ตามที่ได้กำหนดไว้ ส่วนกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าอยู่ที่ประมาณ 2.5A, 1A และ 0.5A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสม จากนั้นปรับแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นเป็น 400V ตัวควบคุมพีไอยังคงสามารถ

เพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ โดยกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันและยังมีการแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสมเช่นเดิม ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 8A 3.8A และ 1.5A ตามลำดับ และเมื่อปรับแรงดันอ้างอิงลดลงกลับไป 300V ที่วินาทีที่ 12 ตัวควบคุมพีไอพร้อมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้จากผลการจำลองสถานการณ์กรณีดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าถ้าแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นด้วย และถ้าแรงดันเอาต์พุตลดลงก็ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตรวมถึงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำลดลงเช่นกัน



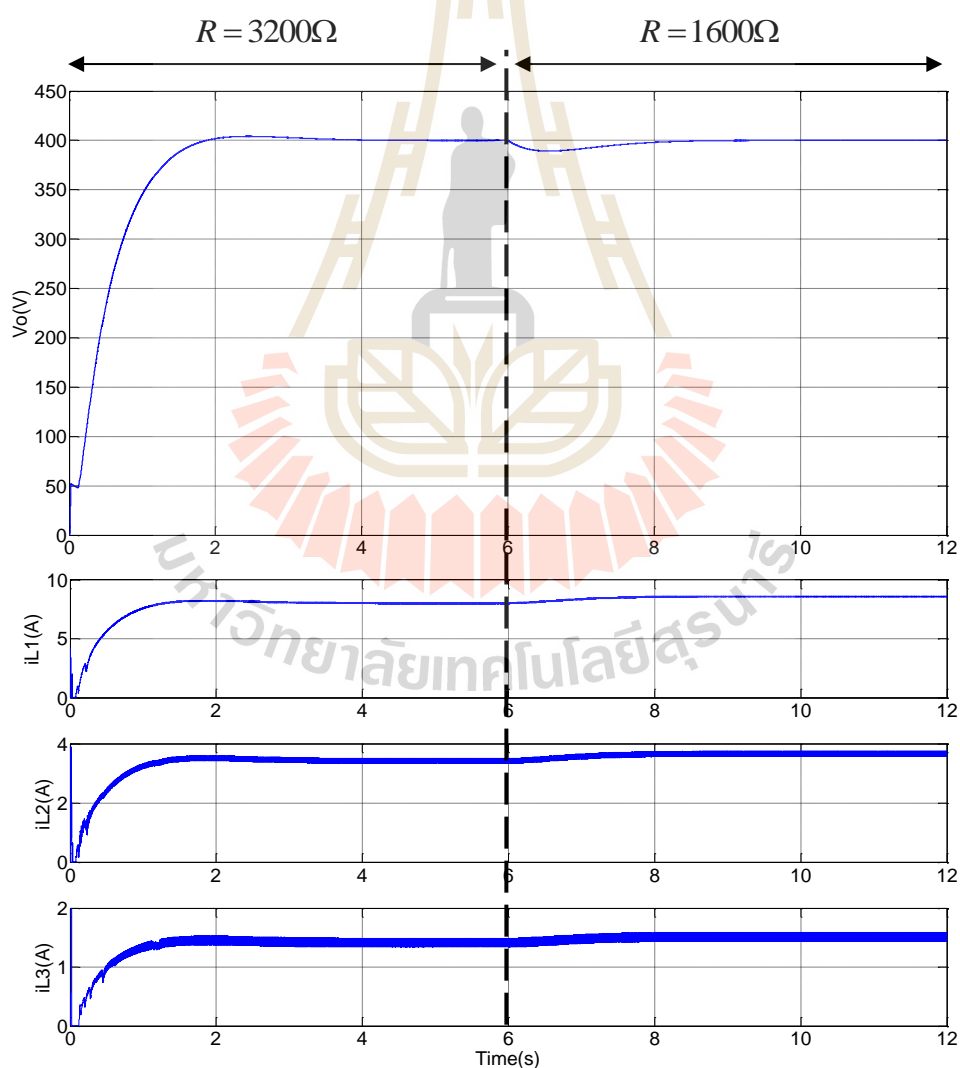
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref})

การจำลองสถานการณ์กรณีที่ 2 เป็นการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตของวงจร โดยจะปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตที่ 20V และ 30V ที่วินาทีที่ 0 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V ผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 โดยในช่วงแรงดันอินพุตที่ 20V จะเห็นว่าตัวควบคุมสามารถเพิ่มและรักษาแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามแรงดันอ้างอิงที่ 400V ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตในวินาทีที่ 6 จาก 20V ไปเป็น 30V พบว่าในสภาวะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นก่อนจะกลับเข้าสู่ค่าเดิมในสภาวะอยู่ตัวที่ 400V ทั้งนี้เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตขึ้น แต่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม จะส่งผลให้กระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าลดลง



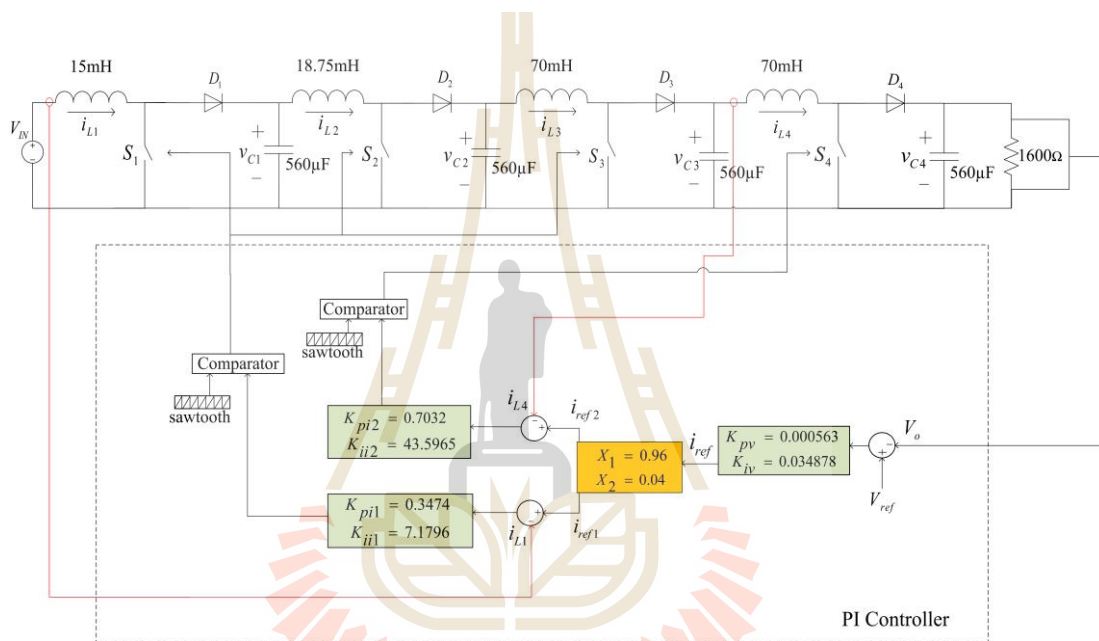
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{IN})

การจำลองสถานการณ์กรณีที่ 3 จะทำการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต โดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน (R) โดยจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V ทำการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานเป็น 3200 Ω และ 1600 Ω ที่วินาที 0 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.12 สังเกตเห็นว่าเมื่อทำการปรับโหลดตัวต้านทานลดลงจาก 3200 Ω และ 1600 Ω ตัวควบคุมพีไอพร้อมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการที่ 400V โดยในสภาวะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตจะการเปลี่ยนแปลงลดลงเพียงเล็กน้อยก่อนจะกลับเข้าสู่ค่าเดิมที่สภาวะอยู่ตัวเท่ากับ 400V รวมถึงกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโหลดตัวต้านทานที่ลดลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวก็มีผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันภายใต้สถานะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป



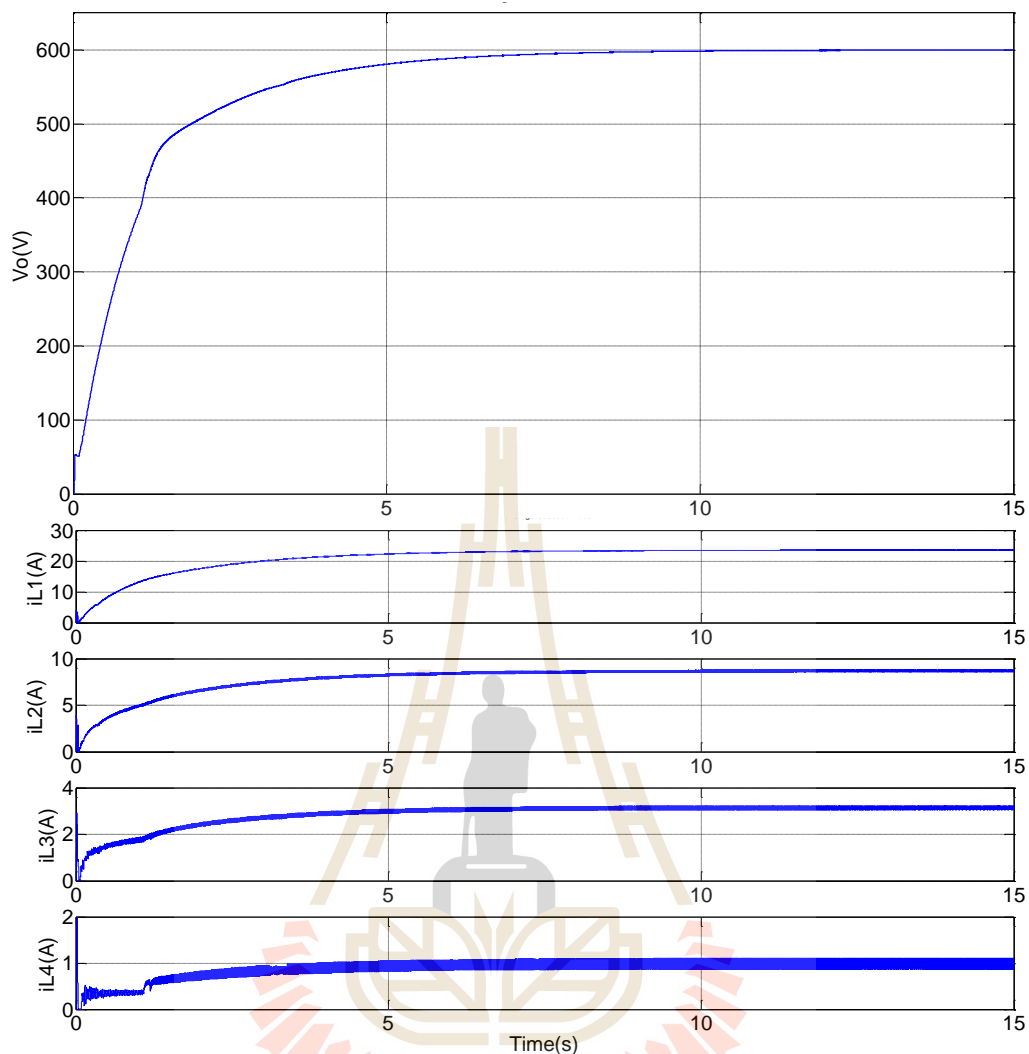
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R)

การจำลองสถานการณ์กรณีที่ 4 เป็นการจำลองสถานการณ์ วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันมากกว่าสามขั้นที่ทำงานร่วมกับตัวควบคุม ทั้งนี้เพื่อยืนยันว่าตัวควบคุมที่ไ้ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้กับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันที่มากกว่าสามขั้นได้ โดยจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 600V และแรงดันอินพุตเท่ากับ 20V โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ขั้น รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรและพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมที่ไ้ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ขั้นที่มีตัวควบคุม

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ขั้นแสดงดังรูปที่ 4.14 จะพบว่าเมื่อมีการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมและเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสให้เหมาะสมสำหรับวงจรบัสต์แบบสี่ขั้นแล้ว ตัวควบคุมที่ไ้ที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ไ้ได้ตามต้องการที่ 600V โดยกระแส i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} และ i_{L4} มีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.5A, 8.8A, 3.2A และ 1A ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวก็ไ้มีผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ไ้ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้กับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันที่มากกว่าสามขั้นขึ้นไปไ้

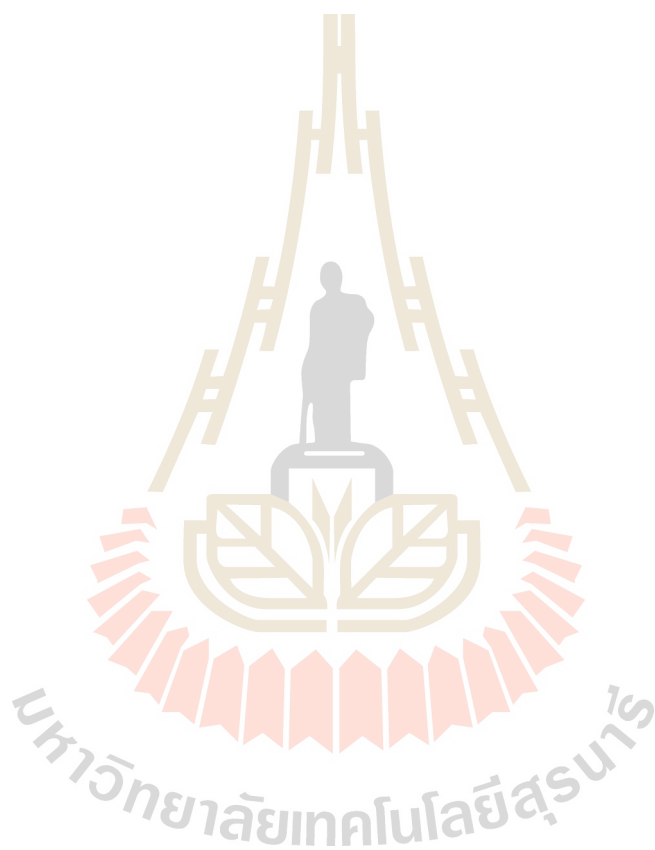


รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสี่ชั้น

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโครงสร้างการควบคุมวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ที่ได้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมสำหรับลูปควบคุมแรงดันและลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยมีการปรับค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะสมกับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป เพื่อควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ โดยได้ทำการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น ในสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสาม

ชั้นหรือมากกว่าสามชั้น ให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป ในบทความนี้จะกล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นที่มีตัวควบคุมเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้น เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร และให้วงจรดังกล่าวสามารถทำงานต่อในสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 5

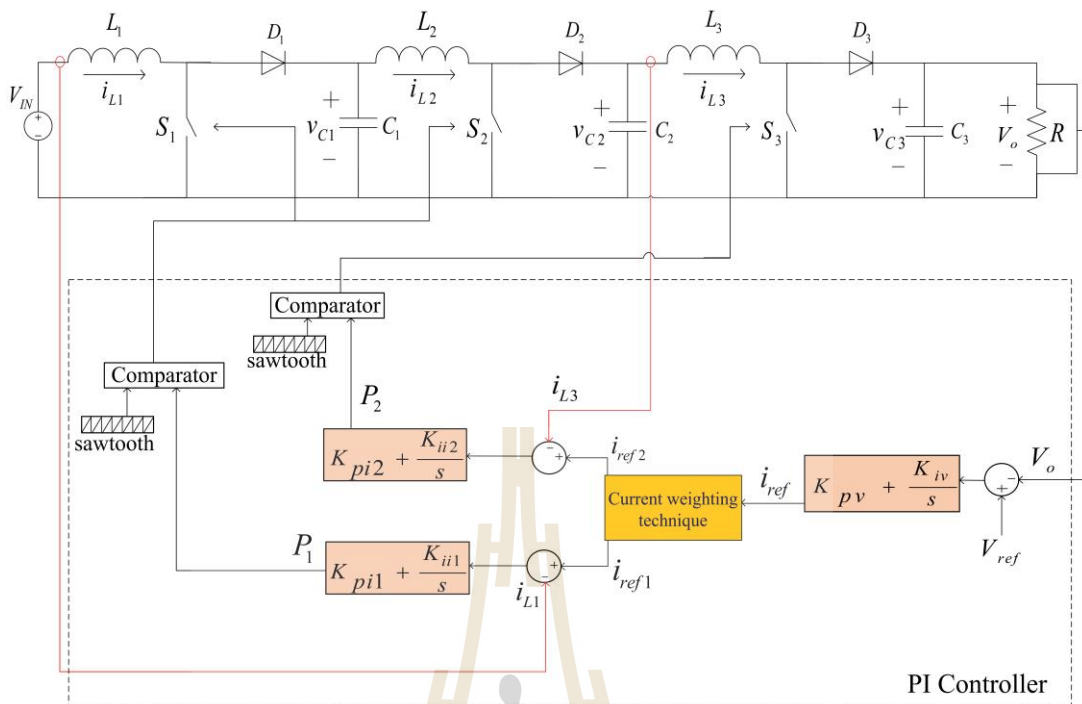
การตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม โดยวิธีการตรวจจับความผิดพลาดจะอาศัยการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมภายใต้สภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพลาดภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ซึ่งจะสังเกตพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ควบคุมกระแสทั้งสองรูปแล้วนำพฤติกรรมดังกล่าวไปใช้เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อให้สามารถลดผลกระทบที่มีต่อวงจรให้น้อยลงได้ โดยวงจรมีดังกล่าวยังคงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

5.2 พฤติกรรมของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นในสภาวะปกติและเมื่อเกิดความผิดพลาด

ในการสังเกตพฤติกรรมของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมภายใต้ความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร จะพิจารณาการทำงานในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพลาดในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ซึ่งจะอาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอที่พัฒนาขึ้นในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 โดยผลการจำลองสถานการณ์ จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงานแบบปกติและเกิดความผิดพลาด การสังเกตพฤติกรรมความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรได้ เพื่อช่วยลดผลกระทบที่มีต่อวงจรได้ โดยโครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมในสภาวะเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรแสดงดังรูปที่ 5.1



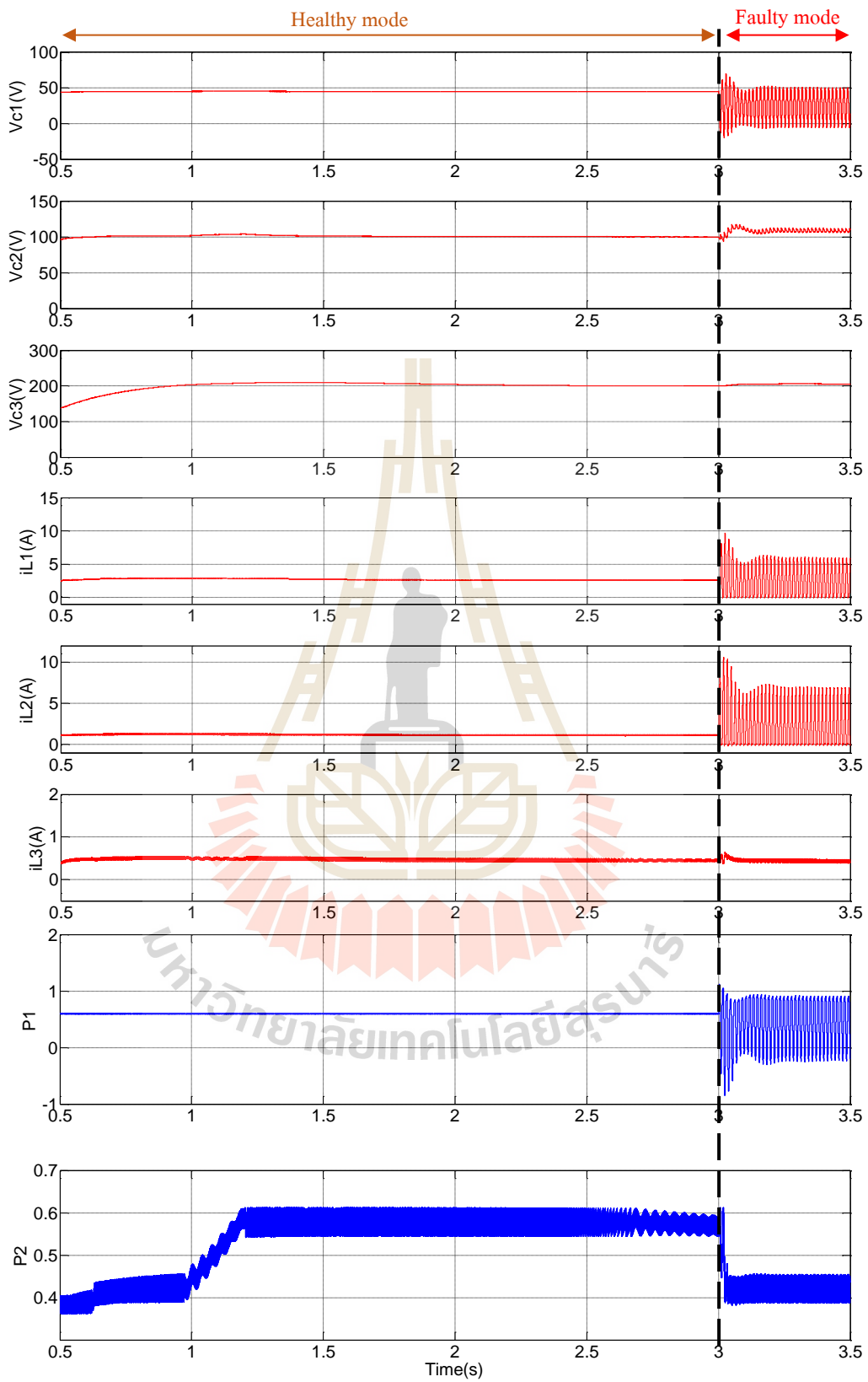
รูปที่ 5.1 โครงสร้างวงจรสำหรับศึกษาพฤติกรรมความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร

การจำลองสถานการณ์เพื่อใช้ในการสังเกตพฤติกรรมความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วยในการจำลองสถานการณ์ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 4 ซึ่งในการจำลองสถานการณ์จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพร่องเท่านั้น โดยจะแบ่งการจำลองสถานการณ์ออกเป็น 3 กรณีดังนี้ การจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 การจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 และการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 โดยกำหนดให้ทุกกรณีมีค่าแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V เพื่อใช้การศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวเปรียบเทียบกับผลการทดสอบวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่จะถูกกล่าวถึงในบทที่ 7 ต่อไป

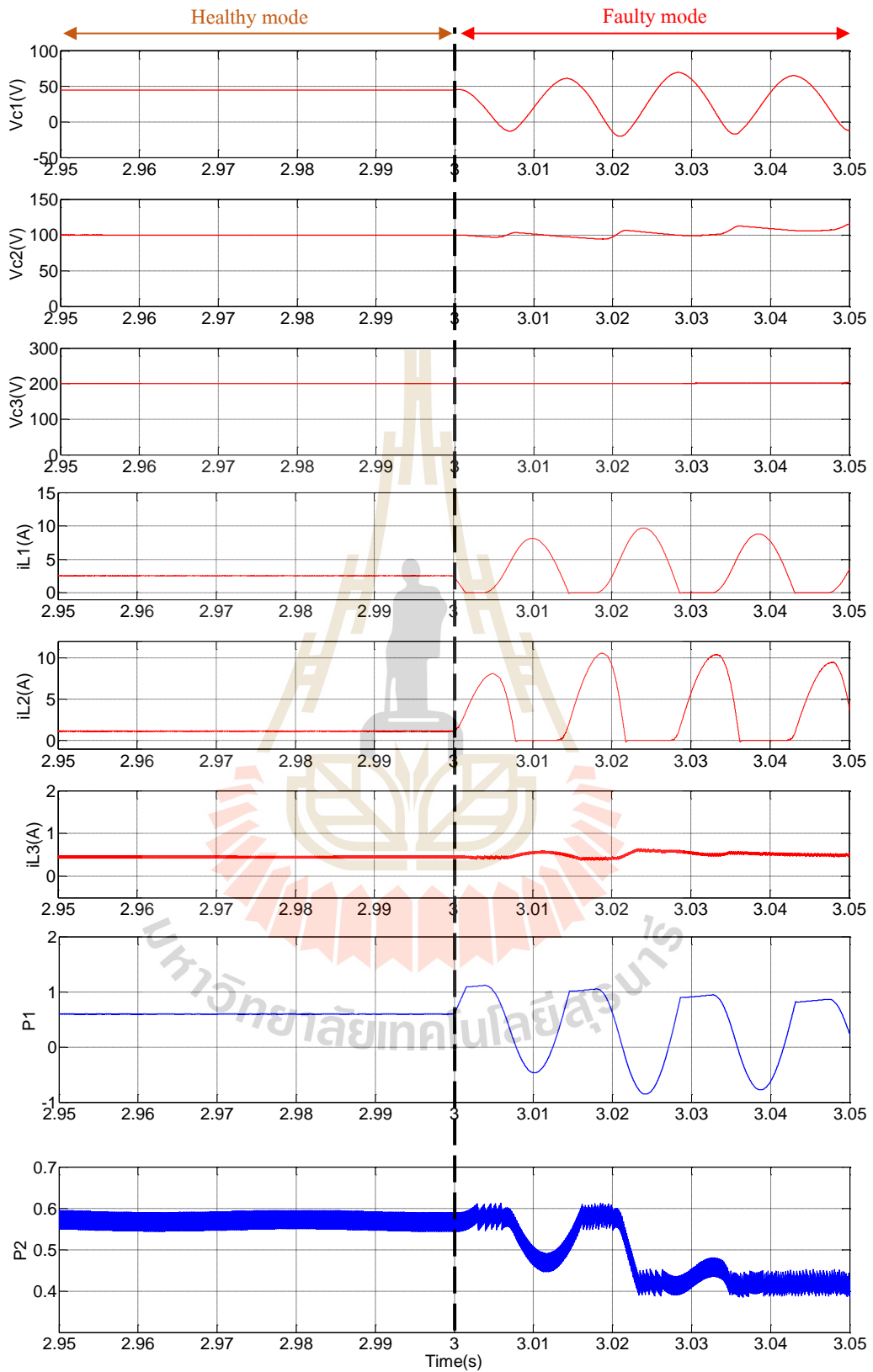
ในการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 จะทำการสร้างสถานการณ์ให้เกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่วินาทีที่ 3 โดยจะแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}) และสัญญาณควบคุมการสวิตช์ (P_1, P_2) ที่ปรากฏในรูปที่ 5.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพร่อง แล้วนำผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวมาพิจารณา

เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ต่อไป

จากการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 แสดงดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 เป็นภาพขยายให้เห็นพฤติกรรมความแตกต่างระหว่างสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติได้ชัดเจนขึ้น จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นในสภาวะปกติ (Healthy mode) ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการที่ 200V ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีผลที่สอดคล้องกันในช่วงสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 3 แต่ในสภาวะเกิดความผิดปกติ (Faulty mode) หรือหลังจากวินาทีที่ 3 จะเห็นได้ว่า v_{C1} , v_{C2} , i_{L1} และ i_{L2} นั้นเกิดการสั่นไกวเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยที่ค่าแรงดัน v_{C1} มีการสั่นไกวค่อนข้างสูง และกระแส i_{L1} มีค่าลดลงจนถึง 0A ก่อนมีการพุ่งขึ้นไปถึง 10A และเกิดการสั่นไกวอย่างต่อเนื่อง รวมถึงกระแส i_{L2} ก็มีการสั่นไกวเกิดขึ้นคล้ายกับกระแส i_{L1} ในขณะที่กระแส i_{L3} มีลักษณะไม่แตกต่างจากสภาวะปกติ ส่วนแรงดันเอาต์พุตหรือ v_{C3} นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นนั้นพยายามที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ ทั้งนี้รวมถึงสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 และ P_2 ก็มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดย P_1 มีการสั่นไกวค่อนข้างมาก ในขณะที่ P_2 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 0.6 เป็น 0.4 ดังนั้นในการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 สามารถนำผลการเปลี่ยนแปลงของ v_{C1} , v_{C2} , i_{L1} , i_{L2} , P_1 และ P_2 ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นอย่างมาก มาพิจารณาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์ S_1 ได้ อย่างไรก็ตามในการควบคุมการทำงานของวงจรมอเตอร์เพียงตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต และตัวตรวจจับกระแส i_{L1} และ i_{L3} เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงอาศัยค่ากระแส i_{L1} เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติสำหรับสวิตช์ S_1 ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



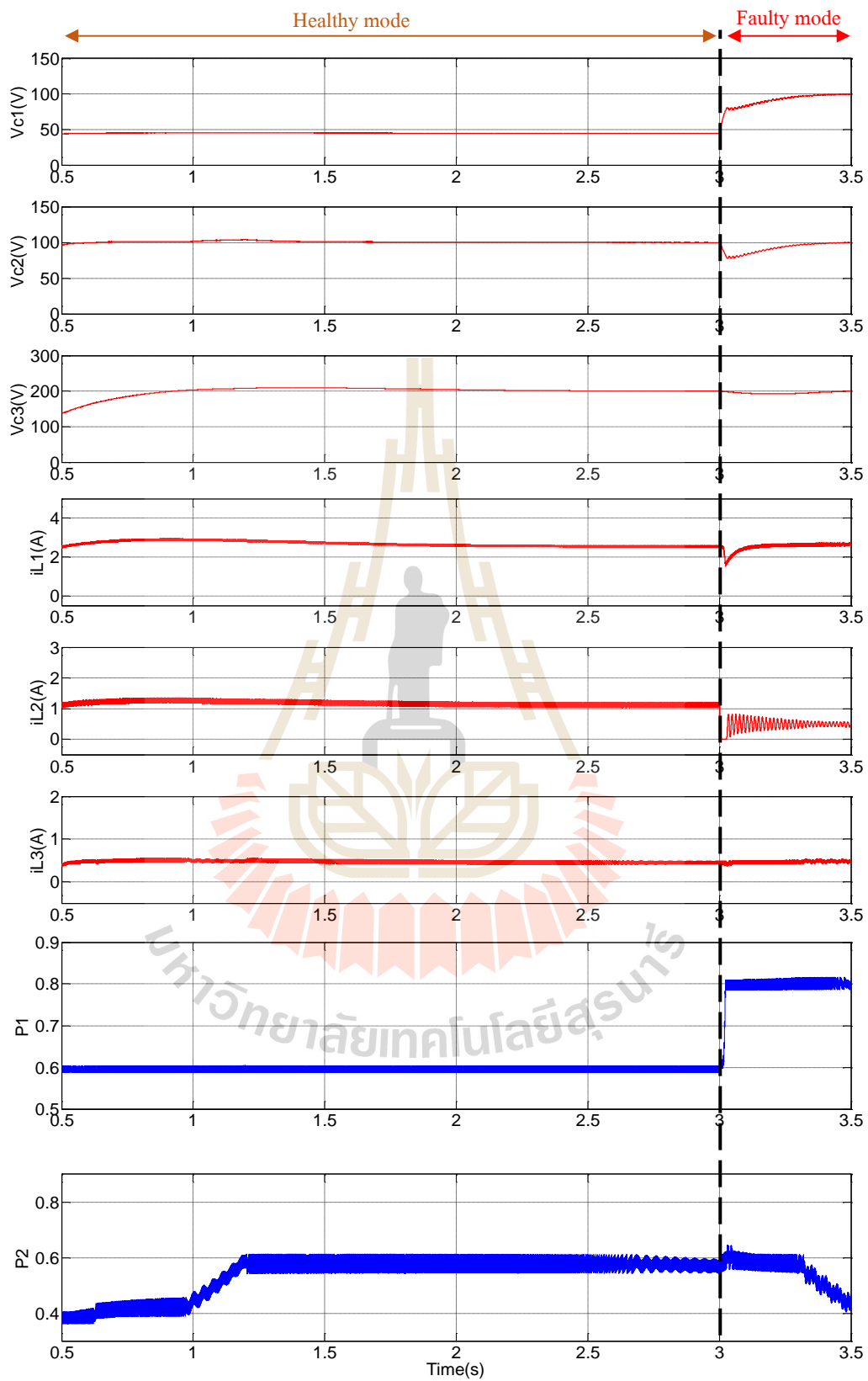
รูปที่ 5.2 พฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1



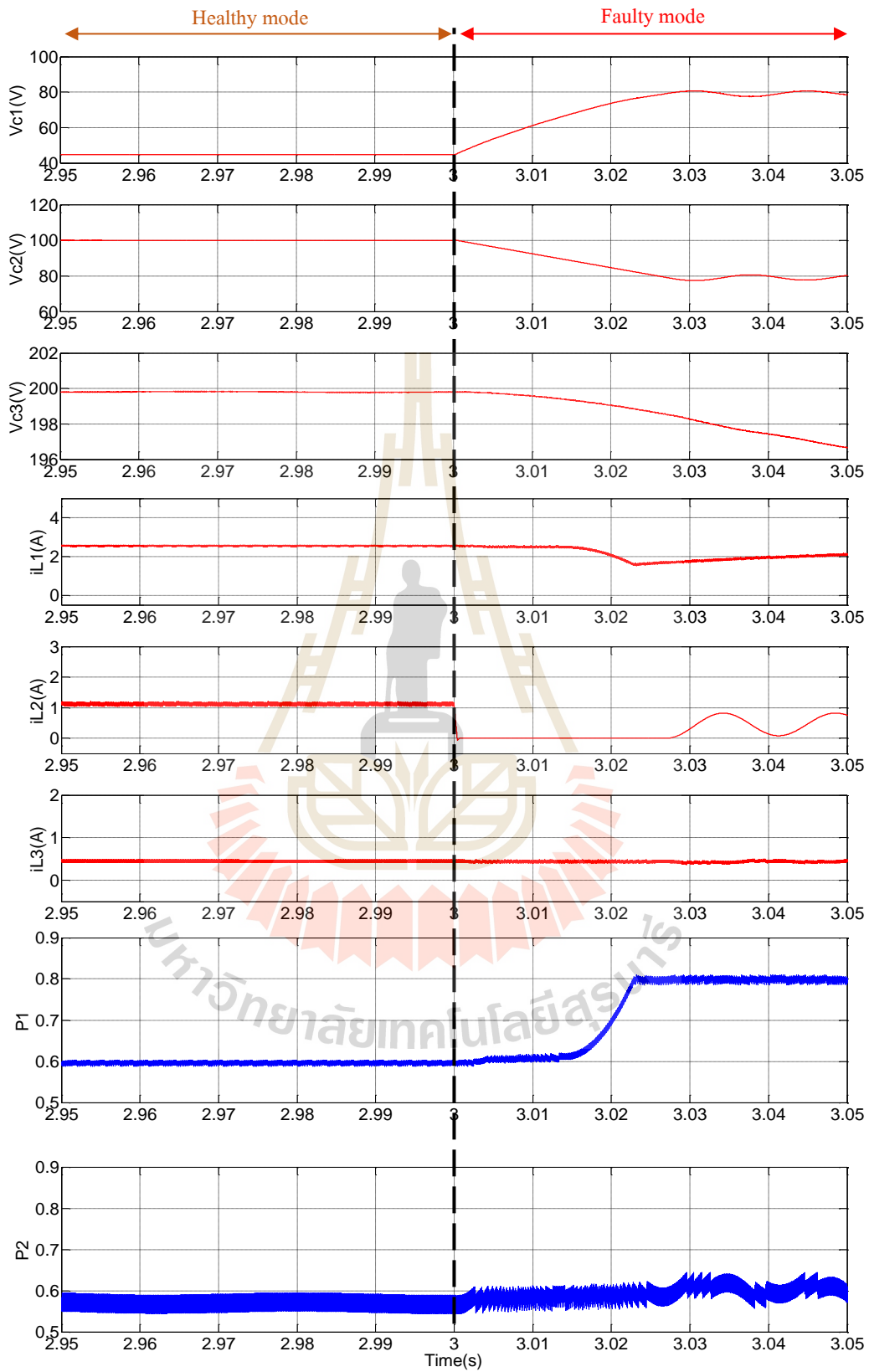
รูปที่ 5.3 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

ในกรณีถัดมาเป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 โดยจะกำหนดให้เกิดความผิดปกติที่วินาทีที่ 3 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5

จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงสภาวะปกติตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการและเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสก็สามารถแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสม ในสภาวะเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 3 เมื่อสวิตช์ S_2 มีการเปิดวงจร จะส่งผลให้แรงดัน v_{C1} มีการเพิ่มระดับแรงดันสูงขึ้นจาก 40V เป็น 100V และแรงดัน v_{C2} มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 100V ไปเป็น 80V ก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมในเวลาถัดมา ในขณะที่ v_{C3} มีลักษณะไม่แตกต่างจากในสภาวะปกติ ในส่วนกระแส i_{L1} หลังจากเกิดความผิดปกติจะมีการลดลงต่ำกว่า 2A และกลับเข้าสู่ใกล้เคียงค่าเดิม มีเพียงกระแส i_{L2} เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงและเกิดการสั่นไกวอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กระแส i_{L3} ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับในสภาวะปกติ และจากผลการจำลองสถานการณ์ยังพบว่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 0.6 ไปเป็น 0.8 ทันทีหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้น ในขณะที่ P_2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกหลังจากเกิดความผิดปกติ เมื่อเวลาผ่านไปสักระยะถึงมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ดังนั้นจึงสามารถอาศัยพฤติกรรมของ i_{L1} , i_{L3} , P_1 และ P_2 มาพิจารณาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์ S_2 ได้



รูปที่ 5.4 พฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2

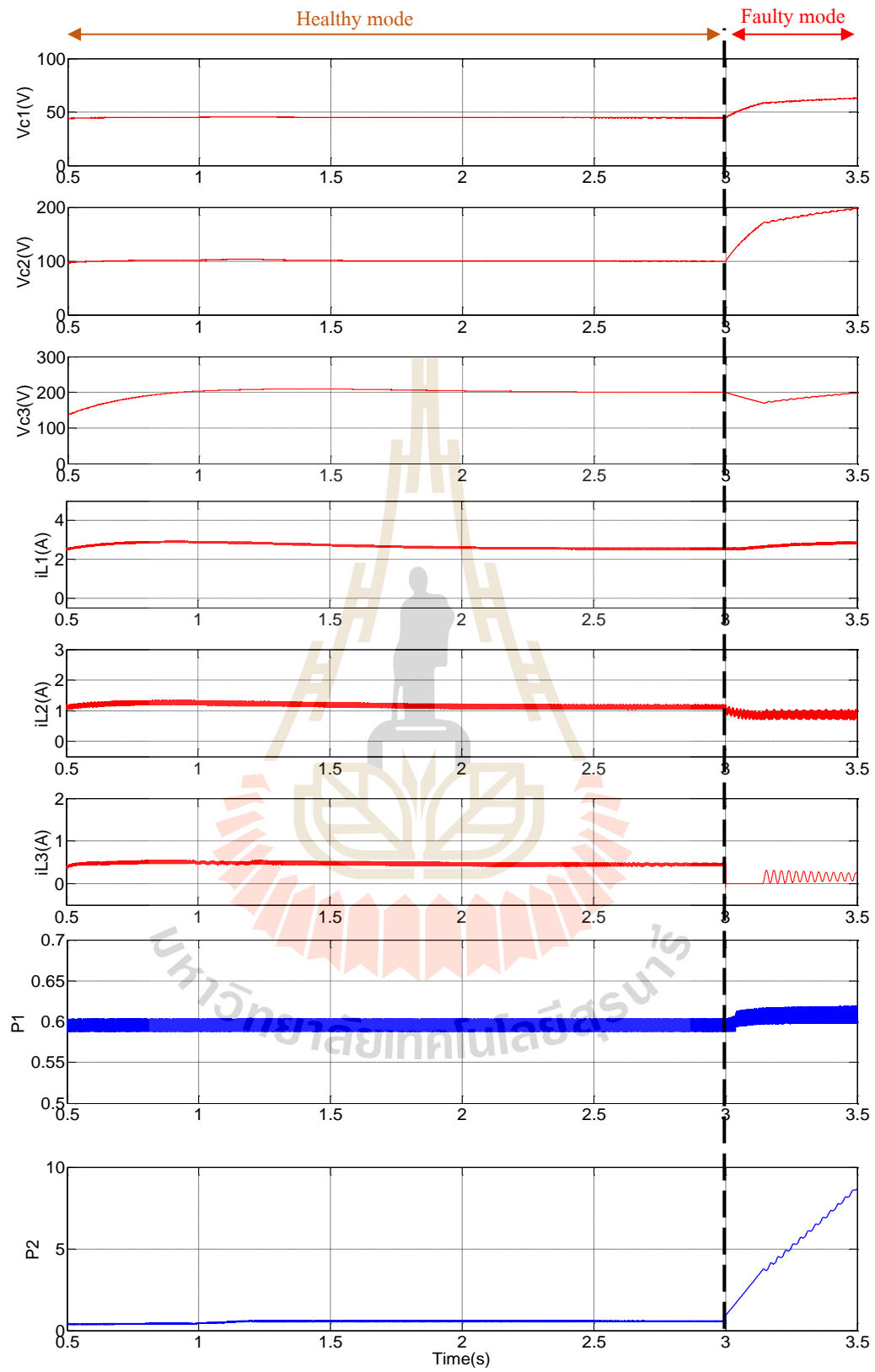


รูปที่ 5.5 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2

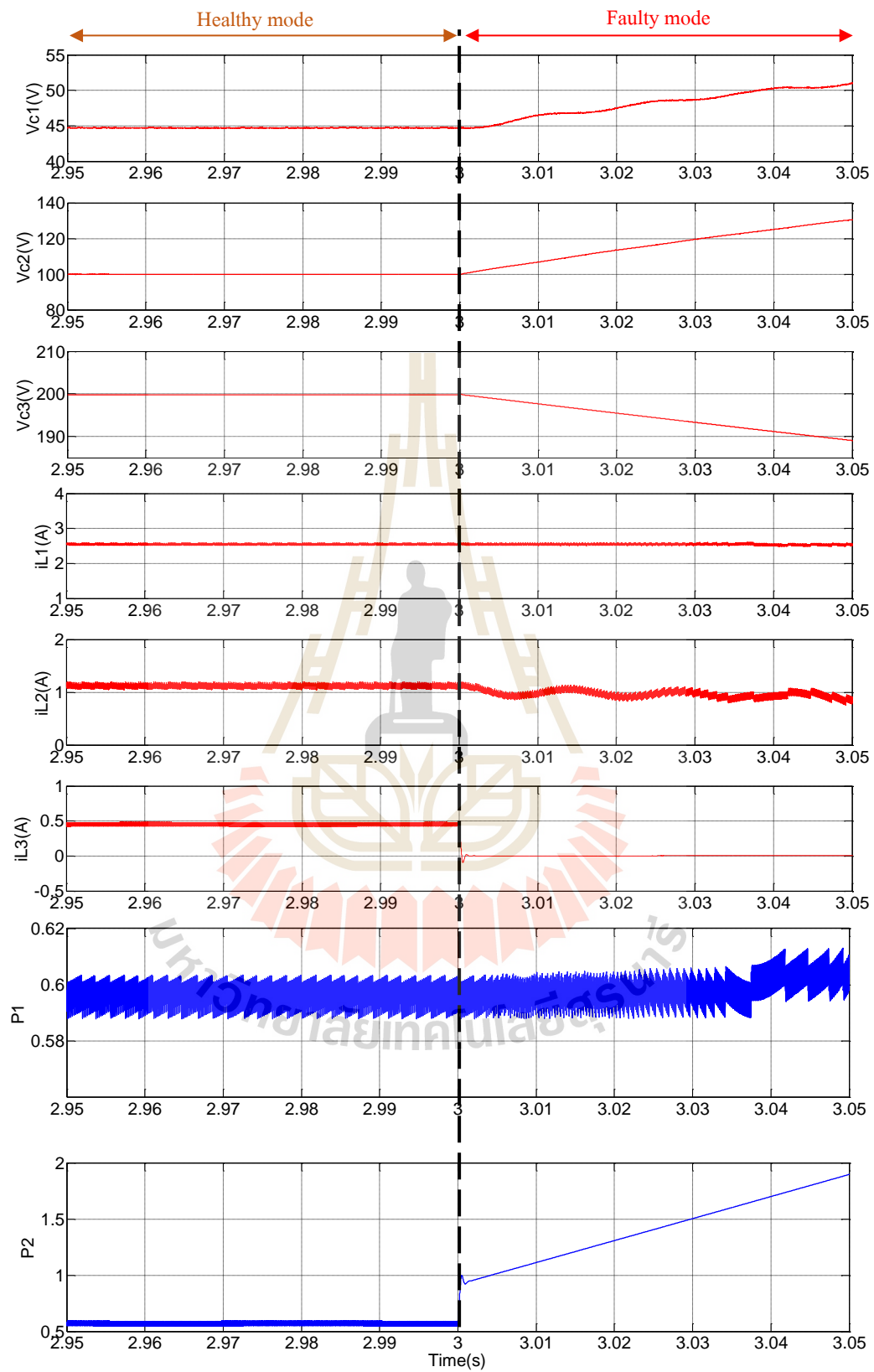
ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 สำหรับ วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม แสดงดังได้รูปที่ 5.6 และ 5.7 โดยนำ ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวมาพิจารณา เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิด วงจรที่สวิตช์ S_3 โดยกำหนดให้เกิดความผิดปกติที่วินาทีที่ 3 เป็นต้นไป

จากผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 แสดงดัง รูปที่ 5.6 และ 5.7 จะสังเกตเห็นว่าในสภาวะเกิดความผิดปกติหลังจากวินาทีที่ 3 แรงดัน v_{C1} กับ v_{C2} มีการเพิ่มระดับแรงดันที่สูงขึ้น โดยที่แรงดัน v_{C2} นั้นเพิ่มระดับแรงดันจาก 100V ไปเป็น 200V เนื่องจากแรงดันอ้างอิงกำหนดไว้ที่ 200V จึงส่งผลให้ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นพยายามที่จะรักษาระดับ แรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ ในส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} จะมีลักษณะคล้าย กับในสภาวะปกติ ในขณะที่กระแส i_{L2} มีการปรับตัวลดลงเพียงเล็กน้อย และกระแส i_{L3} มีการ เปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยพฤติกรรมคล้ายกับค่ากระแส i_{L2} ในกรณีเกิดความผิด ผิดที่สวิตช์ S_2 แต่จะมีค่ากระแสที่เป็น 0A ในช่วงระยะเวลาที่นานกว่า จึงส่งผลให้ค่าแรงดัน เอาต์พุตกลับเข้าสู่ 200V ได้ช้ากว่ากรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 นอกจากนี้ยังมีการ เปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนคือสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_2 ซึ่งมีการปรับเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังนั้น ในการสังเกตพฤติกรรมกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 แสดงให้เห็นว่าสามารถนำพฤติกรรม ของ i_{L3} และ P_2 ไปพิจารณาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์ S_3 ได้





รูปที่ 5.6 พฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3

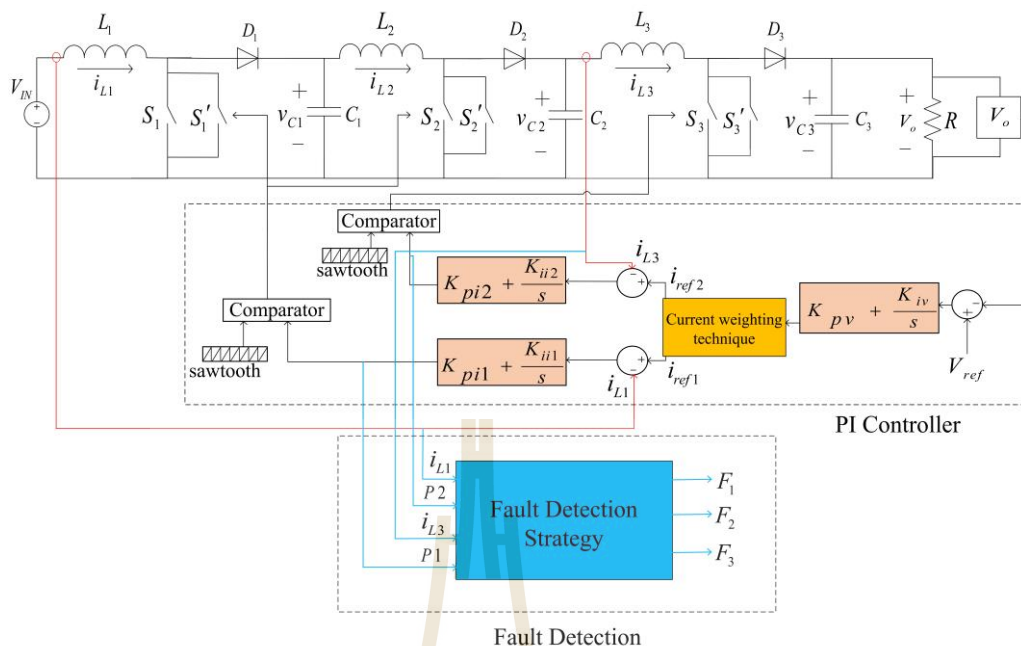


รูปที่ 5.7 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3

จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นว่า การสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม ภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ เมื่อบังคับตั้งกล่าวอยู่ในสภาวะเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร พฤติกรรมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงและเกิดการสั่นไกวขึ้นอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงสัญญาณควบคุมการสวิตช์ก็มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนเช่นกัน โดยมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์แต่ละตัว ดังนั้นจึงสามารถนำพฤติกรรมเหล่านี้ไปพิจารณา เพื่อใช้พัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นและให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเนื่องได้

5.3 การตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์

วิธีการตรวจจับความผิดปกติ (Fault Detection Strategy) แบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม ที่ปรากฏดังรูปที่ 5.5 จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียว (S_1, S_2, S_3) เกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรเท่านั้น และเมื่อตรวจพบว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดปกติขึ้นจะทำการสั่งให้สวิตช์ตัวสำรอง (S'_1, S'_2, S'_3) ที่ต่อขนานกับสวิตช์ที่เปิดวงจรทำงานแทนทันที เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้ความผิดปกติดังกล่าว (Fault Tolerance) โดยวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม จะอาศัยการพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจรดังกล่าว เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่อาจเกิดขึ้นกับสวิตช์แต่ละตัว จากการสังเกตการทำงานของวงจรพบว่าการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 และ S_3 สามารถอาศัยพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} และ i_{L3} ตามลำดับ ซึ่งมีตัวตรวจจับกระแสที่ใช้ในกระบวนการควบคุม รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 เนื่องจากไม่มีตัวตรวจจับกระแสสำหรับตัวกระแส i_{L2} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 จึงต้องอาศัยพฤติกรรมสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 และ P_2 รวมถึงกระแส i_{L1} และ i_{L3} เข้าช่วยในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในการพิจารณาค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะดำเนินการหาค่าความชันปกติ (Slope Normalization) ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} และ i_{L3} โดยจะนำค่าความชันปกติดังกล่าวร่วมกับสัญญาณควบคุมการสวิตช์ไปพิจารณาว่าเกิดความผิดปกติ (F_1, F_2, F_3) ที่สวิตช์ตัวใด เพื่อสามารถสั่งให้สวิตช์ตัวที่ได้สำรองไว้ทำงานทดแทนได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 5.8 โครงสร้างวงจรที่มีตัวควบคุมและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

โดย F_1, F_2 และ F_3 คือ สถานะตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 ตามลำดับ
 โดยที่ $F = 0$ คือ สถานะปกติ
 $F = 1$ คือ สถานะเกิดความผิดปกติ

พิจารณารูปที่ 5.8 วิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร ในส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} และ i_{L3} จะถูกนำมาหาค่าความชันของกระแสแสดงด้วย si_{L1} และ si_{L3} ตามลำดับ จากนั้นจึงนำไปหาค่าความชันปกติ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} เป็นลำดับต่อมา ซึ่งค่าความชันปกติสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

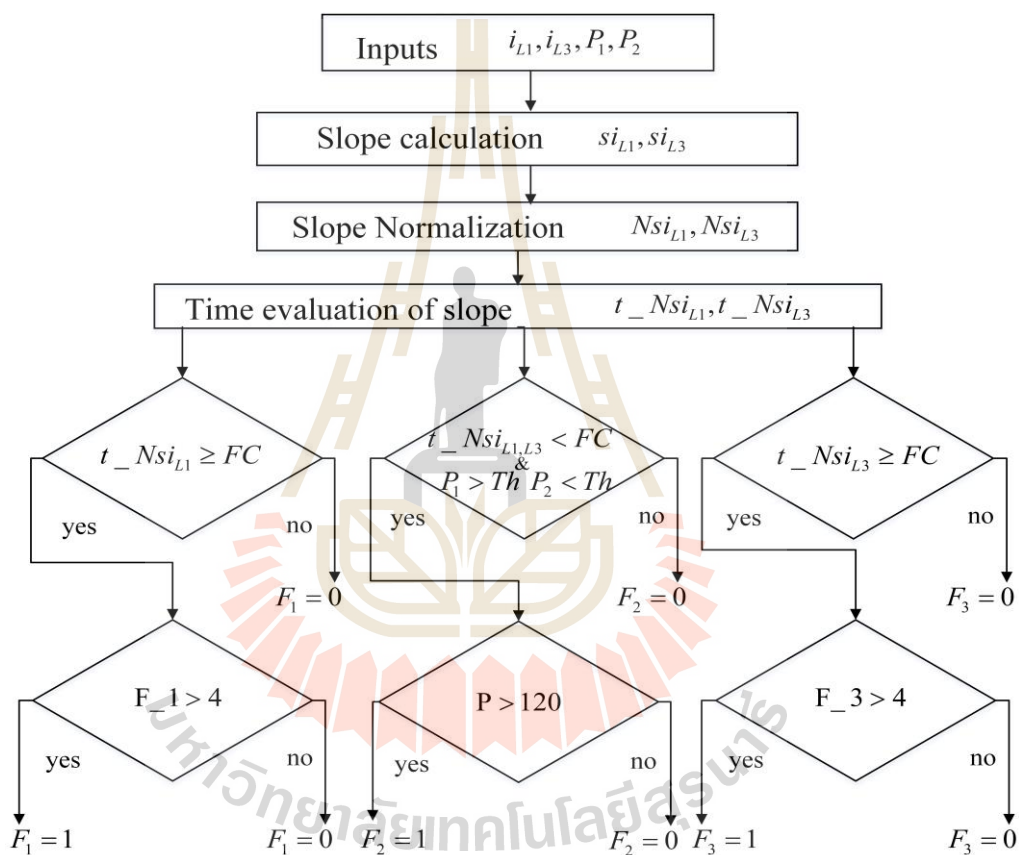
$$Nsi_{L1} = \frac{si_{L1}}{|si_{L1}|} \tag{5-1}$$

$$Nsi_{L3} = \frac{si_{L3}}{|si_{L3}|} \tag{5-2}$$

โดยที่ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} มีค่าเป็น 1 หรือ -1 เท่านั้น

จากสมการที่ (5-1) และ (5-2) เมื่อหาค่าความชันปกติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวแล้ว จะนำมาพิจารณาว่าในหนึ่งคาบเวลา (100 μ s) สำหรับความถี่สวิตช์ 10kHz ว่าอยู่ในกรณีใดที่กำหนดไว้ต่อไปนี่ กรณีที่หนึ่งคือ สภาวะปกติ จะมีค่าความชันปกติทั้ง 1 และ -1 ในหนึ่งคาบเวลา กรณีที่สองคือ สภาวะเกิดความผิดปกติ จะมีค่าความชันปกติเป็น 1 หรือ -1 เพียงค่าเดียวเท่านั้นในหนึ่งคาบเวลาหรือเรียกว่า Fault Cycle (FC) ซึ่งแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติแสดงดังรูปที่

5.9



รูปที่ 5.9 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

โดยที่ $t_{Nsi_{L1}}$ และ $t_{Nsi_{L3}}$ คือ จำนวนของค่าความชันปกติของกระแส i_{L1} และ i_{L3} ที่มีเพียงค่าเดียวในหนึ่งคาบเวลา

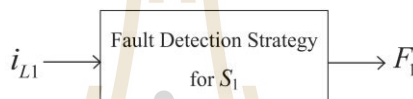
FC คือ จำนวนจุด sampling ในหนึ่งคาบเวลา

F_1 และ F_3 คือ จำนวนคาบเวลาที่เกิดความผิดปกติในสวิตช์ S_1 และ S_3 ตามลำดับ

P คือ จำนวนของ P_1 ที่มีค่ามากกว่า 0.8

โดยจากผลการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อการสังเกตพฤติกรรมของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม สามารถนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 โดยอาศัยค่าความชันปกติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} มาพิจารณาดังสมการที่ (5-3) หลังจากพิจารณาค่าความชันปกติ Nsi_{L1} ว่าอยู่ในสภาวะเกิดความผิดปกติเกินระยะเวลา แสดงว่าตรวจพบความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 และจะทำให้สวิตช์ตัวที่สำรองไว้ทำงานแทนทันที ทั้งนี้ทำการตรวจจับความผิดปกติถึงระยะเวลาเพื่อยืนยันว่าตรวจจับความผิดปกติไม่ผิดพลาด โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 แสดงดังรูปที่ 5.10

$$t_{Nsi_{L1}} \geq FC \quad (5-3)$$



รูปที่ 5.10 วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

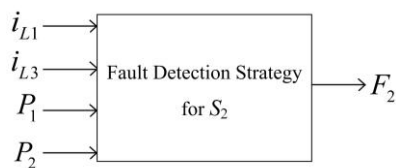
จากการการศึกษาพฤติกรรมของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุมกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ในการตรวจจับความผิดปกติดังกล่าวจะอาศัยค่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 และ P_2 โดยที่ P_1 มีค่ามากกว่าและ P_2 น้อยกว่าค่าเกณฑ์ Th ที่กำหนดไว้ แสดงดังสมการที่ (5-4) ทั้งนี้จำนวนของ P_1 ที่มากกว่า Th ต้องมีมากกว่า 120 จุดขึ้นไป รวมถึงพิจารณาค่าความชันปกติ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} ว่าอยู่ในกรณีสภาวะปกติ แสดงดังสมการที่ (5-5) และ (5-6) ถ้าเป็นไปตามนี้แสดงว่าตรวจพบความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ซึ่งแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 แสดงดังรูปที่ 5.11

$$P_1 > Th, P_2 < Th \quad (5-4)$$

$$t_{Nsi_{L1}} < FC \quad (5-5)$$

$$t_{Nsi_{L3}} < FC \quad (5-6)$$

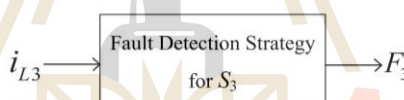
โดย Th คือ ค่าที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมความผิดปกติในสวิตช์ S_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8



รูปที่ 5.11 วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_2

ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 จะพิจารณาคล้ายกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 แต่จะอาศัยค่าความชันปกติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L3} มาพิจารณาดังสมการที่ (5-7) และเมื่อค่าความชันปกติ Nsi_{L3} อยู่ในสถานะเกิดความผิดปกติเกินสัปดาห์เวลาแสดงว่าตรวจพบความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 แสดงดังรูปที่ 5.12

$$t_Nsi_{L3} \geq FC \quad (5-7)$$



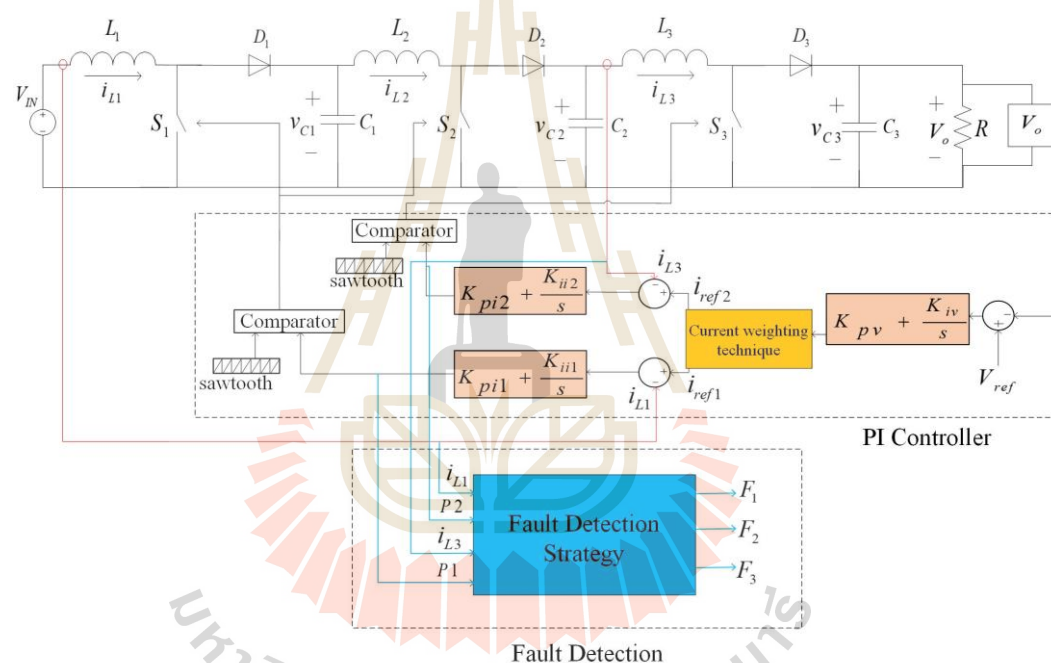
รูปที่ 5.12 วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_3

5.4 ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสคู่คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วย โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยการจำลองสถานการณ์จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นและตรวจสอบวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรว่าตรวจจับไม่ผิดพลาด และกรณีจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสคู่คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุมภายใต้สถานะความคงทนต่อความผิดปกติ เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเนื่อง ทั้งนี้จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติขึ้นเท่านั้น

5.4.1 ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร

ในการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อยืนยันวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป จะแบ่งออกเป็น 9 กรณีคือ การจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง โดยเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 การจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โดยเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 และการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน โดยเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ทั้งนี้โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.13



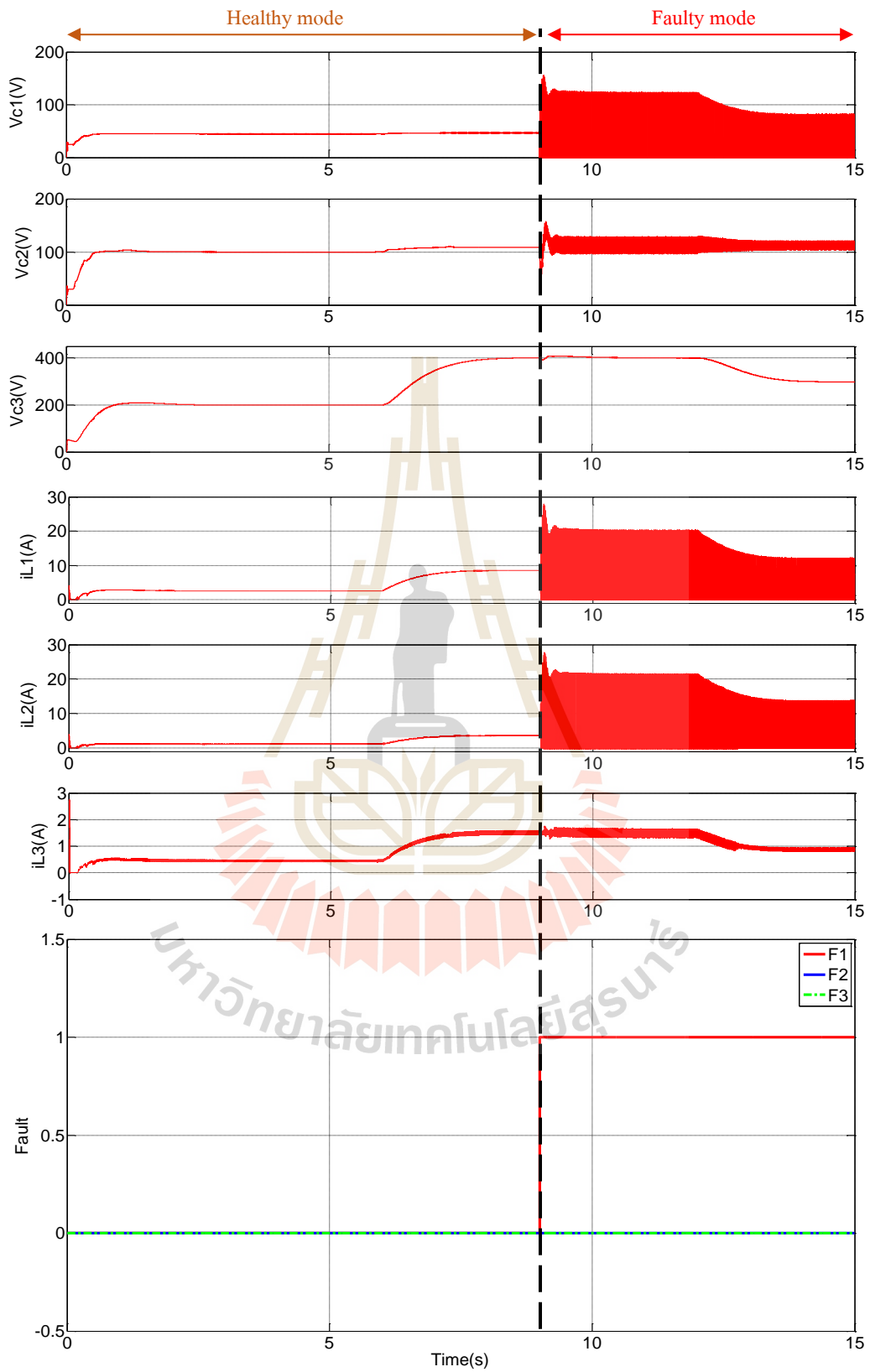
รูปที่ 5.13 โครงสร้างสำหรับการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติ

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ที่วินาทีที่ 9 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V 400V และ 300V ที่วินาทีที่ 0, 6 และ 12 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.14 จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีผลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต (v_{C3}) ให้ได้ 200V และเพิ่มเป็น 400V ที่วินาทีที่ 6 ตามต้องการ โดยวิธีการตรวจจับความผิดปกติไม่มีการตรวจจับผิดพลาดกรณีเปลี่ยนจุดการทำงานดังกล่าว และในช่วงหลังจากเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 9 จะ

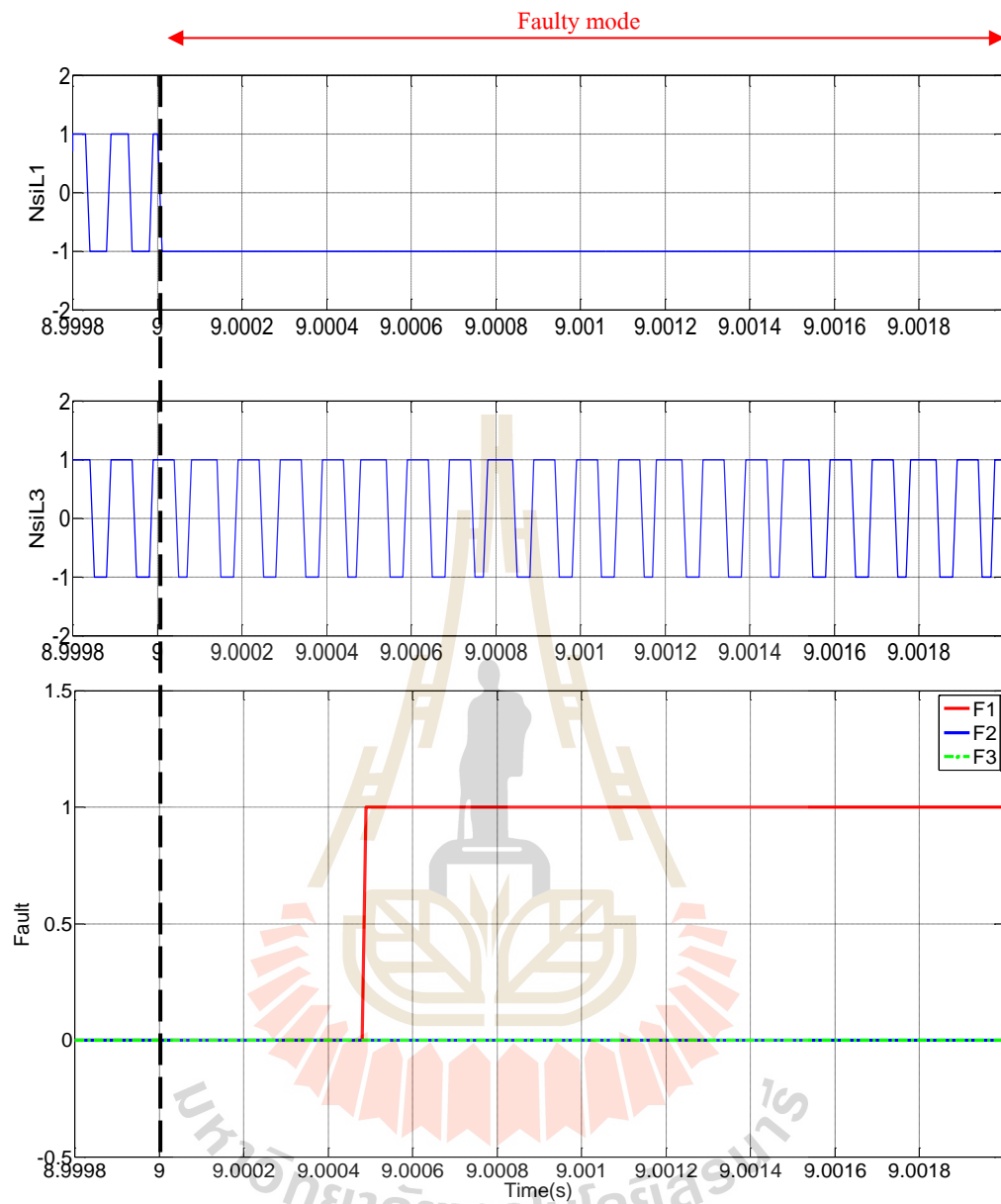
พบว่าแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} กระแส i_{L1} และ i_{L2} มีการสั้นไกวเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับแรงดันเอาต์พุตนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิม เนื่องจากตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นพยายามที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ ทั้งนี้วิธีการตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับพบความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง โดยสังเกตได้จากค่าสัญญาณ Fault ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0 เป็น 1 แสดงดังรูปที่ 5.14

ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ได้อาศัยค่ากระแส i_{L1} เพื่อหาค่าความชันปกติ Nsi_{L1} ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.15 จะพบว่าหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นที่สวิตช์ S_1 ที่วินาทีที่ 9 ค่าความชันปกติ Nsi_{L1} จะมีค่าเป็น -1 เพียงค่าเดียว ซึ่งแตกต่างจากค่าความชันปกติ Nsi_{L3} ที่มีลักษณะเหมือนกับในสถานะปกติ ทั้งนี้ค่าความชันปกติ Nsi_{L1} มีลักษณะตรงตามวิธีการตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์ S_1 ที่พัฒนาขึ้น กล่าวคือมีค่าช่วงหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นเป็น 1 หรือ -1 เพียงค่าเดียวมากกว่า 4 คาบเวลา ดังนั้นจึงสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้โดยใช้เวลาในตรวจจับประมาณ $500\mu s$ หรือ $0.5ms$ และไม่มีการตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว



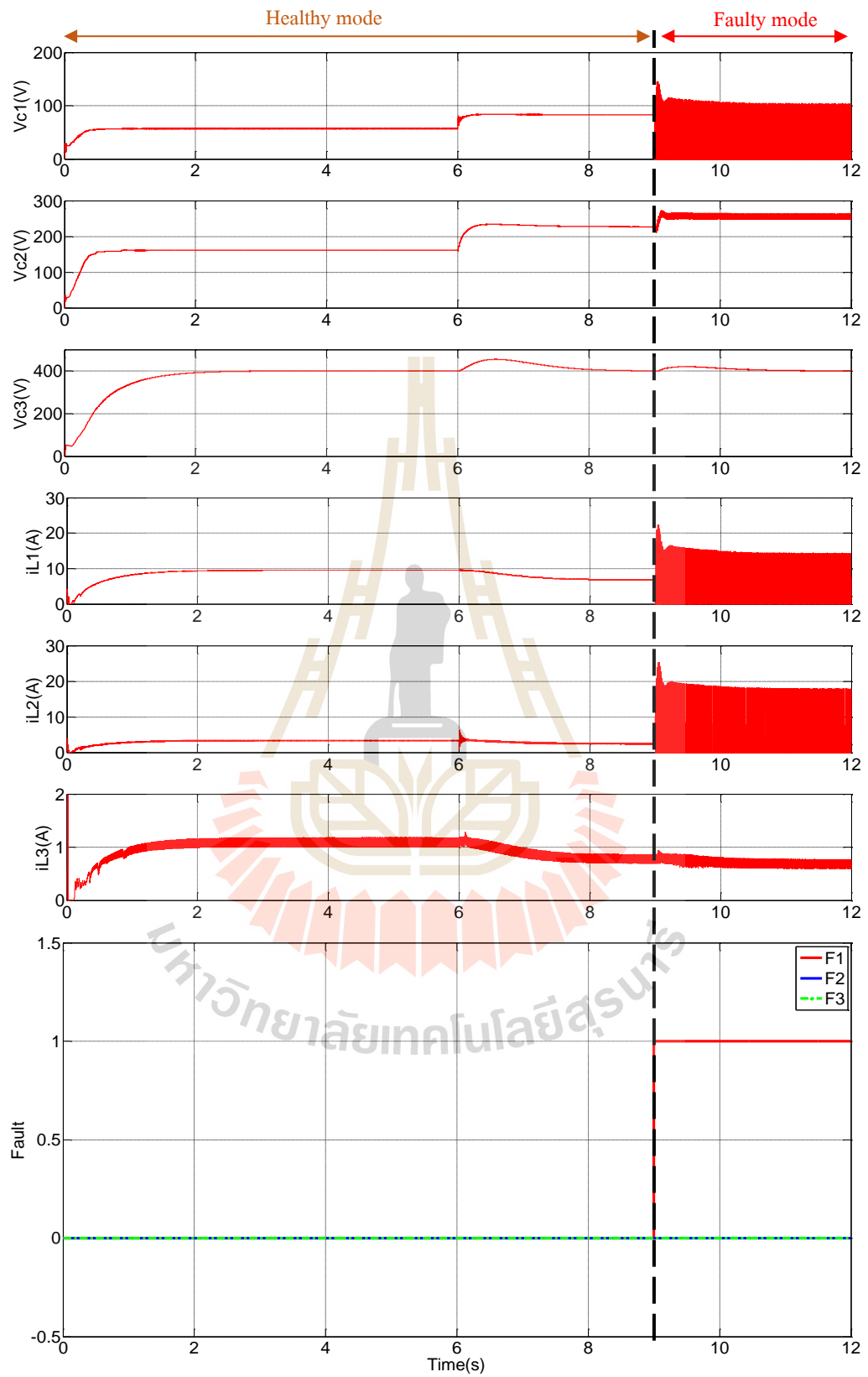


รูปที่ 5.14 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

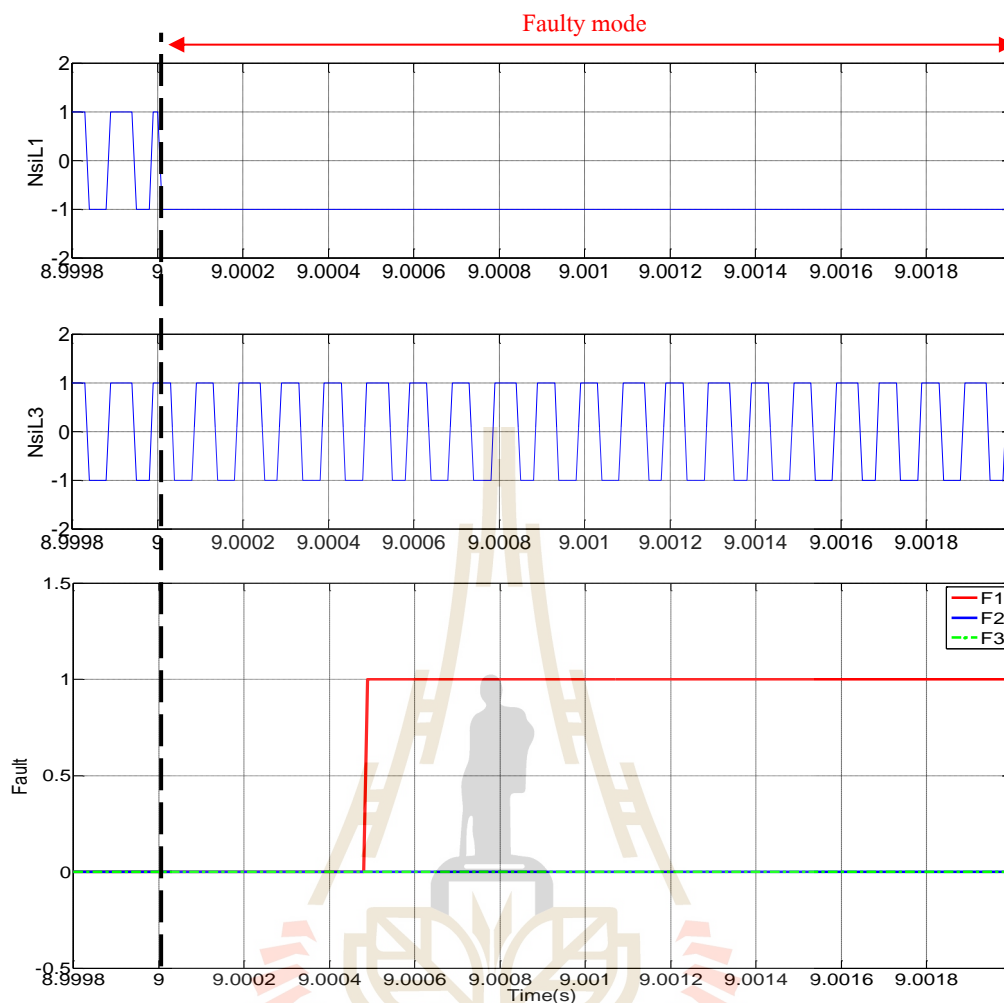


รูปที่ 5.15 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิทช์ S_1

ในการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต (V_{IN}) โดยที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 20V และทำการปรับเปลี่ยนเป็น 30V ที่วินาทีที่ 6 จากนั้นมีความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์ S_1 ในวินาทีที่ 9 ทั้งนี้กำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V จากรูปที่ 5.16 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติ ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการที่ 400V แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่วินาทีที่ 6 ในส่วนของค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว เมื่อมีการเพิ่มค่าแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาช่วงเกิดความผิดพลาดขึ้นที่วินาทีที่ 9 จะพบว่าแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} กระแส i_{L1} และ i_{L2} มีการเปลี่ยนแปลงสั้นๆ เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับแรงดันเอาต์พุตนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และยังคงสามารถรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามต้องการ ทั้งนี้วิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ได้อาศัยค่ากระแส i_{L1} เพื่อหาค่าความชันปกติ $Ns_{i_{L1}}$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.17 จะพบว่าหลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้นที่สวิตช์ S_1 ที่วินาทีที่ 9 ค่าความชันปกติ $Ns_{i_{L1}}$ จะมีค่าเป็น -1 เพียงค่าเดียว ซึ่งแตกต่างจากในสภาวะปกติที่มีค่าทั้ง 1 และ -1 ในหนึ่งคาบเวลาดังนั้นจึงสามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ โดยใช้เวลาในตรวจจับประมาณ 500 μ s หรือ 0.5ms และไม่มีการตรวจจับความผิดพลาดที่ผิดพลาดในช่วงเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ทั้งนี้จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ เนื่องจากมีสวิตช์หลายตัวในวงจร แต่ก็ส่งผลให้วงจรมีสมรรถนะที่ลดลงเป็นอย่างมากเช่นเดียวกัน

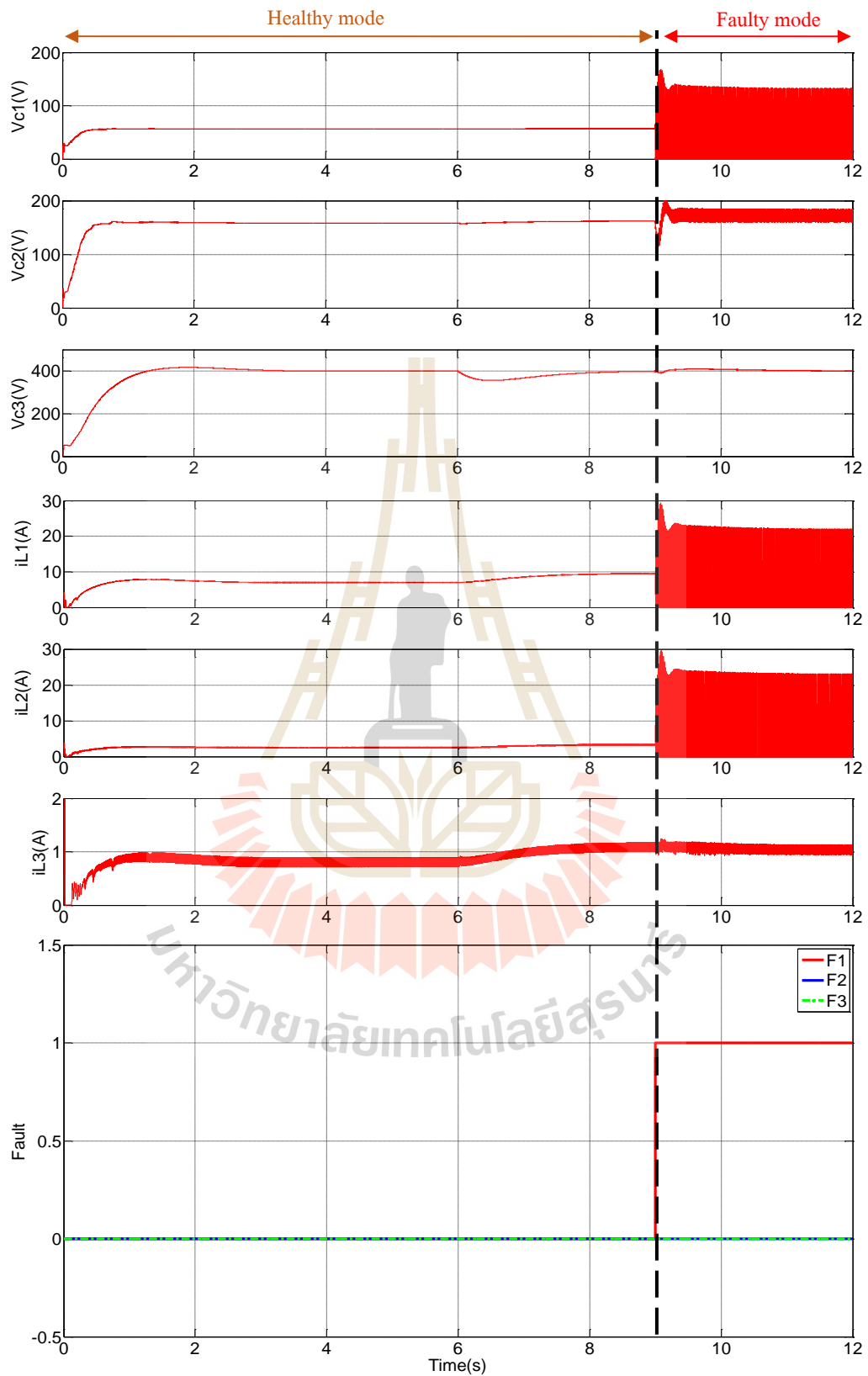


รูปที่ 5.16 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

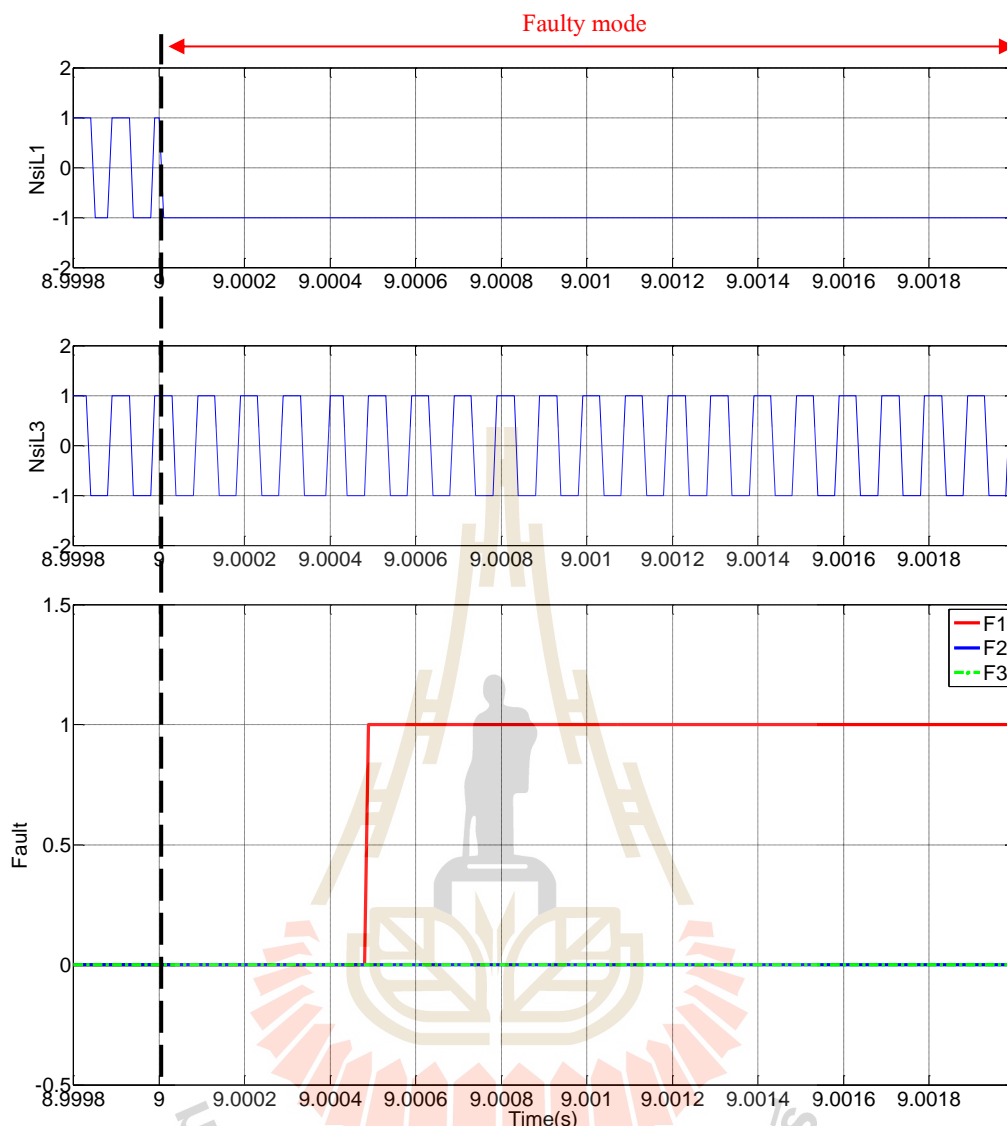


รูปที่ 5.17 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

การจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน (R) โดยเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ที่วินาทีที่ 9 เมื่อกำหนดให้โหลดตัวต้านทานเท่ากับ $3200\ \Omega$ และ $1600\ \Omega$ ที่วินาทีที่ 0 และ 6 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.18 ทั้งนี้แรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 400V จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ รวมถึงเมื่อทำการลดโหลดตัวต้านทานก็จะส่งผลให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ในสถานะเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 9 จะสังเกตเห็นว่าแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} กระแส i_{L1} และ i_{L2} มีการเปลี่ยนแปลงเกิดการสั่นไหวขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมที่ 400V โดยจากรูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นว่าค่าความชันปกติ $Ns_{i_{L1}}$ มีลักษณะตามวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ดังนั้นจะเห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ $500\ \mu\text{s}$ หรือ 0.5ms



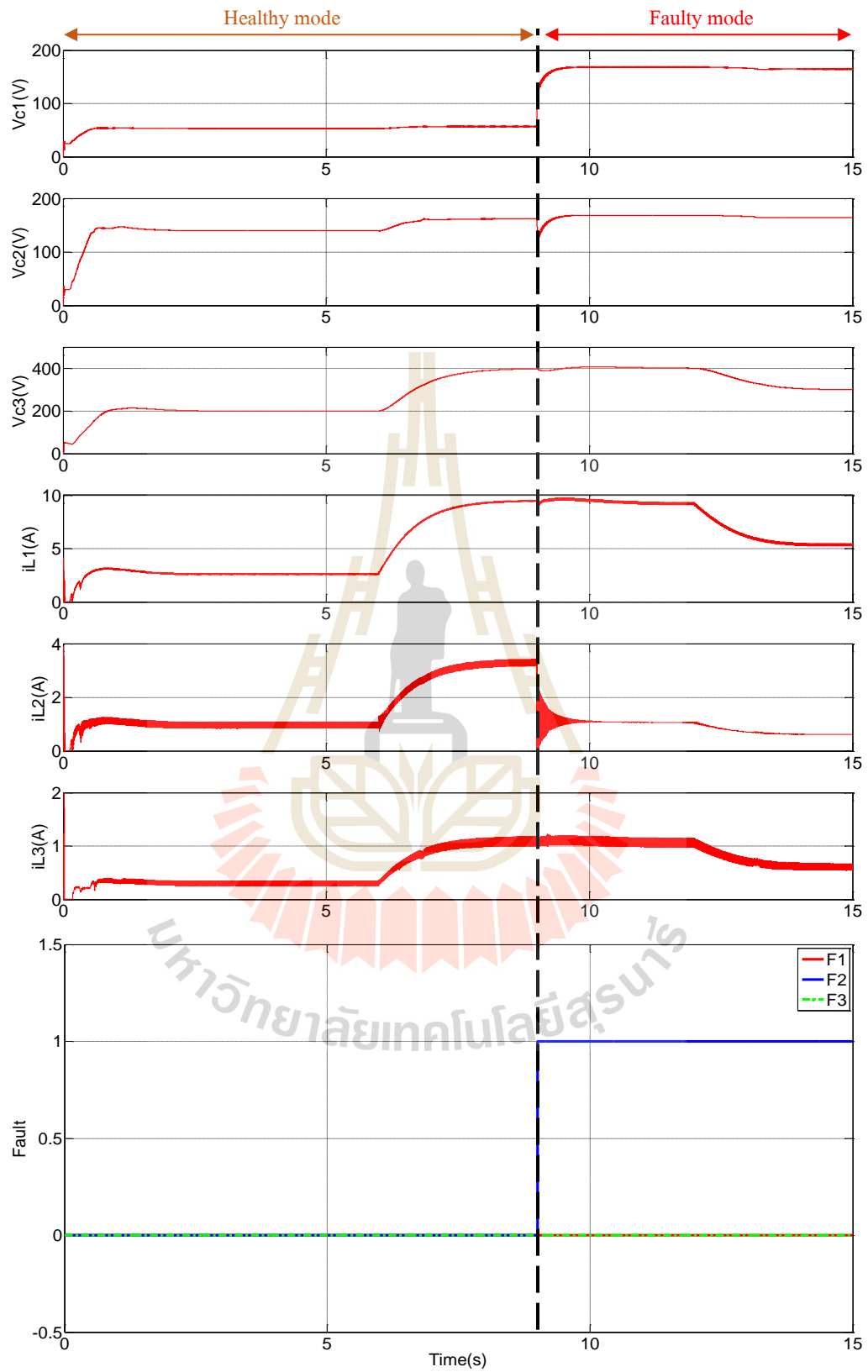
รูปที่ 5.18 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวด้านทานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1



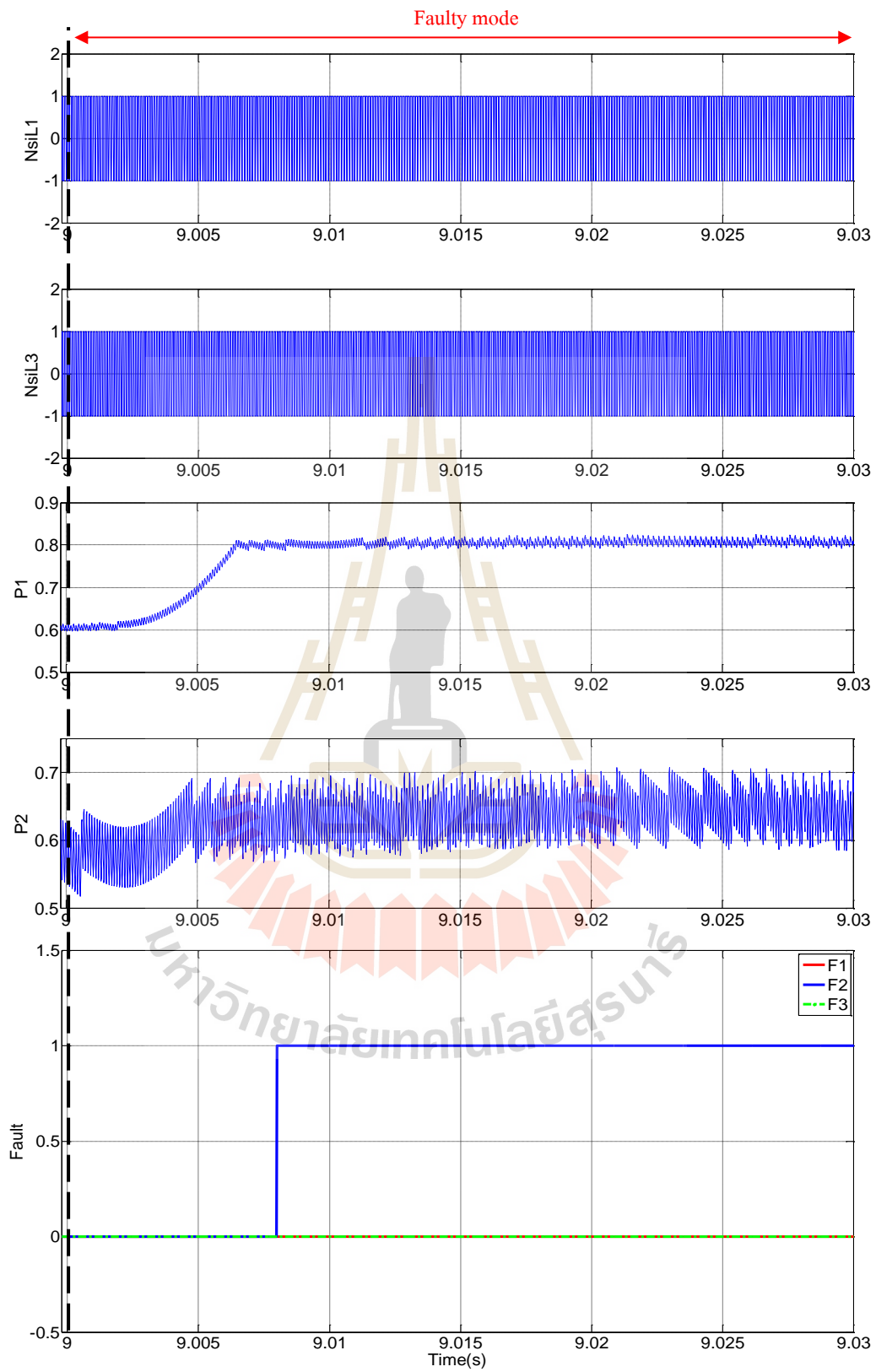
รูปที่ 5.19 ผลจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวด้านทานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่วินาทีที่ 9 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V 400V และ 300V ที่วินาทีที่ 0, 6 และ 12 ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.20 จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวพบว่าในสภาวะการทำงานปกติตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ และวิธีการตรวจจับความผิดปกติไม่มีการตรวจพบความผิดปกติกรณีที่มีการเปลี่ยนจุดการทำงาน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าสถานะการตรวจจับความผิดปกติ และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่วินาทีที่ 9 จะสังเกตเห็นว่าแรงดัน v_{C1} จะมีการปรับ

ตัวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสวิตช์ S_2 หยุดทำงาน ส่วนแรงดัน v_{C2} และ v_{C3} มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และยังคงสามารถรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามต้องการ กระแส i_{L2} มีการเปลี่ยนแปลงค่าลดลงและเกิดการสั่นไกวอย่างมากหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้น แต่ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์ S_2 จะอาศัยค่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 , P_2 ค่าความชันปกติ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} ในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยจากรูปที่ 5.21 แสดงให้เห็นว่าค่าความชันปกติ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} มีค่าทั้ง 1 และ -1 ในหนึ่งคาบเวลาหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้น หรือมีลักษณะเหมือนในสภาวะปกติ ส่วนค่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 มีค่าที่มากกว่า 0.8 เนื่องจากสวิตช์ S_2 หยุดทำงาน จึงส่งผลให้สวิตช์ S_1 รับภาระหน้าที่ที่หนักขึ้น และ P_2 ที่น้อยกว่า 0.8 หรือมีค่าใกล้เคียงค่าเดิมในสภาวะปกติ จากค่าดังกล่าวมีลักษณะตามวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์ S_2 ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นจึงสามารถตรวจจับความผิดปกติโดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 8ms ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์ S_2 จะใช้เวลาตรวจจับนานกว่าสวิตช์ตัวอื่น ๆ เนื่องจากมีเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติมากกว่าสวิตช์ตัวอื่น ๆ ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว รวมถึงไม่มีการตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดภายใต้สถานการณ์ทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ แม้มีความผิดปกติเกิดขึ้นด้วยคุณสมบัติคงทนต่อความผิดปกติ เนื่องจากมีสวิตช์หลายตัวในวงจร แต่อย่างไรก็ตามสวิตช์ที่เหลือยังคงทำงานต่อไปด้วยภาระที่สูงขึ้น



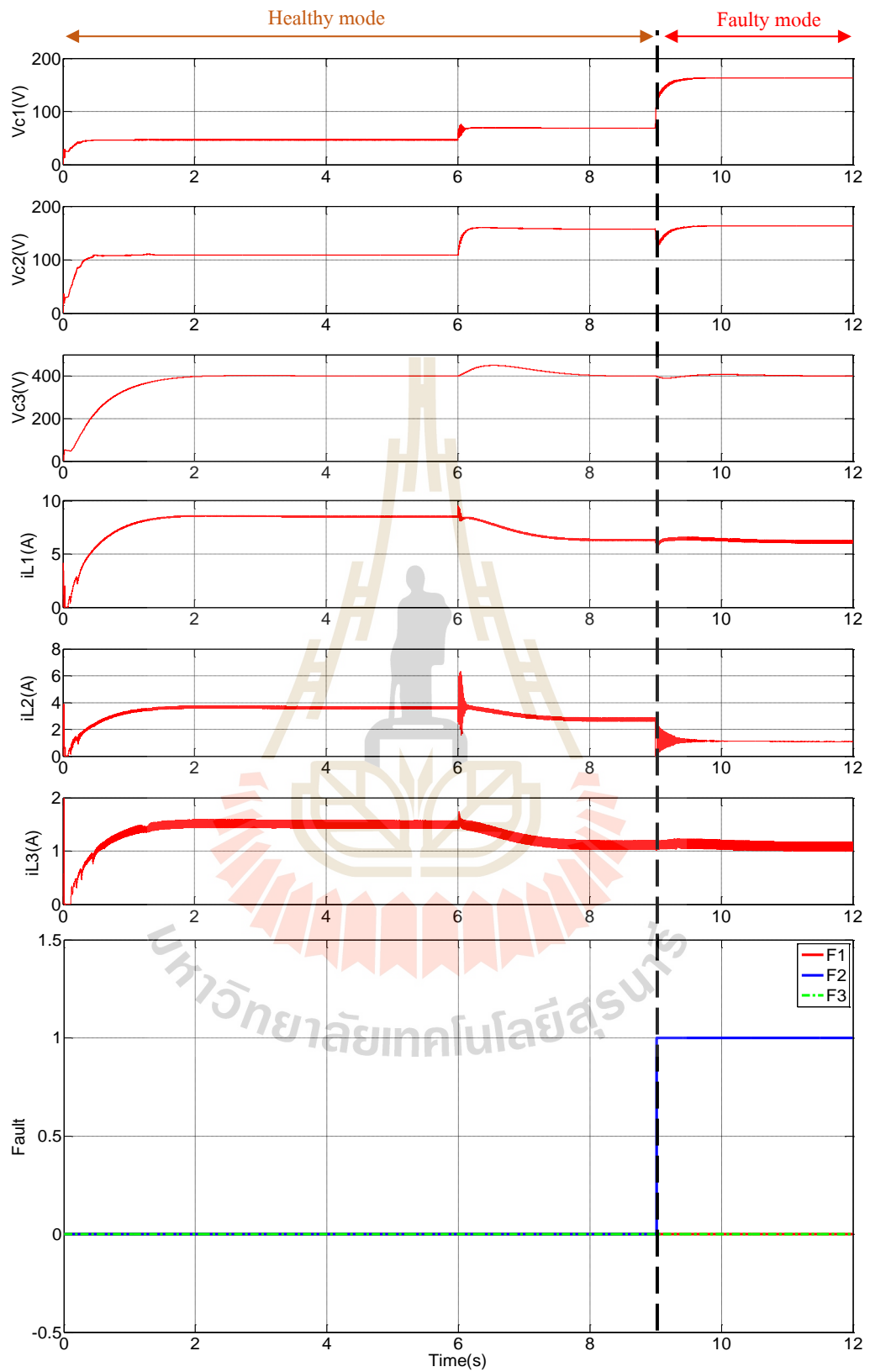
รูปที่ 5.20 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2



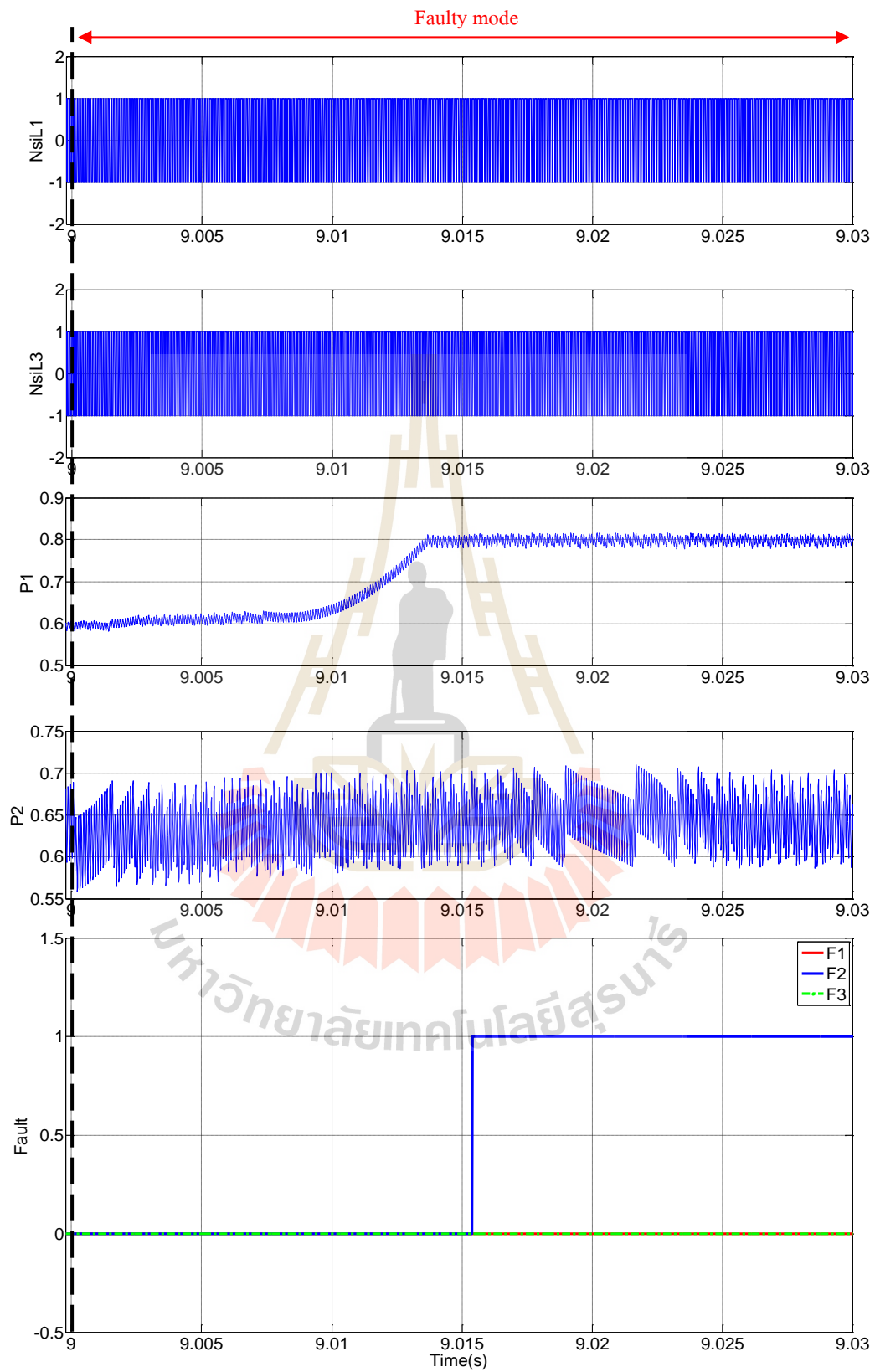
รูปที่ 5.21 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2

ในการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โดยที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 20V และทำการปรับเปลี่ยนเป็น 30V ที่วินาทีที่ 6 จากนั้นมีความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์ S_2 ในวินาทีที่ 9 ทั้งนี้กำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V จากรูปที่ 5.22 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการที่ 400V แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่วินาทีที่ 6 และเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น จะสังเกตเห็นว่าแรงดัน v_{C1} จะมีการปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น ส่วนแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย กระแส i_{L2} มีการเปลี่ยนแปลงค่าลดลงและเกิดการสั่นไหวอย่างมาก โดยมีลักษณะเหมือนกันกับกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_2 ที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง ทั้งนี้จากรูปที่ 5.23 แสดงให้เห็นว่าค่าความชันปกติ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} มีลักษณะเหมือนในสภาวะปกติ ส่วนค่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 มีค่าที่มากกว่า 0.8 และ P_2 ที่น้อยกว่า 0.8 หรือมีค่าใกล้เคียงค่าเดิมในสภาวะปกติ จากค่าดังกล่าวสามารถที่จะตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์ S_2 โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 15ms ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว รวมถึงไม่มีการตรวจจับความผิดพลาดที่ผิดพลาดภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป





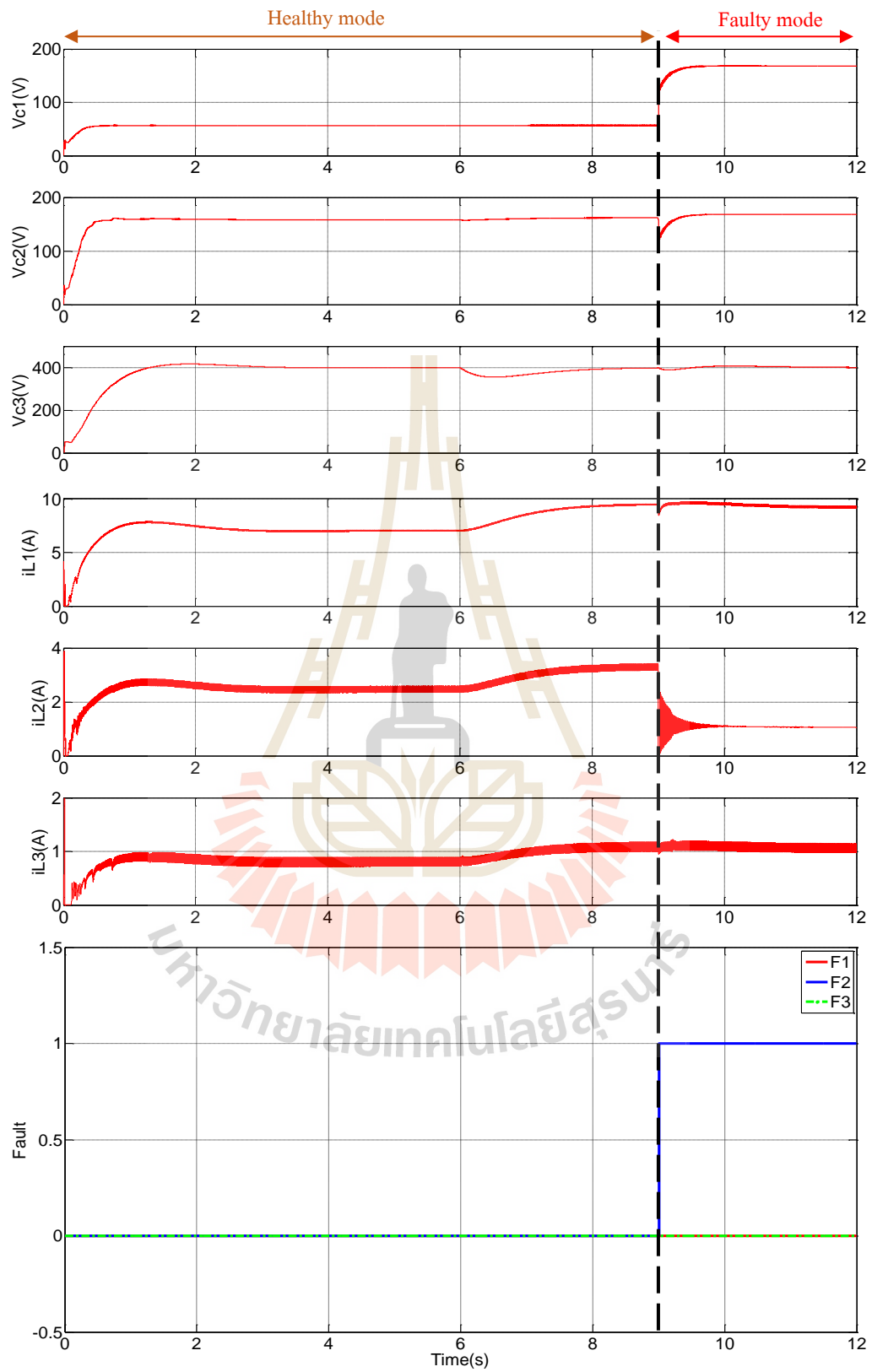
รูปที่ 5.22 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2



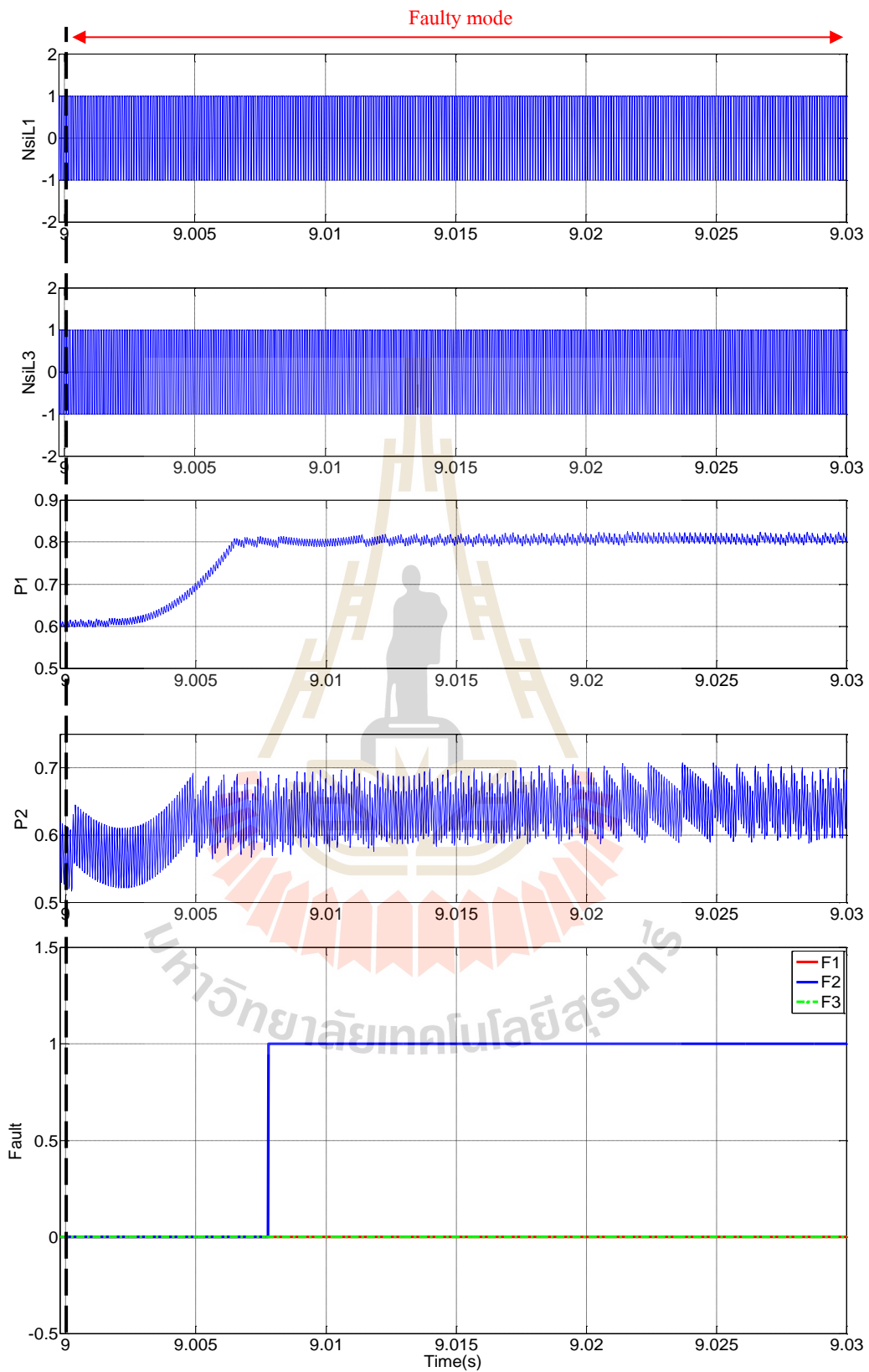
รูปที่ 5.23 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2

สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน โดยเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่วินาทีที่ 9 เมื่อกำหนดให้โหลดตัวต้านทานเท่ากับ $3200\ \Omega$ และ $1600\ \Omega$ ที่วินาทีที่ 0 และ 6 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.24 ทั้งนี้แรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 400V จะเห็นว่าทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพลาดขึ้นแรงดันเอาต์พุตสามารถเพิ่มและรักษา ระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ โดยในสภาวะเกิดความผิดพลาดหรือหลังจากวินาทีที่ 9 จะสังเกตเห็นว่าแรงดัน v_{C1} มีการปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสวิตช์ S_2 เปิดวงจร ในส่วนของกระแส i_{L2} พบว่ามีการลดลงและเกิดการสั้นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์ S_2 จะอาศัยค่าความชันปกติ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} รวมทั้งสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 และ P_2 ในการตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยจากรูปที่ 5.25 แสดงให้เห็นว่าค่าความชันปกติ Nsi_{L1} และ Nsi_{L3} มีค่าเป็น 1 และ -1 ในหนึ่งคาบเวลา และจะเห็นว่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 และ P_2 มีลักษณะตามวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 8ms





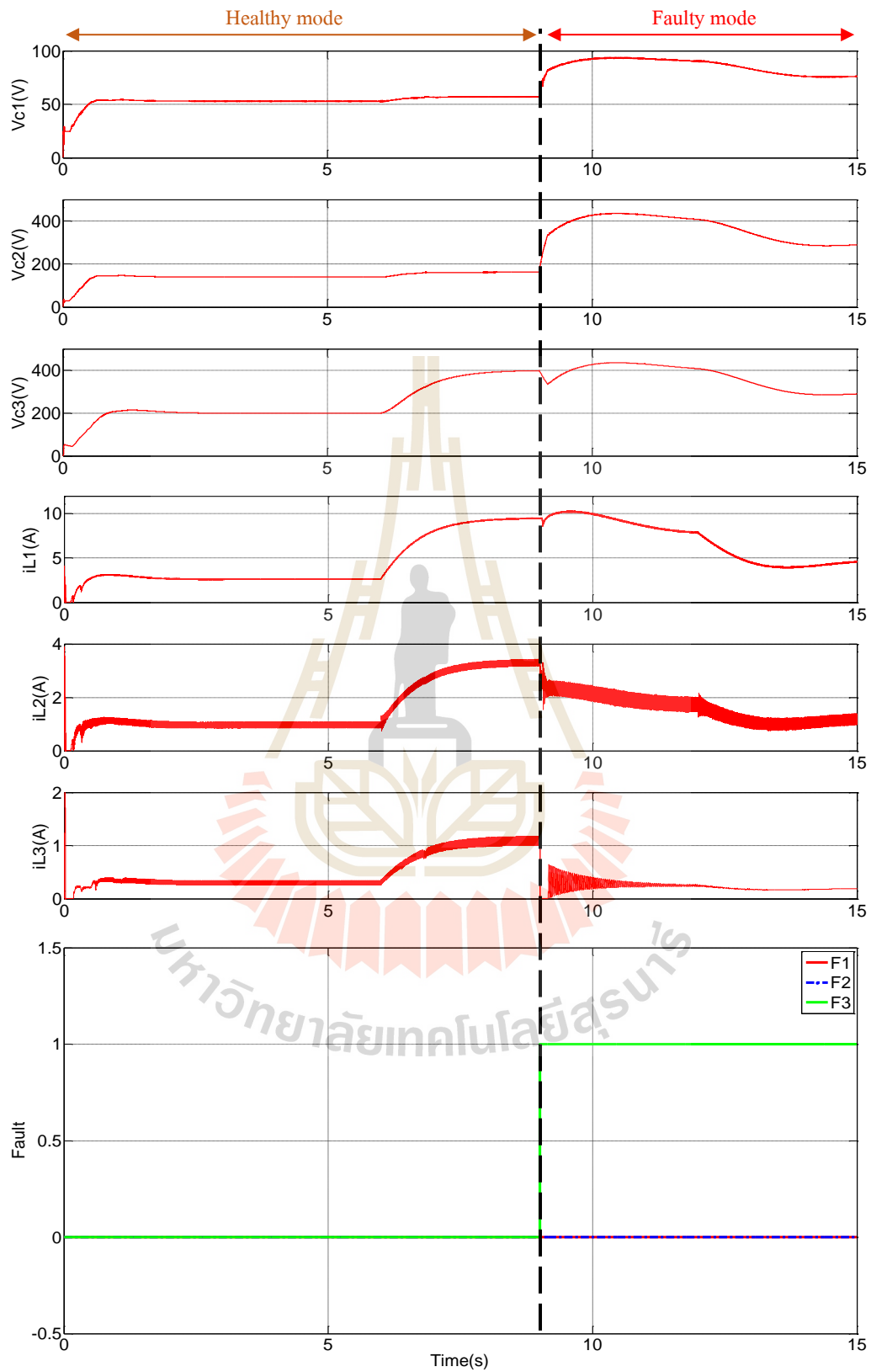
รูปที่ 5.24 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2



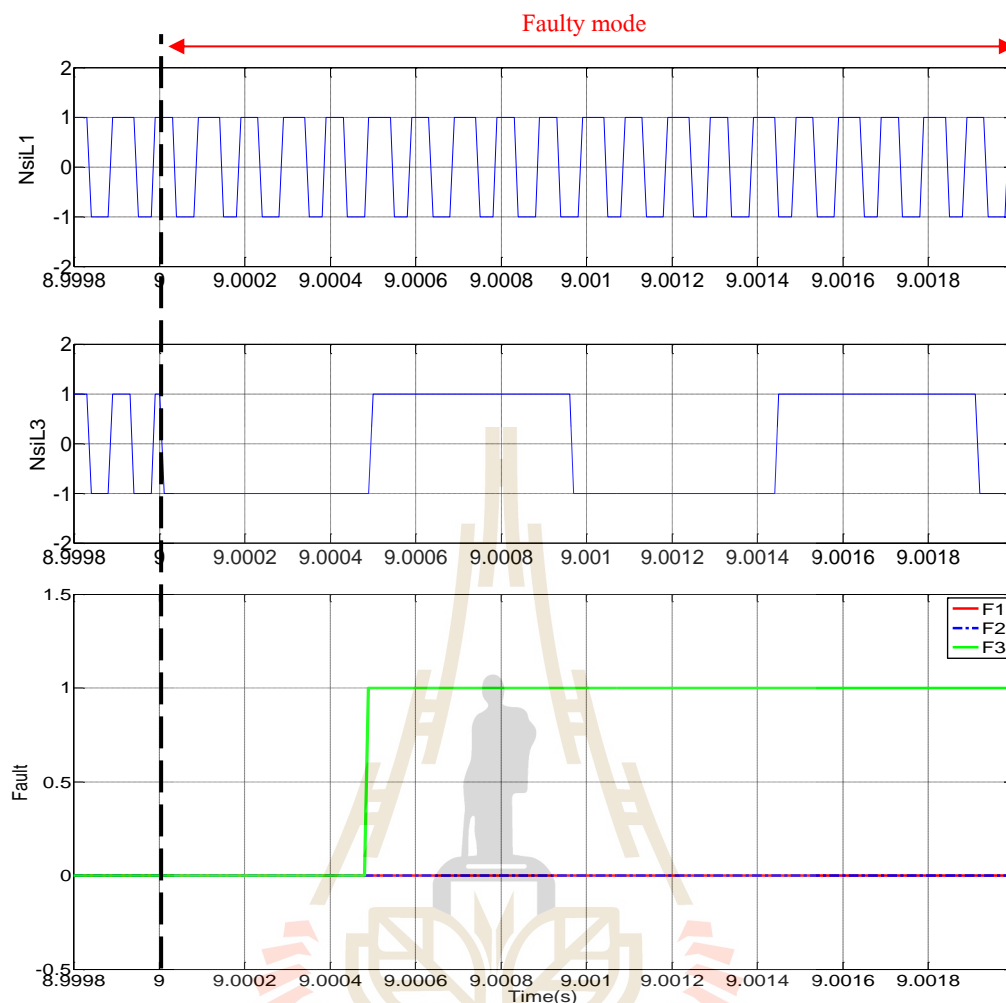
รูปที่ 5.25 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวด้านทานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง เมื่อเกิดความผิดปกติแบบ สวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่วินาทีที่ 9 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V 400V และ 300V ที่วินาทีที่ 0, 6 และ 12 ตามลำดับเช่นเดิม ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.26 พบว่า ในสภาวะการทำงานปกติตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยในสภาวะเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 9 จะสังเกตเห็นว่าแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} มีการปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 400V เนื่องจากสวิตช์ S_3 เปิดวงจร และเมื่อมีการปรับลดค่าแรงดันอ้างอิงลง ตัวควบคุมก็ยังคงสามารถลดและพยายามรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ ทั้งนี้เมื่อพิจารณากระแสจะพบว่ากระแส i_{L2} มีการเปลี่ยนแปลงลดลงช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้น ในขณะที่กระแส i_{L3} มีค่าลดลงและเกิดการสั่นไกวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์ S_3 จะอาศัยค่าความชันปกติ Nsi_{L3} ในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยจากรูปที่ 5.27 แสดงให้เห็นว่าค่าความชันปกติ Nsi_{L3} มีค่าเป็น 1 หรือ -1 เพียงค่าเดียวในหนึ่งคาบเวลา ซึ่งมีลักษณะตามวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 500 μ s หรือ 0.5ms รวมถึงแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการภายใต้สภาวะเกิดความผิดปกติ



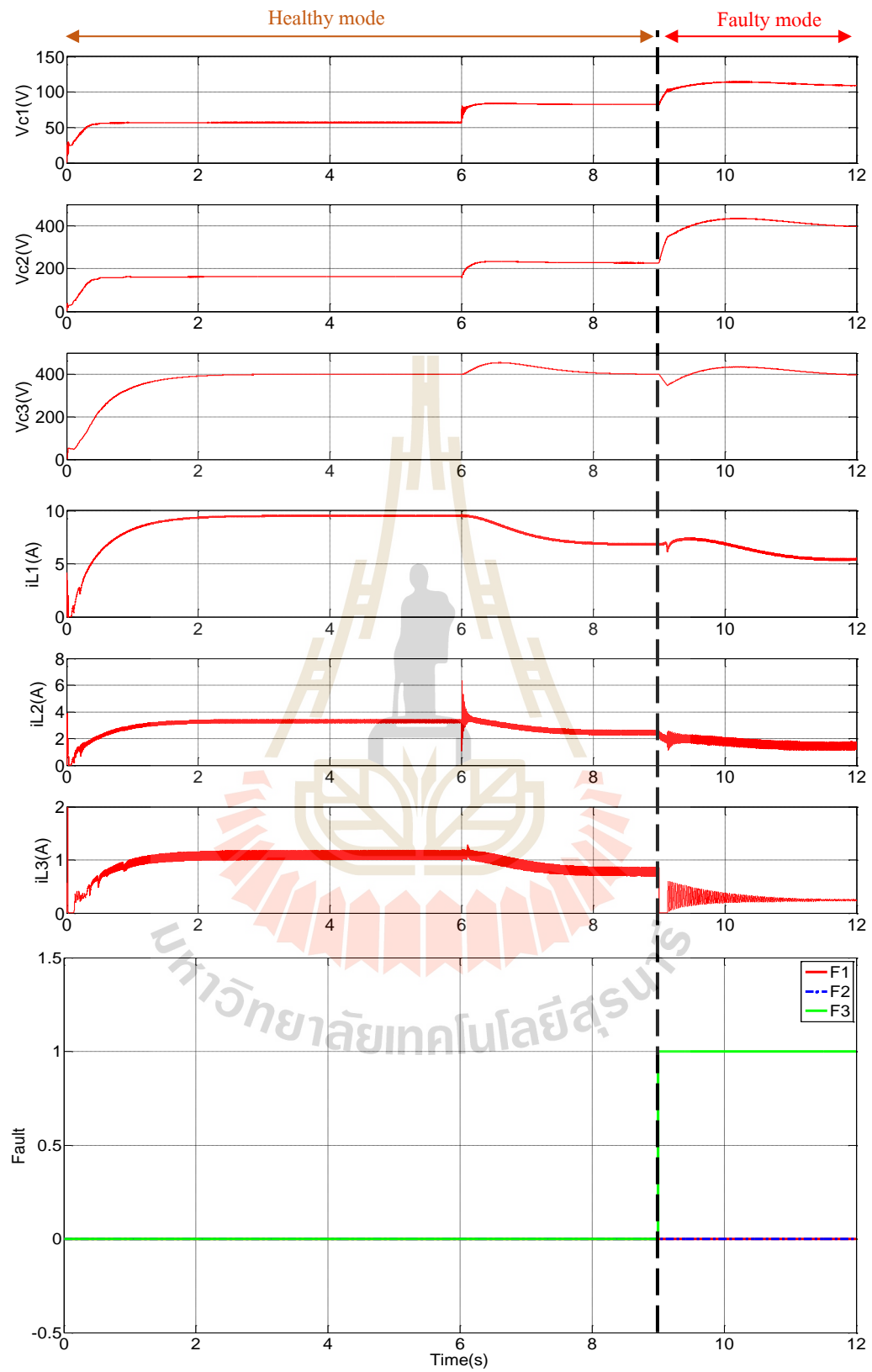


รูปที่ 5.26 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3

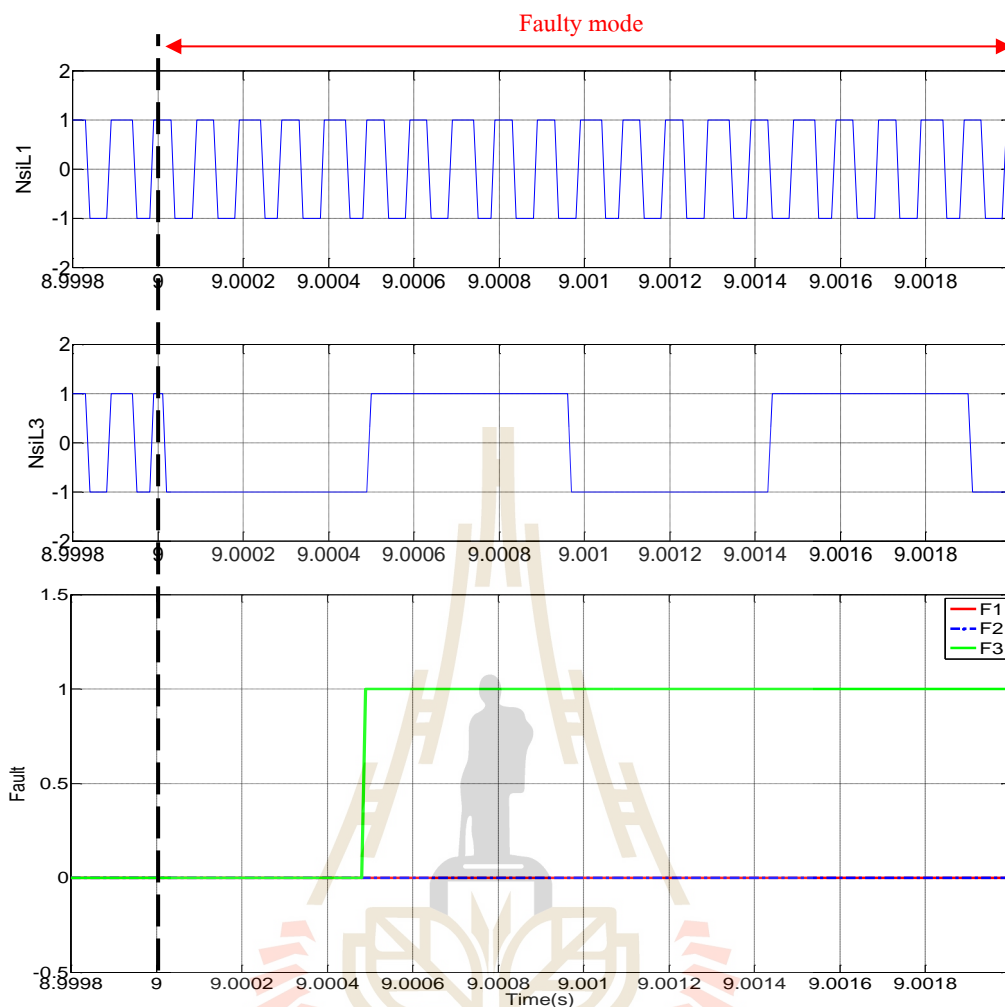


รูปที่ 5.27 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โดยเกิดความผิดปกติแบบ สวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่วินาทีที่ 9 เมื่อกำหนดให้แรงดันอินพุตเท่ากับ 20V และทำการ ปรับเปลี่ยนเป็น 30V ที่วินาทีที่ 6 โดยแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V จากรูปที่ 5.28 จะเห็นว่าตัวควบคุม สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ และวิธีการตรวจจับความผิดปกติไม่มีการตรวจพบ ความผิดปกติในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต แต่ในสถานะเกิดความผิดปกติจะ สังเกตเห็นว่าแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} มีการปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น และแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง ลงเพียงเล็กน้อย กระแส i_{L3} มีค่าลดลงและเกิดการสั้นไกวอย่างเห็นได้ชัด โดยจากรูปที่ 5.29 แสดง ให้เห็นว่าค่าความชันปกติ Nsi_{L3} มีลักษณะตามวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ที่ พัฒนาขึ้น ดังนั้นจึงสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 500 μ s หรือ 0.5ms

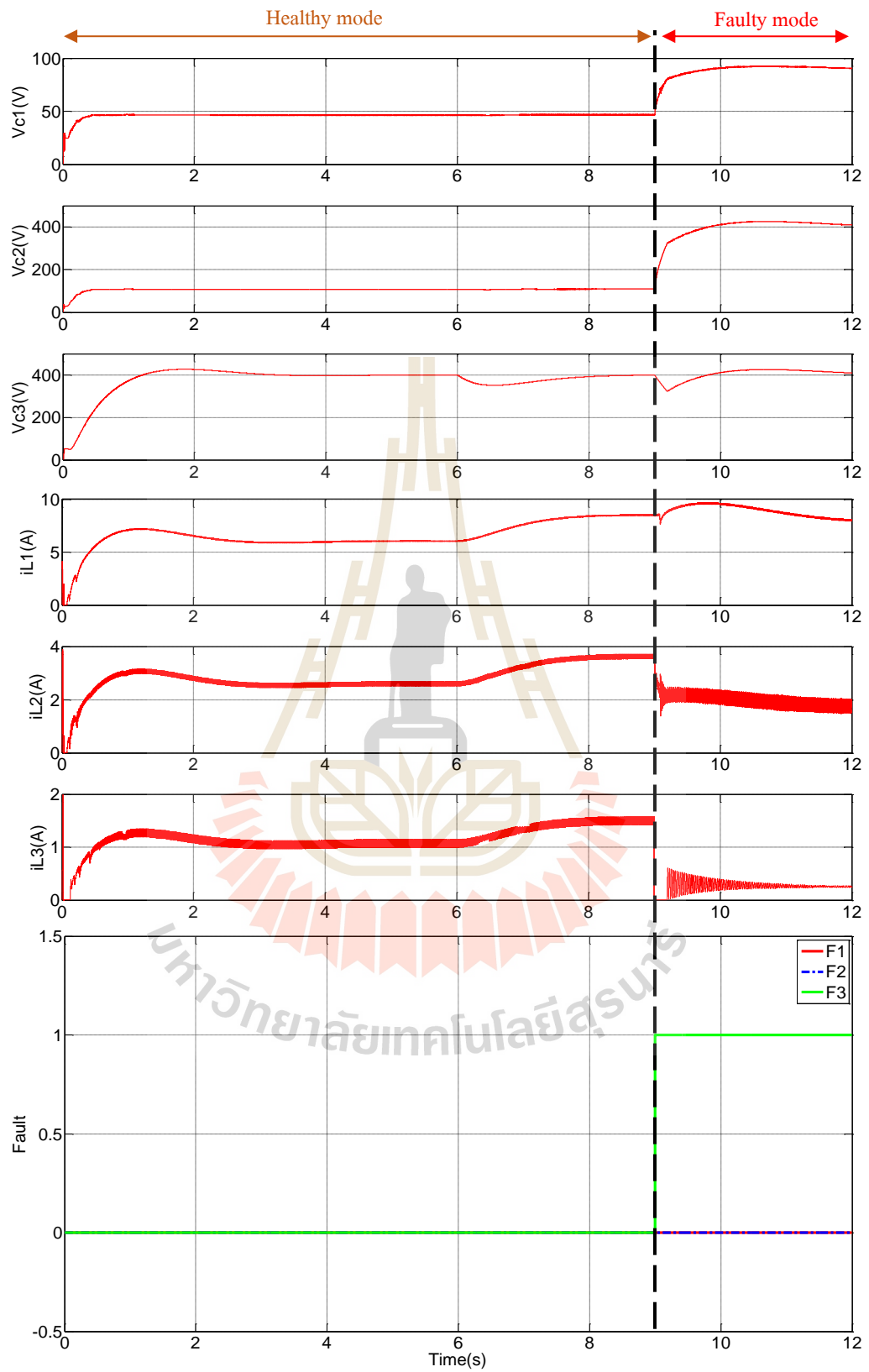


รูปที่ 5.28 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3

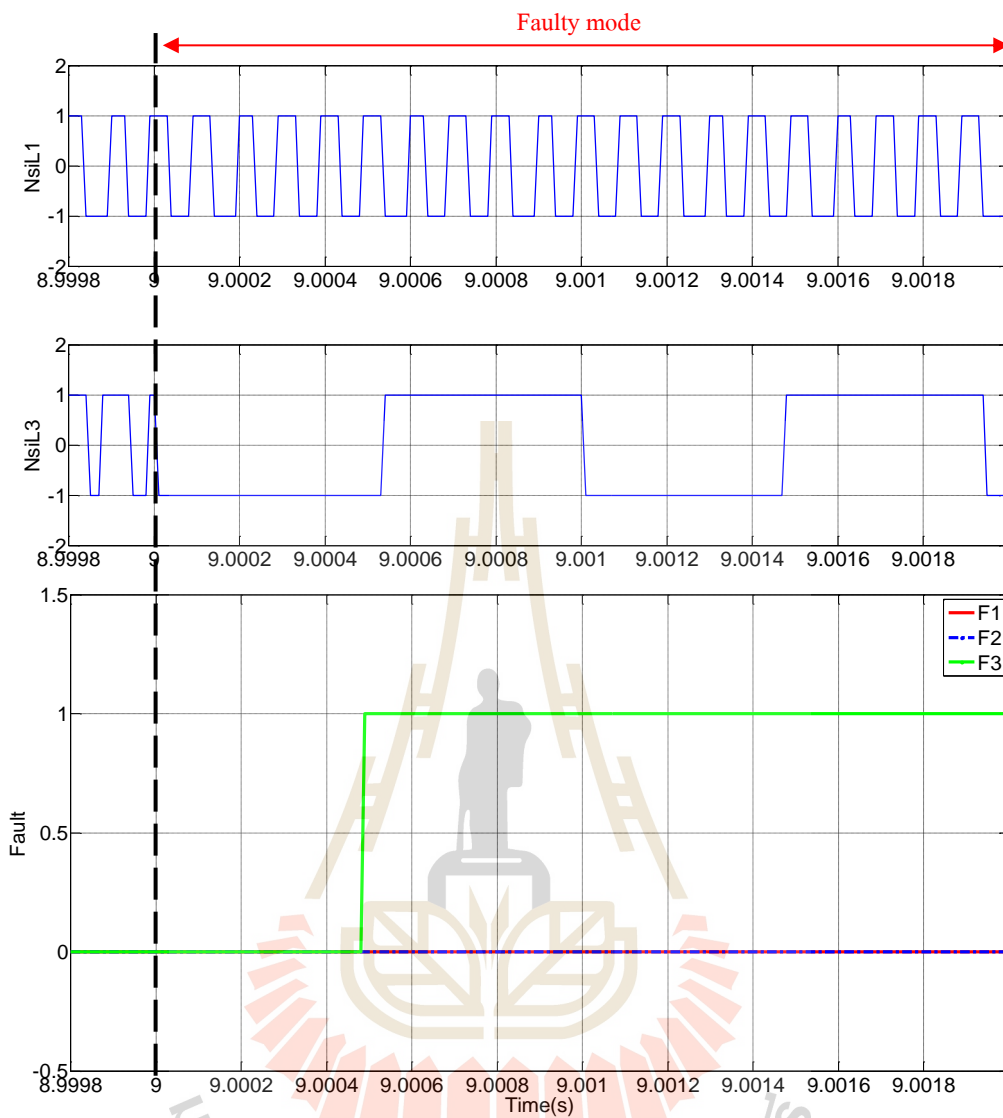


รูปที่ 5.29 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3

การจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน โดยเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่วินาทีที่ 9 เมื่อกำหนดให้โหลดตัวต้านทานเท่ากับ 3200Ω และ 1600Ω ที่วินาทีที่ 0 และ 6 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.30 ทั้งนี้แรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 400V จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ ในสภาวะเกิดความผิดพลาดจะสังเกตเห็นว่าแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} มีการปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 400V เนื่องจากสวิตช์ S_3 เปิดวงจร และแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงลงเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมที่ 400V เมื่อพิจารณากระแส i_{L2} พบว่ามีการลดลงและเกิดการสั้นไกว ในขณะที่กระแส i_{L3} มีค่าลดลงและเกิดการสั้นไกวอย่างชัดเจนเช่นกัน โดยจากรูปที่ 5.31 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะตามวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นจึงสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาในตรวจจับประมาณ $500\mu s$ หรือ 0.5ms



รูปที่ 5.30 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3

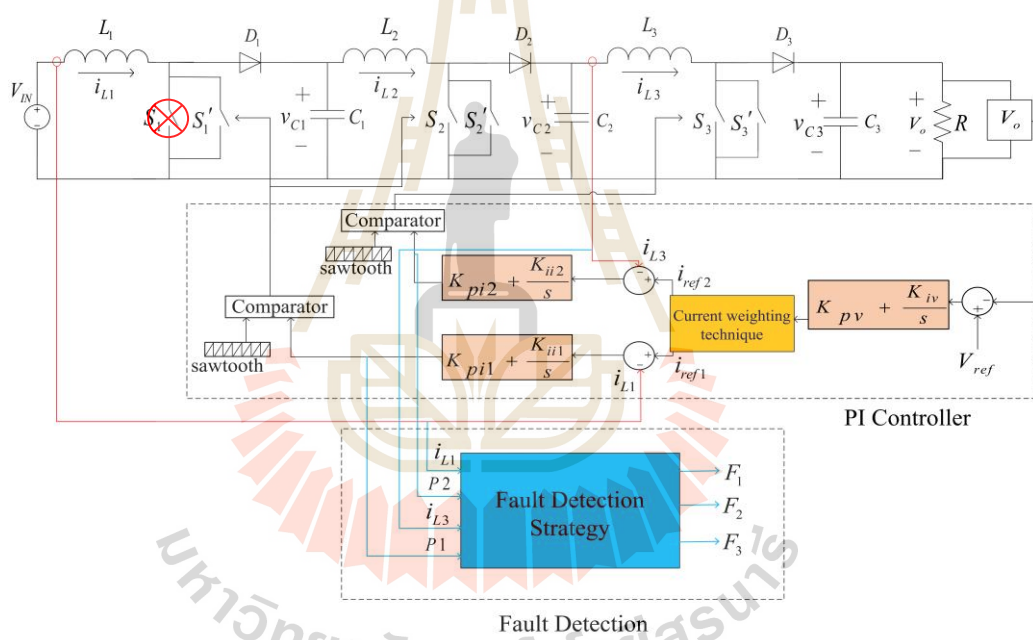


รูปที่ 5.31 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวด้านทานกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตซ์ S_3

5.4.2 ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตซ์เปิดวงจรสำหรับ วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสถานการณ์วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตซ์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุมภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ เพื่อยืนยันการตรวจจับความผิดปกติว่าตรวจจับไม่ผิดพลาดและสามารถทำงานภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติได้ โดยจะพิจารณากรณีที่สวิตซ์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติขึ้นเท่านั้น และเมื่อตรวจพบว่าสวิตซ์ตัวใดเกิดความผิดปกติขึ้นจะทำการสั่งให้สวิตซ์ตัว

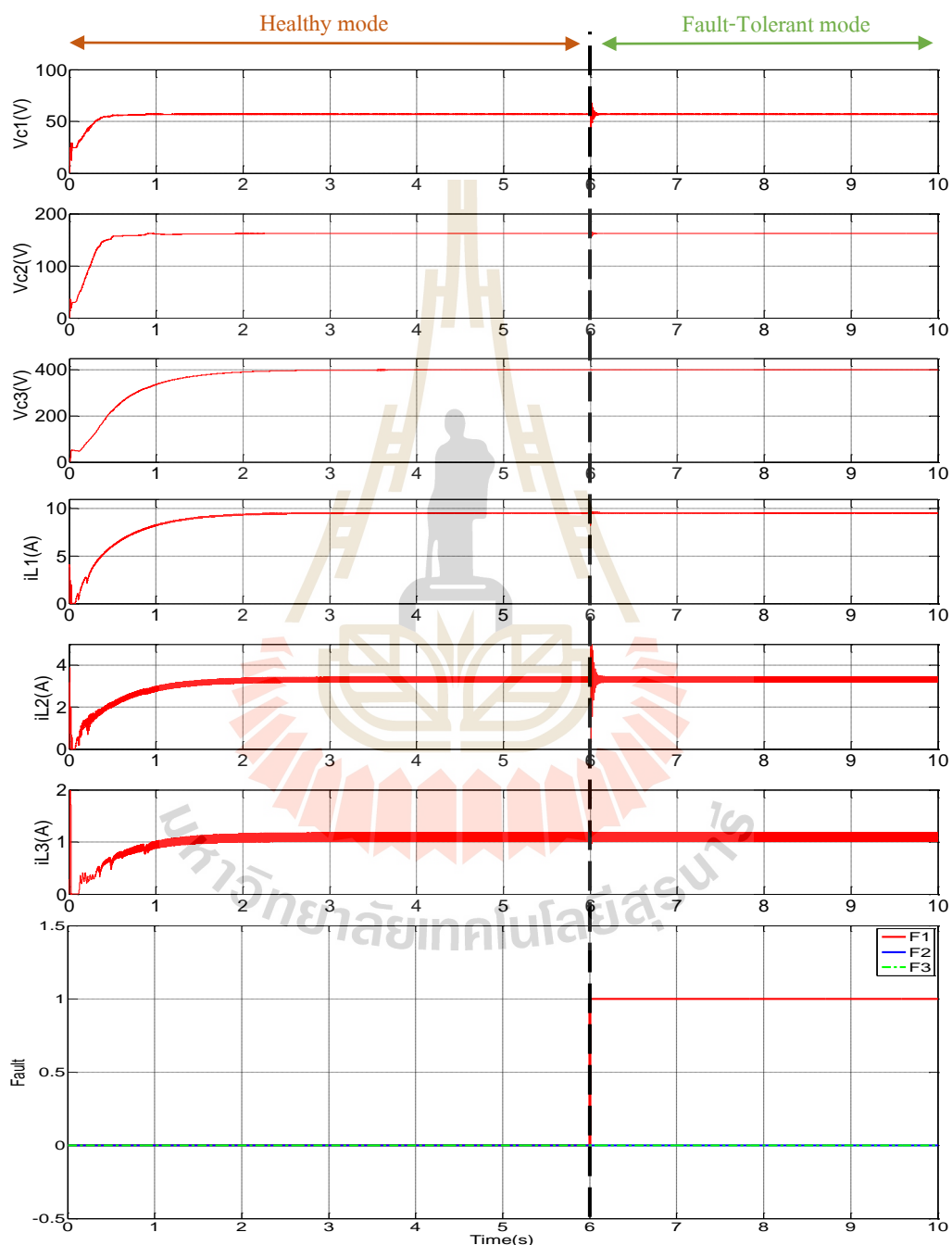
โดยที่อุปกรณ์ในวงจรไม่ต้องรับภาระหนักเกินไป ซึ่งสามารถสังเกตภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้จากผลการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือการจำลองสถานการณ์ วงจรมูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 โดยสวิตช์สำรอง S_1' จะถูกสั่งให้ทำงานแทนทันทีหลังจากตรวจพบความผิดปกติ ซึ่งโครงสร้างวงจรสำหรับจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.32 โดยจะพิจารณาผลของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) และสถานะการตรวจจับความผิดปกติ (F_1 , F_2 , F_3) ทั้งการทำงานในสภาวะปกติ (Healthy mode) สภาวะเกิดความผิดปกติ (Faulty mode) และสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ (Fault-Tolerant mode) โดยจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V และแรงดันอินพุตเท่ากับ 20V



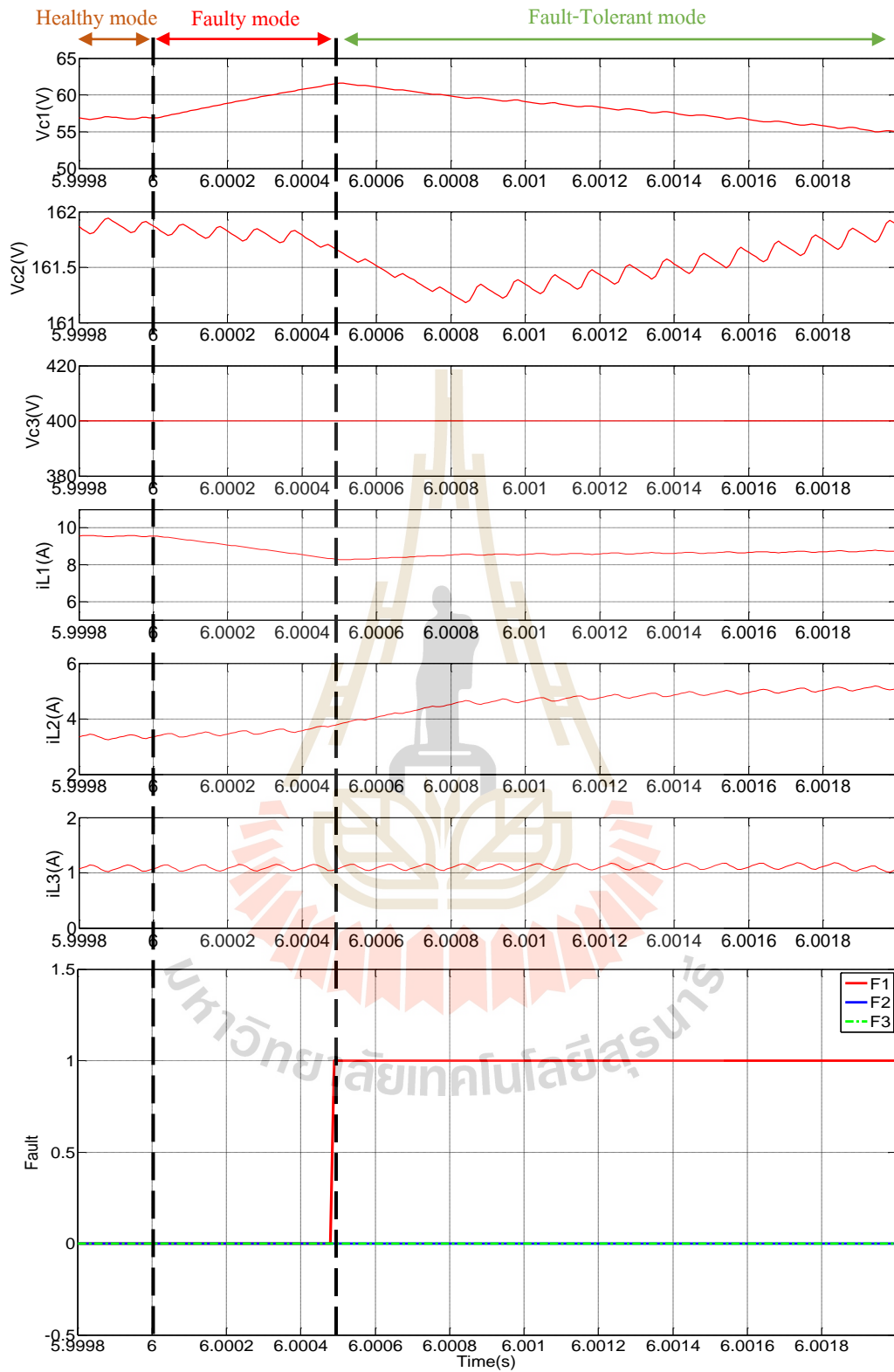
รูปที่ 5.32 โครงสร้างสำหรับกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

จากการจำลองสถานการณ์วงจรมูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่ขณะมีตัวควบคุม เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ที่วินาทีที่ 6 ภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ โดยใช้สวิตช์สำรอง S_1' แสดงดังรูปที่ 5.33 สังเกตพบว่าแรงดัน v_{C1} กระแส i_{L1} และ i_{L2} มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเพียงน้อยหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้น นอกจากนี้พบว่าแรงดัน v_{C2} v_{C3} และกระแส i_{L3} มีความใกล้เคียงกับในสภาวะปกติ ซึ่งจากรูปที่ 5.34 แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้

เวลาประมาณ 500 μ s หรือ 0.5ms จึงส่งผลให้สามารถสั่งสวิตช์สำรอง S_1' ทำงานแทนได้อย่างทันที โดยที่สวิตช์สำรอง S_1' ได้รับสัญญาณควบคุมการทำงาน P_1 แทน S_1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบต่อดวงจรเพียงเล็กน้อย และวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเนื่อง

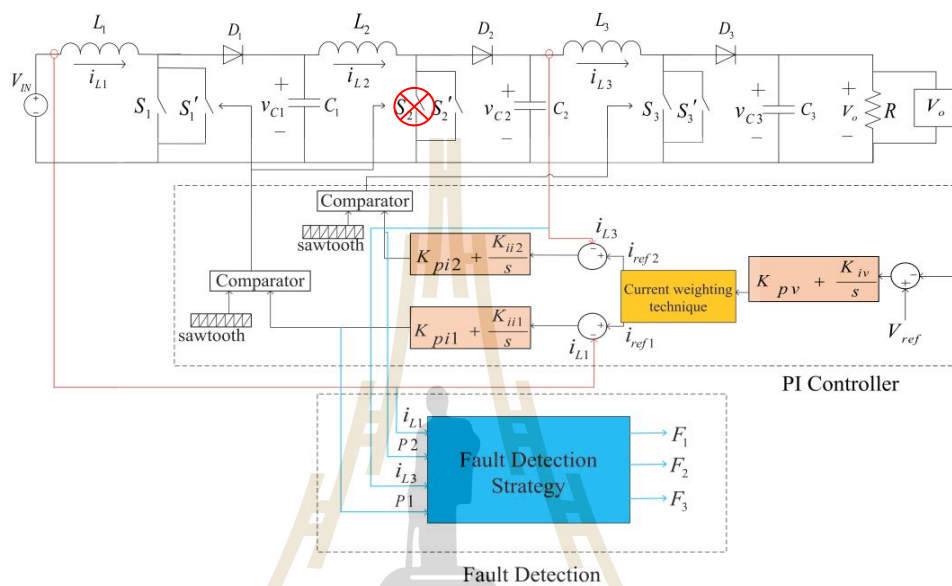


รูปที่ 5.33 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ



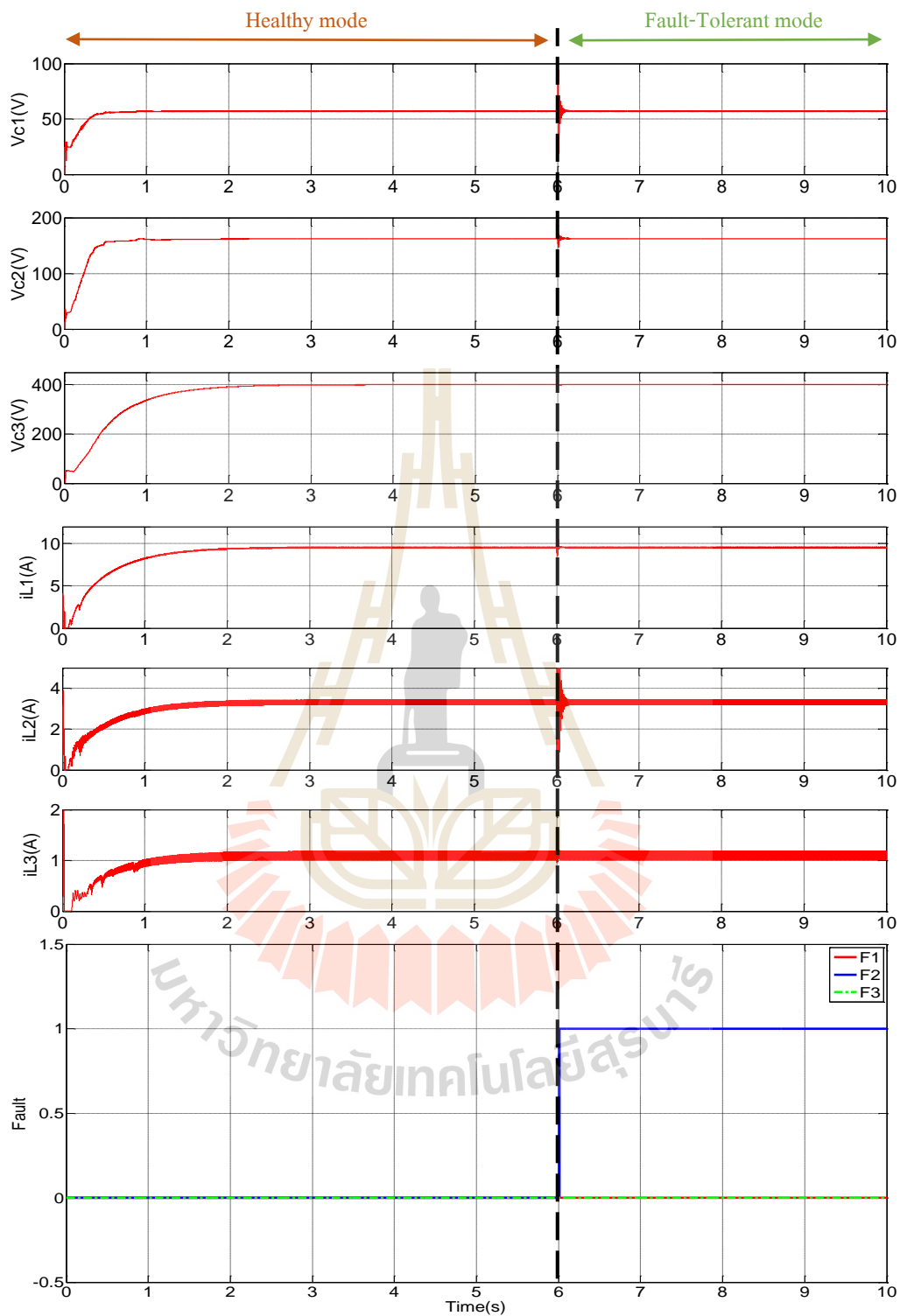
รูปที่ 5.34 ภาพขยายรูปที่ 5.33

การจำลองสถานการณ์วงจรบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ที่วินาทีที่ 6 ภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ โดยให้สวิตช์สำรอง S_2' ทำงานแทนทันที เมื่อมีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ซึ่งโครงสร้างสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.35 โดยกำหนดค่าให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V

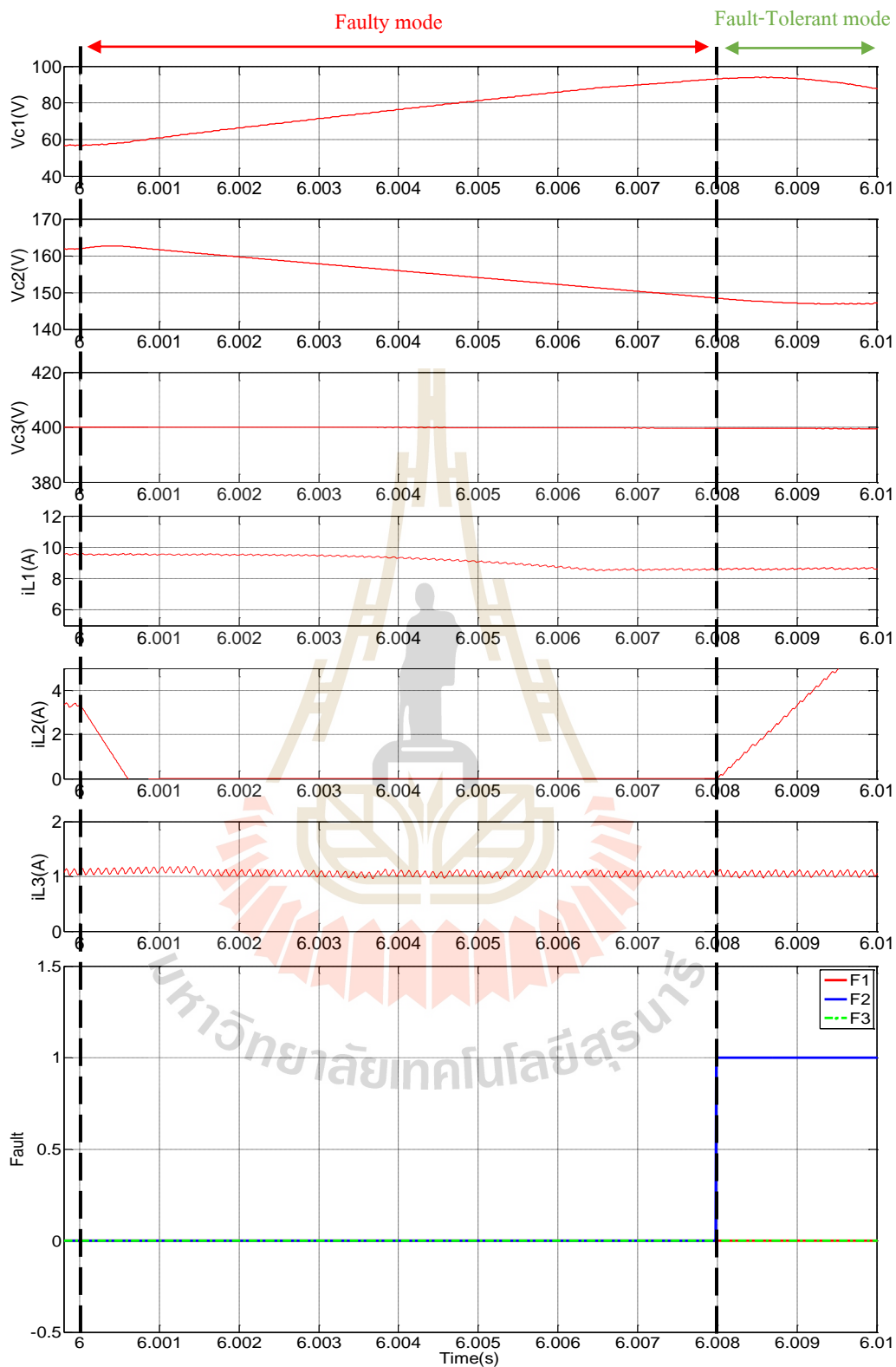


รูปที่ 5.35 โครงสร้างสำหรับกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 ที่วินาทีที่ 6 ภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ โดยใช้สวิตช์สำรอง S_2' แสดงดังรูปที่ 5.36 พบว่าแรงดัน v_{C1} กระแส i_{L1} และ i_{L2} มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้น และในส่วนของ v_{C2} v_{C3} และ i_{L3} มีผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับในสภาวะปกติ โดยมีลักษณะคล้ายกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาประมาณ 8ms แสดงดังรูปที่ 5.37

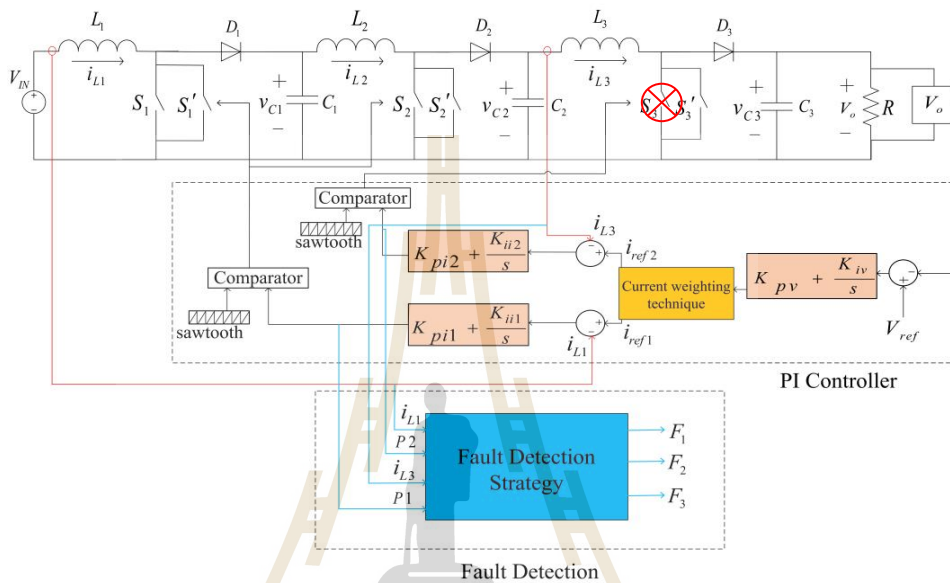


รูปที่ 5.36 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่
 สวิตช์ S_2 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ



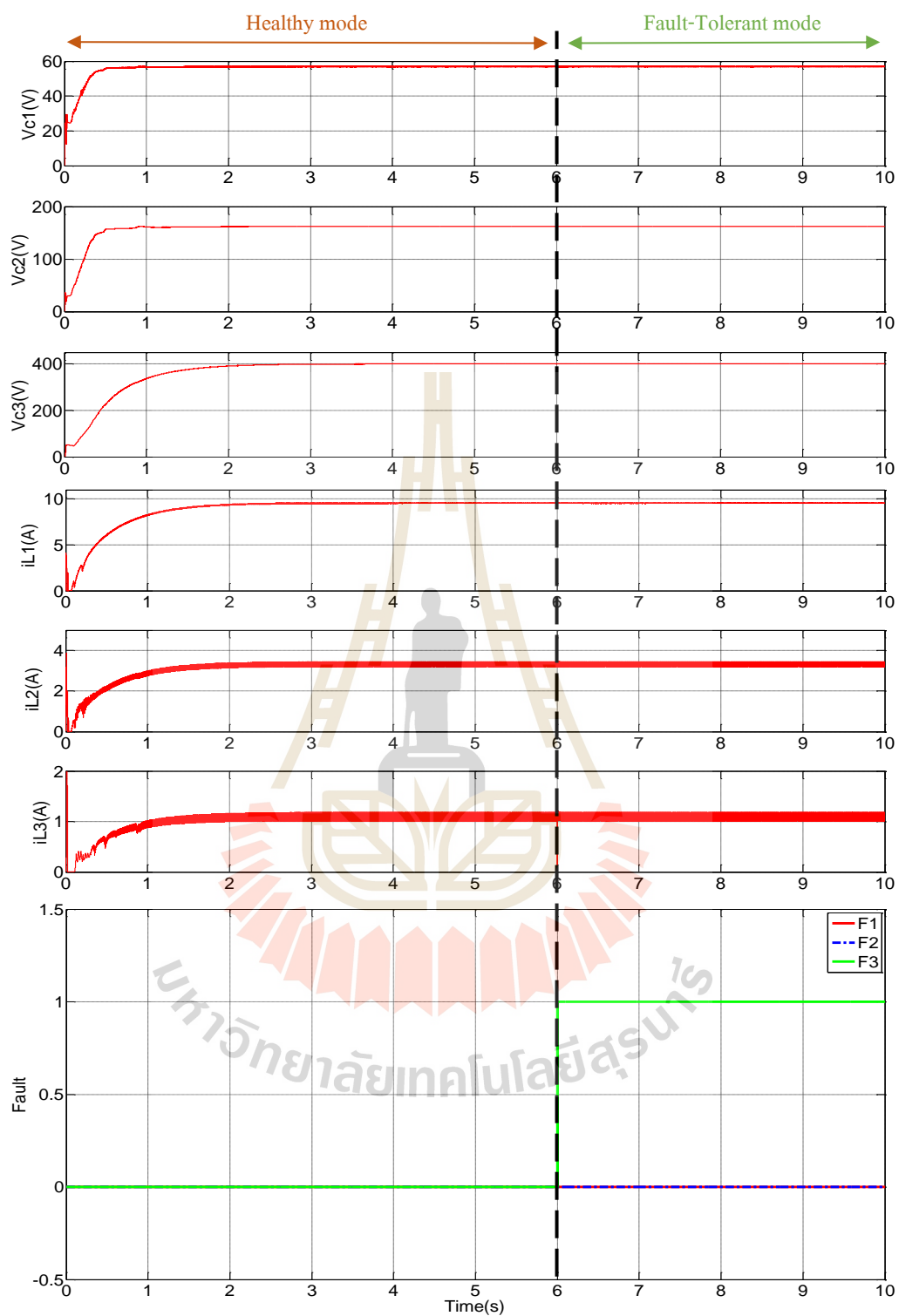
รูปที่ 5.37 ภาพขยายรูปที่ 5.36

ในการจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 ที่วินาทีที่ 6 แล้วใช้สวิตช์สำรอง S'_3 ทำงานแทนหลังจากเกิดความผิดพลาด จะอาศัยโครงสร้างสำหรับการจำลองสถานการณ์ที่แสดงดังรูป 5.38 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V

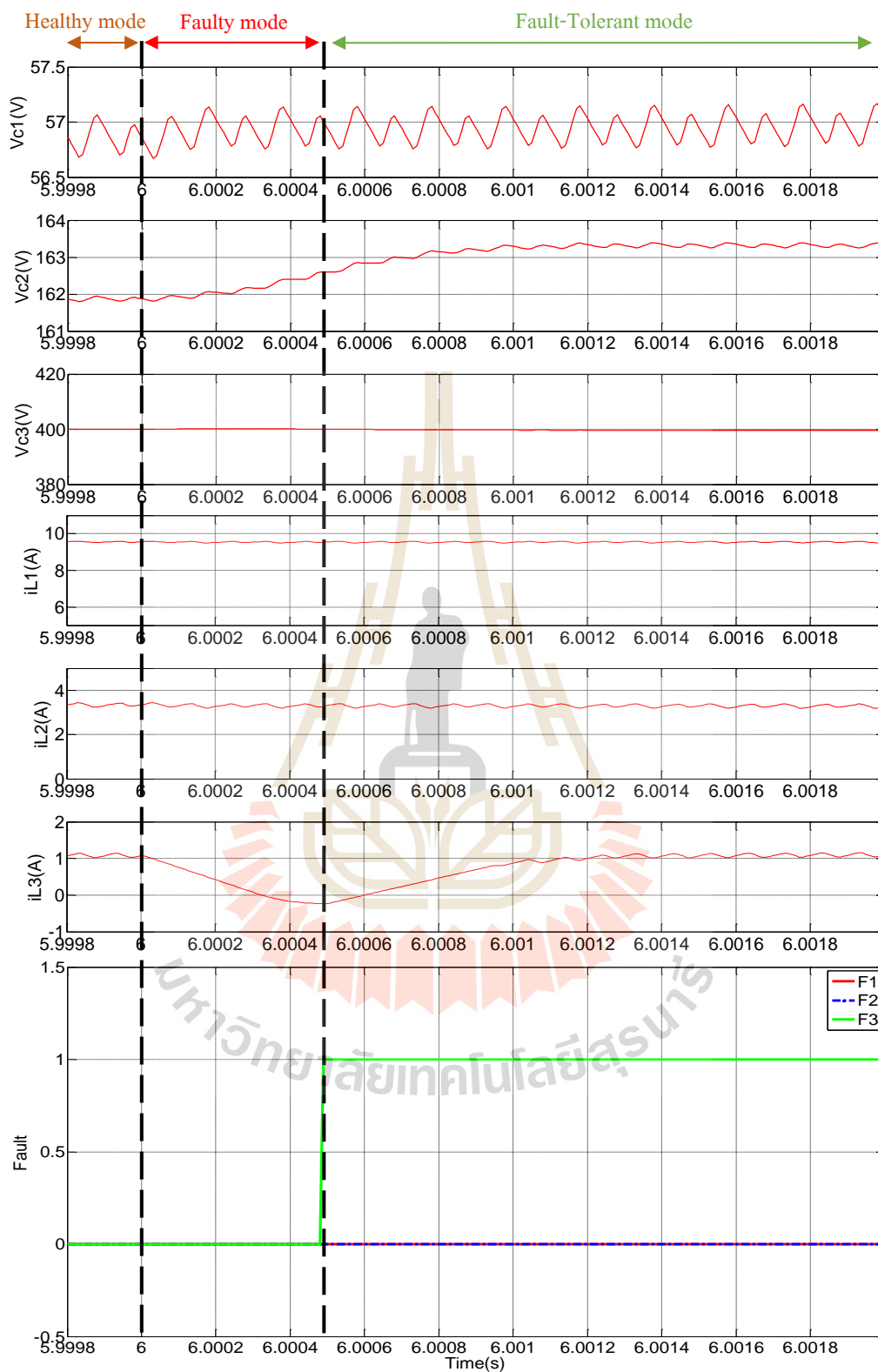


รูปที่ 5.38 โครงสร้างสำหรับกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดพลาด

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_3 ที่วินาทีที่ 6 และใช้สวิตช์สำรอง S'_3 เพื่อให้วงจรอยู่ภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดพลาด แสดงดังรูปที่ 5.39 ดังนั้นเมื่อตรวจพบความผิดพลาดจะเห็นได้ว่าทั้งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้นมีผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับในสภาวะปกติ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาประมาณ 500 μ s หรือ 0.5ms ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.40 จึงทำให้มีผลกระทบต่อวงจรเพียงเล็กน้อย และวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเนื่อง



รูปที่ 5.39 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่
สวิตช์ S_3 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ



รูปที่ 5.40 ภาพขยายรูปที่ 5.39

5.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพลาดภายใต้การทำงานต่าง ๆ เพื่อนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรดังกล่าว ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นอาศัยพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งและสาม ที่มีตัวตรวจจับกระแสอยู่แล้วมาพิจารณาค่าความชันทั่วไป และอาศัยพฤติกรรมของสัญญาณควบคุมการสวิตช์ที่ได้จากกลุ่มควบคุมกระแสทั้งสองรูป ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของกระแสขณะเกิดความผิดพลาดมีการสั้นไกวหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถนำเอาพฤติกรรมดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดได้ และจากผลการจำลองสถานการณ์วิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุมแสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งทำให้สามารถนำเอาสวิตช์ที่ได้สำรองไว้ มาใช้ทดแทนตัวที่เกิดความผิดพลาดขึ้นได้รวดเร็ว จึงทำให้มีผลกระทบต่อวงจรเพียงเล็กน้อย และวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเนื่อง



บทที่ 6

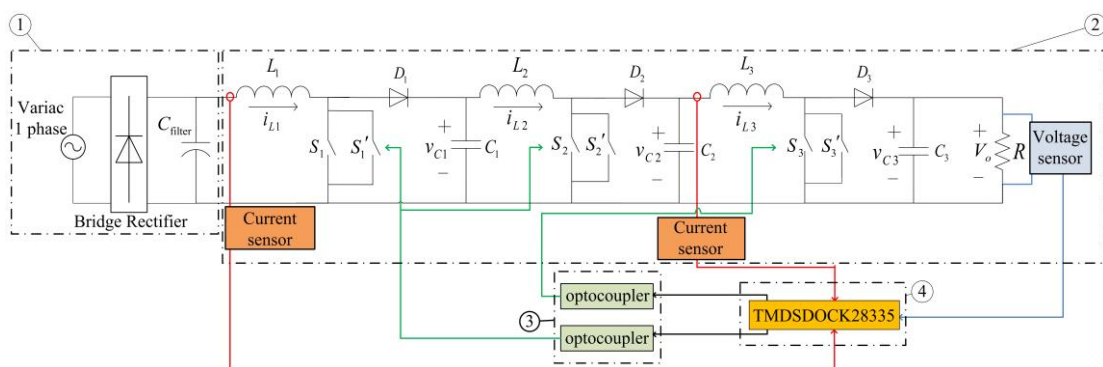
การสร้างชุดทดสอบ

6.1 บทนำ

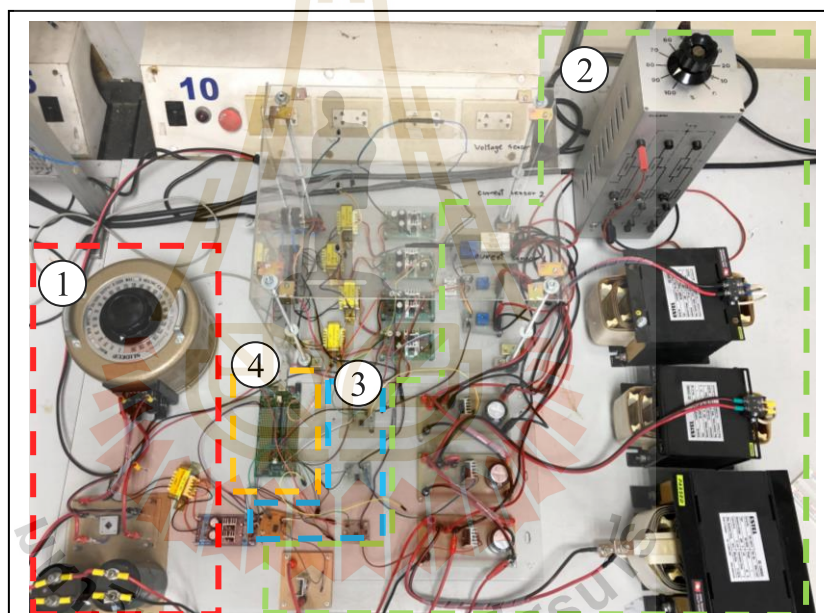
จากบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5 ได้กล่าวถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น และออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอ รวมถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม ตามลำดับ ในบทนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ในการสร้างชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อใช้ยืนยันเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ โดยการสร้างชุดทดสอบจะประกอบด้วย การสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดโดยใช้สวิตช์สำรองต่อขนานกับสวิตช์หลัก วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งและตัวที่สาม วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญญาณ และการควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ทั้งนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อทำการทดสอบการทำงานของคำสั่งตัวควบคุมและวิธีการตรวจจับความผิดพลาดภายในบอร์ด DSP

6.2 โครงสร้างชุดทดสอบ

โครงสร้างชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น แสดงดังรูปที่ 6.1 สามารถแบ่งได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 2 คือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น รวมถึงวงจรตรวจจับกระแส i_{L1} และ i_{L3} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_3 ตามลำดับ และตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต V_o ส่วนที่ 3 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญญาณ และส่วนสุดท้ายเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 สำหรับใช้ประมวลผลเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต โครงสร้างชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

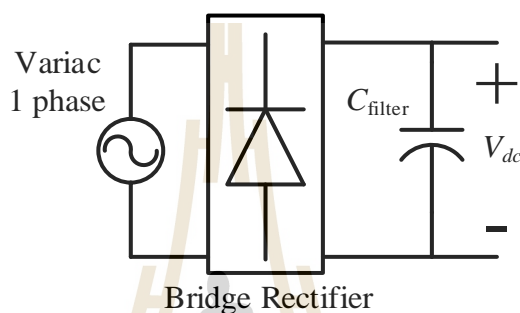


1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
2. วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น วงจรตรวจจับกระแส และวงจรตรวจจับแรงดันเอาต์พุต
3. วงจรขยายแรงดันแบบแยก โคลด์สัญญาณ
4. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMSDOCK28335

รูปที่ 6.2 ชุดทดสอบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

6.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับการทดสอบชุดทดสอบนั้น จะอาศัยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ที่สร้างขึ้นจากการนำหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบหนึ่งเฟส ที่มีพิกัดกระแสที่ 10A ต่อผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส แล้วจึงนำไปต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ ก่อนนำไปใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันต่ำ เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตได้ตามต้องการ โครงสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 6.3



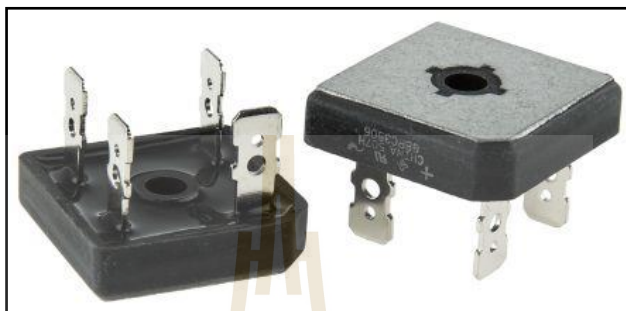
รูปที่ 6.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ทั้งนี้หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (variac) ที่นำมาเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับระบบ แสดงดังรูปที่ 6.4 โดยมีพิกัดแรงดันอยู่ในช่วง 0–250 V_{rms} และมีพิกัดกระแส 10A



รูปที่ 6.4 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

จากการสร้างวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ต้องมีการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จึงได้นำวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35 มาประยุกต์ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ซึ่งมอดูลวงจรเรียงกระแสดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.5 โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 1000V และพิกัดกระแส 35A



รูปที่ 6.5 มอดูลวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35

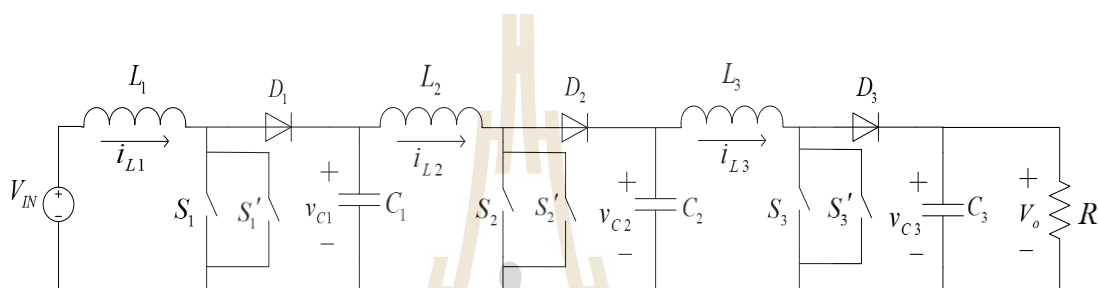
หลังจากได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟสแล้ว จึงนำมาต่อกับตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่มีการกระเพื่อมไม่สูงมากและใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุขนาด 2200 μ F และ 3300 μ F ต่อขนานกันเป็น 5500 μ F ที่มีพิกัดแรงดัน 400V



รูปที่ 6.6 ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

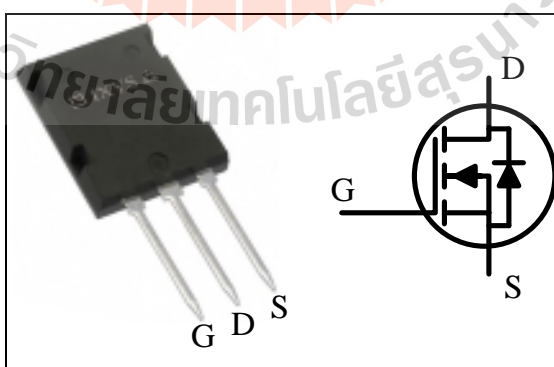
6.4 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

การสร้างชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อใช้สำหรับทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจร ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงการนำสวิตช์สำรองมาต่อขนานสวิตช์หลักในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อใช้ในทดสอบความทนต่อความผิดพลาดของวงจรนี้ โครงสร้างของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น แสดงดังรูปที่ 6.7 โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3



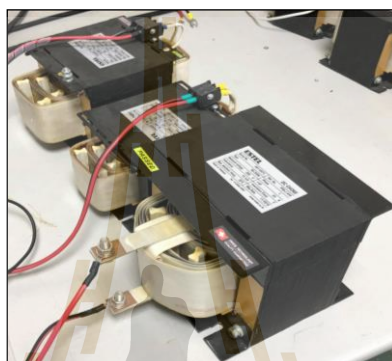
รูปที่ 6.7 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีความทนต่อความผิดพลาด

สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยอุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตกำลัง ซึ่งจะคำนึงถึงพิกัดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในวงจรเป็นสำคัญ ดังนั้นจึงใช้อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตกำลัง IXFK80N60P3 แสดงดังรูปที่ 6.8 โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 600V และค่าพิกัดกระแส 80A



รูปที่ 6.8 มอสเฟตกำลังสำหรับชุดทดสอบ

จากการเลือกตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 จะอาศัยค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยจะคำนึงถึงพิกัดของกระแสที่อาจจะเกิดขึ้นในสภาวะเกิดความผิดปกติ เพื่อให้ตัวเหนี่ยวนำมีพิกัดกระแสเพียงพอสำหรับกระแสที่ไหลภายในวงจรในกรณีดังกล่าว ซึ่งมีค่าไม่เกิน 15A ที่แรงดันเอาต์พุต 200V ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ 15mH พิกัดกระแส 25A ตัวเหนี่ยวนำตัวที่สองเป็น 18.75mH พิกัดกระแส 15A และตัวเหนี่ยวนำตัวที่สามมีค่าเท่ากับ 70mH พิกัดกระแส 10A ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวแสดงดังรูปที่ 6.9



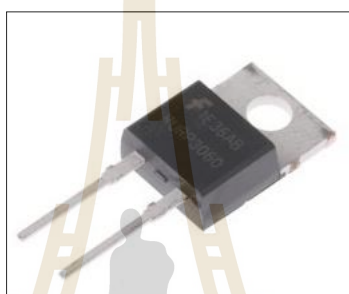
รูปที่ 6.9 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับชุดทดสอบ

ในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 จะอาศัยค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 และคำนึงถึงพิกัดแรงดันเอาต์พุตที่ 400V โดยมีการเปลี่ยนขนาดของตัวเก็บประจุให้มีขนาดใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุที่มีขายทั่วไป ซึ่งตัวเก็บประจุทั้งสามตัวที่ใช้จะมีค่าเท่ากันที่พิกัด 560 μ F 450V ตัวเก็บประจุสำหรับชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 ตัวเก็บประจุสำหรับชุดทดสอบ

สำหรับการเลือกใช้ไดโอดกำลัง D_1 , D_2 และ D_3 นั้นจะคำนึงถึงค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอดกำลังภายในวงจร โดยที่ไดโอดกำลังทั้งสามตัวเป็นเบอร์เดียวกันทั้งหมดคือ RURP3060 มีค่าพิกัดกระแส 30A และพิกัดแรงดัน 600V เป็นไดโอดกำลังที่มีการฟื้นฟูลูกกลับเร็วมาก (Ultrafast Diode) โดยเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time) อยู่ที่ 60ns ช่วยให้มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการไบอัสตรงเพียงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งไดโอดกำลังเบอร์ดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติเพียงพอสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น ไดโอดกำลังที่ใช้สำหรับชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 ไดโอดกำลังสำหรับชุดทดสอบ

และส่วนสุดท้ายของชุดทดสอบคือโหลดตัวต้านทาน R ซึ่งจะใช้ค่าความต้านทานในการทดสอบอยู่ในช่วง $1600\Omega - 3200\Omega$ เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าไม่เกิน 100W ที่ 400V และคำนึงถึงค่ากระแสอินพุตให้มีค่าไม่เกิน 10A เนื่องจากหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (variac) มีค่าพิกัดการจ่ายกระแสสูงสุดที่ 10A ดังนั้นจึงได้ใช้โหลดตัวต้านทานปรับค่าได้ แสดงดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 โหลดตัวต้านทานสำหรับชุดทดสอบ

โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สำหรับสร้างชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น เพื่อใช้สำหรับการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับสร้างชุดทดสอบ

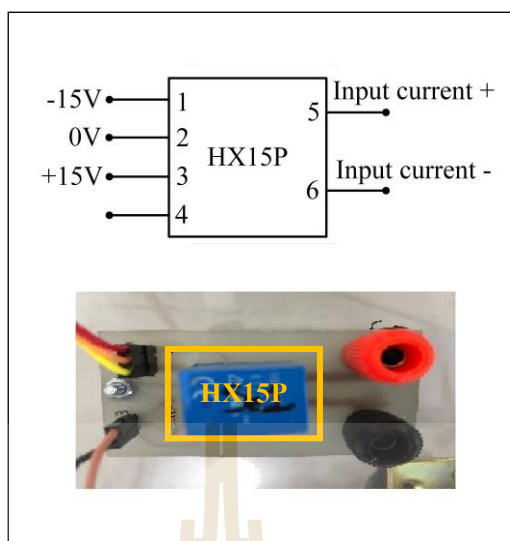
อุปกรณ์	สัญลักษณ์	เบอร์	ขนาด	พิกัด
มอสเฟตกำลัง	$S_1, S_2, S_3,$ S'_1, S'_2, S'_3	IXFK80N60P3	-	80A, 600V
ตัวเหนี่ยวนำ	L_1	-	15mH	25A, 200V
ตัวเหนี่ยวนำ	L_2	-	18.75mH	15A, 400V
ตัวเหนี่ยวนำ	L_3	-	70mH	10A, 400V
ตัวเก็บประจุ	C_1, C_2, C_3	-	560 μ F	450V
ไดโอด	D_1, D_2, D_3	RURP3060	-	30A, 600V
โหลดตัวต้านทาน	R	-	1600 Ω - 3200 Ω	100W

6.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ

วงจรตรวจจับสัญญาณสร้างขึ้นสำหรับตรวจจับสัญญาณกระแส i_{L1} และ i_{L3} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_3 ตามลำดับ รวมถึงตรวจวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_o โดยที่สัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งไปประมวลผลภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังภายในวงจร รวมถึงนำสัญญาณกระแสและแรงดันดังกล่าวไปใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี โดยวงจรตรวจจับสัญญาณจะประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส และวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

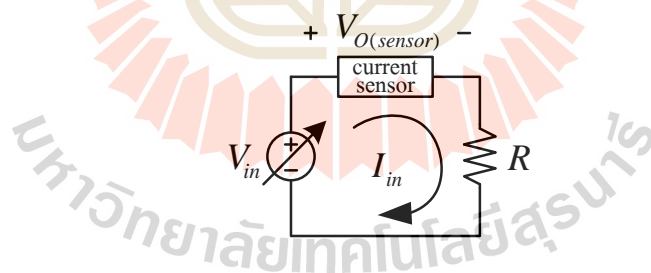
6.5.1 วงจรตรวจจับกระแส

การวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_3 จะใช้ตัวตรวจจับกระแส HX15-P ทั้งสองตัว โดยมีพิกัดกระแส 15A ทั้งนี้ในการทดสอบชุดทดสอบจะคำนึงถึงพิกัดกระแสในกรณีเกิดความผิดปกติ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 15A ดังนั้นตัวตรวจจับกระแสดังกล่าวมีความสามารถเพียงพอที่จะนำมาใช้งาน โดยโครงสร้างวงจรตรวจจับกระแส แสดงดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส

การเปรียบเทียบตัวตรวจจับกระแสทั้งสองตัว จะอาศัยวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 6.14 เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแส I_{in} ที่ไหลผ่านตัวตรวจจับกระแส โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับกระแส $V_{O(sensor)}$ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0V - 3V$ เพื่อนำไปสร้างสมการเส้นตรงต่อไป



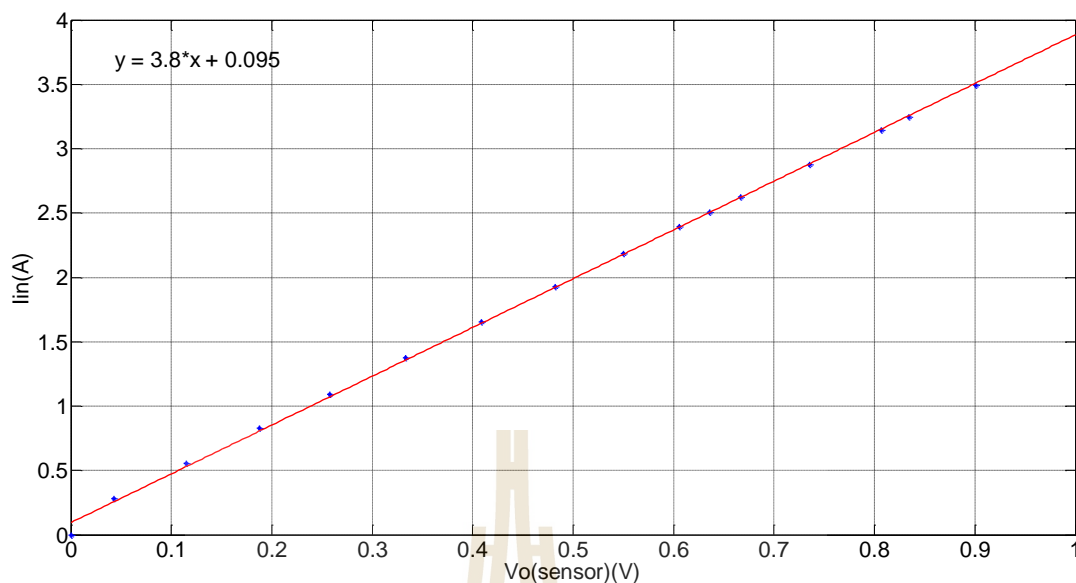
รูปที่ 6.14 วงจรไฟฟ้าสำหรับหาความสัมพันธ์ของตัวตรวจจับกระแส

สำหรับขั้นตอนการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับกระแส จะทำการปรับเพิ่มแรงดันอินพุต V_{in} เพื่อให้กระแสที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้น โดยกำหนดโหลดตัวต้านทานเป็น 20Ω ซึ่งผลการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับกระแส แสดงได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ตารางการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับกระแส

I_{in} (A)				$V_{O(sensor)}$ (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0	0	0	0
0.282	0.281	0.283	0.282	0.043	0.0431	0.043	0.043
0.556	0.557	0.557	0.557	0.115	0.116	0.116	0.116
0.827	0.828	0.826	0.827	0.187	0.188	0.187	0.188
1.092	1.089	1.090	1.090	0.258	0.257	0.257	0.258
1.374	1.375	1.376	1.375	0.332	0.334	0.335	0.334
1.655	1.656	1.655	1.656	0.408	0.410	0.408	0.409
1.927	1.928	1.923	1.926	0.481	0.483	0.479	0.482
2.183	2.186	2.190	2.186	0.549	0.551	0.552	0.551
2.394	2.398	2.393	2.395	0.605	0.607	0.604	0.606
2.506	2.508	2.511	2.508	0.635	0.637	0.639	0.637
2.621	2.624	2.624	2.624	0.665	0.668	0.668	0.668
2.874	2.879	2.876	2.876	0.734	0.737	0.736	0.736
3.141	3.146	3.143	3.144	0.806	0.807	0.806	0.807
3.245	3.247	3.246	3.246	0.834	0.836	0.835	0.835
3.495	3.490	3.492	3.493	0.901	0.900	0.901	0.901

จากตารางที่ 6.2 สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ แสดงได้ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ

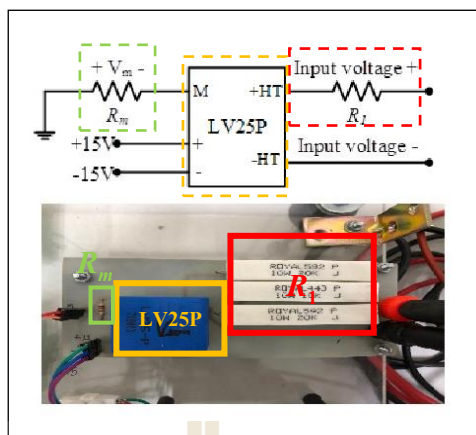
จากรูปที่ 6.15 สามารถหาสมการเส้นตรงของความสัมพันธระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{in} = 3.8V_{O(sensor)} + 0.095 \quad (6-1)$$

ซึ่งตัวตรวจจับกระแสสำหรับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_3 จะใช้สมการความสัมพันธ์ที่ (6-1) ในการคำนวณทั้งสองตัว

6.5.2 วงจรตรวจจับแรงดัน

การวัดแรงดันเอาต์พุต V_o ได้อาศัยตัวตรวจจับแรงดัน LV25-P ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 500V โดยในการทดสอบชุดทดสอบจะมีพิกัดแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ประมาณ 400V ดังนั้นตัวตรวจจับแรงดันดังกล่าวที่สามารถตรวจจับแรงดันในช่วง 0V – 500V นั้นมีความสามารถเพียงพอที่จะนำมาใช้งานสำหรับชุดทดสอบ โดยโครงสร้างวงจรตรวจจับแรงดัน แสดงดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

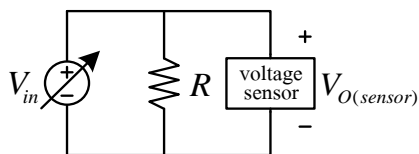
จากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันทางฝั่งอินพุต ต้องมีการป้องกันเพื่อไม่ให้กระแสทางด้านอินพุตไหลเกิน 10mA โดยการต่อตัวต้านทาน R_1 เข้าไป ทั้งนี้เมื่อพิจารณาแรงดันอินพุตเท่ากับ 500V จะสามารถออกแบบ R_1 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_1 = \frac{500}{10 \times 10^{-3}} = 50\text{k}\Omega \quad (6-2)$$

ในส่วนของตัวต้านทาน R_m ที่อยู่ทางฝั่งเอาต์พุต ใช้เพื่อปรับสัญญาณแรงดันจากตัวตรวจจับแรงดัน V_m ให้มีค่าไม่เกิน 3V และค่ากระแสไม่เกิน 25mA ก่อนเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งนี้การออกแบบค่าตัวต้านทาน R_m แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$R_m = \frac{3}{25 \times 10^{-3}} = 120\Omega \quad (6-3)$$

สำหรับการปรับเทียบตัวตรวจจับแรงดันนั้นทำเช่นเดียวกับตัวตรวจจับกระแส โดยอาศัยวงจรไฟฟ้างดรูปที่ 6.17 เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต V_{in} กับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับแรงดัน $V_{O(sensor)}$ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง



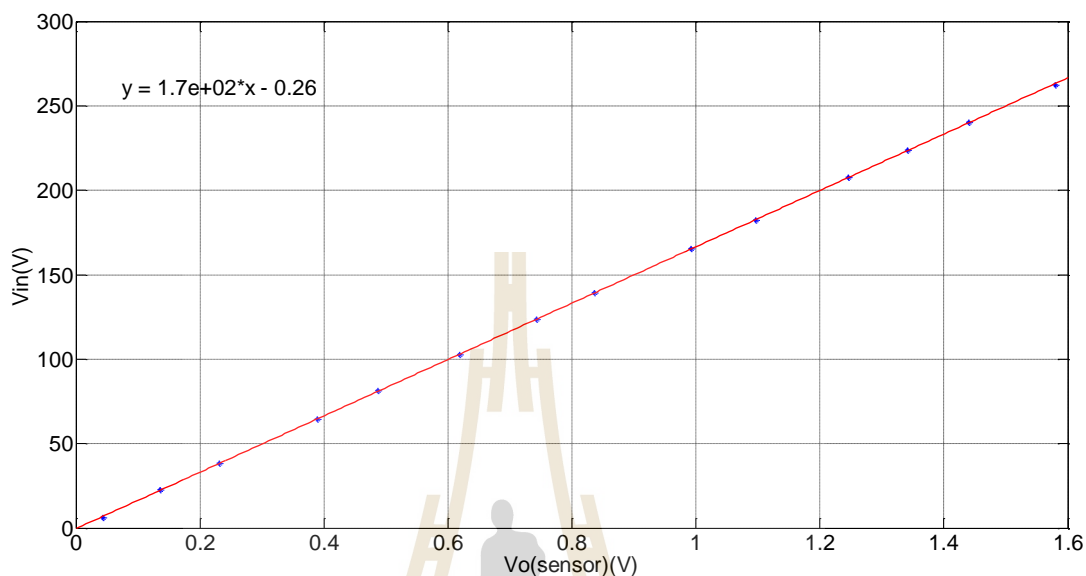
รูปที่ 6.17 วงจรไฟฟ้าสำหรับหาความสัมพันธ์ของตัวตรวจจับแรงดัน

สำหรับขั้นตอนการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับแรงดัน จะทำการปรับแรงดันอินพุต V_{in} จาก 0V – 260V เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต V_{in} กับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับแรงดัน $V_{O(sensor)}$ ซึ่งผลการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับแรงดัน แสดงได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ตารางการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจจับแรงดัน

V_{in} (V)				$V_{O(sensor)}$ (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0	0	0	0
20.05	23.79	23.99	22.61	0.133	0.137	0.137	0.136
38.40	41.09	35.56	38.35	0.232	0.240	0.221	0.231
59.97	65.54	68.47	64.66	0.352	0.394	0.421	0.389
80.34	81.75	81.81	81.3	0.477	0.491	0.493	0.487
99.67	105.12	104	102.93	0.586	0.639	0.632	0.619
118.83	130.39	122.33	123.85	0.696	0.798	0.735	0.743
139.56	140.21	137.89	139.22	0.840	0.842	0.826	0.836
162.32	163.44	170.26	165.34	0.982	0.985	1.009	0.992
179.53	184.70	183.09	182.44	1.091	1.099	1.098	1.096
206.97	211.06	205.43	207.82	1.244	1.252	1.242	1.246
219.10	225.97	226.03	223.7	1.327	1.347	1.349	1.341
238.58	243.65	238.37	240.2	1.427	1.467	1.426	1.440
260.43	268.03	259.34	262.6	1.570	1.602	1.568	1.580

จากตารางที่ 6.3 สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับแรงดัน แสดงได้ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ

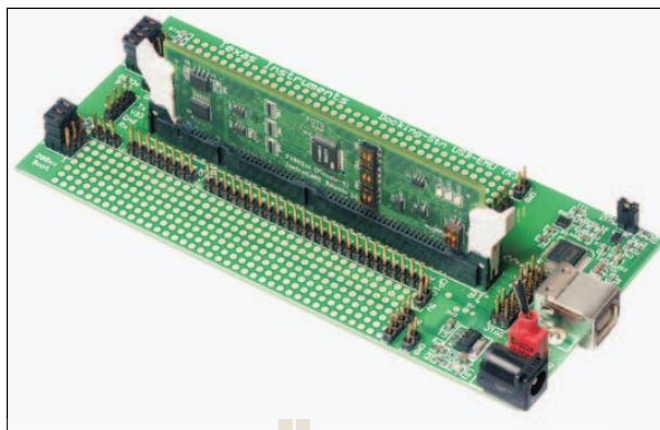
จากรูปที่ 6.18 สามารถหาสมการเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับแรงดัน ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{in} = 170V_{O(sensor)} - 0.26 \quad (6-4)$$

6.6 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณ

วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณเป็นวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์ภายในวงจร รวมถึงการแยกกราวด์ฝั่งแรงดันต่ำกับฝั่งแรงดันสูงออกจากกัน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมขณะส่งสัญญาณขับขาเกตของสวิตช์

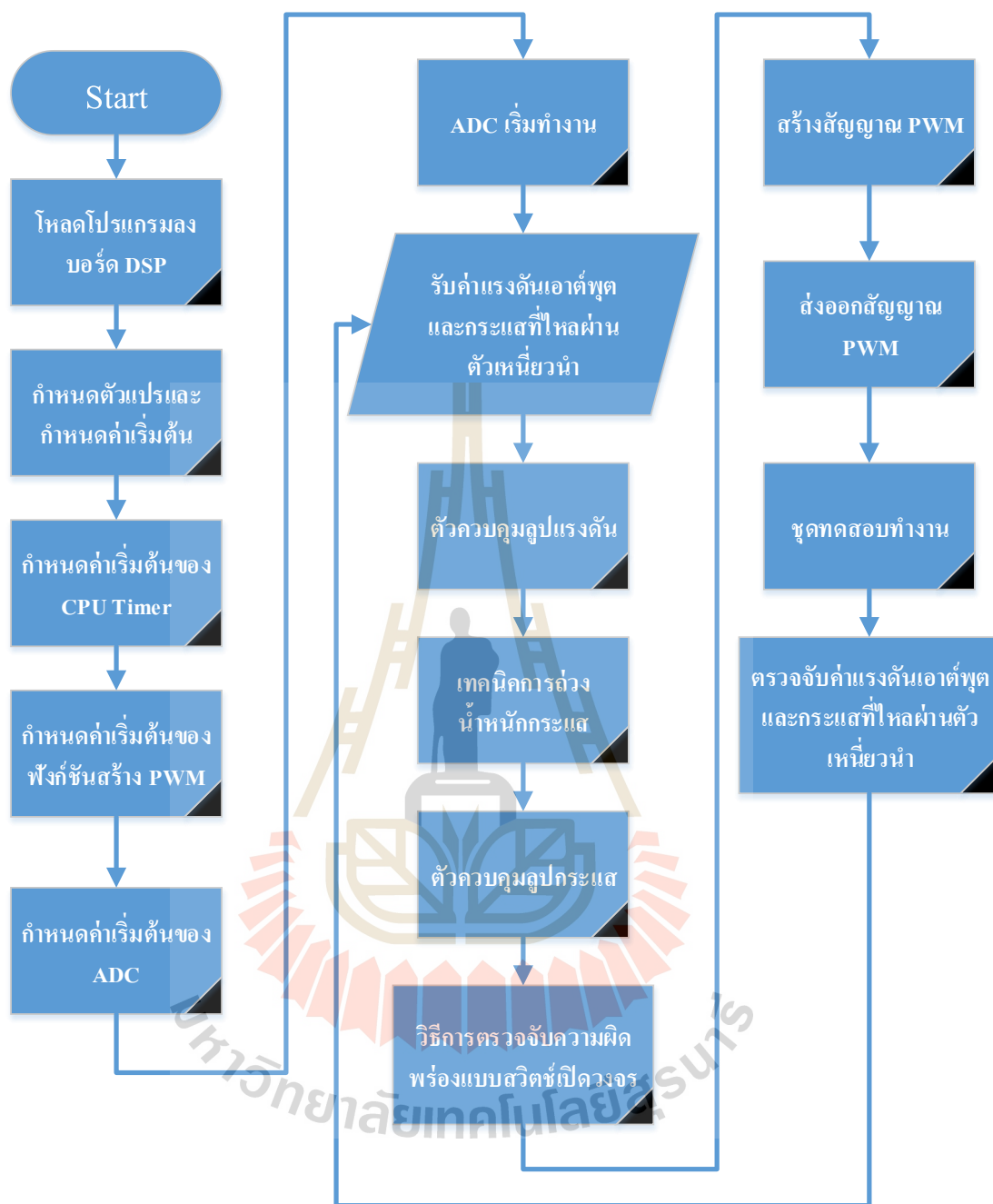
วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณได้อาศัยไอซีออปโตเบอร์ PC923L ซึ่งเป็นวงจรแยกโคคัลที่มีการขยายสัญญาณในตัววงจร โดยไอซีออปโตเบอร์ PC923L และโครงสร้างวงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณแสดงดังรูปที่ 6.19 และ 6.20



รูปที่ 6.21 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335

การโปรแกรมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335

การเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตและการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ได้อาศัยภาษาซีในการเขียนโปรแกรม โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมและการตรวจจับความผิดปกติสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงได้ดังรูป 6.22



รูปที่ 6.22 ไคอะแกรมการเขียนโปรแกรม

จากไคอะแกรมลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมภาษาซีในรูปที่ 6.22 สามารถอธิบายการเขียนโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วนสำคัญได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 โปรแกรมภาษาซีสำหรับรับและคำนวณปรับค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลง ADC ของแรงดันเอาต์พุต V_o กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} และ i_{L3} แสดงการเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```
Voltage_Vo = AdcMirror.ADCRESULT0; //รับค่าดิจิตอลของแรงดัน  $V_o$ 
Current_IL1 = AdcMirror.ADCRESULT1; //รับค่าดิจิตอลของกระแส  $i_{L1}$ 
Current_IL3 = AdcMirror.ADCRESULT2; //รับค่าดิจิตอลของกระแส  $i_{L3}$ 
Vo=((1.7e2*(Voltage_Vo))-0.26); //ปรับเทียบค่าแรงดัน  $V_o$ 
IL1=((3.8*(Current_IL1))+0.095); //ปรับเทียบค่ากระแส  $i_{L1}$ 
IL3=((3.8*(Current_IL3))+0.095); //ปรับเทียบค่ากระแส  $i_{L3}$ 
```

ส่วนที่ 2 โปรแกรมภาษาซีสำหรับการคำนวณของตัวควบคุมพีไอ เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส และวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแสดงดังนี้

```
// PI V loop
err_v=Vref-Vo; //คำนวณค่าความผิดพลาดของแรงดัน  $V_o$ 
Upv=kpv*err_v; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Uiv=(kiv*Ts*err_v)+Uiv_1; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
Iin_ref=Upv+Uiv; //คำนวณกระแสอ้างอิงจากลูปแรงดัน

// Current weighting
Iref1=Iin_ref*0.85; //การถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับลูปกระแสที่ 1
Iref2=Iin_ref*0.15; //การถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับลูปกระแสที่ 2

// PI I loop1
err_i=Iref1-IL1; //คำนวณค่าความผิดพลาดของกระแส  $i_{L1}$ 
Upi=kpi*err_i; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Uii=(kii*Ts*err_i)+Uii_1; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
Upi_i=Upi+Uii; //คำนวณสัญญาณอ้างอิงสำหรับสร้าง PWM

// PI I loop2
err_i2=Iref2-IL3; //คำนวณค่าความผิดพลาดของกระแส  $i_{L3}$ 
Upi2=kpi2*err_i2; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Uii2=(kii2*Ts*err_i2)+Uii_2; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
Upi_i2=Upi2+Uii2; //คำนวณสัญญาณอ้างอิงสำหรับสร้าง PWM
```

```

//update variable
Uiv_1=Uiv; //อัปเดตค่า Uiv_1
Uii_1=Uii; //อัปเดตค่า Uii_1
Uii_2=Uii2; //อัปเดตค่า Uii_2

//fault Detection
io_new_1=IL1; //อัปเดตค่า io_new_1
io_new_3=IL3; //อัปเดตค่า io_new_3
slope_1=(io_new_1-io_old_1)/(T*Ts-((T-1)*Ts)); //คำนวณหาค่าความชันของ  $i_{L1}$ 
slope_3=(io_new_3-io_old_3)/(T*Ts-((T-1)*Ts)); //คำนวณหาค่าความชันของ  $i_{L2}$ 
slopesig_1=slope_1/abs(slope_1); //คำนวณหาค่าความชันปกติของ  $i_{L1}$ 
slopesig_3=slope_3/abs(slope_3); //คำนวณหาค่าความชันปกติของ  $i_{L3}$ 
total=total+1; //นับจำนวนจุดใน 1 คาบเวลา
if (slopesig_1== -1){ sum_1=sum_1+1; //พิจารณาค่าความชันปกติของ  $i_{L1}$  ว่ามีค่าเป็น -1
แล้วทำการบวก sum_1 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (sum_1>=10){ F_1=F_1+1; //พิจารณา sum_1 ว่ามีค่าเกิน 10 แล้วทำการบวก F_1
เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (slopesig_3== -1){ sum_3=sum_3+1; //พิจารณาค่าความชันปกติของ  $i_{L3}$  ว่ามีค่าเป็น -1
แล้วทำการบวก sum_3 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (sum_3>=10){ F_3=F_3+1; //พิจารณา sum_3 ว่ามีค่าเกิน 10 แล้วทำการบวก F_3
เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (slopesig_1== 1){ sump_1=sump_1+1; //พิจารณาค่าความชันปกติของ  $i_{L1}$  ว่ามีค่าเป็น 1
แล้วทำการบวก sump_1 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (sump_1>=10){ F_1=F_1+1; //พิจารณา sump_1 ว่ามีค่าเกิน 10 แล้วทำการบวก
F_1 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (slopesig_3== 1){ sump_3=sump_3+1; //พิจารณาค่าความชันปกติของ  $i_{L3}$  ว่ามีค่าเป็น 1
แล้วทำการบวก sump_3 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (sump_3>=10){ F_3=F_3+1; //พิจารณา sump_3 ว่ามีค่าเกิน 10 แล้วทำการบวก
F_3 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง
if (Upi_i>=0.8){ G_2=G_2+1; //พิจารณา Upi_i ว่ามีค่าเกินกว่า 0.8 แล้วทำการบวก
G_2 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง

```

```

if (sum_1==10||sump_1==10||sum_3==10||sump_3==10){ H=H+1; //ตรวจสอบผลรวมแต่
//ค่า ว่ามีค่าเท่ากับที่กำหนดไว้ แล้วทำการบวก H
//เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง

if (total==10&&H==0){ //ตรวจสอบว่าจุดการทำงานครบ 10 จุด (1 คาบเวลา)
//และ H เท่ากับ 0

if (G_2>=10){ F_2=F_2+1; //ตรวจสอบ G_2 ว่ามีค่ามากกว่า 10 แล้วทำการบวก
//F_2 เพิ่มขึ้นทีละหนึ่ง

if (Upi_i<=0.8){ G_2=0; //พิจารณา Upi_i ว่ามีค่าน้อยกว่า 0.8 ดังนั้น G_2 จะ
//เท่ากับ 0

if (F_1>=5){ F1=1; //ตรวจสอบ F_1 ว่ามีค่าเกิน 5 เพื่อแสดงว่าเกิด
//ความผิดปกติที่สวิตช์ S1

if (F_2>=2){ F2=1; //ตรวจสอบ F_2 ว่ามีค่าเกิน 2 เพื่อแสดงว่าเกิด
//ความผิดปกติที่สวิตช์ S2

if (F_3>=5){ F3=1; //ตรวจสอบ F_3 ว่ามีค่าเกิน 5 เพื่อแสดงว่าเกิด
//ความผิดปกติที่สวิตช์ S3

if (total>=10){ sump_1=0; sum_1=0; sump_3=0; sum_3=0; total=0; //ถ้า total มากกว่า 10
//ทำการรีเซ็ตค่าต่าง ๆ ให้เท่ากับ 0

io_old_1=io_new_1; //อัปเดตค่า io_old_1

io_old_3=io_new_3; //อัปเดตค่า io_old_3

```

และส่วนที่ 3 โปรแกรมภาษาซีสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM โดยจะเป็นกระบวนการภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมด้านเท่า กับสัญญาณอ้างอิง แสดงดังนี้

```

if (F1==1){ J=Upi_i; //ตรวจสอบสถานะเกิดความผิดปกติที่ S1 และ
//อัปเดตค่า J

if (F2==1){ J=Upi_i; //ตรวจสอบสถานะเกิดความผิดปกติที่ S2 และ
//อัปเดตค่า J

if (F3==1){ J=Upi_i; //ตรวจสอบสถานะเกิดความผิดปกติที่ S3 และ
//อัปเดตค่า J

```

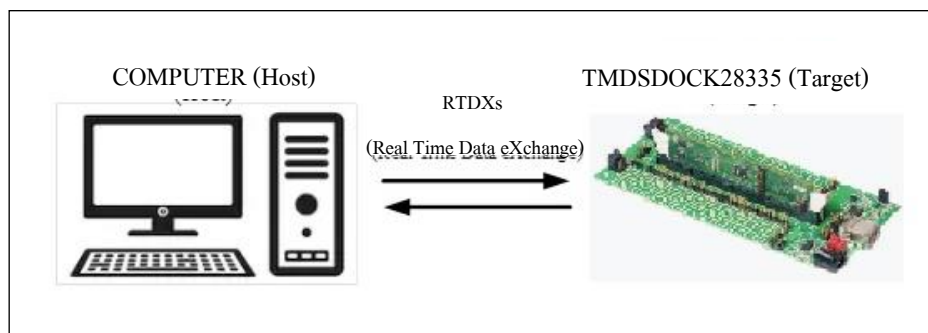
$EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i;$ //สร้างสัญญาณ PWM
 สำหรับสวิตช์ S_1
 $EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i;$ //สร้างสัญญาณ PWM
 สำหรับสวิตช์ S_2
 $EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i2;$ //สร้างสัญญาณ PWM
 สำหรับสวิตช์ S_3
 $EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*J;$ //สร้างสัญญาณ PWM

สำหรับสวิตช์ S'_1 S'_2 หรือ S'_3 โดยที่ J มีค่าเท่ากับ Upi_i หรือ Upi_i2 ซึ่งขึ้นอยู่กับสวิตช์ที่เกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร และพิจารณาเฉพาะสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดขึ้นเท่านั้น

นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมการทำงานและการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรในส่วนอื่น ๆ ที่เป็นเพียงการกำหนดค่าเริ่มต้น และการประกาศฟังก์ชันการทำงาน โดยรายละเอียดเพิ่มเติมได้แสดงในส่วนภาคผนวก ง.

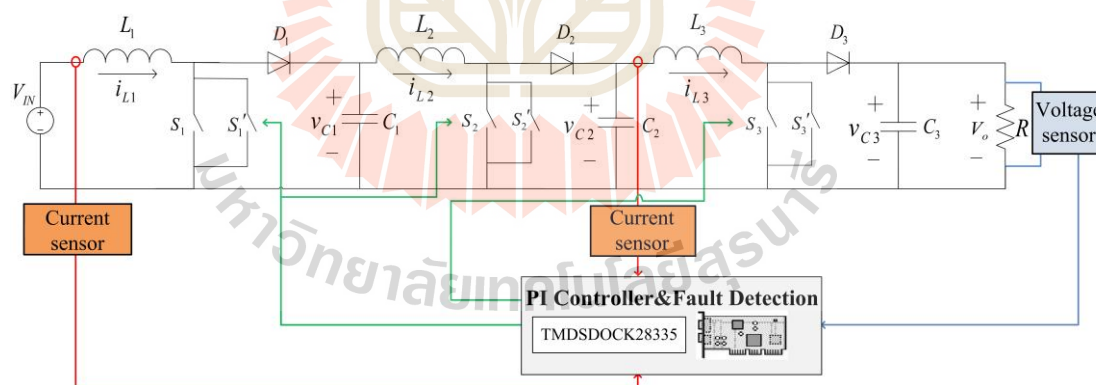
6.8 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอและวิธีการตรวจจับความผิดพลาด

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In Loop : HIL) เป็นการใช้ออร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ทำงานร่วมกับโปรแกรม MATLAB SIMULINK โดยสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสเพื่อจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น รวมถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ได้พัฒนาขึ้น การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปได้อาศัยโครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 รวมถึงค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอและเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 นำมาสร้างขึ้นภายในโปรแกรม MATLAB SIMULINK โดยอาศัยการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรและวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรดังที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ด้วยโปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) โดยหลักการการทำงานของฮาร์ดแวร์ในลูปจะเป็นการรับส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchange) เชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม SIMULINK (Host) กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 (Target) โดยแผนภาพการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP

สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เป็นการจำลองสถานการณ์ที่ใช้บอร์ด DSP ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB SIMULINK ภายในคอมพิวเตอร์กับฮาร์ดแวร์ที่เป็นบอร์ด DSP TMDSDOCK28335 ผ่านช่องทางสื่อสารแบบ RTDX มีจุดประสงค์เพื่อทำการทดสอบการทำงานของคำสั่งตัวควบคุมและวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในบอร์ด DSP โดยโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงดังรูปที่ 6.24 ทั้งนี้รายละเอียดการเชื่อมต่อและใช้งานฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงในภาคผนวก จ.

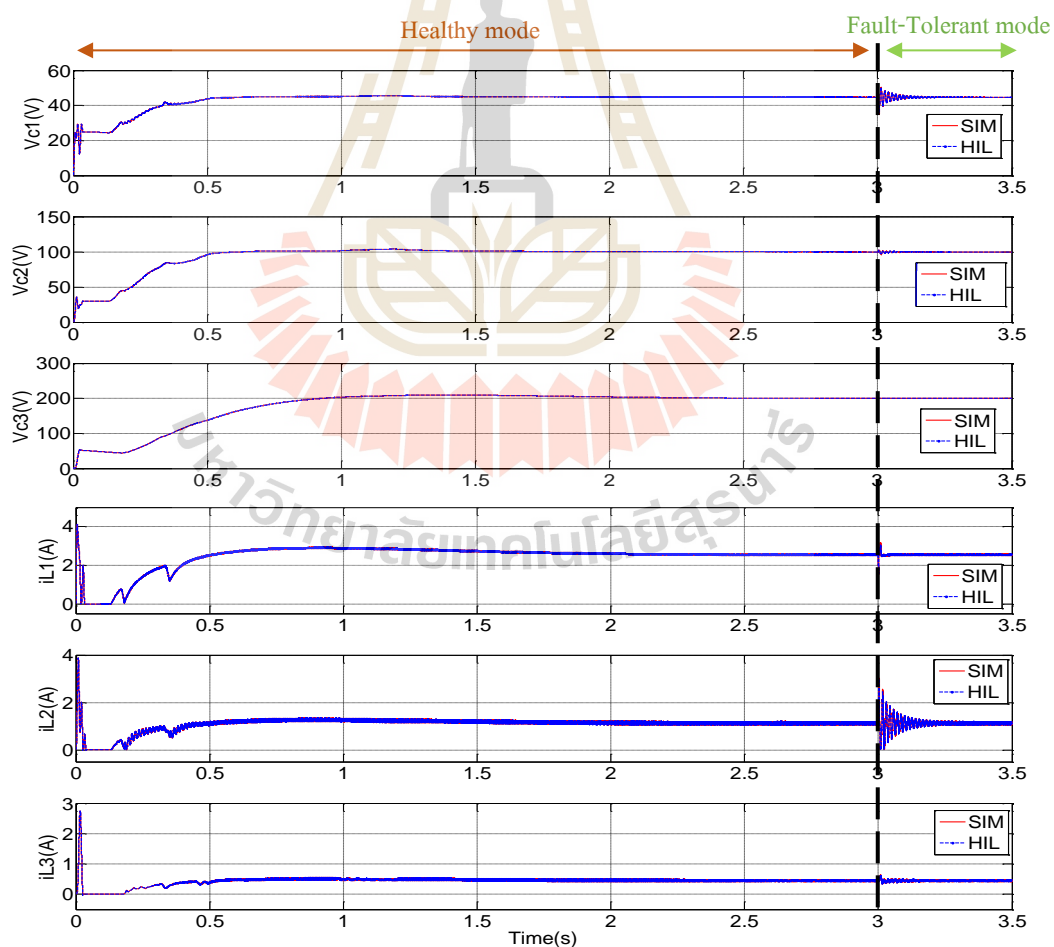


รูปที่ 6.24 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

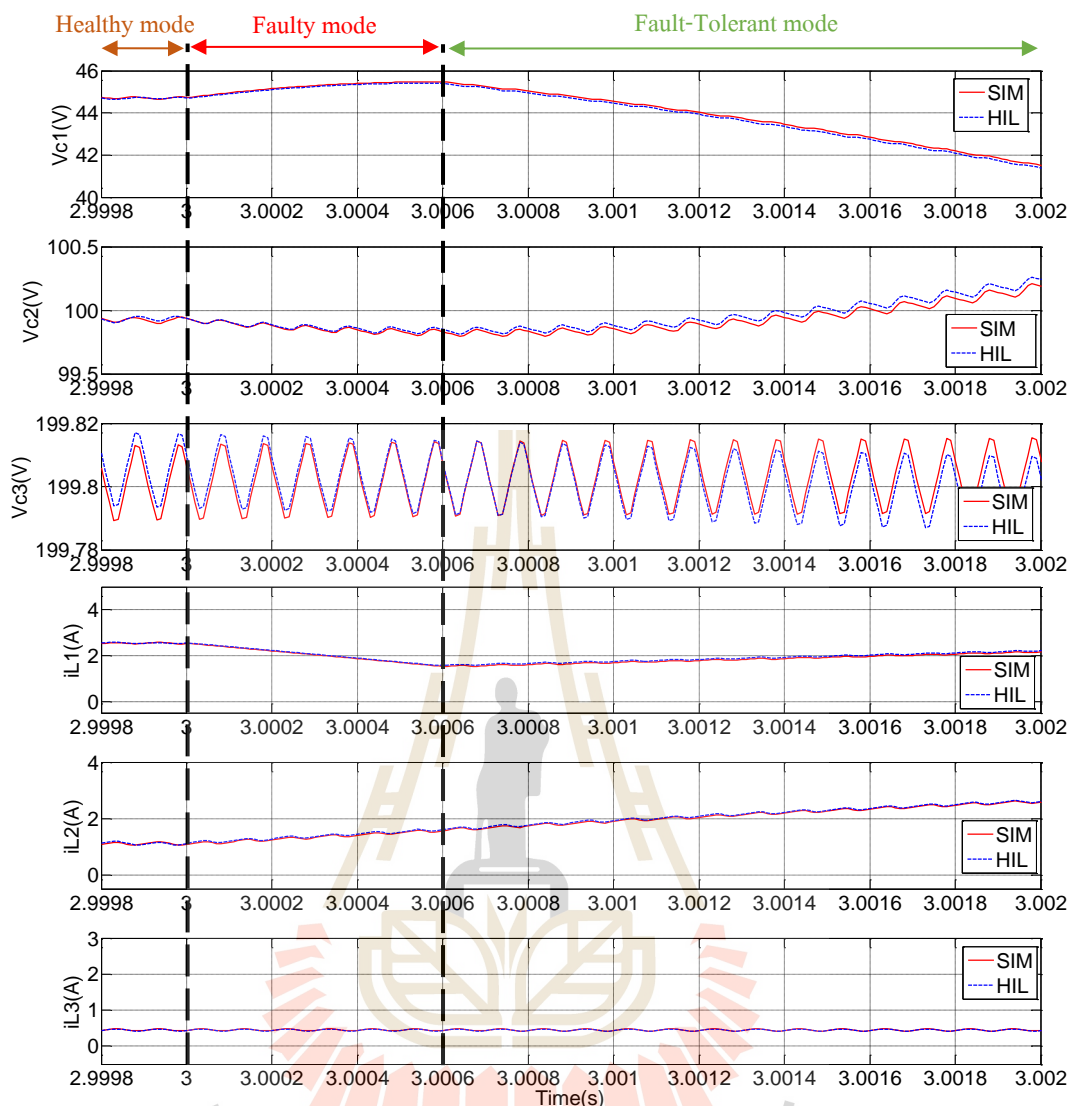
การจำลองสถานการณ์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยกำหนดให้แรงดันอินพุต V_{IN} มีค่าคงที่ 20V และแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V ซึ่งกำหนดให้เกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ที่วินาทีที่ 3 โดยที่เมื่อตรวจจับพบความผิดปกติแบบเปิดวงจร จึงจะให้สวิตช์สำรองที่ได้นำมาขนานไว้ทำงานแทนทันที รูปที่ 6.25 และ 6.26 แสดงผลการเปรียบเทียบ

เทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK กับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.25 และ 6.26 ได้แสดงผลของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ซึ่งจะเห็นว่าผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสองมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งในสภาวะปกติ (Healthy mode) สภาวะเกิดความผิดปกติ (Faulty mode) และสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ (Fault-tolerant mode) โดยในสภาวะปกติแรงดันเอาต์พุตทั้งสองกรณีมีค่าเพิ่มขึ้นสู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 200V กระแส i_{L1} i_{L2} และ i_{L3} ก็มีการปรับค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันแรงดันเอาต์พุต ส่วนสภาวะเกิดความผิดปกติแรงดัน v_{C1} กระแส i_{L1} และ i_{L2} ทั้งสองกรณีมีการสั้นไกวเกิดขึ้น และในส่วนสุดท้ายสภาวะภายใต้เกิดความคงทนต่อความผิดปกติ แรงดันและกระแสทั้งสองกรณีจะกลับเข้าสู่ค่าเดิมหลังจากให้สวิตช์สำรองทำงานแทน



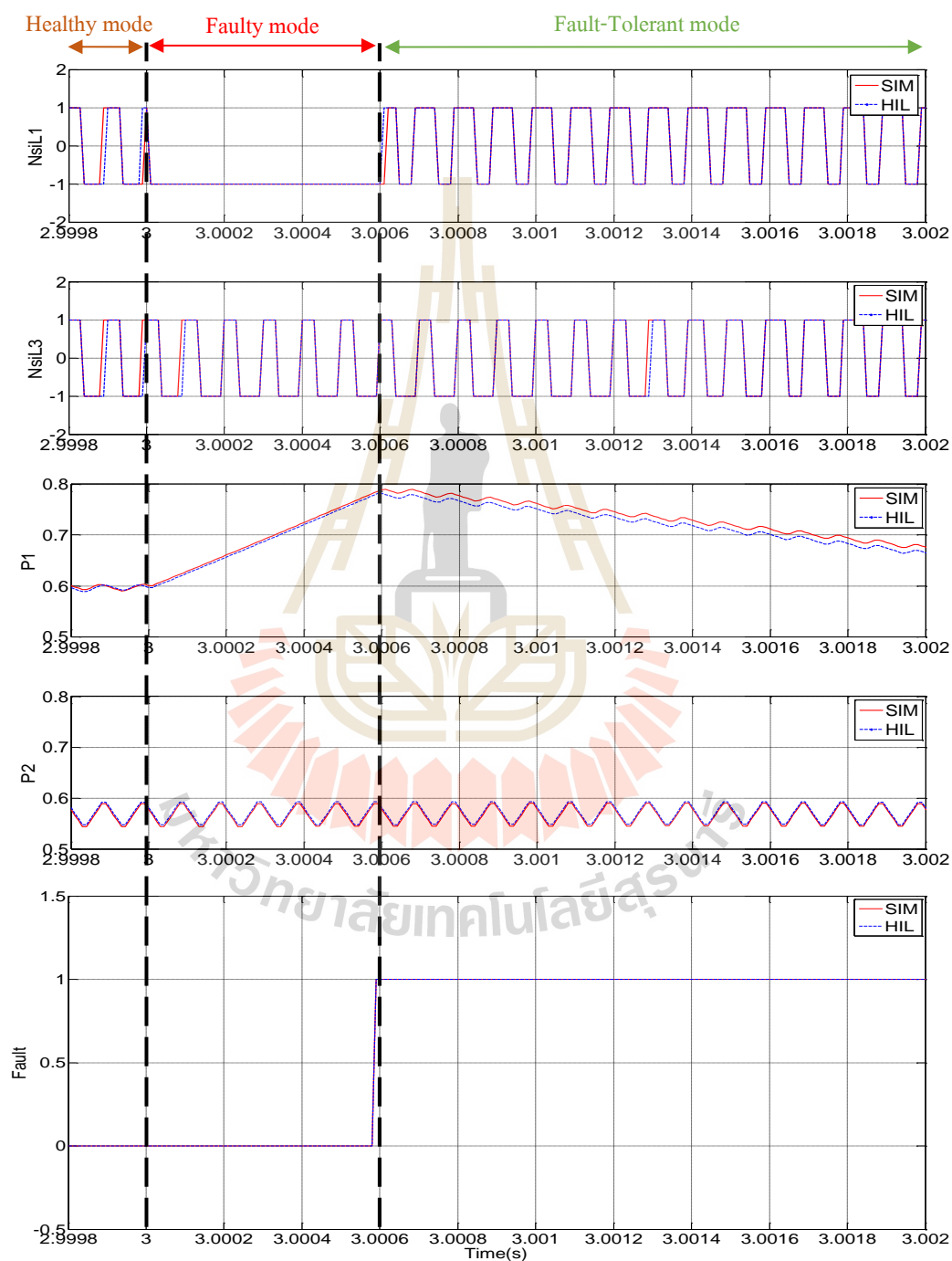
รูปที่ 6.25 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์และการทำแบบฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ 6.26 ภาพขยายผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์และการทำแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

รูปที่ 6.27 แสดงผลค่าความชันปกติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} i_{L3} สัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 P_2 และสถานะการตรวจจับความผิดปกติ ซึ่งจะเห็นว่าผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณีมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งในสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 3 สภาวะเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 3 จนถึงวินาทีที่ 3.0006 และสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ ทั้งนี้จากผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่าง ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK และผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ให้ผลตอบแทนของแรงดันเอาต์พุต V_o กระแส i_{L1} i_{L2} i_{L3} ค่าความชันปกติ Nsi_{L1} Nsi_{L3} และสัญญาณควบคุมการสวิตช์ P_1 และ P_2 รวมถึงสถานะการตรวจจับความผิด

พร้อมมีผลเป็นไปในทางสอดคล้องใกล้เคียงกัน จึงทำให้สามารถยืนยันได้ว่าตัวควบคุมพีไอ เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส และวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซี สามารถนำมาใช้ควบคุมและตรวจจับความผิดปกติการทำงานของชุดทดสอบได้



รูปที่ 6.27 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์และการทำแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

6.9 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เริ่มตั้งแต่การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง การเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น การเลือกและใช้งานตัวตรวจจับกระแสและตัวตรวจจับแรงดัน รวมถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาดและตัวควบคุมพีไอ เพื่อสร้างสัญญาณ PWM จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMS320C28335 การสร้างวงจรถ่ายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบ เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส และวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตและตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้เพื่อนำตัวควบคุมและวิธีการตรวจจับความผิดพลาดไปใช้กับระบบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 7 ต่อไป



บทที่ 7

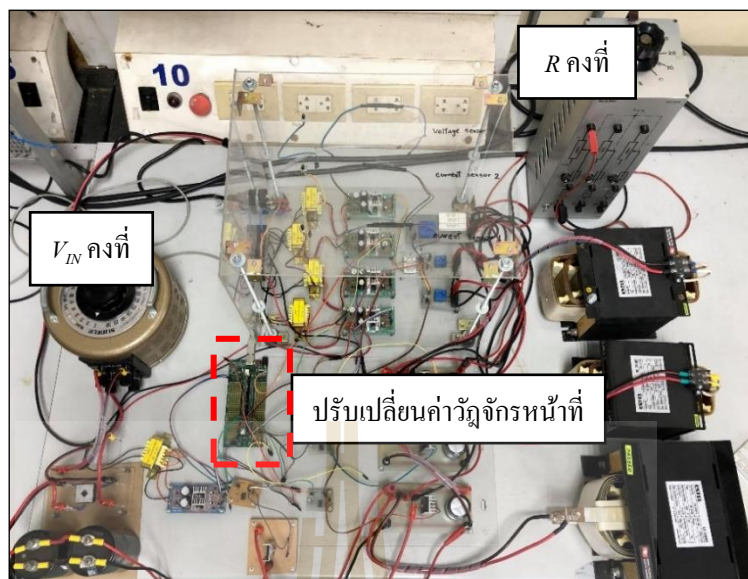
ผลการทดสอบ

7.1 บทนำ

จากการสร้างชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 6 ในบทนี้จะดำเนินการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบดังกล่าว เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ รวมถึงวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร และสั่งให้สวิตช์ตัวสำรองทำงานแทนทันทีที่ตรวจจับพบความผิดปกติ เพื่อให้วงจรดังกล่าวมีความคงทนต่อความผิดปกติ สามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดสอบชุดทดสอบจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์กับผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ณ จุดการทำงานต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้ การทดสอบชุดทดสอบขณะที่ไม่มีตัวควบคุม การทดสอบชุดทดสอบขณะใช้ตัวควบคุมที่ไ้ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ ภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป และการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์แต่ละตัว โดยใช้วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการทำให้อุปกรณ์มีความคงทนต่อความผิดปกติ เพื่อสามารถทำงานได้ต่อไปแม้มีความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น

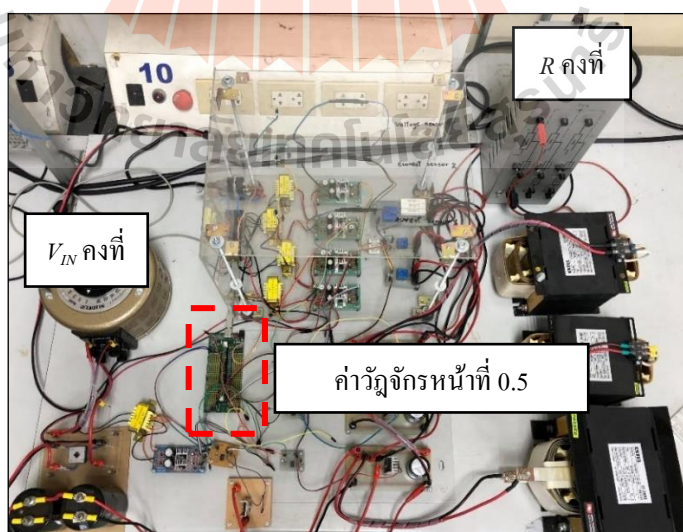
7.2 ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม

การทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม จะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ให้กับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น กำหนดให้สัญญาณพัลส์มีค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ที่ความถี่ 10kHz ซึ่งจะทำการพิจารณาระหว่างการจำลองสถานการณ์กับผลทดสอบจากชุดทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ชุดทดสอบวงจรกรณีไม่มีตัวควบคุม

การทดสอบชุดทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 7.2 เมื่อปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีค่าเท่ากับ 0.5 โดยการเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMS320C28335 ทั้งนี้กำหนดให้แรงดันอินพุต V_{IN} มีค่าคงที่เท่ากับ 20V

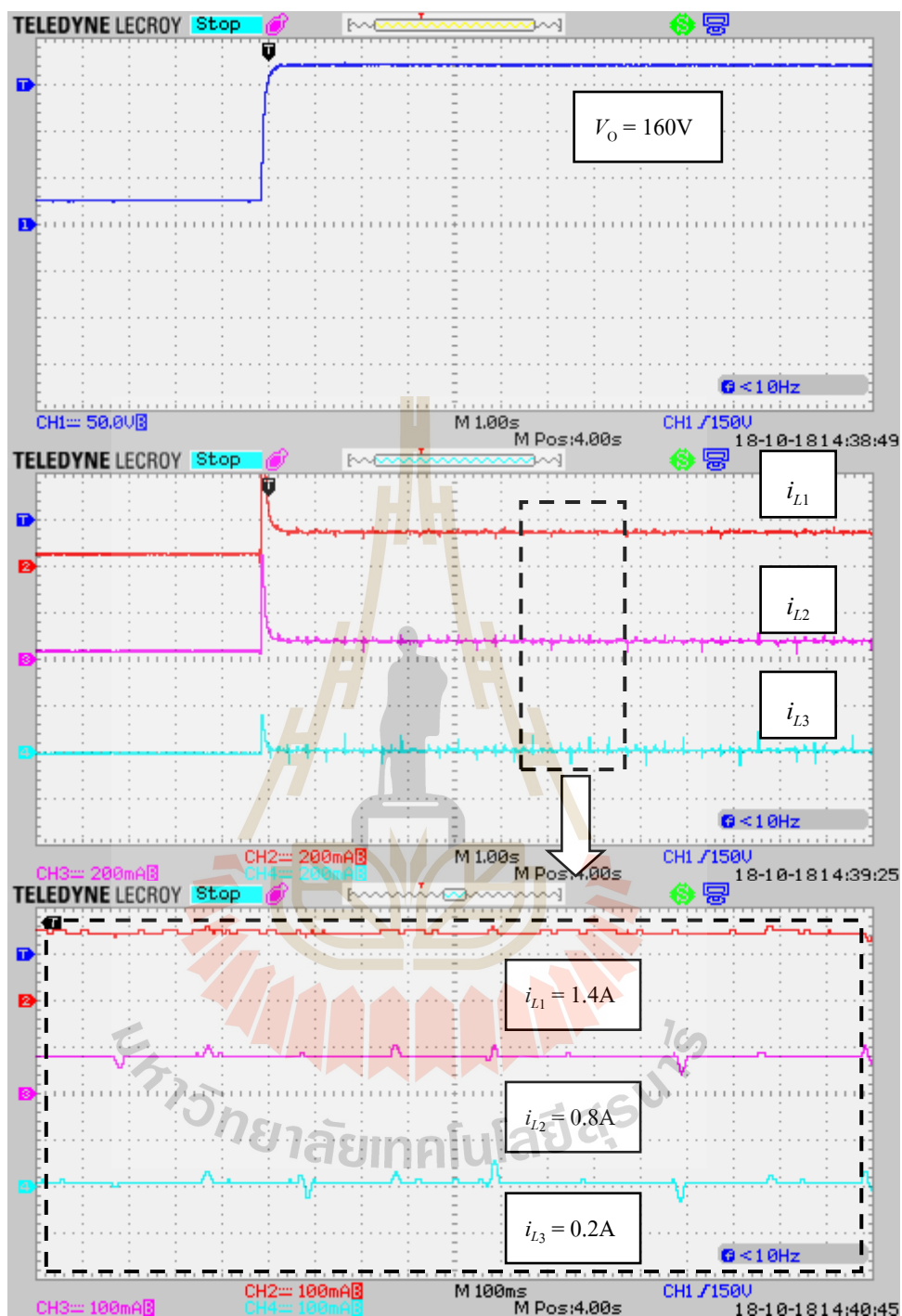


รูปที่ 7.2 ชุดทดสอบวงจรกรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5

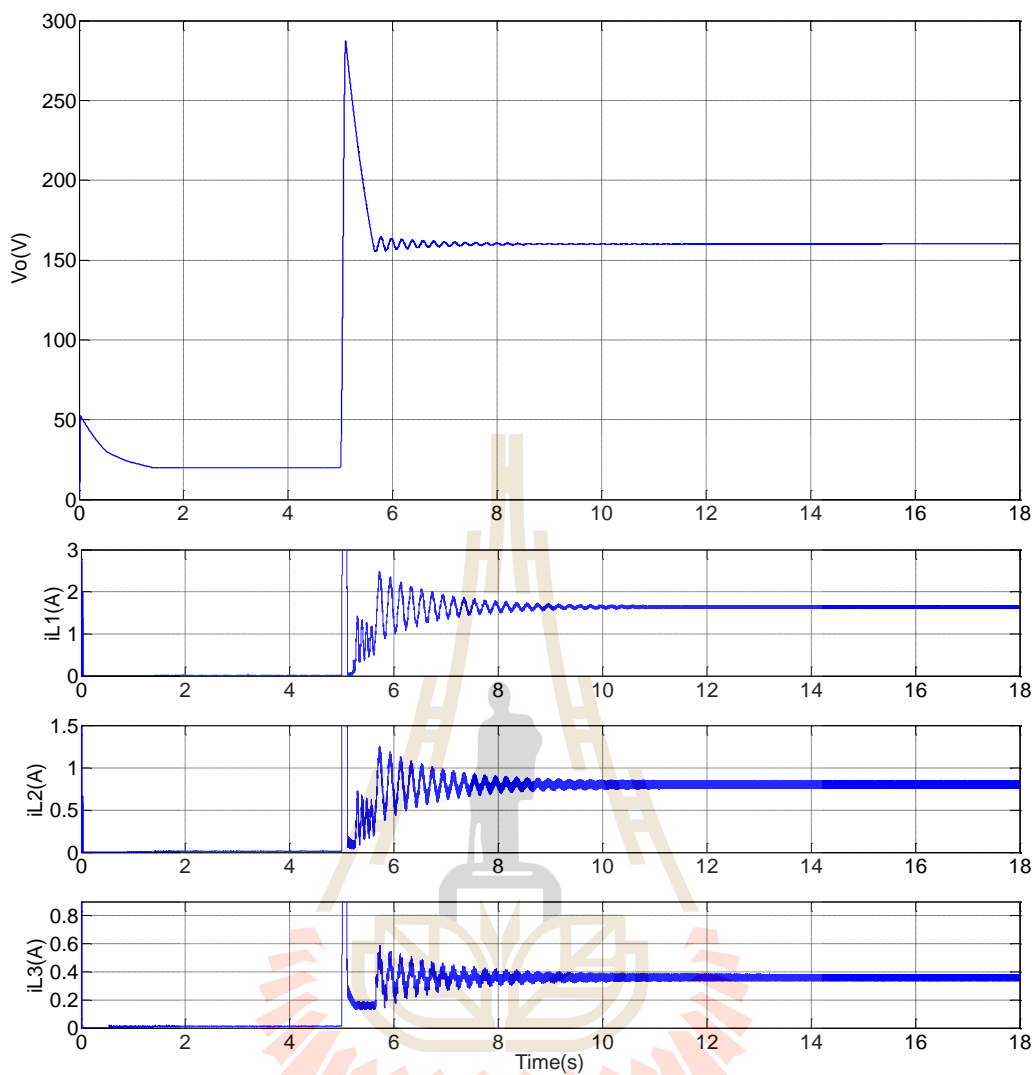
ผลการทดสอบวงจรบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าทีเท่ากับ 0.5 แสดงได้ดังรูปที่ 7.3 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทดสอบวงจรในช่วงเวลาที่ชุดทดสอบยังไม่ได้รับสัญญาณพัลส์ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรคือประมาณ 20V และเมื่อชุดทดสอบได้รับค่าสัญญาณพัลส์สั่งให้สวิตช์ทำงานที่วัฏจักรหน้าทีเท่ากับ 0.5 แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 160V และในส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ค่าจะมีการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราว ก่อนจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวโดยมีค่าประมาณ 1.4A, 0.8A และ 0.2A ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าทีเท่ากับ 0.5 แสดงดังรูปที่ 7.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราวก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งที่สถานะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 165V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว พบว่ามีการพุ่งเกินในช่วงสถานะชั่วคราวก่อนกลับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ค่าประมาณ 1.5A, 0.8A และ 0.35A ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบวงจรมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์



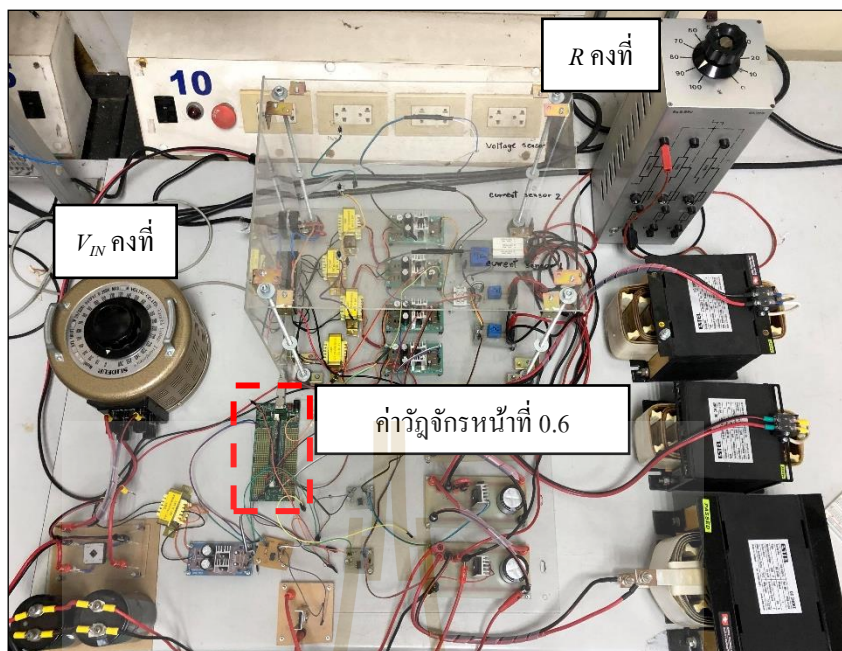


รูปที่ 7.3 ผลการทดสอบวงจรกรณีนีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5



รูปที่ 7.4 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5

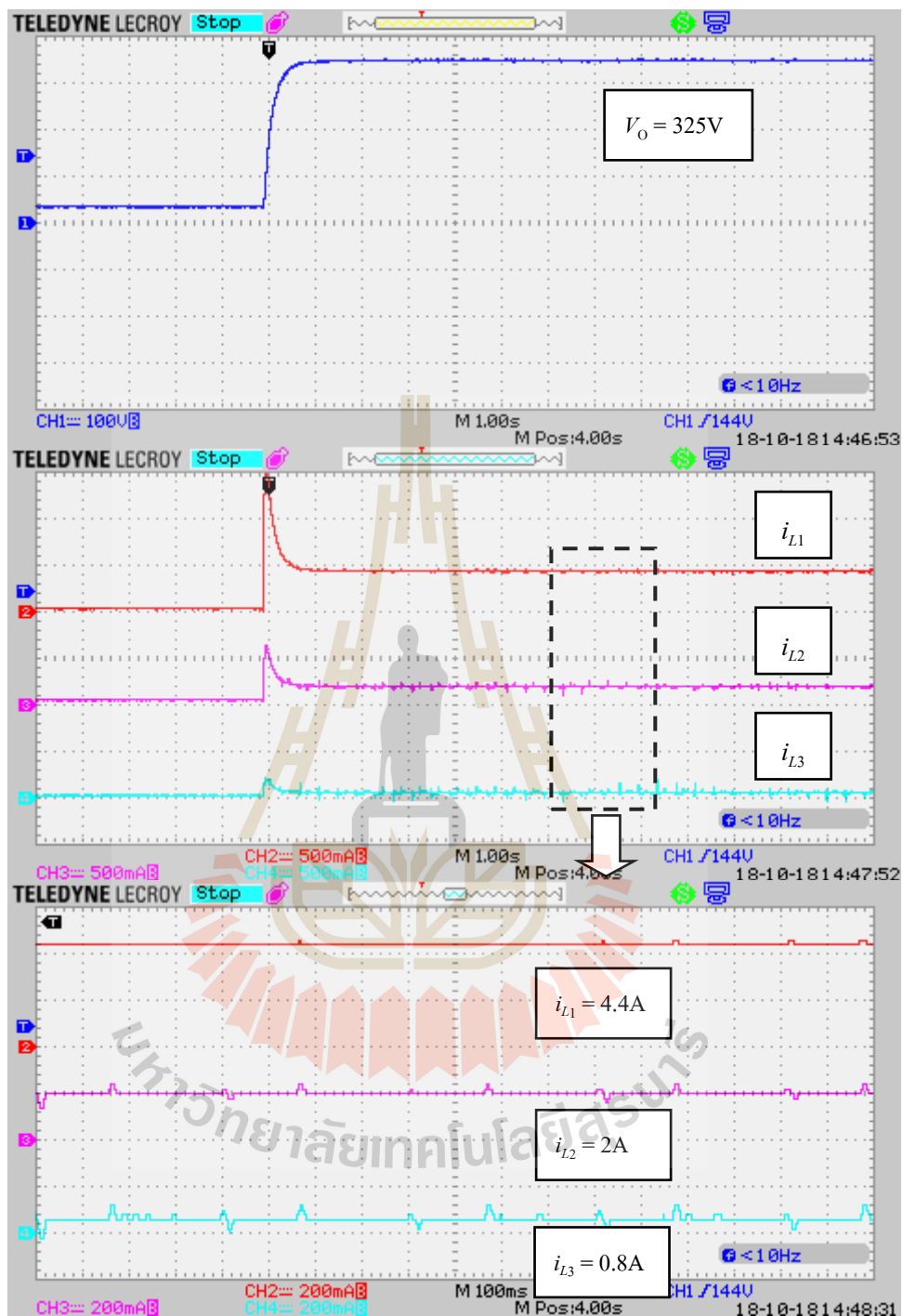
จากนั้นทำการทดสอบชุดทดสอบวงจรมอสต์คอนเวอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น โดยเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าจาก 0.5 เป็น 0.6 สำหรับสวิตช์ทั้งสามตัว โดยอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูป 7.5 ซึ่งกำหนดให้แรงดันอินพุตเท่ากับ 20V



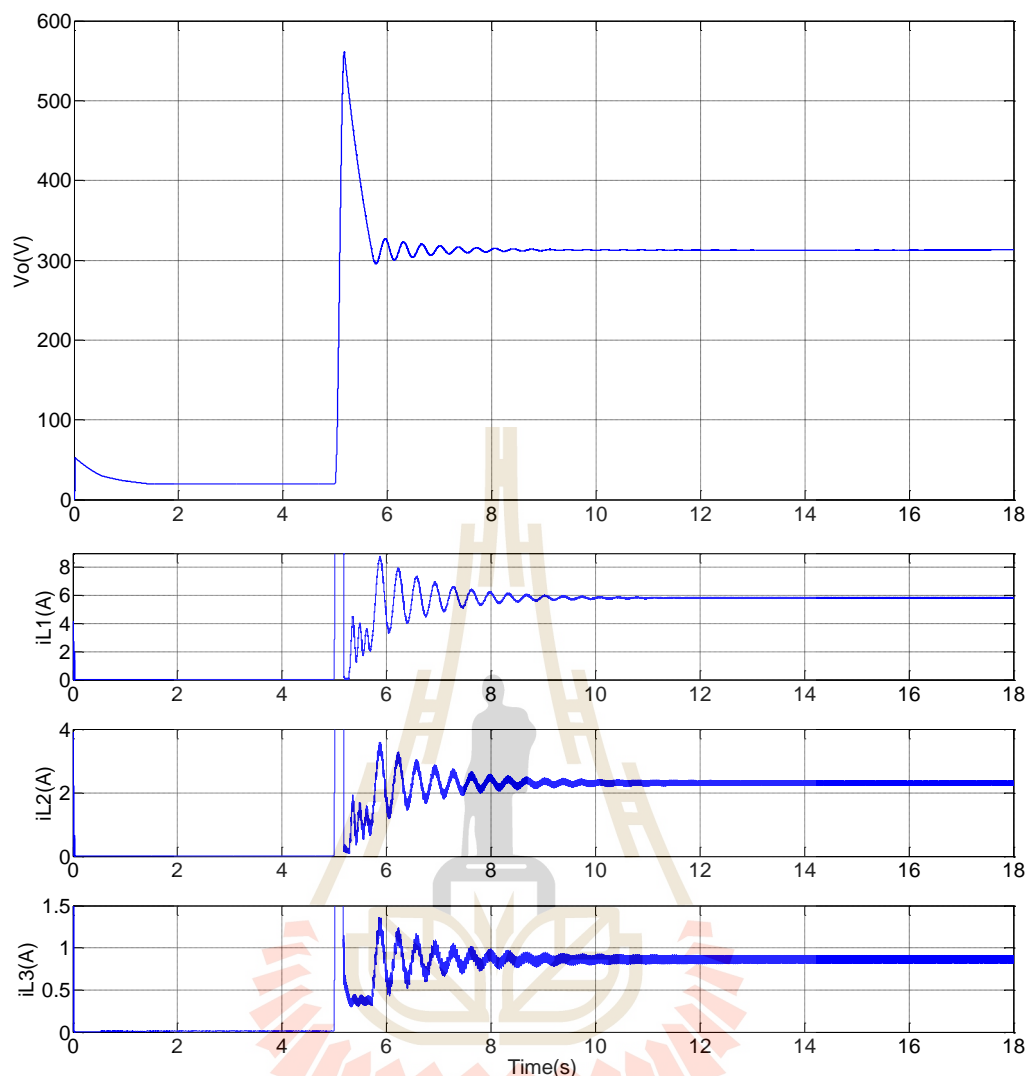
รูปที่ 7.5 ชุดทดสอบวงจรกรณีสี่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.6

สำหรับผลการทดสอบวงจรบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นกรณีสี่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.6 แสดงได้ดังรูปที่ 7.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อชุดทดสอบได้รับคำสั่งสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ค่าแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากรณีที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5 ซึ่งในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 325V โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราว ก่อนจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งมีค่าประมาณ 4.4A, 2A และ 0.8A ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.6 แสดงดังรูปที่ 7.7 ซึ่งผลการทดสอบวงจรมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ โดยสังเกตได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราวก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งที่สถานะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 315V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว จะมีการพุ่งเกินในช่วงสถานะชั่วคราวก่อนกลับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ค่าประมาณ 5.5A, 2.3A และ 0.8A ตามลำดับ



รูปที่ 7.6 ผลการทดสอบวงจรนี้มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.6



รูปที่ 7.7 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.6

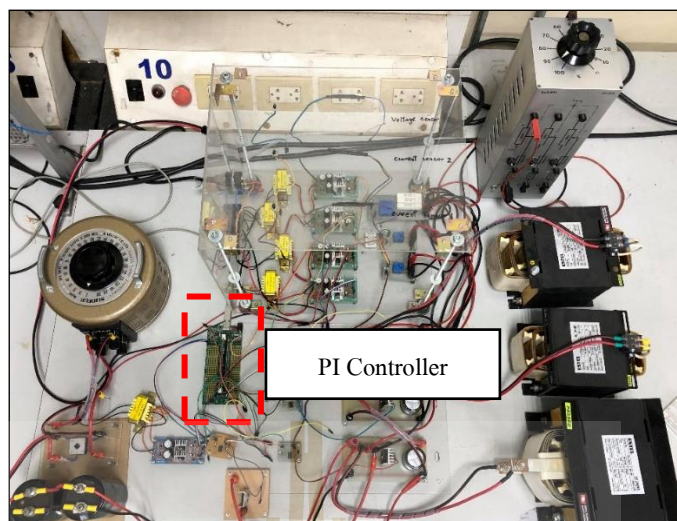
จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวที่ได้จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบ แสดงได้ดังตารางที่ 7.1 ซึ่งจากตารางดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ว่าผลการทดสอบจากชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มที่สอดคล้องใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ

ค่าวัฏจักรหน้าที (D)	สัญลักษณ์	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการทดสอบ
0.5	V_o	165V	160V
	i_{L1}	1.5A	1.4A
	i_{L2}	0.8A	0.8A
	i_{L3}	0.35A	0.2A
0.6	V_o	315V	325V
	i_{L1}	5.5A	4.4A
	i_{L2}	2.3A	2A
	i_{L3}	0.8A	0.8A

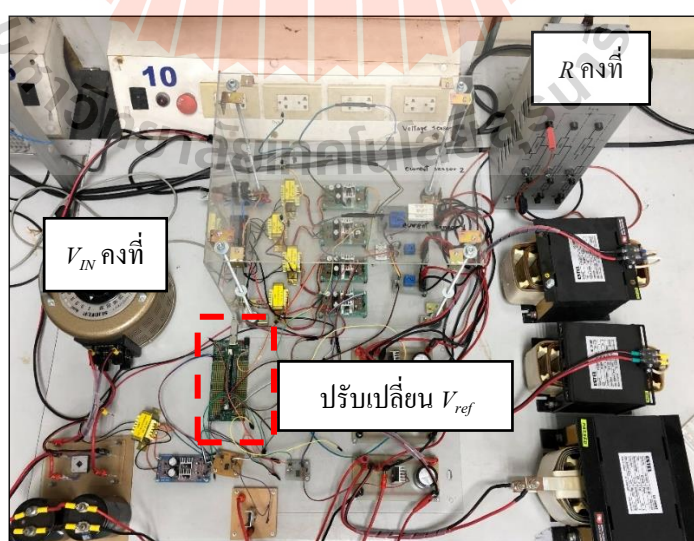
7.3 ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม

การทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม จะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 4 ซึ่งค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมต่าง ๆ จะอาศัยการเขียนโค้ดโปรแกรมลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณีดังนี้ การทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง การทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต และการทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อพิจารณาผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ รวมถึงการแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถทำให้วงจรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



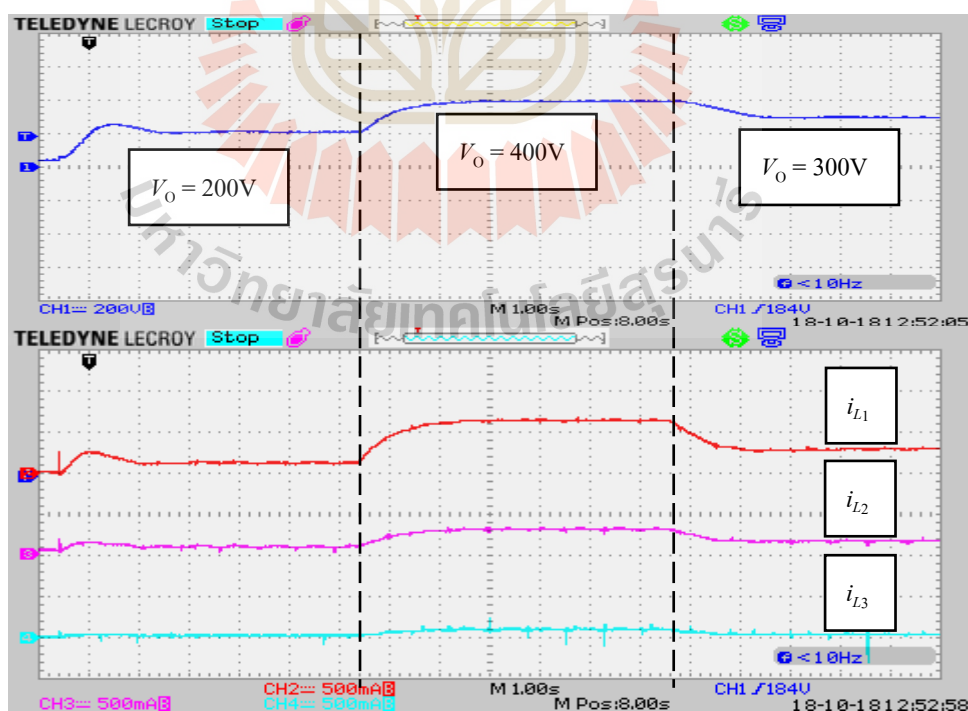
รูปที่ 7.8 ชุดทดสอบวงจรกรณีมีตัวควบคุม

ในการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ได้ กำหนดให้แรงดันอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 200V ไปเป็น 400V และ 300V ตามลำดับ โดยการ กำหนดค่าแรงดันอ้างอิงจะอาศัยการเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMSDCK28335 และกำหนดให้แรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ทั้งนี้จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 7.9



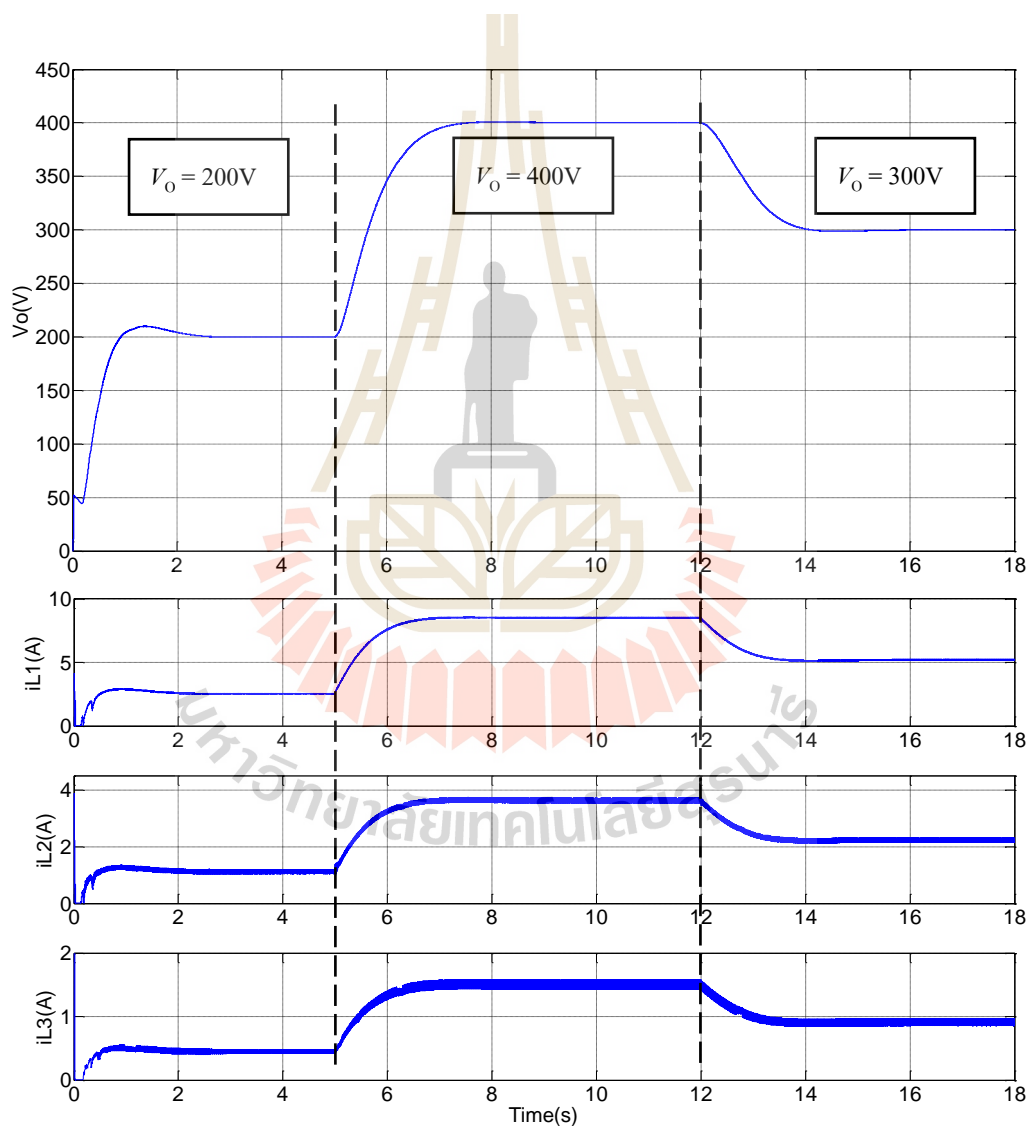
รูปที่ 7.9 ชุดทดสอบวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}

ผลการทดสอบชุดทดสอบ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง แสดงได้ดังรูปที่ 7.10 จะเห็นว่า เมื่อเริ่มการทดสอบวงจร ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 200V ในสถานะอยู่ตัวตามค่าแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้มีค่าเท่ากับ 200V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A, 1A และ 0.5A ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนกระแสในแต่ละชั้นสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นมีความเหมาะสมตามอัตราส่วนการถ่วงน้ำหนักที่ได้ออกแบบไว้ กล่าวคือเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นในแต่ละชั้น จะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง เนื่องจากกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน จากนั้นทำการปรับแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นจาก 200V เป็น 400V จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตปรับเพิ่มสูงขึ้นตามค่าแรงดันอ้างอิงและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 400V กระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 7A, 3A และ 1A ตามลำดับ ต่อมาทำการปรับค่าแรงดันอ้างอิงลดลงจาก 400V เป็น 300V จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 300V ค่ากระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าลดลงตามแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 3A, 2A และ 0.5A ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอพร้อมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ



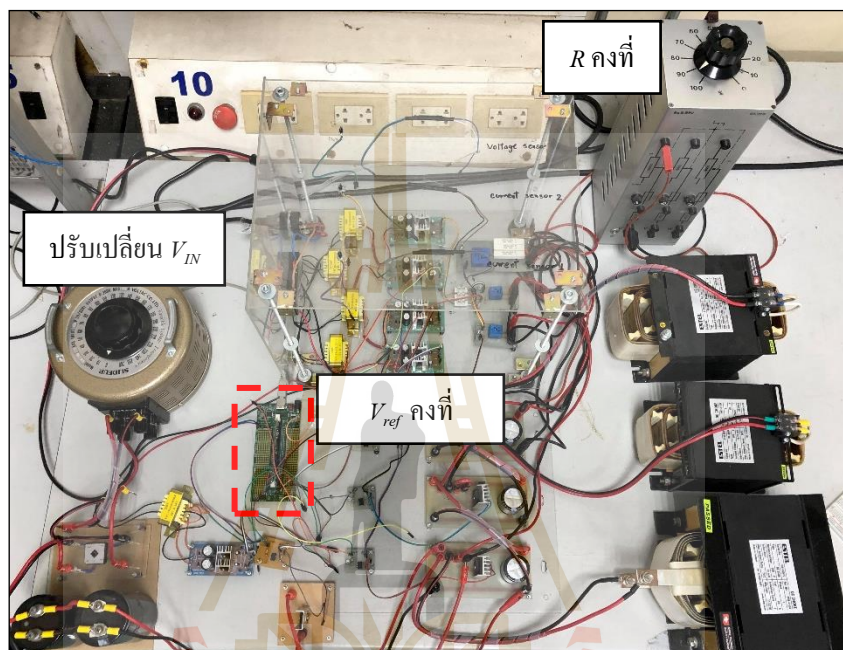
รูปที่ 7.10 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}

จากผลการจำลองสถานการณ์วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 7.11 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากชุดทดสอบ โดยมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 7.10 จะเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลทดสอบทั้งแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถควบคุมและรักษา ระดับแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นให้ได้ตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ



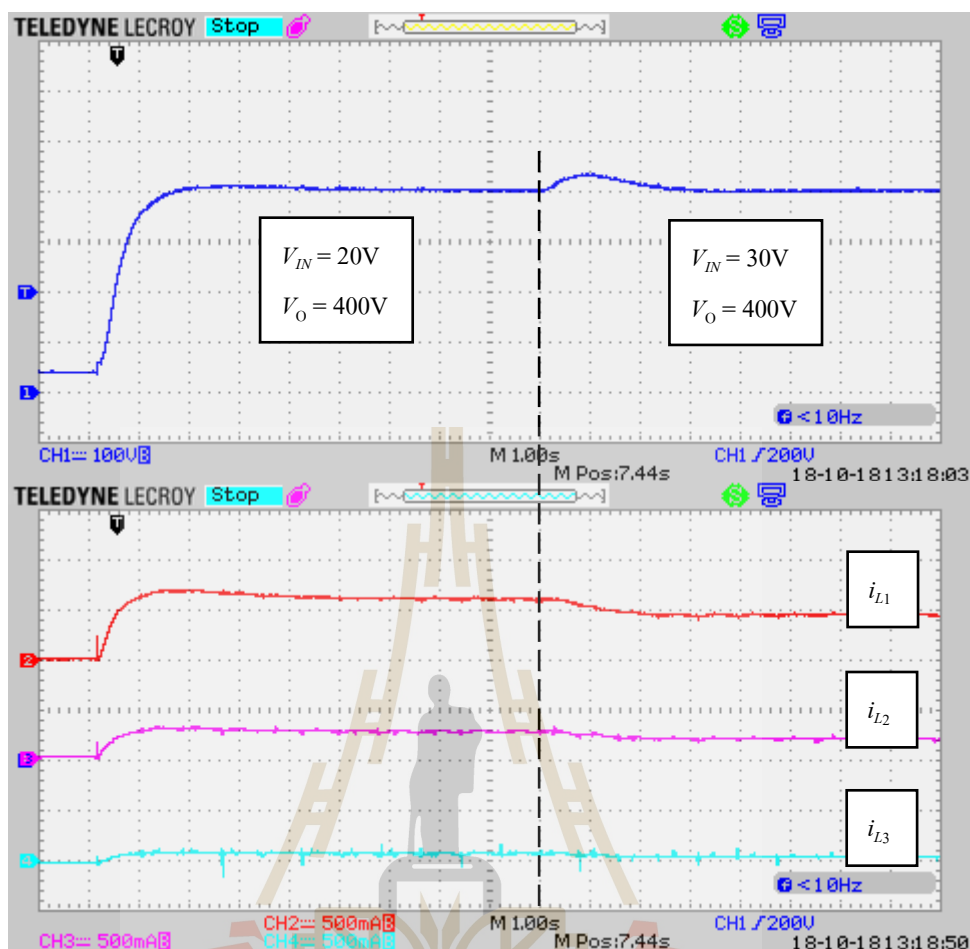
รูปที่ 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_{ref}

การทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม เมื่อทำการทดสอบปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต (V_{IN}) ที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจร โดยเริ่มแรกกำหนดให้แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 20V แล้วปรับเพิ่มขึ้นเป็น 30V และกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงให้มีค่าเท่ากับ 400V ทั้งนี้การปรับค่าแรงดันอินพุตจะอาศัยการปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลง โดยจะชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 7.12



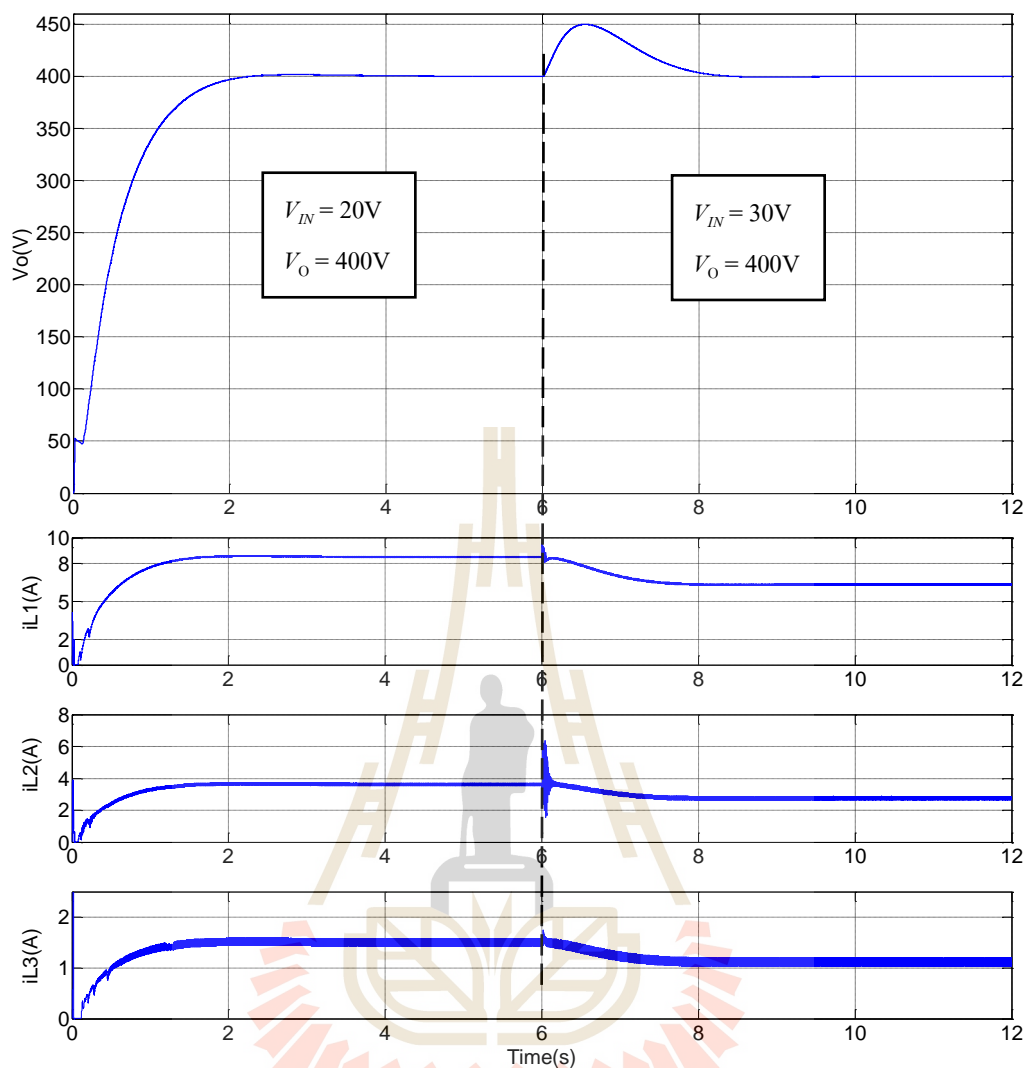
รูปที่ 7.12 ชุดทดสอบวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต V_{IN}

สำหรับผลการทดสอบชุดทดสอบ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจร แสดงได้ดังรูปที่ 7.13 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อปรับแรงดันอินพุตเท่ากับ 20V โดยมีแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัวให้มีค่าเท่ากับ 400V ได้ตามต้องการ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 6A, 3A และ 1A ตามลำดับ ในช่วงถัดมาทำการปรับแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นจาก 20V เป็น 30V จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมในสภาวะอยู่ตัวตามค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ที่ 400V ส่วนกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าลดลงจากเดิมและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4.5A, 2A และ 0.5A ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม จึงส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าลดลง



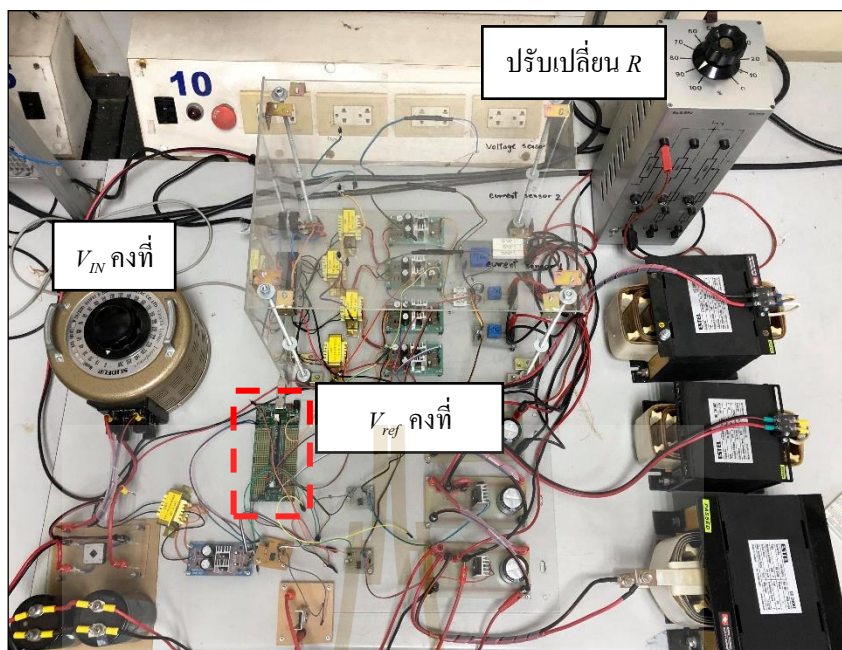
รูปที่ 7.13 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต V_{IN}

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมและทำการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โดยกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 400V แสดงดังรูปที่ 7.14 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.13 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลทดสอบทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว สำหรับแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว อาจมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยของกระแส เนื่องจากการปรับค่าแรงดันอินพุตของชุดทดสอบ ทั้งนี้จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอพร้อมทั้งเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้ออกแบบไว้สามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นให้ได้ตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไป



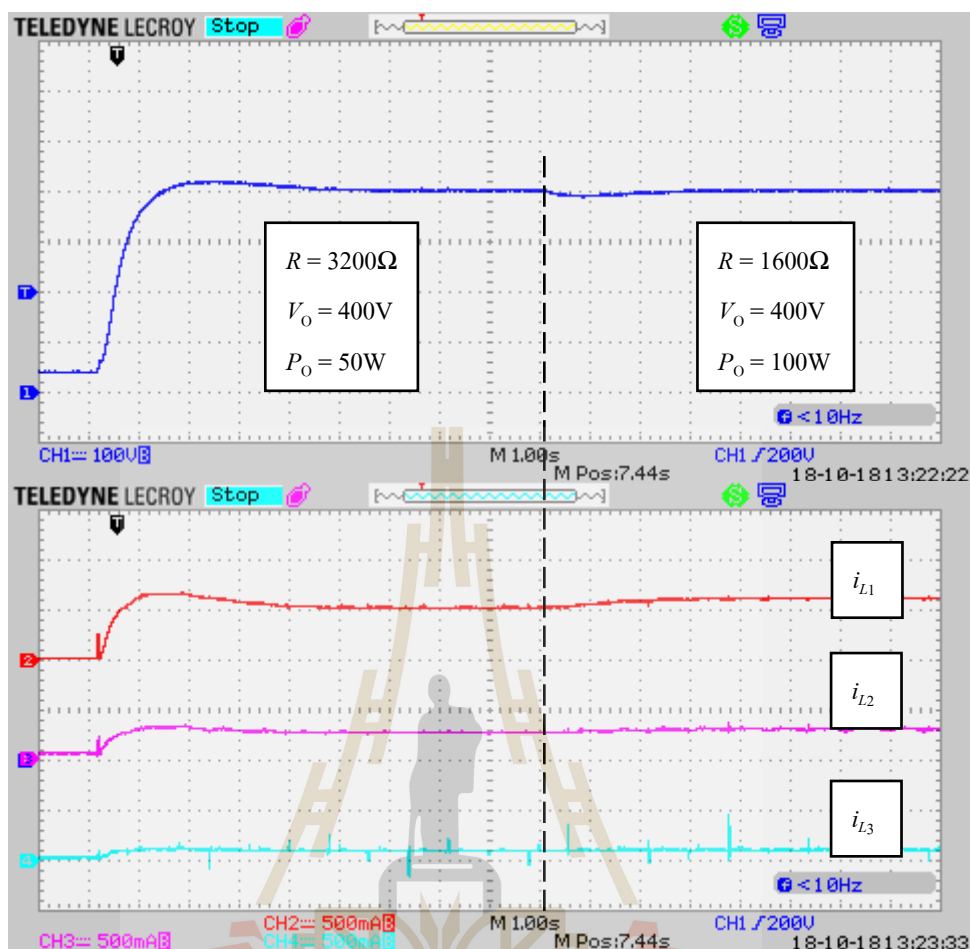
รูปที่ 7.14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต V_{IN}

ในการทดสอบชุดทดสอบกรณีถัดมา จะทำการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต โดยปรับโหลดตัวต้านทาน (R) ให้มีค่าเท่ากับ 3200Ω ในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็น 1600Ω ในช่วงเวลาถัดมา ซึ่งการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าภายในวงจร โดยโหลดตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 3200Ω จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ $50W$ และที่ 1600Ω จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ $100W$ ทั้งนี้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตมีเท่ากับ $20V$ ทำการเขียนโปรแกรมลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ให้แรงดันอ้างอิงอยู่ที่ $400V$ โดยอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 7.15



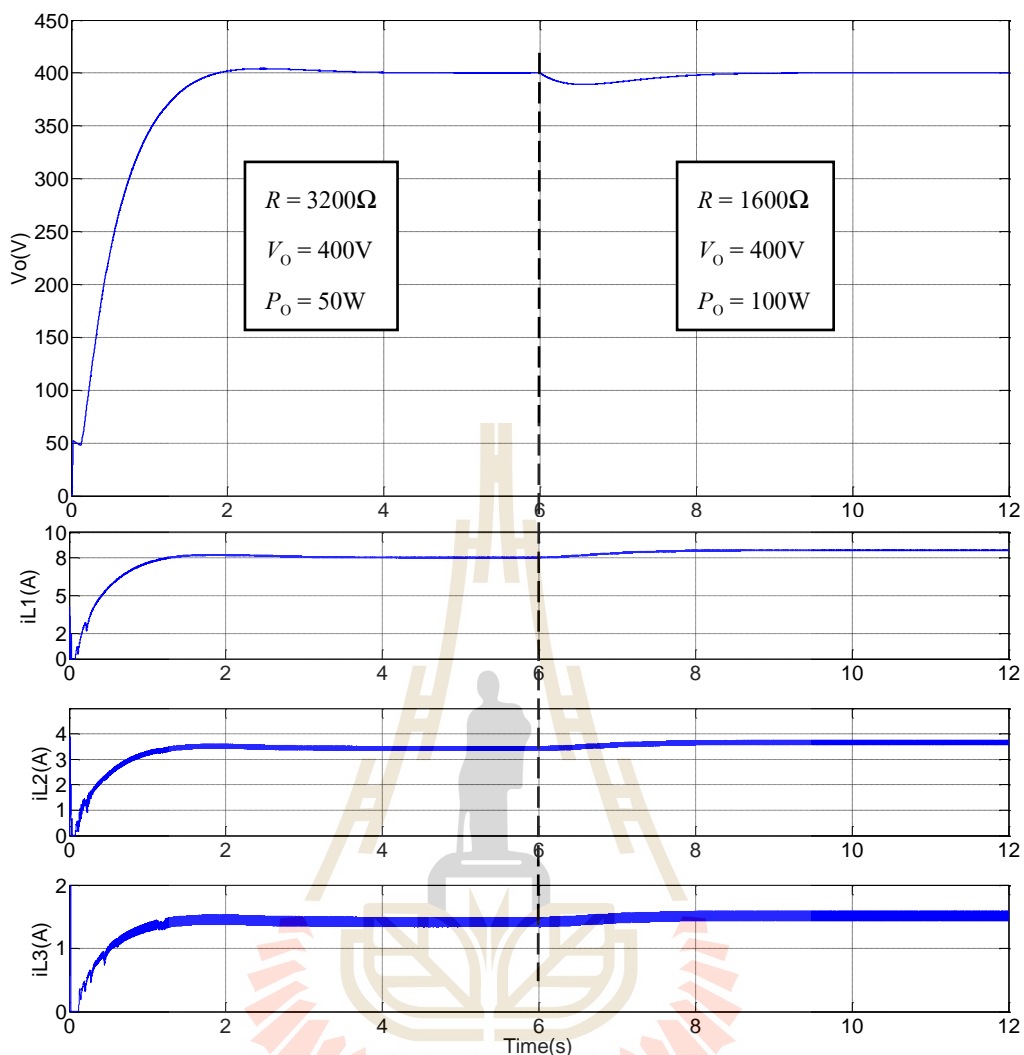
รูปที่ 7.15 ชุดทดสอบวงจร เมื่อปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน R

ผลการทดสอบชุดทดสอบ เมื่อมีการปรับเปลี่ยน โหลดตัวต้านทาน แสดงได้ดังรูปที่ 7.16 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทดสอบวงจร ที่โหลดตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 3200Ω แรงดันเอาต์พุต มีการเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบไว้ทำการควบคุมแรงดันให้ได้ตามแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้ โดยในสภาวะอยู่ตัวมีค่าเท่ากับ $400V$ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $5A$, $2.9A$ และ $1A$ ตามลำดับ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ $50W$ จากนั้นทำการปรับ โหลดตัวต้านทานลดลงเหลือ 1600Ω จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมในสภาวะอยู่ตัวที่ $400V$ ส่วนกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ $6A$, $3.2A$ และ $1.1A$ ตามลำดับ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ $100W$ ทั้งนี้เมื่อกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอพร้อมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 7.16 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยน โหลดตัวต้านทาน R

ในส่วนของการจำลองสถานการณ์วงจรมอเตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม โดยทำการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานหรือปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าภายในวงจร แสดงดังรูปที่ 7.17 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.16 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์วงจรมอเตอร์ กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลทดสอบทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัวสำหรับทั้งแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว อาจมีความคลาดเคลื่อนของกระแสเพียงเล็กน้อยเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการปรับค่าโหลดตัวต้านทานของชุดทดสอบ ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอพร้อมทั้งเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป

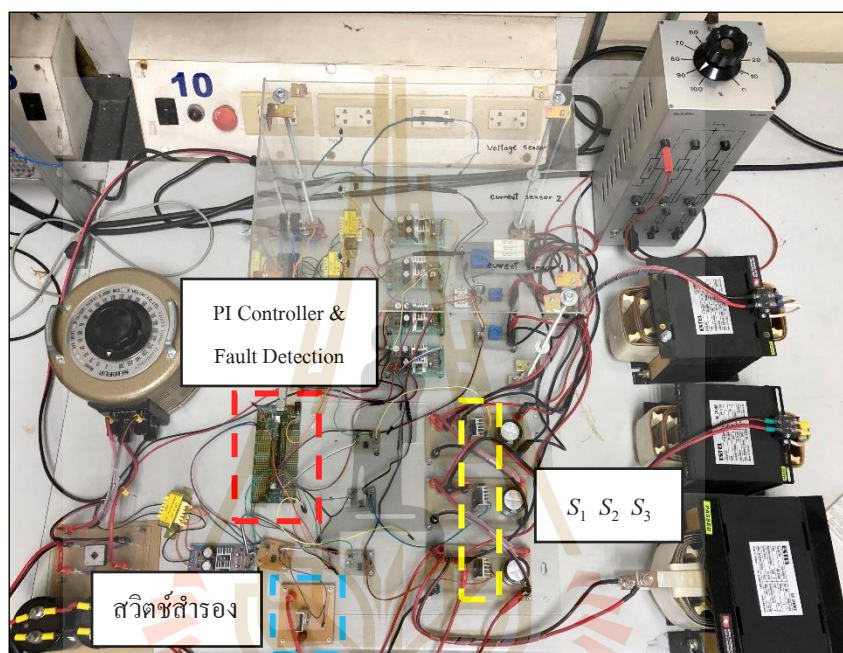


รูปที่ 7.17 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน R

7.4 ผลการทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

การทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร จะอาศัยการเขียนโปรแกรม ลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ ตามที่ต้องการ พร้อมทั้งตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับสวิตช์แต่ละตัว โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสและวิธีตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ได้พัฒนาขึ้น ในบทที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 กรณีดังนี้ การทดสอบวงจรเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงโดยไม่มีการเกิดความผิดปกติ เพื่อยืนยันว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติ แบบสวิตช์เปิดวงจรนั้นตรวจจับไม่ผิดพลาด การทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิด

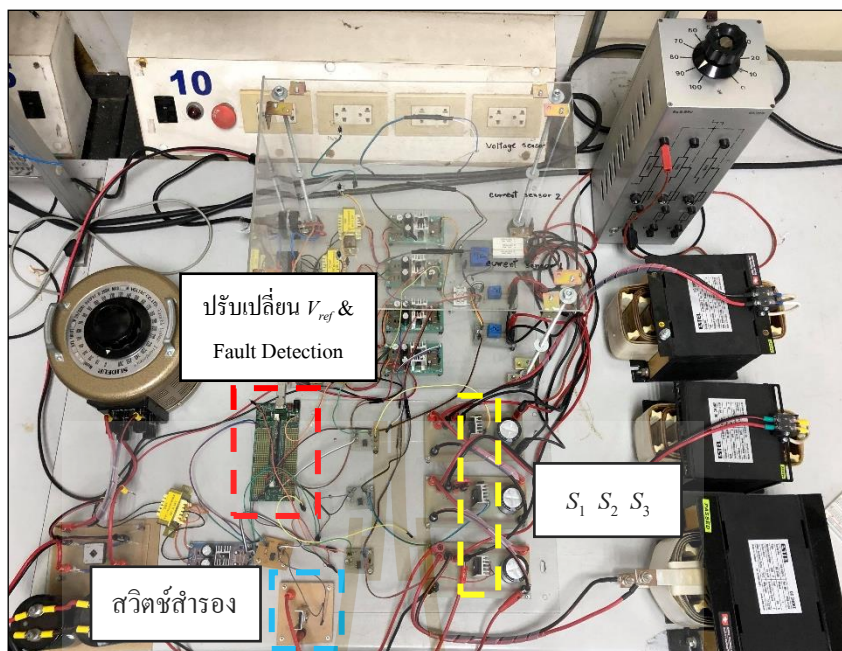
วงจรที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ในส่วนของคุณวรวดเร็วและความถูกต้องในการตรวจจับความผิดปกติ เพื่อพิจารณาประสิทธิผลของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้เมื่อตรวจจับพบความผิดปกติดังกล่าวได้แล้ว จะทำการสั่งให้สวิตช์ตัวที่สำรองไว้ทำงานแทนทันที เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 7.18 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร

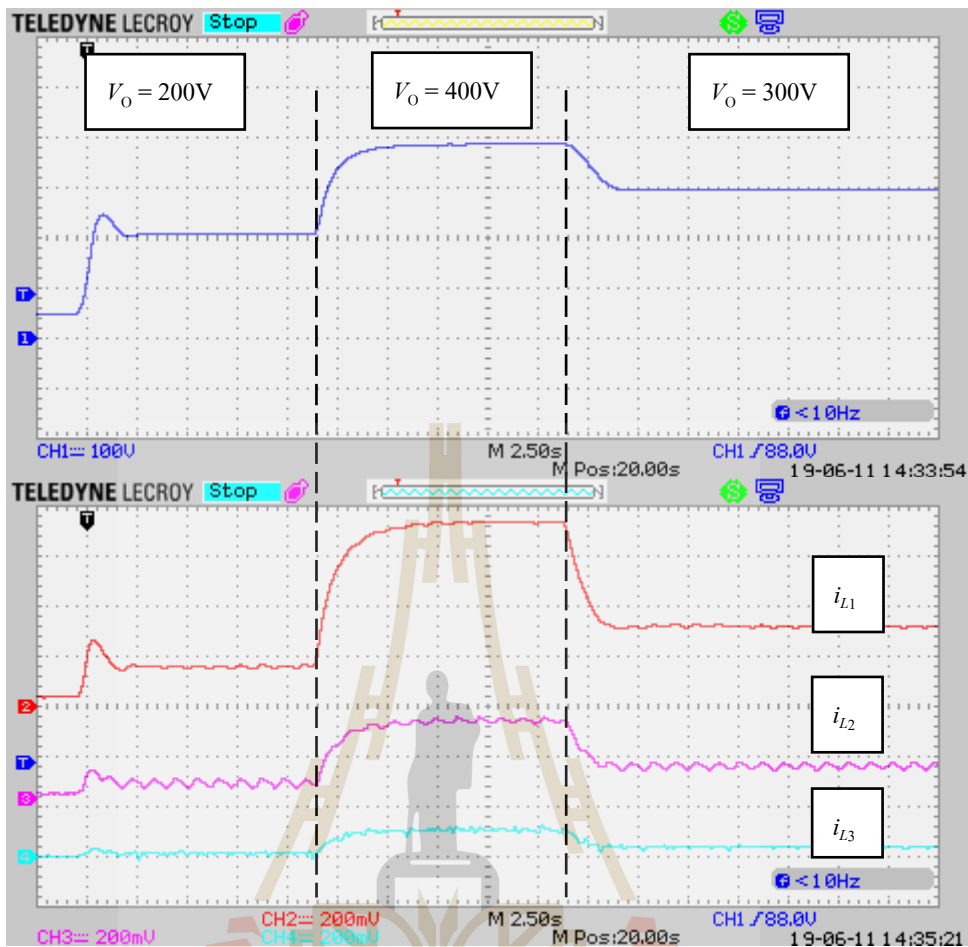
7.4.1 ผลการทดสอบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงโดยไม่มีการเกิดความผิดปกติเกิดขึ้น

ในการทดสอบชุดทดสอบกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) โดยกำหนดค่าให้ไม่มีการเกิดความผิดปกติขึ้นภายในวงจร เพื่อตรวจสอบวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรว่าไม่ตรวจจับผิดพลาด ซึ่งกำหนดให้แรงดันอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 200V ไปเป็น 400V และ 300V ตามลำดับ โดยการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงและวิธีการตรวจจับความผิดปกติ จะอาศัยการเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 และกำหนดให้แรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ทั้งนี้จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 7.19



รูปที่ 7.19 ชุดทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงร่วมกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

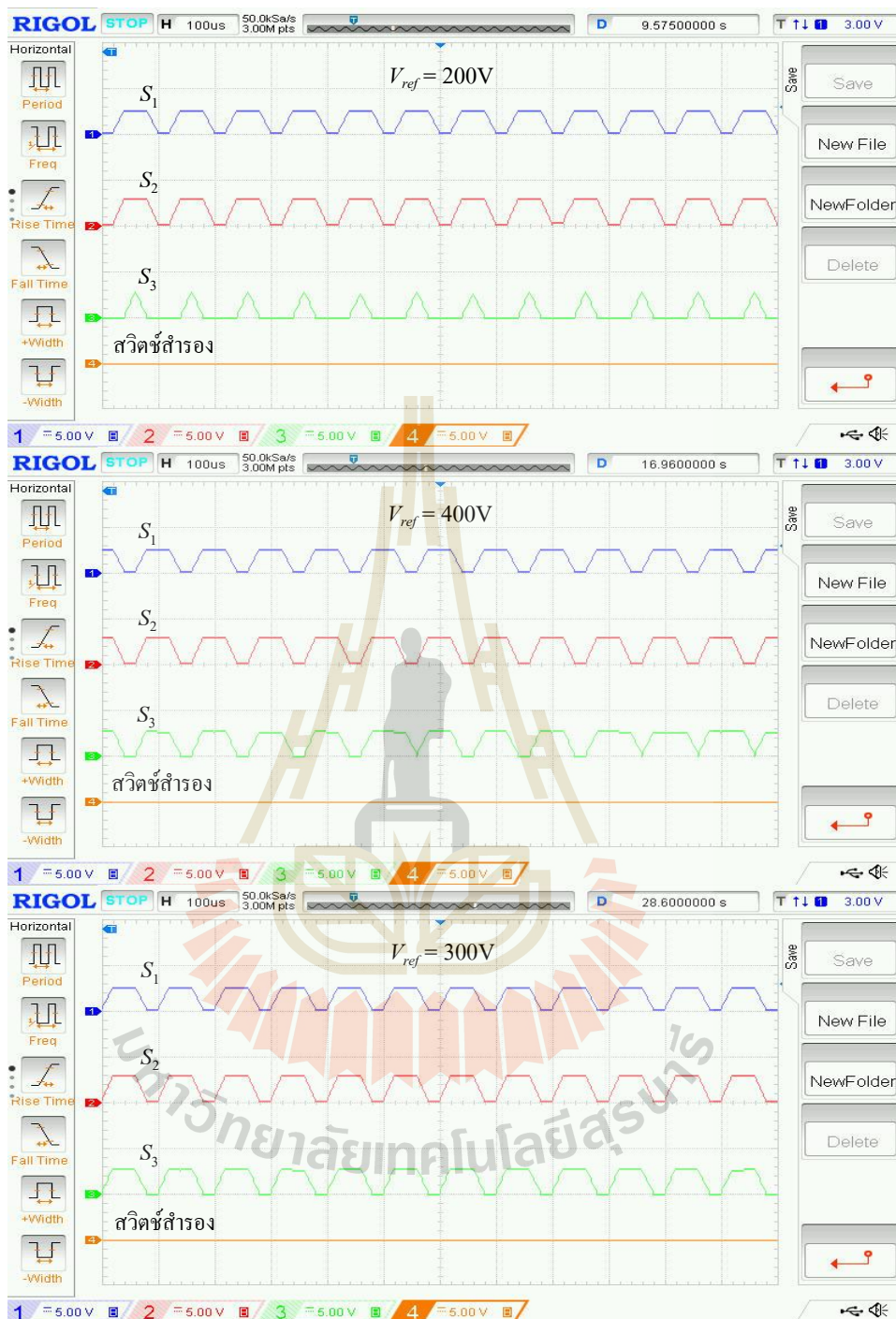
ผลการทดสอบชุดทดสอบในขณะที่วงจรทำงานในสภาวะปกติ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง โดยไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 7.20 ถึง 7.22 โดยรูปที่ 7.20 แสดงผลทดสอบของแรงดันและกระแส จะเห็นได้ว่าการทดสอบวงจร ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 200V และทำการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตไปที่ 400V แล้วกลับมาที่ 300V ได้ตามต้องการ โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้จากรูปที่ 7.21 และ 7.22 จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบสำหรับสวิทช์ทั้งสามตัว จะมีสัญญาณพัลส์ในช่วงแรงดันเอาต์พุต 200, 400 และ 300V ตามลำดับ แต่สัญญาณพัลส์ของสวิทช์ตัวที่สำรอง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้น เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิทช์เปิดวงจร ตรวจสอบไม่พบความผิดปกติ จึงส่งผลให้ไม่มีการทำงานของสวิทช์ตัวที่สำรองไว้ (S_1' , S_2' , S_3') ดังนั้นแม้วงจรจะมีสถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นก็สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 7.20 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงพร้อมวิธีการตรวจจับ



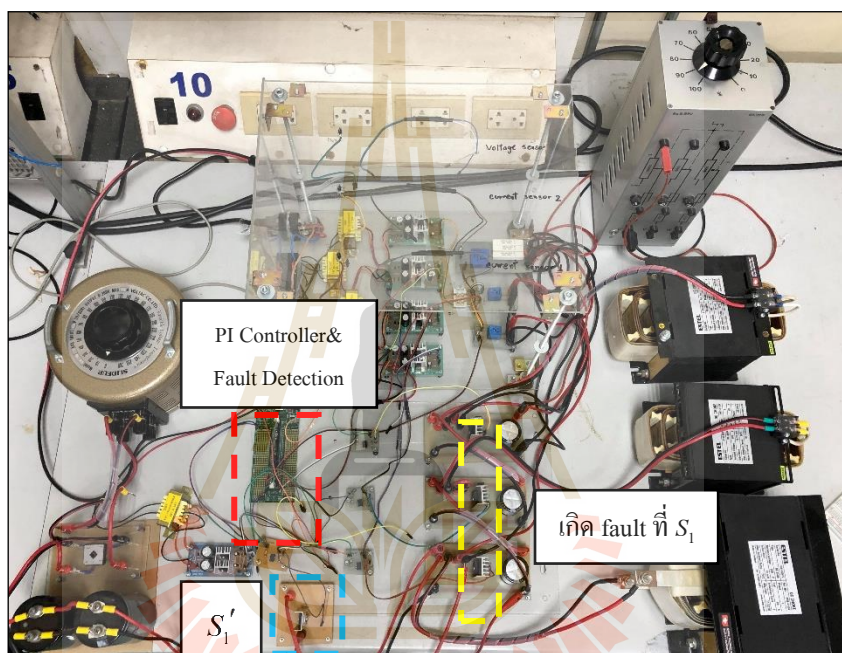
รูปที่ 7.21 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบ



รูปที่ 7.22 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบ โดย V_{ref} เท่ากับ 200 400 และ 300V ตามลำดับ

7.4.2 ผลการทดสอบชุดทดสอบเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1

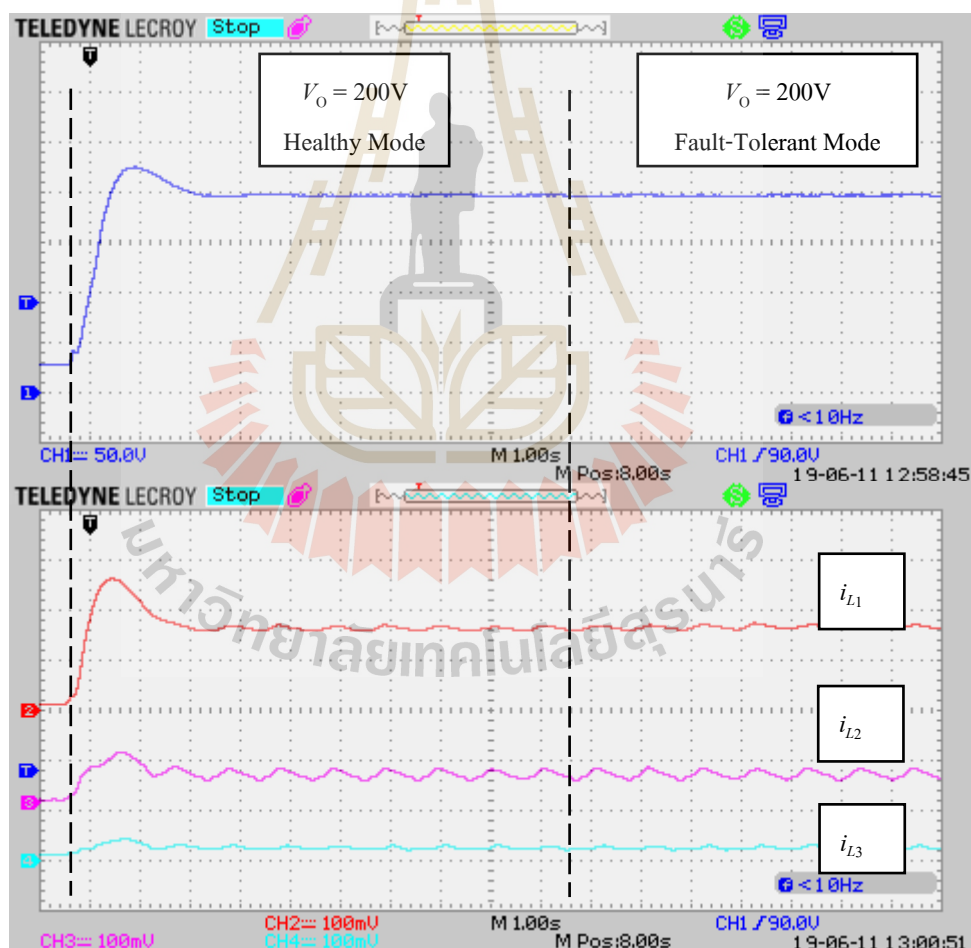
ในการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 ซึ่งกำหนดให้เกิดความผิดปกติที่ประมาณวินาทีที่ 10 ซึ่งแรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 200V และ 300V โดยในการทำให้เกิดความผิดปกติและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร จะอาศัยการเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 และกำหนดให้แรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ทั้งนี้จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 7.23



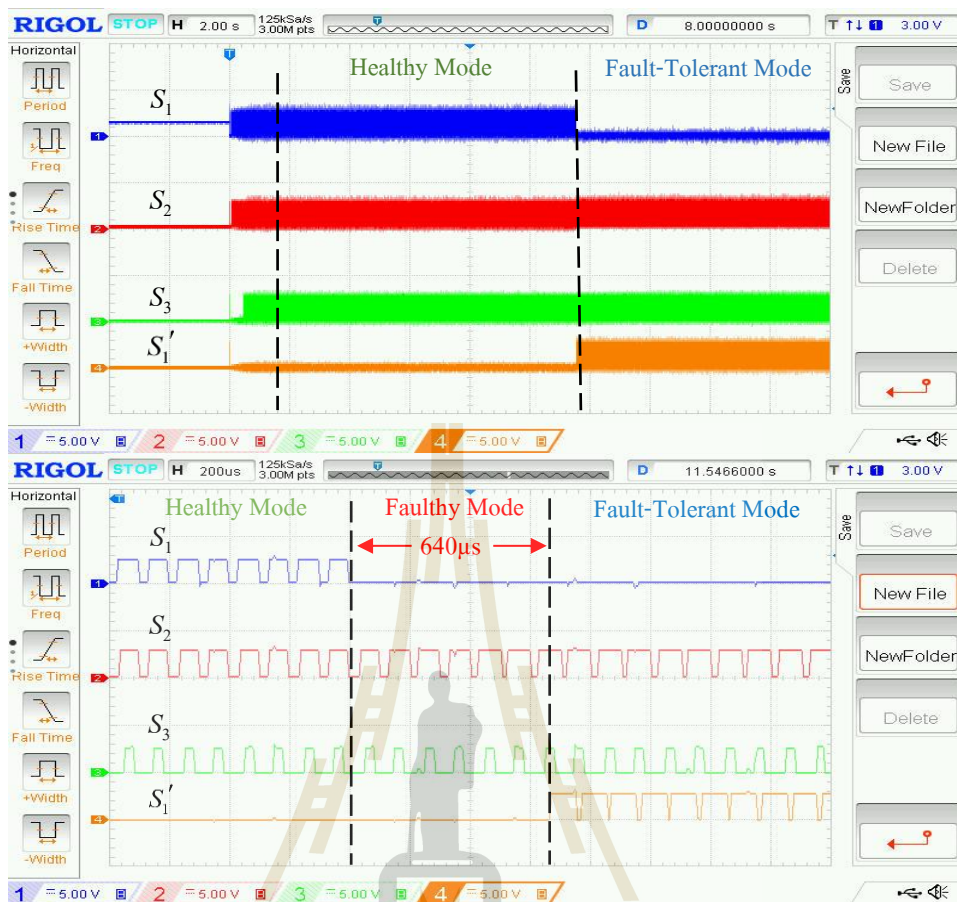
รูปที่ 7.23 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1

จากผลการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V แสดงได้ดังรูปที่ 7.24 และ 7.25 โดยรูปที่ 7.24 แสดงผลการทดสอบแรงดันและกระแส จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 10 ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 200V ตามที่ต้องการ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.7A, 0.8A และ 0.3A ตามลำดับ ในช่วงเวลาหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้นแล้ว จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง จึงส่งผลให้ทำการสั่งสวิตช์

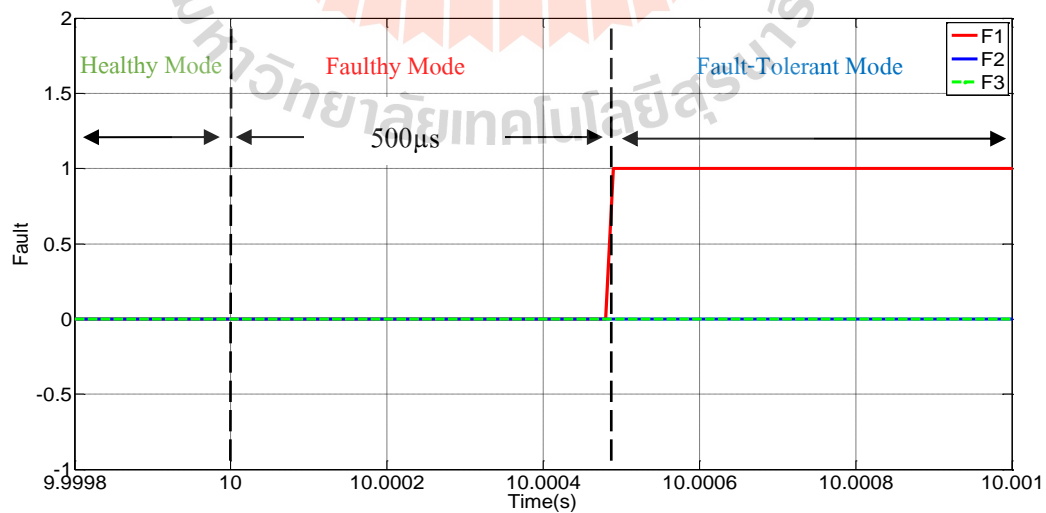
S_1' ตัวที่ได้สำรองไว้ทำงานแทนทันที โดยสังเกตจากรูปที่ 7.25 ที่แสดงสัญญาณพัลส์ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 แล้วสัญญาณพัลส์ของสวิตช์ S_1 จะหายไป หลังจากนั้นวิธีการตรวจจับ จะทำการตรวจจับความผิดปกติแล้วสั่งให้สวิตช์ S_1' ทำงานแทน โดยใช้เวลาในการตรวจจับ ประมาณ $640\mu\text{s}$ หรือ 0.64ms ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในสถานะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น และจากรูปที่ 7.26 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ สถานะการเกิดความผิดปกติของสวิตช์ S_1 จะเห็นว่าใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ $500\mu\text{s}$ หรือ 0.5ms ซึ่งเป็นเวลาที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบ แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากตัวตรวจจับกระแสและการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในชุดทดสอบ



รูปที่ 7.24 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V

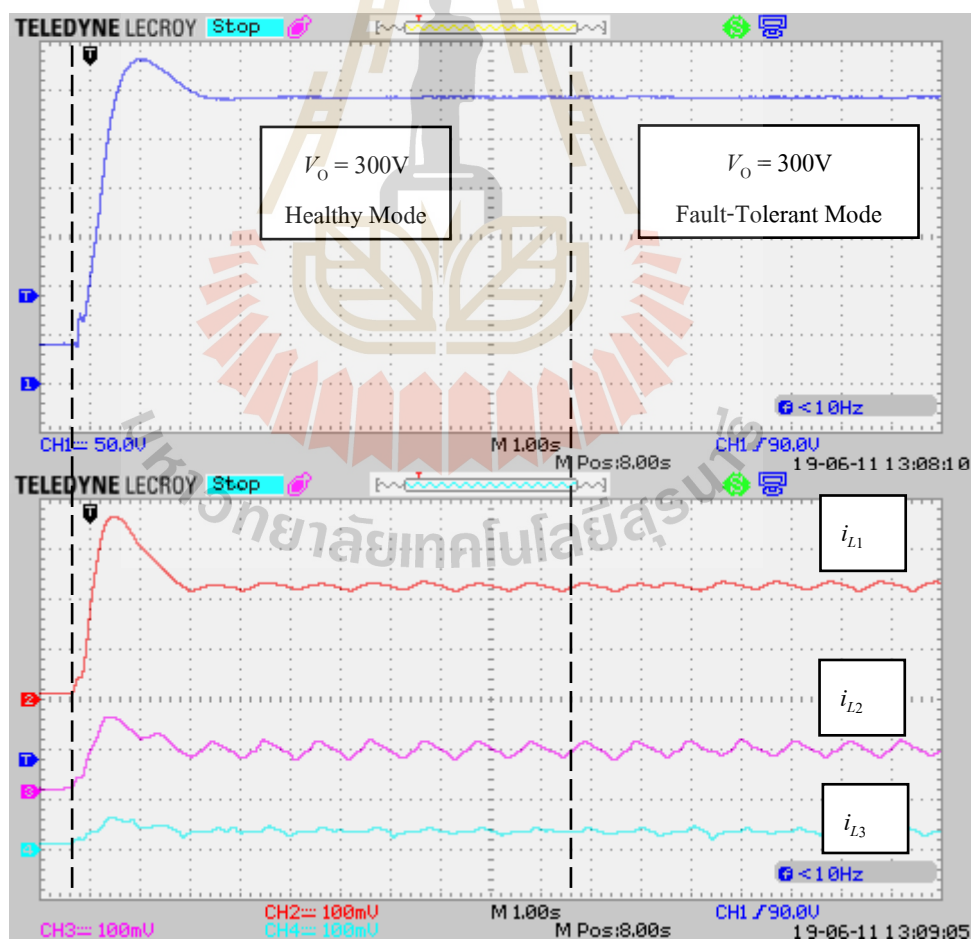


รูปที่ 7.25 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V

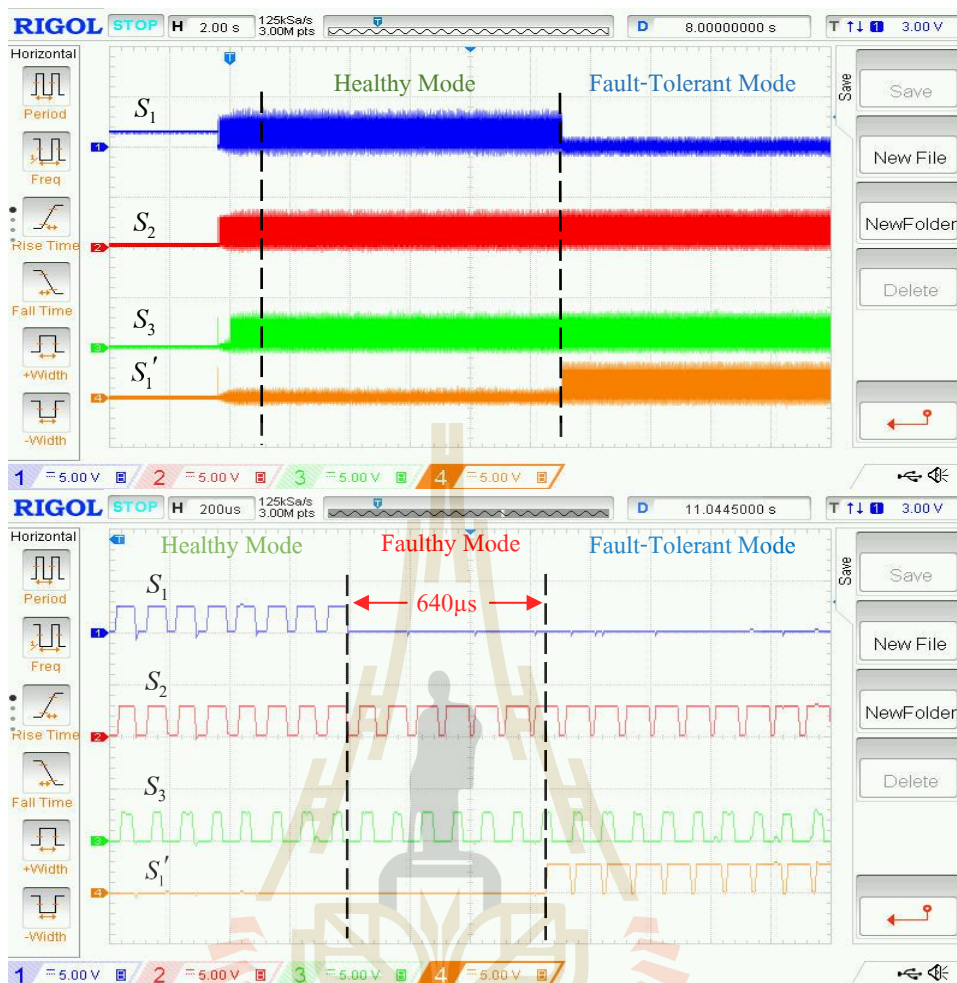


รูปที่ 7.26 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V

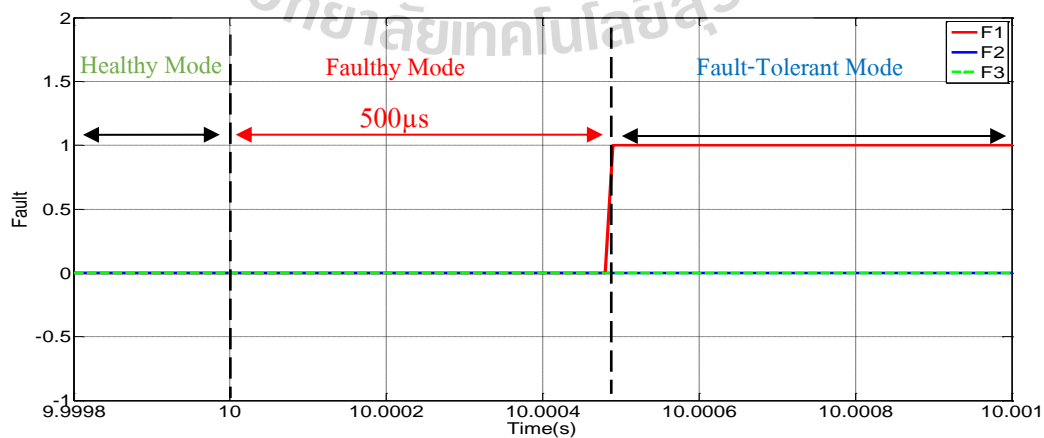
ในส่วนของการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 300V และเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_1 ที่วินาทีที่ 10 แสดงได้ดังรูปที่ 7.27 และ 7.28 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 300V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าในสถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 2.3A, 1A และ 0.4A ตามลำดับ โดยหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงสภาวะเกิดความผิดปกติก็มีการทดสอบที่ไม่แตกต่างจากกรณีแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V กล่าวคือไม่มีผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับสวิตช์ S_1 สามารถตรวจจับได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยใช้เวลาประมาณ 640 μ s หรือ 0.64ms ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้เวลาประมาณ 500 μ s หรือ 0.5ms แสดงดังรูปที่ 7.29



รูปที่ 7.27 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V



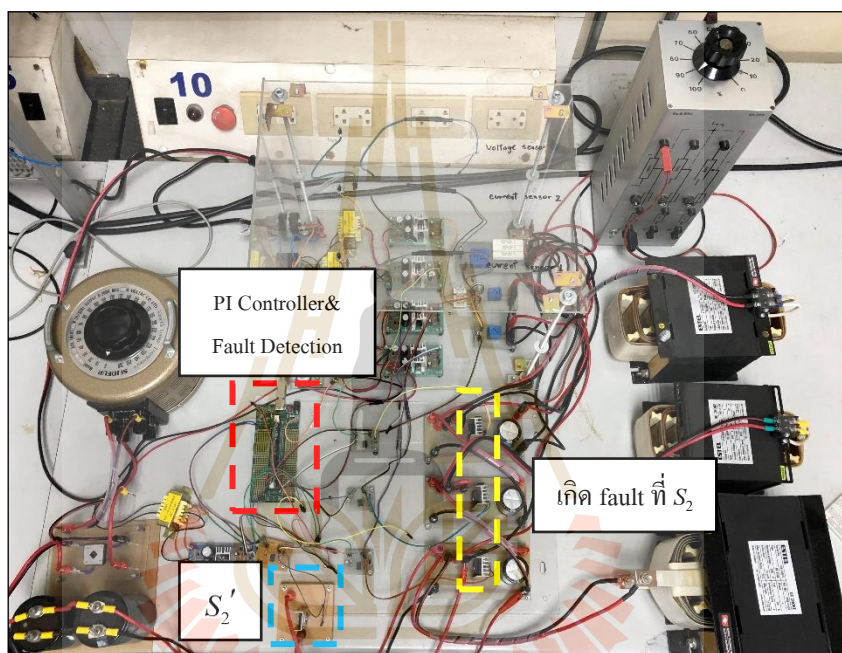
รูปที่ 7.28 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V



รูปที่ 7.29 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V

7.4.3 ผลการทดสอบชุดทดสอบเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2

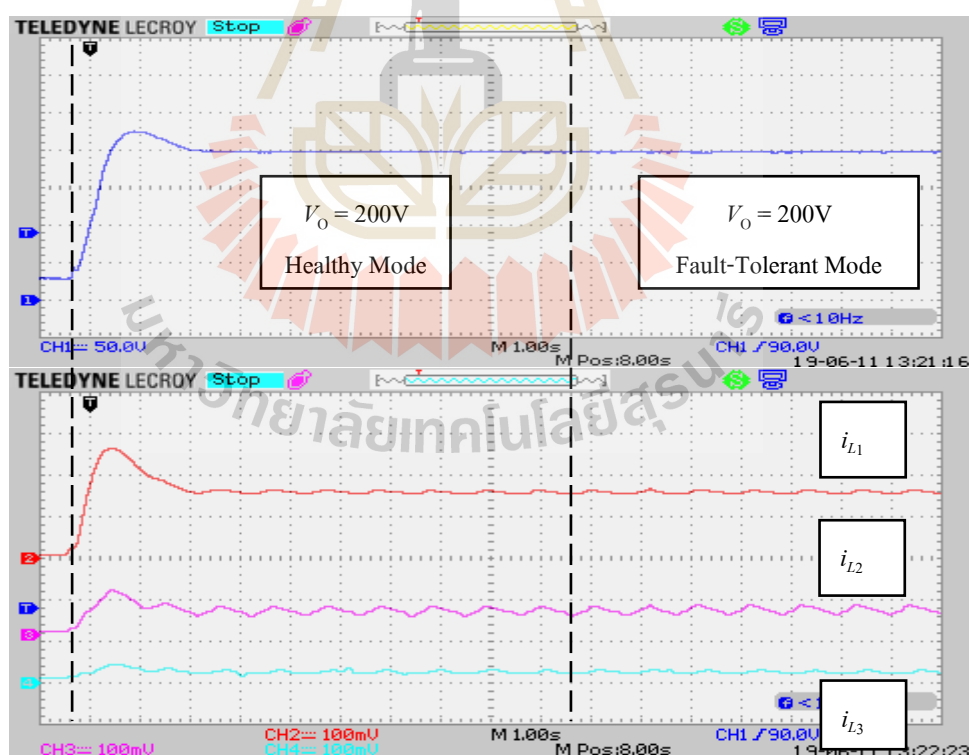
สำหรับการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ซึ่งกำหนดให้เกิดความผิดปกติในชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์ที่ประมาณวินาทีที่ 10 และกำหนดแรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 200V และ 300V และกำหนดให้แรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ทั้งนี้จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 7.30 โดยทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสวิตช์สำรองมาขนานกับสวิตช์ S_2



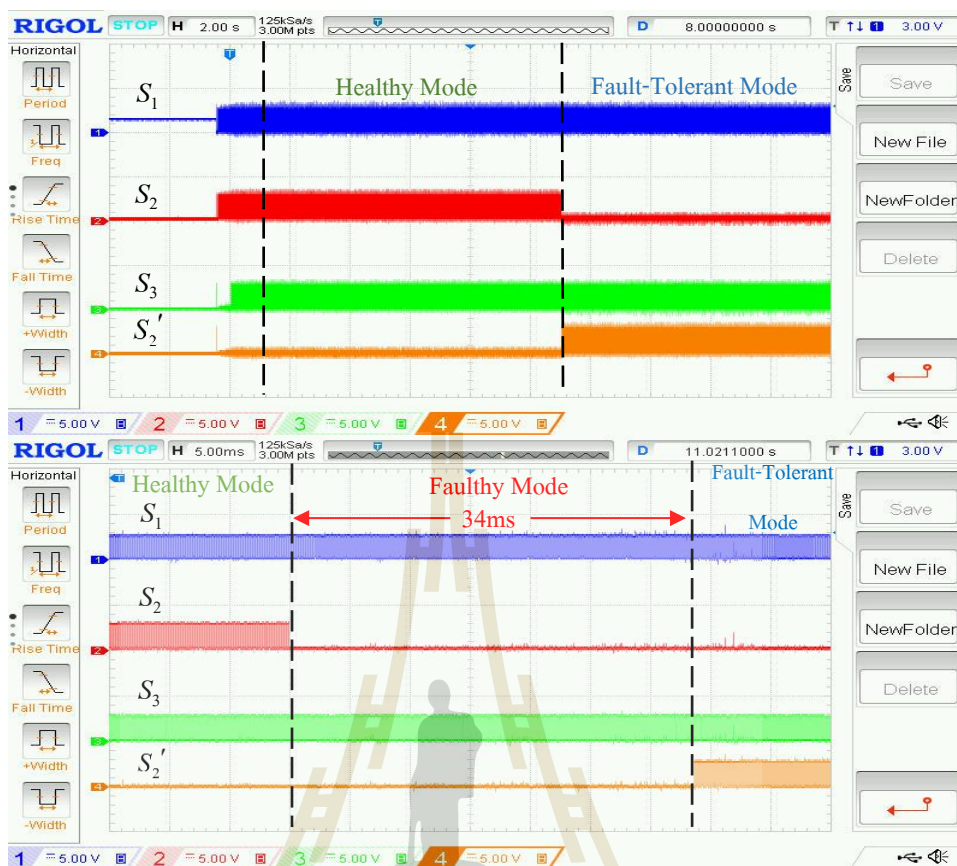
รูปที่ 7.30 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2

จากผลการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 200V แสดงได้ดังรูปที่ 7.31 และ 7.32 โดยรูปที่ 7.31 แสดงผลการทดสอบแรงดันและกระแส รูปที่ 7.32 แสดงสัญญาณพัลส์ของสวิตช์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มทำการทดสอบชุดทดสอบในช่วงสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 10 ตัวควบคุมพีไอพร้อมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตและแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสม โดยแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ 200V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าในสถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.7A, 0.8A และ 0.3A ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ในช่วงเวลาหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้น จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ไม่มีผลกระทบเกิดขึ้น

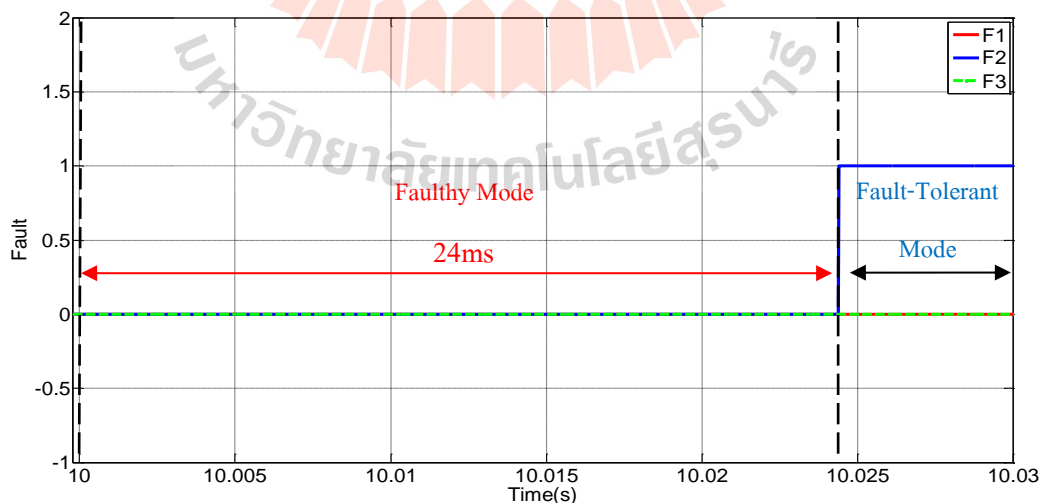
เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์ S_2 ได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยใช้เวลาในการตรวจจับความผิดปกติประมาณ 34ms ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้สวิตช์สำรอง S_2' ทำงานแทนได้รวดเร็ว และวงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_2 จะใช้เวลาในการตรวจจับนานกว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวอื่น ๆ เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่ S_1 กับ S_3 นั้นใช้การพิจารณาค่ากระแส i_{L1} และ i_{L3} ที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสโดยตรง แต่ S_2 ไม่มีตัวตรวจจับกระแส i_{L2} เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นจึงต้องอาศัยสัญญาณที่ออกจากกลุ่มควบคุมกระแสทั้งสองรูป และพิจารณาค่ากระแสที่ได้จากตัวตรวจจับกระแส i_{L1} และ i_{L3} ส่งผลให้มีการใช้เวลาในการตรวจจับนานกว่าสวิตช์อื่น ๆ และจากรูปที่ 7.33 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติ พบว่าใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 24ms ซึ่งผลดังกล่าวมีสอดคล้องกันกับผลชุดทดสอบ



รูปที่ 7.31 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V



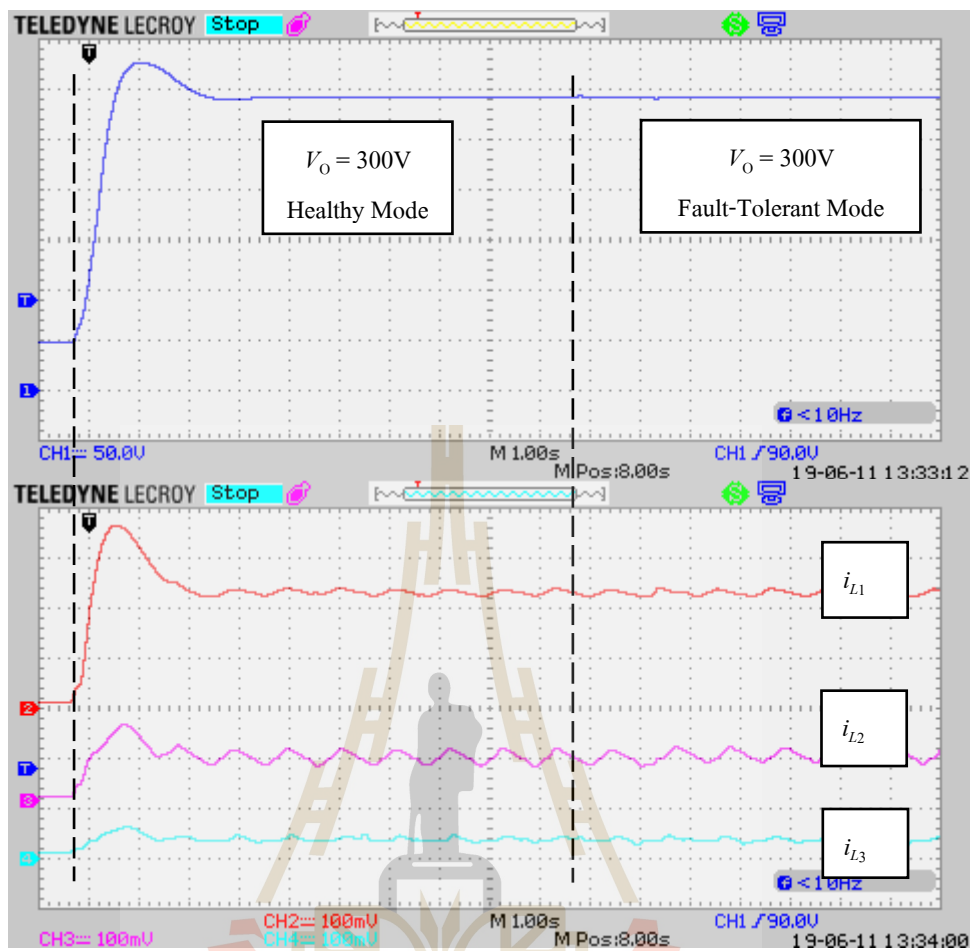
รูปที่ 7.32 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V



รูปที่ 7.33 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V

ในส่วนของการทดสอบชุดทดสอบ โดยปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงจาก 200V มาเป็น 300 V โดยกำหนดให้เกิดความผิดพลาดที่สวิทช์ S_2 ที่วินาทีที่ 10 แสดงได้ดังรูปที่ 7.34 และ 7.35 จะเห็นว่าตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 300V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าในสถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 2.3A, 1A และ 0.4A ตามลำดับ โดยหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงสภาวะเกิดความผิดพลาดก็มีผลการทดสอบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิทช์เปิดวงจรสำหรับสวิทช์ S_2 สามารถตรวจจับได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยใช้เวลาประมาณ 42ms ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์มีผลที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยใช้เวลาในการตรวจจับความผิดพลาดประมาณ 14ms แสดงดังรูปที่ 7.36 ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์กรณีแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 300V สามารถตรวจจับความผิดพลาดได้เร็วกว่ากรณี 200V เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดพลาดสำหรับสวิทช์ S_2 จะกำหนดค่าพิคคของสัญญาณควบคุมการสวิทช์ P_1 ในการตรวจจับไว้เท่ากันทั้งกรณีแรงดันอ้างอิง 200V และ 300V ซึ่งในกรณี 300V มีค่าสัญญาณควบคุมการสวิทช์ที่สูงกว่า จึงส่งผลให้มีค่าถึงค่าพิคคก่อนกรณี 200V ในส่วนของการจำลองสถานการณ์

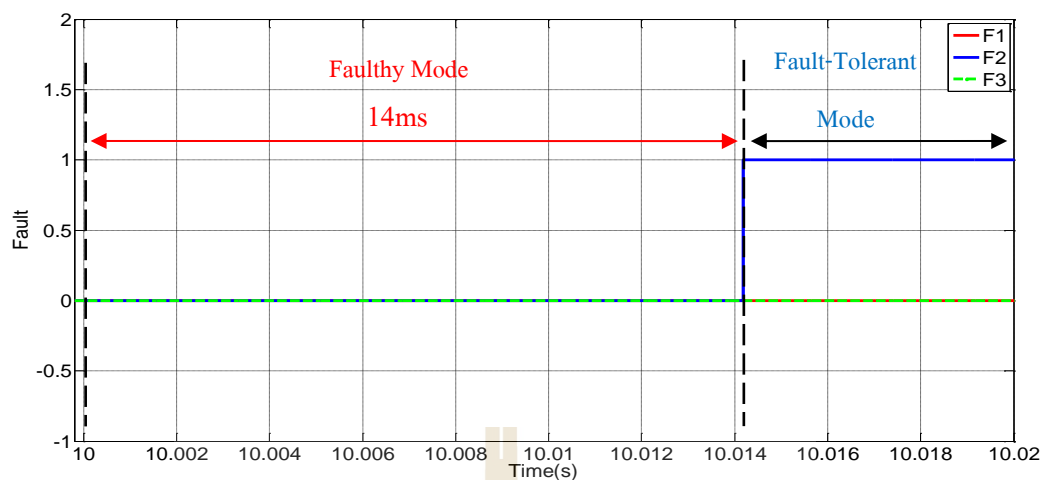




รูปที่ 7.34 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V



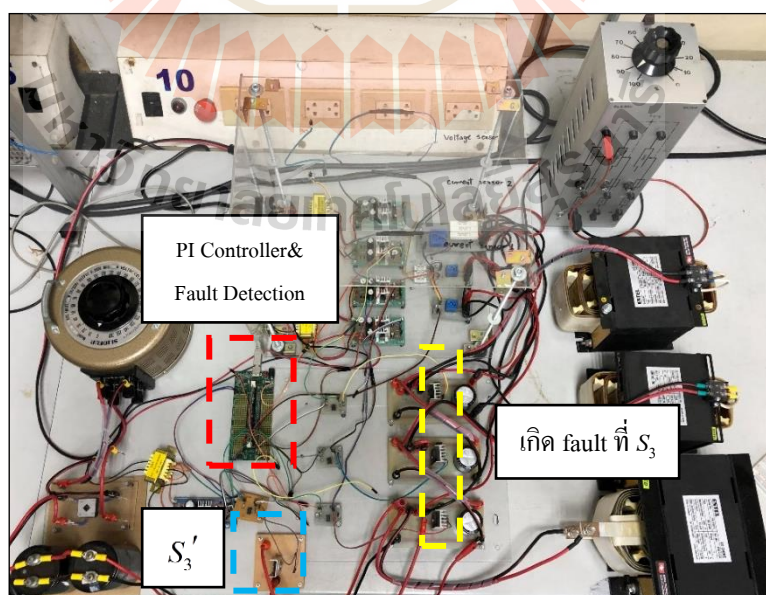
รูปที่ 7.35 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V



รูปที่ 7.36 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V

7.4.4 ผลการทดสอบชุดทดสอบเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3

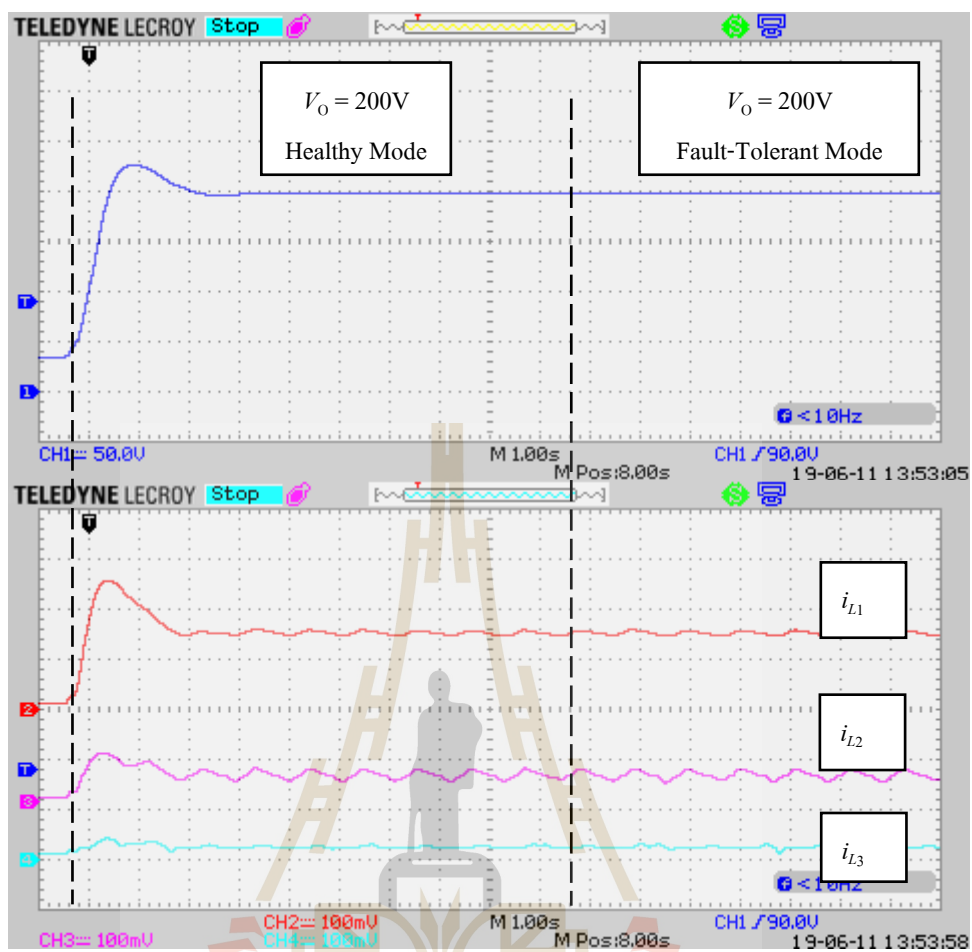
การทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_3 ซึ่งกำหนดให้เกิดความผิดพลาดที่ประมาณวินาทีที่ 10 และกำหนดแรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 200V และ 300V และแรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ทั้งนี้จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 7.37 โดยทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสวิตช์สำรองให้มาขนานกับสวิตช์ S_3



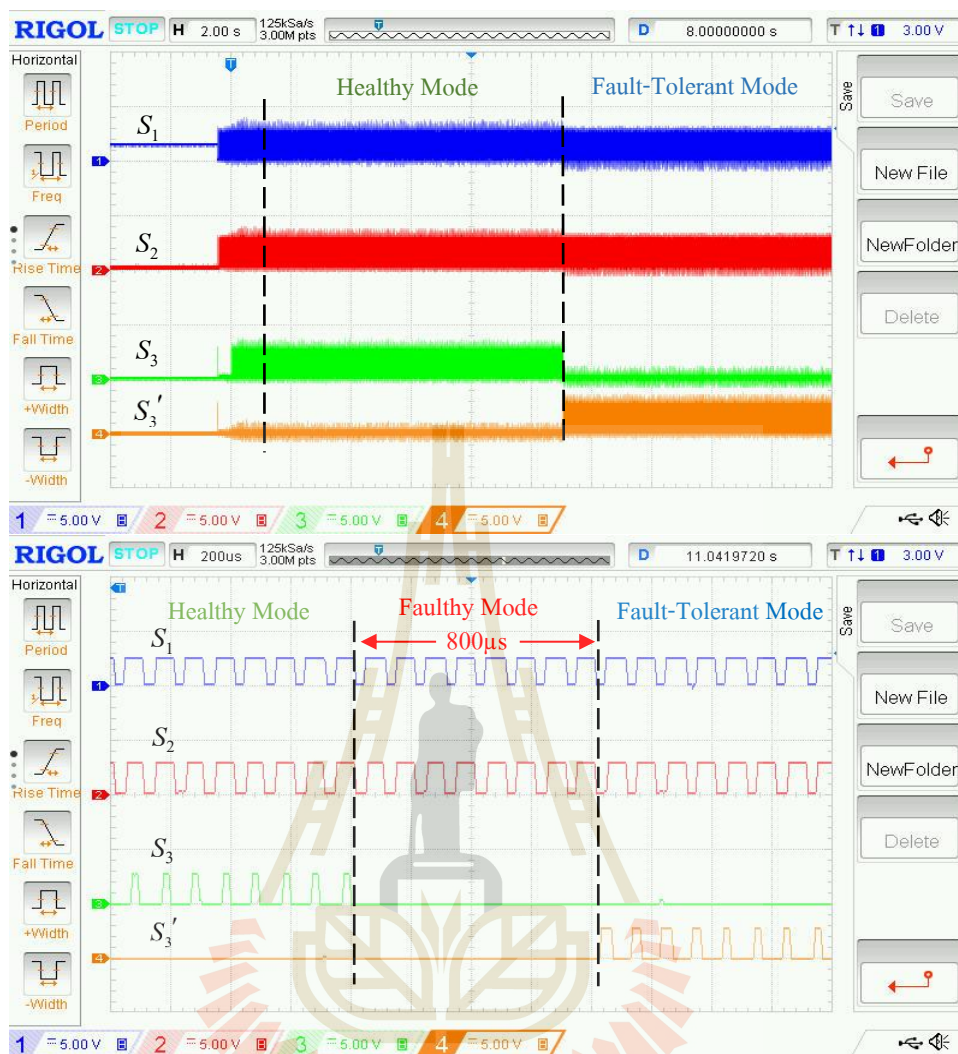
รูปที่ 7.37 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3

จากผลการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิทช์ S_3 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงอยู่ที่ 200V แสดงได้ดังรูปที่ 7.38 และ 7.39 จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงสภาวะปกติตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับ 200V ตามค่าแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้ตามต้องการ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีการปรับตัวสูงขึ้น โดยในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 1.7A, 0.8A และ 0.3A ตามลำดับ และในช่วงเวลาหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้น จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เช่นเดียวกันกับกรณีก่อนหน้านี้ โดยจากรูปที่ 7.39 จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณพัลส์ของสวิทช์ S_3 หลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นแล้วนั้นจะหายไป ก่อนจะมีสัญญาณพัลส์เกิดขึ้นที่สวิทช์สำรอง S_3' แทน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิทช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับความผิดปกติในสวิทช์ S_3 ได้และส่งให้สวิทช์ S_3' ตัวที่สำรองไว้ทำงานแทนทันที ส่งผลให้วงจรมีสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยใช้เวลาในการตรวจจับความผิดปกติประมาณ $800\mu\text{s}$ หรือ 0.8ms ซึ่งมีผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงดังรูปที่ 7.40 โดยจากผลการจำลองสถานการณ์ใช้เวลาประมาณ $600\mu\text{s}$ หรือ 0.6ms ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิทช์เปิดวงจรที่สวิทช์ S_3 ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

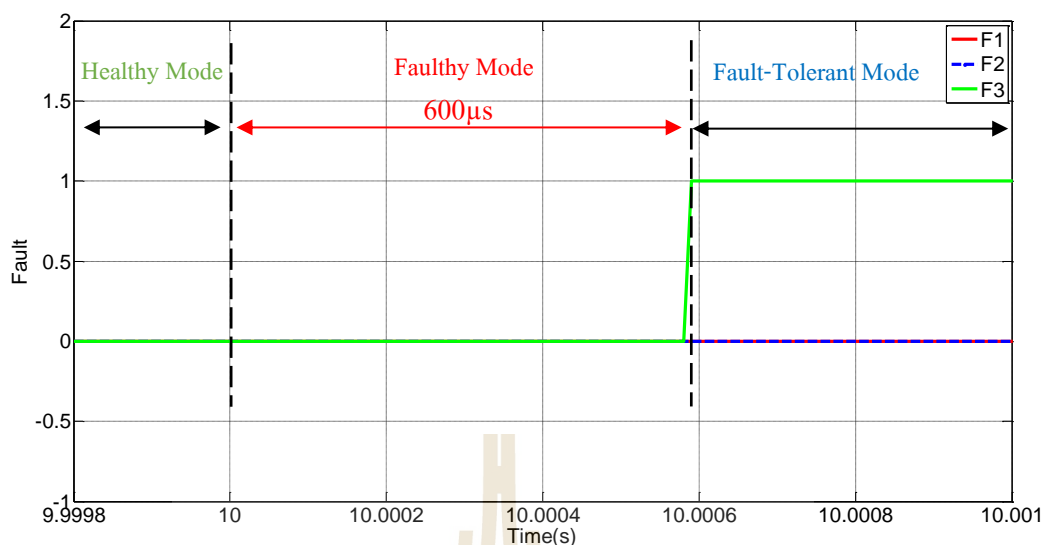




รูปที่ 7.38 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V

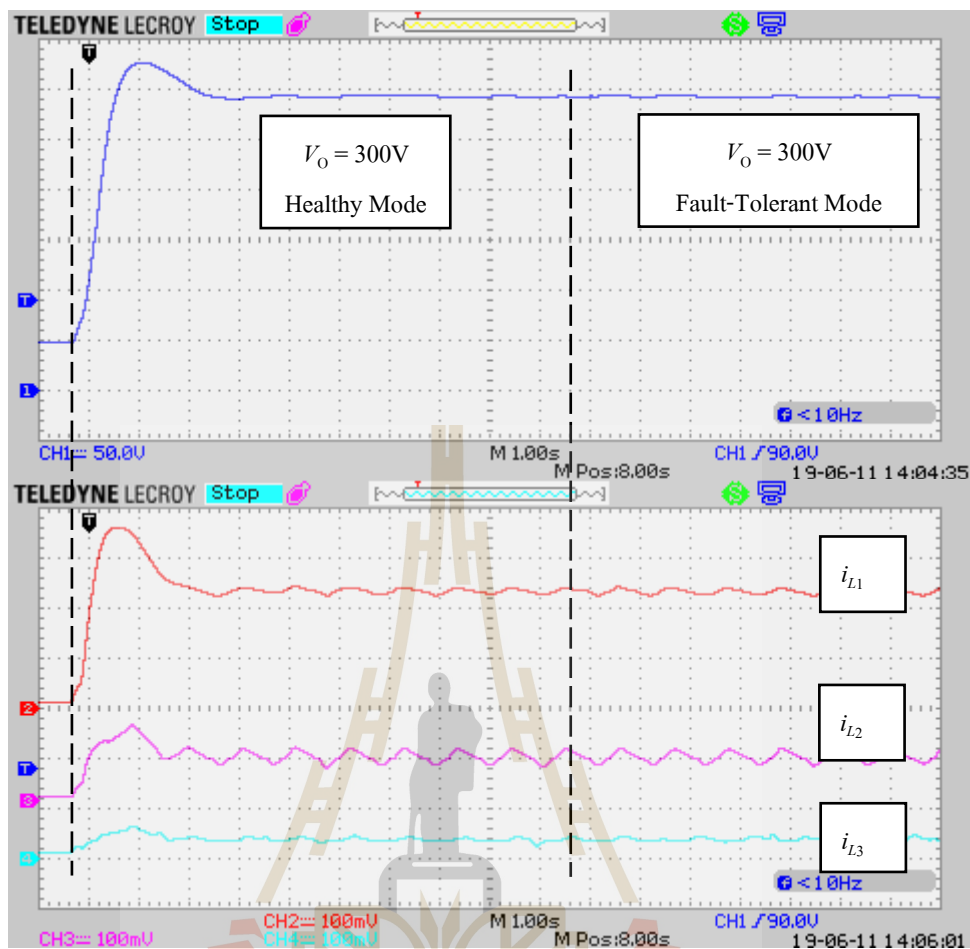


รูปที่ 7.39 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V

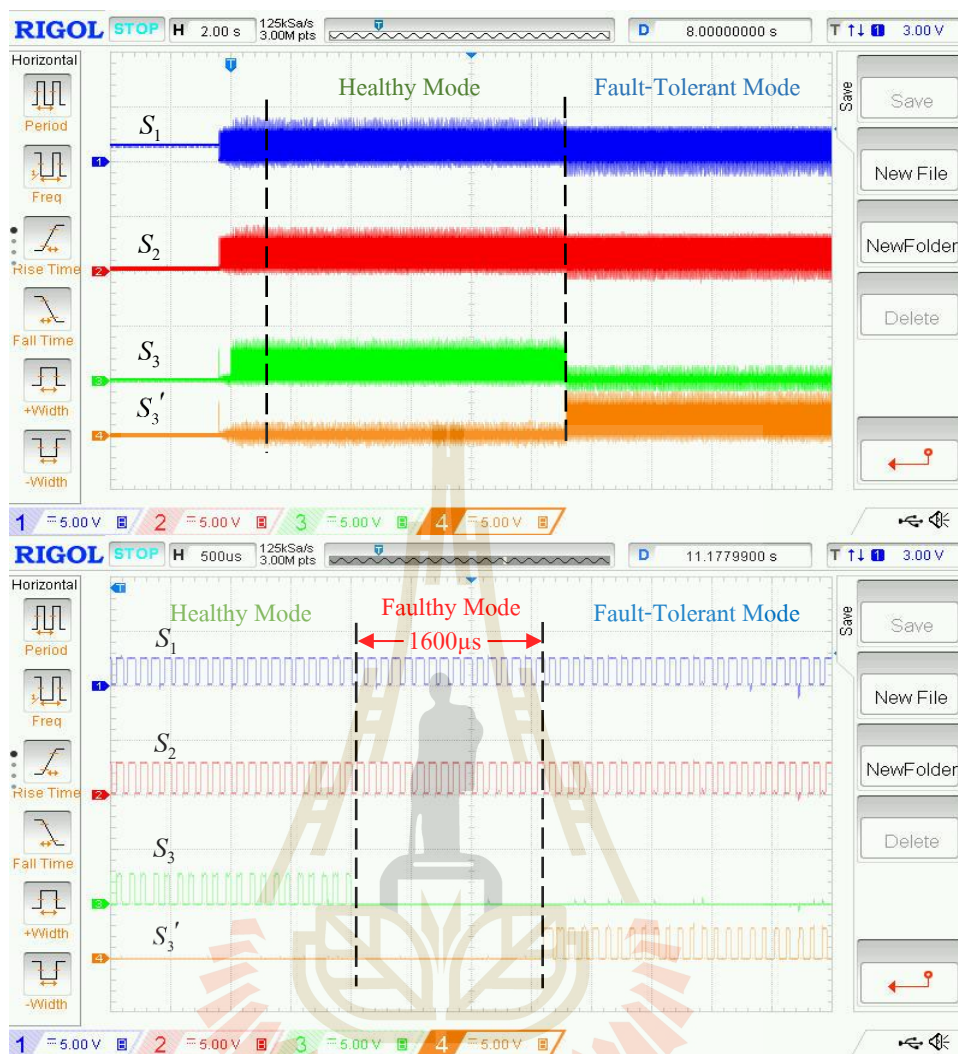


รูปที่ 7.40 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 200V

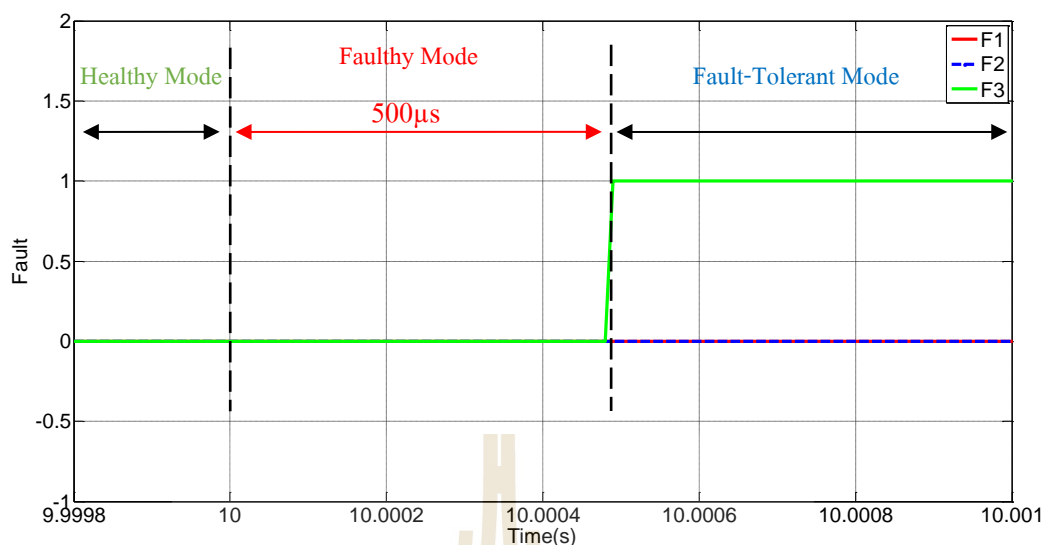
ในส่วนของการทดสอบชุดทดสอบสุดท้าย ทำการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงจาก 200V เป็น 300 V โดยกำหนดให้เกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 ที่วินาทีที่ 10 แสดงได้ดังรูปที่ 7.41 และ 7.42 จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้น โดยในสภาวะเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 10 จะมีผลการทดสอบของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวที่ไม่แตกต่างจากในสภาวะปกติ เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับสวิตช์ S_3 นั้นสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง จึงทำให้สวิตช์ S_3 ที่ได้สำรองไว้ทำงานแทนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วงจรมีสถานะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 1600µs ส่วนผลการจำลองสถานการณ์สถานะการตรวจจับแสดงให้เห็นว่าใช้เวลาประมาณ 500µs แสดงดังรูปที่ 7.43



รูปที่ 7.41 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V



รูปที่ 7.42 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V



รูปที่ 7.43 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 โดย V_{ref} เท่ากับ 300V

7.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ซึ่งแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดการทำงานเดียวกัน โดยแสดงการเปรียบเทียบทั้งกรณีที่ชุดทดสอบไม่มีตัวควบคุม มีตัวควบคุม และสถานะเกิดความผิดปกติแบบสวิทช์เปิดวงจร ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่สร้างขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตตามค่าวัฏจักรหน้าที่กำหนดไว้ ในส่วนของผลการทดสอบกรณีมีตัวควบคุม ได้อาศัยตัวควบคุมพีไอ ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้น ได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ โดยมีการทดสอบเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน ตัวควบคุมสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป และผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิทช์แต่ละตัว แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิทช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ซึ่งสามารถสั่งให้สวิทช์ที่ได้สำรองไว้ทำงานแทนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในสถานะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เรียงต่อกันสามขั้น โดยเริ่มจากการปรับสัณฐานกรรมเพื่อศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องดังแสดงในบทที่ 2 ซึ่งได้กล่าวถึงงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง และวิธีการตรวจจับความผิดปกติเพื่อศึกษาแนวทางในการประยุกต์โครงสร้างวงจรและพัฒนาการตรวจจับความผิดปกติในการทำงานจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตทั้งสองหัวข้อทำให้ได้ทราบถึงโครงสร้างวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น ซึ่งได้นำโครงสร้างวงรดังกล่าวมาต่อขยายให้เป็นวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อสามขั้น และอาศัยการศึกษาพฤติกรรมการทำงานภายในวงจรสำหรับพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น

โครงสร้างวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น แสดงในบทที่ 3 โดยมีการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้อยู่ในขอบเขตที่พึงพอใจ รวมถึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามต้องการเมื่อมีแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งอัตราขยายแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์ยังแสดงการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ พบว่าสอดคล้องกับขอบเขตที่กำหนดไว้

ในบทที่ 4 ได้นำเสนอโครงสร้างการควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ที่ได้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันและควบคุมกระแสทั้งสองลูป ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยมีการปรับค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะสมกับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป เพื่อควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ โดยได้ทำการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ในสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสาม

ขึ้นหรือมากกว่าสามขึ้น ให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป

ในบทที่ 5 ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพลาดภายใต้การทำงานต่าง ๆ เพื่อนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรถูกกล่าว ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นอาศัยพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งและสาม ที่มีตัวตรวจจับกระแสอยู่แล้วมาพิจารณาหาค่าความชันทั่วไป และอาศัยพฤติกรรมของสัญญาณควบคุมการสวิตช์ที่ได้จากกฎควบคุมกระแสทั้งสองขั้ว ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของกระแสขณะเกิดความผิดพลาดมีการสั้นไปหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถนำเอาพฤติกรรมดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดได้ และจากผลการจำลองสถานการณ์วิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นขณะมีตัวควบคุม แสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งทำให้สามารถนำเอาสวิตช์ที่ได้สำรองไว้มาใช้ทดแทนตัวที่เกิดความผิดพลาดขึ้นได้รวดเร็ว จึงทำให้มีผลกระทบต่อวงจรเพียงเล็กน้อย และวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเนื่อง

ในบทที่ 6 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เริ่มตั้งแต่การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง การเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น การเลือกและใช้งานตัวตรวจจับกระแสและตัวตรวจจับแรงดัน รวมถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาดและตัวควบคุมพีไอ เพื่อสร้างสัญญาณ PWM จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 การสร้างวงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบ เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส และวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตและตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างน่าพอใจ

และในบทที่ 7 ได้นำเสนอผลการทดสอบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ซึ่งแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดการทำงานเดียวกัน โดยแสดงการเปรียบเทียบทั้งกรณีที่ชุดทดสอบไม่มีตัวควบคุม มีตัวควบคุม และสภาวะเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็น

ว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่สร้างขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตตามค่าวัฏจักรหน้าที่กำหนดไว้ ในส่วนของผลการทดสอบกรณีมีตัวควบคุม ได้อาศัยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้น ได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ โดยมีการทดสอบเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน ตัวควบคุมสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป และผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิทช์แต่ละตัว แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิทช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ซึ่งสามารถสั่งให้สวิทช์ที่ได้สำรองไว้ทำงานแทนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในสภาวะความคงทนต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมประเภทอื่น ๆ สำหรับควบคุมการทำงานของวงจร
2. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมหรือควบคุมการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป
3. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิทช์เปิดวงจรที่สามารถตรวจจับความผิดพลาดของสวิทช์ได้มากกว่าหนึ่งตัวพร้อมกัน
4. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจมีการนำวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิทช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอื่น ๆ

รายการอ้างอิง

- Alexandre Silveira, Rui Esteves Ara'ujo, and Jos'e Ulson (2017) "Comparative Study of Inversion-based and Observer-based Approaches for Fault Diagnosis" in DC-DC Converters" in IEEE Trans.
- Andre Elias Lucena da Costa, Romero Leandro Andersen (2015) "HIGH-GAIN BOOST-BOOST-FLYBACK CONVERTER FOR RENEWABLE" in IEEE Trans. on Power Electronic.
- Bin Wu, Shouxiang Li, Yao Liu, and Keyue Ma Smedley (2016). "A New Hybrid Boosting Converter for Renewable Energy Applications" in IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL 31, NO.2, FEBRUARY.
- D. R. Espinoza-Trejo, C. Verde, G. Espinosa-Perez, G. Bossio, E. Diez and E. Barcenas (2016) "Model-Based Fault Detection and Isolation in a MPPT BOOST Converter for Photovoltaic Systems" in IEEE Trans.
- E. Jamshidpour, M. Shahbazi, P. Poure, E. Gholipour, and S. Saadate "Fault tolerant operation of single-ended non-isolated DC-DC converters under open and short-circuit switch faults" International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- E. Jamshidpour, M. Shahbazi, S. Saadate, P. Poure, and E. Gholipour (2014) "FPGA Based Fault Detection and Fault tolerance Operation in DC-DC Converters" International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti (2014) "Fault Diagnosis in Unidirectional Non-Isolated DC-DC Converters" in IEEE Trans.
- E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti (2014) "Fault Diagnosis in Non-Isolated Bidirectional Half-Bridge DC-DC Converters" in IEEE Trans.
- Ehsan Jamshidpour, Philippe Poure and Shahrokh Saadate (2018) "Unified Switch Fault Detection for Cascaded Non-Isolated DC-DC Converters" in IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 12-15 June.

- Elham Pazouki, Jose Alexis De Abreu-Garcia and Yilmaz Sozer (2017) "Fault Tolerant Control Method for Interleaved DCDC Converters under Open and Short Circuit Switch Faults" in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1-5 Oct.
- Eunice Ribeiro, Antonio J. Marques Cardoso, and Chiara Boccaletti (2013) "Fault-Tolerant Strategy for a Photovoltaic DC-DC Converter" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 28, NO. 6, JUNE.
- Hongchen Liu, Fei Li, and Jian Ai (2016) "A Novel High Step-Up Dual Switches Converter with Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell for a Renewable Energy System" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL 31, NO.7, JULY.
- Kuo-Ching Tseng and Chi-Chih Huang (2014) "High Step-up High-Efficiency Interleaved Converter with Voltage Multiplier Module for Renewable Energy System" in IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL 61, NO3, MARCH.
- M. Mohammadi, J. S. Moghani, J. Milimonfared and N. Safari (2015) "A Non-Isolated High Step-up DC-DC Converter with Soft Switching Using coupled Inductor" in 6th International Power Electronics Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2015), 3-4 Feb 2015, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Mahajan Sagar Bhasker, Rishi M. Kulkarni, Sanjeevikumar Padmanaban, Pierluigi Siano, and Frede Blaabjerg (2016) "Hybrid Non-Isolated and Non Inverting Nx Interleaved DC-DC Multilevel Boost Converter for Renewable Energy Application" in IEEE Trans. on Power Electronic.
- Mahmoud Shahbazi, Ehsan Jamshidpour, Philippe Poure, Shahrokh Saadate, and Mohammad Reza Zolghadri (2013). "Open- and Short-Circuit Switch Fault Diagnosis for Nonisolated DC-DC Converters Using Field Programmable Gate Array" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO. 9, SEPTEMBER.
- Mahmoud Shahbazi, Mohammad Reza Zolghadri, and Saeed Ouni (2016) "Fast and Simple Open-Circuit Fault Detection Method for Interleaved DC-DC Converters" 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2016), 16-18 Feb.
- Masoume Amirbande, Keyvan Yari, Mojtaba Forouzesh, Alfred Baghrmian (2016) "A Novel Single Switch High Gain DC-DC Converter Employing Coupled Inductor and Diode

Capacitor” 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference(PEDSTC 2016) 16-18 Feb 2016, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Mohammad Lotfi Nejad, Behzad Poorali, Ehsan Adib, and Ali Akbar Motie Birjandi (2016) “New cascade boost converter with reduced losses” in IET Power Electronics., Vol. 9, Iss. 6, pp. 1213–1219.

Roger Gules, Walter Meneghette dos Santos, Flavio Aparecido dos Reis, Eduardo Felix Ribeiro Romaneli, and Alceu Andr´e Badin (2014) “A Modified SEPIC Converter with High Static Gain for Renewable Application” in IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 29, NO. 11, NOVEMBER.

T. Park, and T. Kim (2011) “Novel Fault Tolerant Power Conversion System for Hybrid Electric Vehicles” in IEEE Trans.

Wuhua Li, Xiaodong Lv, Yan Deng, Jun Liu, Xiangning He (2009) “A Review of Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converters in Renewable Energy Applications” in IEE Proc.- Electr. Power Appl.

Yigeng Huangfu, Shengrong Zhuo, Fuxi Chen, and Shengzhao Pang (2016) “Evaluation and Fault Tolerant Control of a Floating Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Systems” in IEEE Trans.



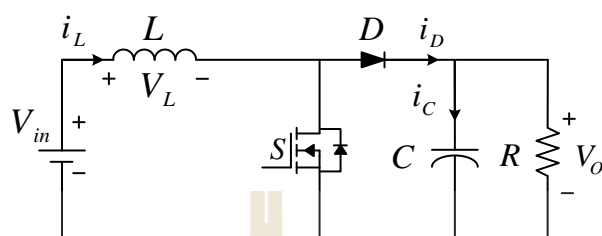


ภาคผนวก ก

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง

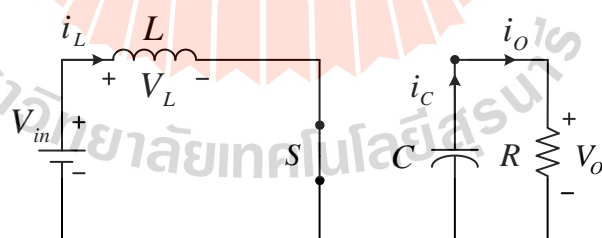
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์แบบคั้งเดิม (Boost converter) คือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงกว่าแรงดันอินพุต โครงสร้างของวงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์แบบคั้งเดิมแสดงได้ดังรูป ก.1



รูปที่ ก.1 โครงสร้างวงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์แบบคั้งเดิม

วงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์แบบคั้งเดิมพิจารณาหลักการทำงานได้ 2 โหมด คือ โหมดสวิตช์กำลังนำกระแส และโหมดสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส ดังนี้
 โหมดสวิตช์กำลังนำกระแส ; การทำงานในโหมดนี้สวิตช์กำลังจะถูกปิดวงจร (switch on) ทำให้กระแสอินพุตจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสวิตช์กำลัง ในขณะที่ไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ โครงสร้างการทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูป ก.2



รูปที่ ก.2 วงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์แบบคั้งเดิมในโหมดสวิตช์กำลังนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรโดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ในโหมดสวิตช์กำลังนำกระแสจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$-V_{in} + V_L = 0 \quad (\text{ก.1})$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in} \quad (ก.2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (ก.3)$$

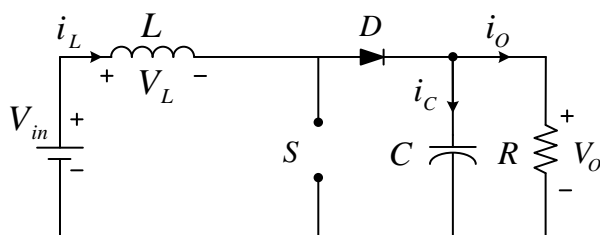
พิจารณาช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส $dt=DT$ โดยที่ D คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ และ T คือ คาบของการสวิตช์ เมื่อการกระเพื่อมของกระแสอินพุตมีค่าคงที่ ถือว่าการเพิ่มของกระแสอินพุตเป็นแบบเชิงเส้น จะให้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L} \quad (ก.4)$$

จะได้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ดังนี้

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_{in} DT}{L} \quad (ก.5)$$

โดยที่ $\Delta i_{L,on}$ คือ การกระเพื่อมของกระแสอินพุตเมื่อสวิตช์กำลังนำกระแส โหมดสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส ; ในโหมดนี้สวิตช์กำลังจะหยุดนำกระแส (switch off) ทำให้กระแสอินพุตของวงจรไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และไดโอด ไปยังตัวเก็บประจุ และโหลดความต้านทาน ซึ่งโครงสร้างการทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูป ก.3



รูปที่ ก.3 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมใน โหมดสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรโดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ในโหมดสวิตช์กำลัง หมายความว่ากระแส จะได้รับความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$-V_{in} + V_L + V_o = 0 \quad (ก.6)$$

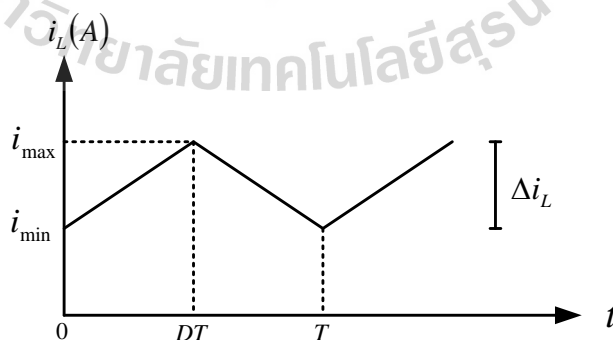
$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - V_o \quad (ก.7)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (ก.8)$$

ขณะที่สวิตช์กำลังหยุดนำกระแส $dt=(1-D)T$ การกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ ถือว่าการลดลงของกระแสอินพุตเป็นแบบเชิงเส้นดังรูปที่ ก.4 แสดงการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (ก.9)$$

โดยที่ $\Delta i_{L,off}$ คือ การกระเพื่อมของกระแสอินพุตเมื่อสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส



รูปที่ ก.4 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ ก.4 แสดงการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (current ripple) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส และสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส พิจารณาการกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่สถานะอยู่ตัว จะได้อัตราขยายของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม แสดงได้ดังนี้

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (\text{ก.10})$$

$$\frac{V_{in}DT}{L} + \left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right) (1-D)T = 0$$

$$V_{in}DT + (V_{in} - V_o)(1-D)T = 0$$

$$V_{in}DT + V_{in}T - V_{in}DT - V_oT + V_oDT = 0$$

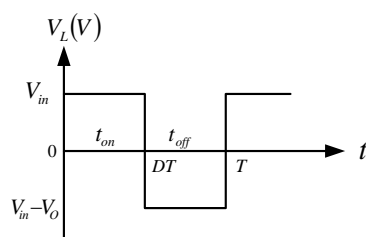
$$V_{in} - V_o(1-D) = 0$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{ก.11})$$

โดยที่ $D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$; $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$

เมื่อ t_{on} คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังนำกระแส

t_{off} คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังหยุดนำกระแส แสดงดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการอัตราขยายแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม พบว่าแรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่เมื่อวงจรรับแรงดันอินพุตคงที่ ซึ่งเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าสูงจะส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงเพิ่มขึ้นด้วย แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรหน้าที่กับอัตราขยายแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D)	อัตราขยายแรงดัน (M)
0	1.00
0.1	1.10
0.2	1.25
0.3	1.43
0.4	1.67
0.5	2.00
0.6	2.50
0.7	3.33
0.8	5.00
0.9	10.00
1.0	infinity

จากตารางที่ ก.1 พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) ของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ โดยที่แรงดันเอาต์พุตของวงจรจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มขึ้น แต่การที่วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูง ๆ จะส่งผลถึงประสิทธิภาพของวงจรที่จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลังค่อนข้างสูง ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงที่สวิตช์นำกระแส (conduction loss) สูงขึ้นด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เลือกใช้ในวงจรอย่างเหมาะสม เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแส และการกระเพื่อมของแรงดันอันเป็นสาเหตุการเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจร โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อให้การกระเพื่อมของกระแส และการกระเพื่อมของแรงดันอยู่ในขอบเขตที่ต้องการจะนำเสนอต่อไปนี้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

จากโครงสร้างของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมในรูป ก.1 ซึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด สวิตช์กำลัง ตัวเก็บประจุ และโหลดความต้านทาน โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวมีการออกแบบพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

การออกแบบเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ;

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม โดยสมมติว่าไม่มีกำลังงานสูญเสียภายในวงจร กำลังงานไฟฟ้าอินพุต (P_{in}) จะมีค่าเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต (P_{out}) จะได้ว่า

$$P_{in} = P_{out} \quad (ก.12)$$

$$V_{in} I_L = V_o I_o \quad (ก.13)$$

$$\text{เมื่อ } V_o = \frac{V_{in}}{1-D}$$

$$V_{in} I_L = \frac{V_{in}}{1-D} I_o \quad (ก.14)$$

$$I_L = \frac{I_o}{1-D} \quad (ก.15)$$

จากความสัมพันธ์ ของเวลาการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} ; t_{on} = DT \text{ และ } t_{off} = (1-D)T \quad (ก.16)$$

พิจารณาการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมเมื่อสวิตช์กำลังนำกระแสได้ สมการการกระเพื่อมของกระแสอินพุตดังสมการ (ก.5) และเมื่อสวิตช์กำลังหยุดนำกระแสได้ สมการการกระเพื่อมของกระแสอินพุตดังสมการ (ก.9) จากนั้นทำการหาสมการสำหรับออกแบบตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$L = \frac{V_{in}(V_o - V_{in})}{f \cdot V_o \cdot \Delta i_L} \quad \text{หรือ} \quad L = \frac{D \cdot V_{in}}{f \cdot \Delta i_L} \quad (\text{ก.17})$$

การออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุ ;

การออกแบบตัวเก็บประจุ C จะพิจารณาช่วงสวิทช์กำลังนำกระแสดังรูป ก.2 สังเกตได้ว่าตัวเก็บประจุจะจ่ายกระแสให้กับโหลดความต้านทาน

$$i_C = i_o \quad (\text{ก.18})$$

พิจารณา i_C ในช่วง $0-t_{on}$ เท่านั้น เพื่อทำการหาค่าตัวเก็บประจุ

$$V_C - V_C(t=0) = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} i_o dt \quad (\text{ก.19})$$

$$\Delta V_C = \frac{i_o \cdot t_{on}}{C} \quad (\text{ก.20})$$

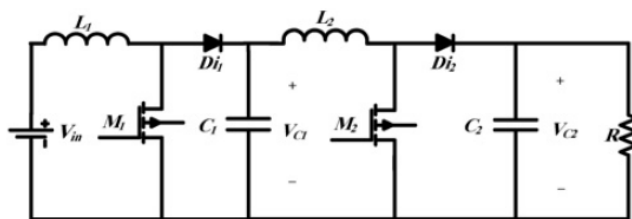
$$\text{เมื่อ } t_{on} = DT = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \cdot \frac{1}{f}$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ C ของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมดังนี้

$$C = \frac{i_o(V_o - V_{in})}{f \cdot V_o \cdot \Delta V_C} \quad \text{หรือ} \quad C = \frac{D \cdot i_o}{f \cdot \Delta V_C} \quad (\text{ก.21})$$

โดยที่ ΔV_C คือ การกระเพื่อมของแรงดัน V_C

วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น (Two-Stage Cascaded Boost converter) คือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงกว่าแรงดันอินพุต โดยมีโครงสร้างคล้ายกับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม แต่มีการเพิ่มอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และมีอัตราขยายแรงดันที่สูงกว่าแบบดั้งเดิม แสดงได้ดังรูป ก.6



รูปที่ ก.6 โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น

ซึ่งจากรูปที่ ก.6 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้นจะมีอัตราขยายแรงดันที่สูงกว่าแบบดั้งเดิม โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ต่ำกว่าแบบดั้งเดิม สามารถคำนวณอัตราขยายได้จากสมการต่อไปนี้

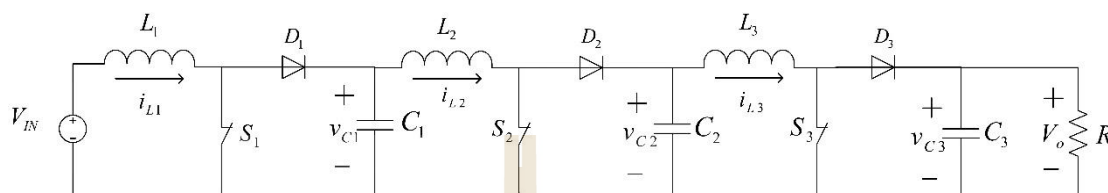
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D_1)(1-D_2)} \quad (\text{ก.22})$$

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรหน้าที่กับอัตราขยายแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 อัตราขยายแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น

ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D_1, D_2)	อัตราขยายแรงดัน (M)
0	1.00
0.1	1.23
0.2	1.56
0.3	2.04
0.4	2.78
0.5	4.00
0.6	6.25
0.7	11.11
0.8	25.00
0.9	100.00
1.0	infinity

และเมื่อนำมาเปรียบเทียบอัตราขยายกับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น (Three-Stage Cascaded Boost converter) ซึ่งเป็นวงจรที่มีการต่อยอดมาจากวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมและแบบเรียงต่อกันสองขั้น จะมีลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ ก.7 และการเปรียบเทียบอัตราขยายแสดงดังตารางที่ ก.3



รูปที่ ก.7 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

ตารางที่ ก.3 การเปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม แบบเรียงต่อกันสองขั้น และแบบเรียงต่อกันสามขั้น

ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D_1, D_2, D_3)	อัตราขยายแรงดัน ของบัสต์แบบดั้งเดิม	อัตราขยายแรงดัน ของบัสต์สองขั้น	อัตราขยายแรงดัน ของบัสต์สามขั้น
0	1.00	1.00	1.00
0.1	1.10	1.23	1.37
0.2	1.25	1.56	1.95
0.3	1.43	2.04	2.92
0.4	1.67	2.78	4.63
0.5	2.00	4.00	8.00
0.6	2.50	6.25	15.63
0.7	3.33	11.11	37.04
0.8	5.00	25.00	125
0.9	10.00	100.00	1000.00
1.0	infinity	infinity	infinity

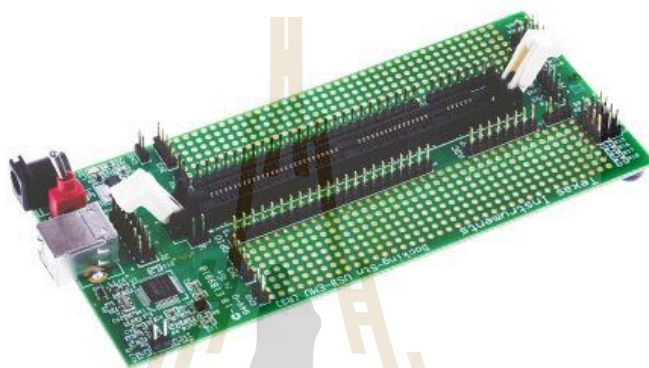


ภาคผนวก ข

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
DSP รุ่น TMDSDOCK28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การสร้างชุดทดสอบวงจรบุสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมชนิดพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสเป็นตัวควบคุม ภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดพลาด จะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 มาเป็นตัวประมวลผลสำหรับสร้างสัญญาณควบคุม และวิธีตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Texas Instruments แสดงดังรูป ข.1 โดยลักษณะที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 มีดังต่อไปนี้



รูปที่ ข.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335

คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335

1. หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล 32 บิต รองรับการประมวลผลทั้งแบบ floating point unit และ fixed point unit
2. ใช้สัญญาณนาฬิกา 150 MHz ในการประมวลผล หรือ 6.67 ns ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
3. หน่วยความจำประกอบด้วย
 - หน่วยความจำประเภท RAM 68 กิโลไบต์ (68 K bytes on-chip RAM)
 - หน่วยความจำประเภท Flash 512 กิโลไบต์ (512 K bytes on-chip Flash memory)
 - หน่วยความจำประเภท SRAM 256 กิโลไบต์ (256 K bytes on-chip SRAM memory)
4. พอร์ตเชื่อมต่อ XDS100 JTAG Emulator และพอร์ตเชื่อมต่อ RS232 แบบแยกสำหรับโปรแกรมแบบเวลาจริง (real-time in system programming)
5. พอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital converter) แบบ 12 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณอินพุต

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 เพื่อใช้ในการขับขาเกตสวิตช์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 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) และ โหมดการนับขึ้น - 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 เพื่อขับขาเกตสวิตช์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

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

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

การใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล ADC (Analog to Digital Converter)

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 มีโมดูลสำหรับการแปลงแอนาล็อกเป็นดิจิตอลที่มีความละเอียด 12 บิต โดยรองรับสัญญาณแอนาล็อกที่มีแรงดันไม่เกิน 3 V ซึ่งเมื่อรับสัญญาณที่อยู่ในช่วงแรงดันดังกล่าวแล้วจะทำการแปลงเป็นค่าดิจิตอล ตัวเลขที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 4095 สำหรับโมดูล ADC มีทั้งหมด 16 ช่องอินพุตสัญญาณ แบ่งเป็นพอร์ตชุด A 8 ช่องสัญญาณ (ADCINA0 – ADCINA7) และพอร์ตชุด B 8ช่องสัญญาณเช่นกัน (ADCINB0 – ADCINB7) สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ 3 ช่องสัญญาณ คือ ADCINA0 สำหรับรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น ADCINA1 รับสัญญาณกระแส i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ ADCINA2 รับสัญญาณกระแส i_{L3} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยสมการที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล แสดงได้ดังสมการ (ข.2)

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

โดยที่ $Digital\ Values$ คือ ค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลง ADC

V_{analog} คือ สัญญาณแรงดันแอนาล็อก (V)



ภาคผนวก ค

โปรแกรมภาษาซีสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
DSP รุ่น TMDSDOCK28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

DSP รุ่น TMDSDOCK28335

```
#####
```

โปรแกรมภาษาซีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น
และวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร

```
#####
```

```
#include "DSP2833x_Device.h" // โหลด headerfile และ Examples Include File
```

```
#if (CPU_FRQ_150MHZ) // กรณี SYSCLKOUT มีค่า 150 MHz
```

```
#define ADC_MODCLK 0x3 // สัญญาณนาฬิกา ADC_HSPCLK = 150/(2*3) = 25MHz
```

```
#endif
```

```
#if (CPU_FRQ_100MHZ) // กรณี SYSCLKOUT มีค่า 100 MHz
```

```
#define ADC_MODCLK 0x2 // สัญญาณนาฬิกา ADC_HSPCLK = 100/(2*2) = 25MHz
```

```
#endif
```

```
//=====
```

//ประกาศฟังก์ชันภายนอก (ฟังก์ชันพื้นฐานที่อยู่ใน Headerfile)

```
//=====external function prototypes=====
```

```
extern void InitAdc(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าพื้นฐานของ ADC
```

```
extern void InitSysCtrl(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าพื้นฐานของ CPU
```

```
extern void InitPieCtrl(void); // ฟังก์ชันการควบคุม Peripheral Interrupt Expansion
```

```
extern void InitPieVectTable(void); // ฟังก์ชันตาราง Peripheral Interrupt Expansion
```

```
extern void InitCpuTimers(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าพื้นฐานของ CPU Timer
```

```
extern void ConfigCpuTimer(struct CPUTIMER_VARS *, float, float); // ฟังก์ชันกำหนดโครงสร้างของ CPU
```

Timer

```
//=====
```

//ประกาศฟังก์ชันสำหรับการใช้งาน

```
//=====
```

```
void Gpio_select(void); // ประกาศฟังก์ชัน Gpio_select
```

```
void Setup_ePWM(void); // ประกาศฟังก์ชัน Setup_ePWM
```

```
interrupt void cpu_timer0_isr(void); // ประกาศฟังก์ชัน interrupt void cpu_timer0_isr
```

```
interrupt void adc_isr(void); // ประกาศฟังก์ชัน interrupt void adc_isr
```

```
//=====
```

```

//ประกาศตัวแปร
//=====Global Variables=====

unsigned int Voltage_VR1; //ประกาศตัวแปร Voltage_VR1
unsigned int Current_Iin1; //ประกาศตัวแปร Current_Iin1
unsigned int Current_Iin2; //ประกาศตัวแปร Current_Iin2
unsigned int Voltage_Vout; //ประกาศตัวแปร Voltage_Vout
int i=1,sump_1=0,sump_3=0,sum_1=0,sum_3=0,sum0=0; //ประกาศตัวแปรต่าง ๆ สำหรับวิธีการตรวจจับ
int G_2=0,F_1=0,F_2=0,F_3=0,H=0,total=0,total_2=0; //ประกาศตัวแปรต่าง ๆ สำหรับวิธีการตรวจจับ
int slopesig_1=0,slopesig_3=0,slope_1=0,slope_3=0; //ประกาศตัวแปรต่าง ๆ สำหรับวิธีการตรวจจับ
int A=0,B=0,flag=0; //ประกาศตัวแปรต่าง ๆ สำหรับวิธีการตรวจจับ
float F1=0.0,F11=0.0,F2=0.0,F22=0.0,F3=0.0,F33=0.0; //ประกาศตัวแปรสถานะความผิดพลาด
float io_old_1=0.0,io_old_3=0.0; //ประกาศตัวแปร io_old_1 และ io_old_3
float io_new_1=0.0,io_new_3=0.0; //ประกาศตัวแปร io_new_1 และ io_new_3
float Voltage_VR1,Voltage_VR2,Voltage_VR3; //ประกาศตัวแปร Voltage_VR1,Voltage_VR2,Voltage_VR3
float V_ch1,V_ch2,V_ch3,Vdc,IL1,IL3; //ประกาศตัวแปร V_ch1,V_ch2,V_ch3,Vdc,IL1,IL3
float Ts=1e-5; //ประกาศตัวแปร sampling time
float T=0; //ประกาศตัวแปร Time
float Vref=400; //ประกาศตัวแปร Vref แรงดันอ้างอิง
float Z1=0,Vref1=400; //ประกาศตัวแปร Vref1
float Z2=15,Vref2=300; //ประกาศตัวแปร Vref2
float Z3=30,Vref3=300; //ประกาศตัวแปร Vref3
float err_v=0; //ประกาศตัวแปร err_v
float Upv=0,Uiv=0,Uiv_1=0; //ประกาศตัวแปร Upv, Uiv และ Uiv_1
//สำหรับรูปควบคุมแรงดัน
float kpv=0.000563,kiv=0.046502; //ประกาศตัวแปร Kpv และ Kiv
float Iin_ref=0,Iref1=0,Iref2=0; //ประกาศตัวแปร Iin_ref, Iref1 และ Iref2
float err_i=0,err_i2=0; //ประกาศตัวแปร err_i และ err_i2
float kpi=0.1695,kii=5.2549,kpi2=0.7032,kii2=43.5965; //ประกาศตัวแปร Kpi, Kii, Kpi2 และ Kii2
//สำหรับรูปควบคุมกระแสทั้งสองรูป
float Upi=0,Uii=0,Uii_1=0,Upi_i=0; //ประกาศตัวแปร Upi, Uii, Uii_1 และ Upi_i

```

```

float Upi2=0,Uii2=0,Uii_2=0,Upi_i2=0;           //ประกาศตัวแปร Upi2, Uii2, Uii_2และ Upi_i2

float M;                                         //ประกาศตัวแปร M

//=====
//main code
//=====

void main(void)
{

    InitSysCtrl();                             //โหลด PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDCR= 0x00AF;
    EDIS;
    DINT;                                       //หยุดการทำงานของอินเทอร์รัพต์
    Gpio_select();                             //กำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต
    Setup_ePWM();                              //กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM
    InitPieCtrl();                             //กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับ PIE table
    InitPieVectTable();
    InitAdc();                                 //โหลดค่าเริ่มต้นพื้นฐานของการแปลง ADC
    AdcRegs.ADCTRL1.all = 0;
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = 7;
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1;          //cascaded sequencer
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0;              //divide by 1
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0;         //single run mode
    AdcRegs.ADCTRL2.all = 0;
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1;     //enable SEQ1 interrupt
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 1;   //SEQ1 start from
    ePWM_SOCA trigger
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_MOD_SEQ1 = 0;     //interrupt after every end
                                                of sequence

    AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 3;
        //ADC clock: FCLK HSPCLK / 2 * ADCCLKPS
        // HSPCLK = 75MHz (see DSP2833x_SysCtrl.c)
        // FCLK = 12.5 MHz

    AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 3;               //กำหนดจำนวนช่องสัญญาณ 3+1= 4 ช่อง
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0;     //ADCINA0 as 1st SEQ1
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 1;     //ADCINA1 as 2nd SEQ1
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 2;     //ADCINA2 as 3rd SEQ1
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 3;     //ADCINA3 as 4 SEQ1

```

```

EPwm5Regs.TBCTL.all = 0xC030;          // Configure timer control register
EPwm5Regs.TBPRD = 2999;                // TPPRD +1 = TPWM / (HSPCLKDIV * CLKDIV * TSYSCCLK)
                                        = 20 us / 6.667 ns

EPwm5Regs.ETPS.all = 0x0100; //Configure ADC start by ePWM3
EPwm5Regs.ETSEL.all = 0x0A00;          //Enable SOCA to ADC
EALLOW;

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

EDIS;

InitCpuTimers();                        //basic setup CPU Timer0, 1 and 2

ConfigCpuTimer(&CpuTimer0,150,10);     //กำหนด sampling time=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;
}
}

//=====
//ฟังก์ชัน Gpio_select
//=====
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.GPAMUX1.bit.GPIO6 = 1; // ePWM4A 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;
    GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0;
    EDIS;
}
//=====
//ฟังก์ชัน Setup_ePWM
//=====
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
    EPwm1Regs.TBPRD = 3750; //3750=10KHz - PWM signal
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750/2; //duty1
    EPwm2Regs.TBCTL.all = 0; //default status
    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
    EPwm2Regs.TBPRD = 3750; //3750=10KHz - PWM signal
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750/2; //duty2
    EPwm3Regs.TBCTL.all = 0; //default status
    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
    EPwm3Regs.TBPRD = 3750; //3750=10KHz - PWM signal
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750/2; //duty3
    EPwm4Regs.TBCTL.all = 0; //default status
    EPwm4Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0; //CLKDIV = 1
    EPwm4Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 1; //HSPCLKDIV = 2
    EPwm4Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2; //up - down mode
    EPwm4Regs.AQCTLA.all = 0x0060; //set ePWM1A on CMPA up
    EPwm4Regs.TBPRD = 3750; //3750=10KHz - PWM signal
    EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA = 3750/2; //duty3
}
//=====

```

```

//ฟังก์ชัน interrupt void cpu_timer0_isr
//=====
interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
    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;
    }
    if(up_down)

```



```

{
    if(EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA < EPwm1Regs.TBPRD) EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA;
    else up_down = 0;
}
else
{
    if(EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA > 0) EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA;
    else up_down = 1;
}
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
Voltage_VR2 = (AdcRegs.ADCRESULT1>>4);
V_ch2= Voltage_VR2*3/4095; //อัตราค่ากระแส  $i_{L1}$ 
Voltage_VR3 = (AdcRegs.ADCRESULT2>>4);
V_ch3= Voltage_VR3*3/4095; //อัตราค่ากระแส  $i_{L3}$ 
Voltage_VR1 = (AdcRegs.ADCRESULT0>>4);
V_ch1= Voltage_VR1*3/4095; //อัตราค่าแรงดัน  $V_o$ 
IL1=((3.8*(V_ch2))+0.095); //ปรับเทียบค่ากระแส  $i_{L1}$ 
IL3=((3.8*(V_ch3))+0.095); //ปรับเทียบค่ากระแส  $i_{L3}$ 
Vdc=((1.7e2*(V_ch1))+0.26); //ปรับเทียบค่าแรงดัน  $V_o$ 
//===== PI V loop =====
err_v=Vref-Vdc; //คำนวณค่าความผิดพลาดของแรงดัน  $V_o$ 
Upv=kpv*err_v; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Uiv=(kiv*Ts*err_v)+Uiv_1; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
Iin_ref=Upv+Uiv; //คำนวณกระแสอ้างอิงจากลูปแรงดัน
//===== Current Weighting =====
Iref1=Iin_ref*0.85; //คำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับลูปควบคุมกระแส
ลูปที่ 1
Iref2=Iin_ref*0.15; //คำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับลูปควบคุมกระแส
ลูปที่ 2
//===== PI I loop1 =====
err_i=Iref1-IL1; //คำนวณค่าความผิดพลาดของกระแส  $i_{L1}$ 
Upi=kpi*err_i; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Uii=(kii*Ts*err_i)+Uii_1; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
Upi_i=Upi+Uii; //คำนวณสัญญาณอ้างอิงสำหรับสร้าง PWM

```

```

//===== PI I loop2 =====
err_i2=Iref2-IL3; //คำนวณค่าความผิดพลาดของกระแส  $i_{L3}$ 
Upi2=kpi2*err_i2; //คำนวณการควบคุมแบบสัดส่วน
Uii2=(kii2*Ts*err_i2)+Uii_2; //คำนวณการควบคุมแบบอินทิกรัล
Upi_i2=Upi2+Uii2; //คำนวณสัญญาณอ้างอิงสำหรับสร้าง PWM
//===== update variable =====
Uiv_1=Uiv;; //อัปเดตค่า  $U_{iv\_1}$ 
Uii_1=Uii; //อัปเดตค่า  $U_{ii\_1}$ 
Uii_2=Uii2; //อัปเดตค่า  $U_{ii\_2}$ 
T=T+Ts; //ตัวจับเวลาการทำงาน
//===== DUTY limiter =====
if(Upi_i>=0.9){ Upi_i=0.9; //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่  $U_{pi\_i}$  ไม่เกิน 0.9
if(Upi_i2>=0.9){ Upi_i2=0.9; //กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่  $U_{pi\_i2}$  ไม่เกิน 0.9
//===== Fault Detection =====
io_new_1=IL1; //อัปเดตค่า  $io\_new\_1$ 
io_new_3=IL3; //อัปเดตค่า  $io\_new\_3$ 
slope_1=(io_new_1-io_old_1)/(T*Ts-((T-1)*Ts)); //คำนวณค่าความชันของกระแส  $i_{L1}$ 
slope_3=(io_new_3-io_old_3)/(T*Ts-((T-1)*Ts)); //คำนวณค่าความชันของกระแส  $i_{L3}$ 
slopesig_1=slope_1/abs(slope_1); //คำนวณค่าความชันปกติของกระแส  $i_{L1}$ 
slopesig_3=slope_3/abs(slope_3); //คำนวณค่าความชันปกติของกระแส  $i_{L3}$ 
if(T>=4){ //กำหนดเวลาที่เริ่มตรวจจับความผิดปกติ
if(slopesig_1==1||slopesig_1==1||slopesig_3==1||slopesig_3==1){ //ตรวจสอบค่าความชันปกติ
total=total+1; //คำนวณค่า total
total_2=total_2+1; //คำนวณค่า total_2
//===== S1 fault =====
if(slopesig_1==1){sum_1=sum_1+1; //ตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$ 
if(sum_1>=10){ F_1=F_1+1;}}
if(slopesig_1==1){sump_1=sump_1+1;
if(sump_1>=10){ F_1=F_1+1;}}

```

```

//===== S3 fault =====
if (slopesig_3==1){sum_3=sum_3+1;           //ตรวจจับความผิดปกติที่สวิทช์ S3
if (sum_3>=10){ F_3=F_3+1;}}
if (slopesig_3==1){sump_3=sump_3+1;
if (sump_3>=10){ F_3=F_3+1;}}
//===== S2 fault =====
if (Upi_i>=0.75){                           //ตรวจจับความผิดปกติที่สวิทช์ S2
if (Upi_i-0.8>=0){G_2=G_2+1;}
if (sum_1==10||sump_1==10||sum_3==10||sump_3==10){H=H+1;}
if (total_2==10&&H==0){if(G_2>=60){F_2=F_2+1;}}
if (Upi_i<=0.75){G_2=0;}
if (total>=10){sump_1=0,sum_1=0,sump_3=0,sum_3=0; //อัปเดตค่า sump_1, sum_1, sump_3, sum_3
total=0, total_2=0;} //อัปเดตค่า total และ total_2
//===== fault status =====
if (F_1>=4){F1=1,F11=1;}else{F1=0;} //สถานะความผิดปกติของสวิทช์ S1
if (F_2>=2){F2=1,F22=1,H=0;}else{F2=0;} //สถานะความผิดปกติของสวิทช์ S2
if (F_3>=4){F3=1,F33=1;}else{F3=0;} //สถานะความผิดปกติของสวิทช์ S3
io_old_1=io_new_1; //อัปเดตค่า io_old_1
io_old_3=io_new_3; //อัปเดตค่า io_old_3
//===== Update DUTY =====
if (A==0){
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S1
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S2
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-
3750*Upi_i; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S3
EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*0; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S1'
//===== สร้างความผิดปกติแบบสวิทช์เปิดวงจร =====
if (T>=10&&B==0&&T<=15){A=1;
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*0; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S1
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S2
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750* Upi_i; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S3
EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*0; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิทช์ S1'
if(F11==1){ flag=1;} //ตรวจพบความผิดปกติที่สวิทช์ S1
//===== Fault tolerant =====

```

```

if(flag==1){ B=1;
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*0; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิตช์  $S_1$ 
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิตช์  $S_2$ 
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750* Upi_i2; //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิตช์  $S_3$ 
EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Upi_i;} //อัปเดตสัญญาณ PWM ของสวิตช์  $S_1'$ 
if(T>T1&&T<T2){Vref=Vref1;} //เปลี่ยนแปลงค่า Vref ครั้งที่1
if(T>T2&&T<T3){Vref=Vref2;} //เปลี่ยนแปลงค่า Vref ครั้งที่2
if(T>T3){Vref=Vref3;} //เปลี่ยนแปลงค่า Vref ครั้งที่3
}
//=====
//ฟังก์ชัน interrupt void adc_isr
//=====
interrupt void adc_isr(void)
{
Voltage_VR1 = AdcMirror.ADCRESULT0; //รับค่าดิจิตอลของแรงดัน  $V_o$ 
Voltage_VR2 = AdcMirror.ADCRESULT1; //รับค่าดิจิตอลของกระแส  $i_{L1}$ 
Voltage_VR3 = AdcMirror.ADCRESULT2; //รับค่าดิจิตอลของกระแส  $i_{L3}$ 
// Reinitialize for next ADC sequence
AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reset SEQ1
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1; // Clear INT SEQ1 bit
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
// Acknowledge interrupt to PIE
}
//=====
// End of SourceCode.
//=====

```



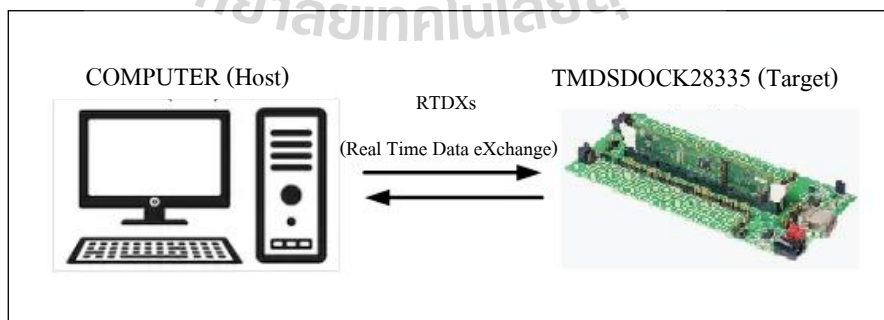
ภาคผนวก ง

การจำลองสถานการณ์วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น
แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่มีตัวควบคุมและมีวิธีตรวจจับความผิดปกติ
แบบสวิตช์เปิดวงจร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In Loop : HIL)

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In Loop : HIL) เป็นการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 ทำงานร่วมกับโปรแกรม MATLAB Simulink โดยสร้างตัวควบคุมพีไอและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรด้วยการเขียนคำสั่งโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 เพื่อจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจะอาศัยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้ออกแบบดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 และวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ซึ่งการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 จะประมวลผลของตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส รวมถึงวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น เพื่อส่งสัญญาณ PWM และตรวจจับความผิดปกติภายในวงจรให้สวิทช์กำลังของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นเพื่อจำลองสถานการณ์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB Simulink เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจะอาศัยโปรแกรม Code Composer Studio V3.3 เพื่อเขียนคำสั่งโปรแกรมภาษาซีสำหรับตัวควบคุมพีไอและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจร เพื่อควบคุมการทำงานและตรวจจับความผิดปกติของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น หลักการทำงานของฮาร์ดแวร์ในลูปจะเป็นการรับส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchang) เชื่อมโยงโปรแกรม MATLAB Simulink (Host) กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMDSDOCK28335 (Target) โดยแผนภาพการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลแสดงได้ดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 แผนการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMDSDOCK28335

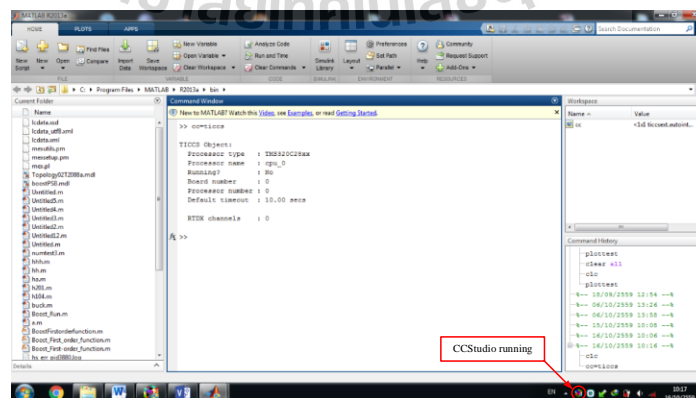
การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด DSP รุ่น TMSDOCK28335

การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์กับบอร์ด DSP รุ่น TMSDOCK28335 ลำดับแรกต้องทำการติดตั้งทั้งซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCSstudio v3.3 โดยไอคอน โปรแกรมที่จะใช้งานเชื่อมต่อแสดงได้ดังรูป ง.2 ประกอบด้วย โปรแกรม MATLAB และ โปรแกรม CCSstudio v3.3 ที่ใช้สำหรับเขียนคำสั่งโปรแกรมภาษาซีและเชื่อมต่อกับบอร์ด TMSDOCK28335

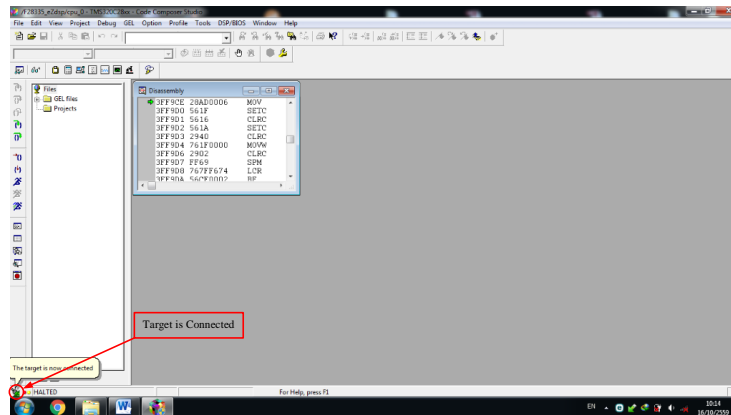


รูปที่ ง.2 ไอคอนการเข้าใช้งานซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCSstudio v3.3

การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด TMSDOCK28335 ทำได้โดยการต่อพอร์ต USB เข้ากับคอมพิวเตอร์ จากนั้นเปิดซอฟต์แวร์ MATLAB บนหน้าต่าง Command Window ทำการคีย์คำสั่ง `cc=ticcs` เพื่อทดสอบว่าบอร์ด TMSDOCK28335 เชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์ MATLAB เรียบร้อยแล้ว โดยจะปรากฏการเชื่อมต่อ แสดงดังรูปที่ ง.3 จากนั้นทำการเปิดโปรแกรม CCSstudio v3.3 เพื่อสร้างไฟล์โปรเจกต์การทำงาน หน้าต่างของโปรแกรม CCSstudio v3.3 แสดงดังรูป ง.4 หลังจากเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด TMSDOCK28335 แล้วจะปรากฏการเชื่อมต่อบอร์ด TMSDOCK28335 กับโปรแกรม CCSstudio v3.3 บริเวณมุมล่างซ้ายของหน้าต่าง ดังรูป ง.4



รูปที่ ง.3 การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด TMSDOCK28335

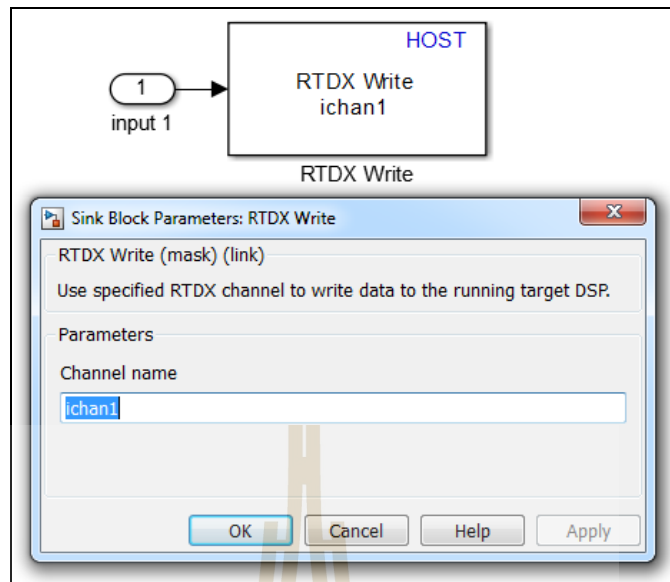


รูปที่ 4.4 หน้าต่างโปรแกรม CCStudio v3.3

การเชื่อมโยง โปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335

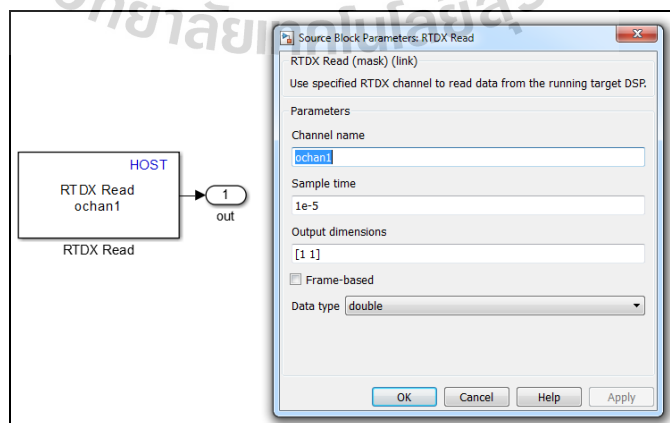
การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335 สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของการรับ และการส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335 ผ่านช่องทางสื่อสารแบบ RTDX การสื่อสารรับส่งข้อมูลดังกล่าว สามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การส่งข้อมูลจากโปรแกรม Simulink ไปยังบอร์ด TMDSDOCK28335 การรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink จากบอร์ด TMDSDOCK28335 การส่งข้อมูลจากบอร์ด TMDSDOCK28335 มายังโปรแกรม Simulink และการรับข้อมูลของบอร์ด TMDSDOCK28335 จากโปรแกรม Simulink ซึ่งแต่ละกรณีสามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ 1 การส่งข้อมูลจากโปรแกรม Simulink ไปยังบอร์ด TMDSDOCK28335 สามารถทำได้โดยใช้บล็อกอินพุต RTDX Write ที่สามารถเรียกใช้จากไลบรารี RTDX simulation block ซึ่งจะอยู่ในบล็อกเครื่องมือภายในซอฟต์แวร์ MATLAB การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกอินพุต RTDX Write มีเพียงชื่อของช่องอินพุต (Channel name) ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการกำหนดชื่อช่องอินพุตสำหรับระบบการทดสอบรับ และส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX แสดงดังรูป 4.5 เป็นการรับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink มาเก็บไว้ในชื่อ ichan1



รูปที่ ๓.5 การกำหนดค่าบล็อก RTDX Write

กรณีที่ 2 การรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink จากบอร์ด TMDSDOCK28335 สามารถทำได้โดยการใช้บล็อกเอาต์พุต RTDX Read ซึ่งอยู่ในไลบรารี RTDX simulation block การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ได้แก่ ชื่อของช่องเอาต์พุต (Channel name) ช่วงเวลาในการซักรับข้อมูล (Sample Time) ขนาดของข้อมูลที่ส่งมาจากบอร์ด TMDSDOCK28335 (Output dimensions) และชนิดข้อมูล (Data type) แสดงได้ดังรูป ๓.6 (double คือ ชนิดข้อมูลแบบตัวเลขทศนิยมละเอียด (float))



รูปที่ ๓.6 การกำหนดค่าบล็อก RTDX Read

กรณีที่ 3 การส่งข้อมูลจากบอร์ด TMDSDOCK28335 มายังโปรแกรม Simulink สามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งภาษาซี บนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

- RTDX_CreateOutChannel(ochan1);
- เป็นฟังก์ชันคำสั่งการสร้างช่องเอาต์พุต RTDX สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink โดยชื่อของช่องเอาต์พุตดังกล่าวจะต้องกำหนดให้เหมือนกับชื่อของช่องการรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink
- RTDX_enableOutput(&ochan1);
- เป็นฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องเอาต์พุต RTDX ที่ชื่อ ochan1 สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink
- RTDX_write(&ochan1,dout1,nbuf*sizeof(long))
- เป็นฟังก์ชันคำสั่งเขียนส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink ผ่านทางช่องเอาต์พุต RTDX ชื่อ ochan1 โดยจะต้องกำหนดค่าข้อมูล ขนาดข้อมูล และชนิดของข้อมูลในวงเล็บฟังก์ชันดังกล่าว

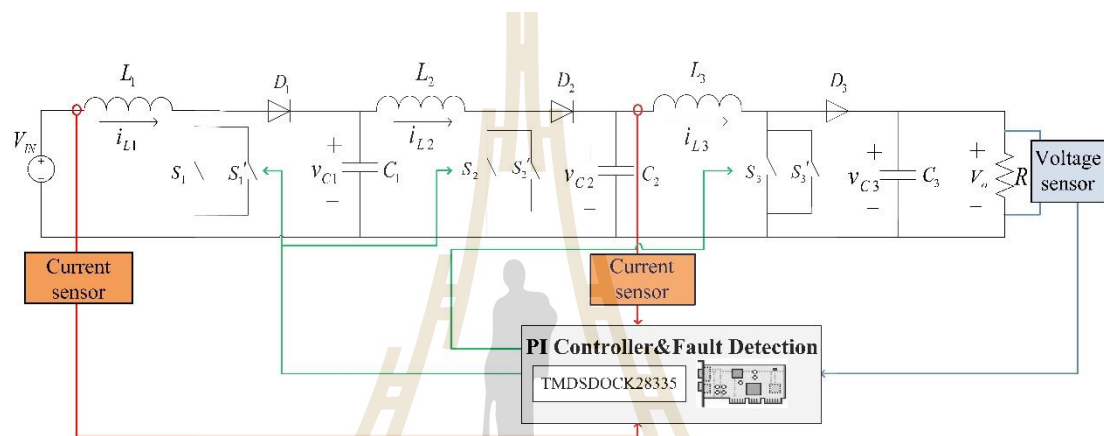
กรณีที่ 4 การรับข้อมูลของบอร์ด TMDSDOCK28335 จากโปรแกรม Simulink ทำได้โดยใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

- RTDX_CreateInputChannel(ichan1);
- เป็นฟังก์ชันคำสั่งการสร้างช่องอินพุต RTDX สำหรับใช้รับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink โดยชื่อของช่องอินพุตดังกล่าวจะต้องกำหนดให้เหมือนกับชื่อของช่องการส่งข้อมูลของโปรแกรม Simulink
- RTDX_enableInput(&ichan1);
- เป็นฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องอินพุต RTDX ที่ชื่อ ichan1 สำหรับใช้รับข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink
- RTDX_read(&ichan1,din1,nbuf*sizeof(long))
- เป็นฟังก์ชันคำสั่งอ่านข้อมูลที่รับมาจากช่องอินพุต RTDX ชื่อ ichan1

สำหรับเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เป็นการจำลองสถานการณ์ที่ใช้บอร์ด TMDSDOCK28335 ทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์ที่เป็นโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์กับฮาร์ดแวร์ที่เป็นบอร์ด TMDSDOCK28335 ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ RTDX มีจุดประสงค์เพื่อทำให้การจำลองสถานการณ์มีความเสมือนจริง

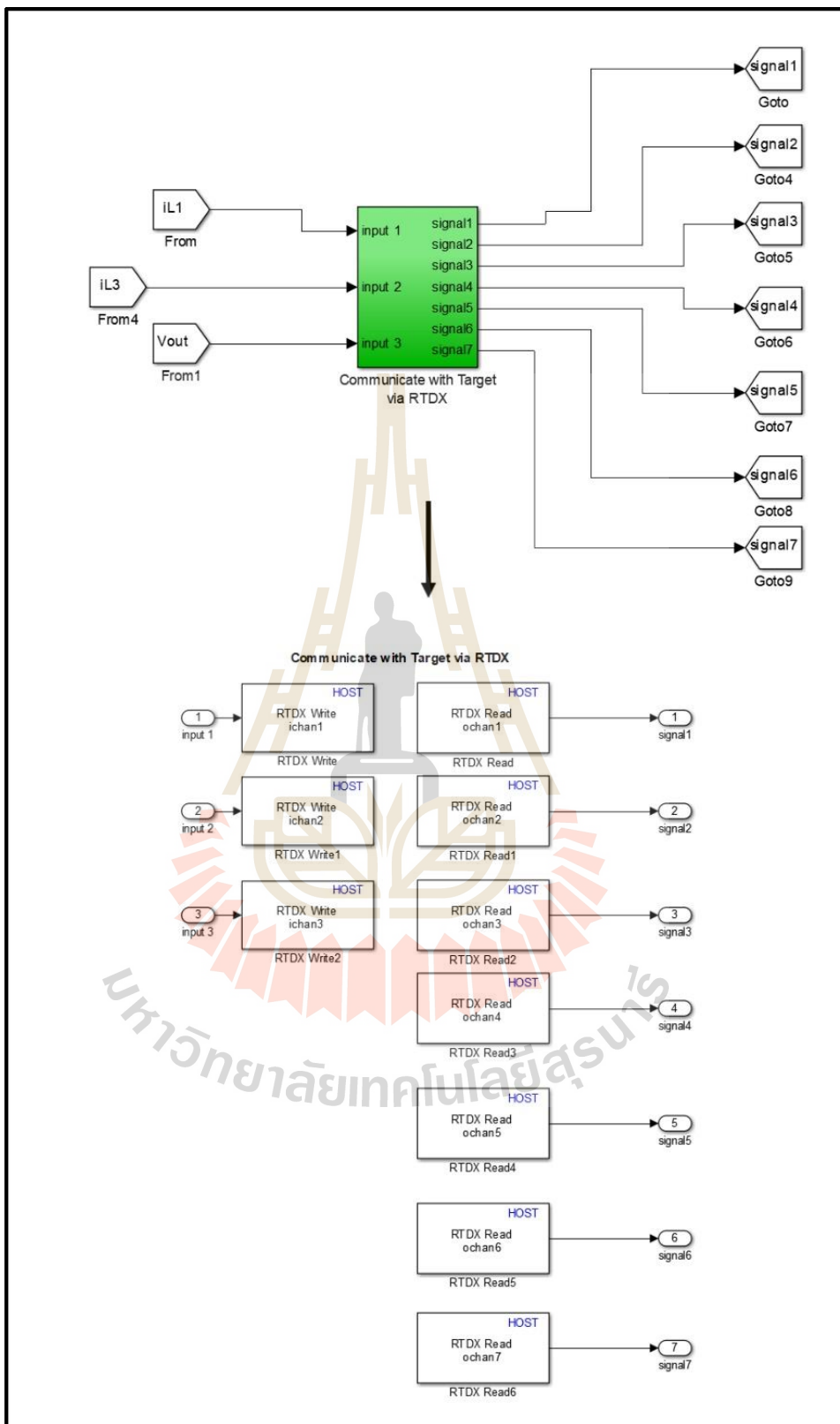
การประยุกต์เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอและวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

ในการจำลองสถานการณ์จะให้ตัวควบคุมพีไอและวิธีการตรวจจับความผิดปกติทำงานอยู่บนบอร์ด TMDSDOCK28335 จะอาศัยการเขียนคำสั่งโปรแกรมทำงานด้วยภาษาซี และทำการรับส่งข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์ (MATLAB, Simulink) กับระบบฮาร์ดแวร์ (บนบอร์ด TMDSDOCK28335) ผ่านช่องทางการสื่อสาร RTDX โดยโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ แสดงได้ดังรูป ๗.7



รูปที่ ๗.7 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

จากโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ ดังรูป ๗.7 ระบบจะทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ โดยการรับส่งข้อมูลจากโปรแกรม Simulink และบอร์ด TMDSDOCK28335 แสดงได้ดังรูปที่ ๗.8 โดยอินพุตของบอร์ด TMDSDOCK28335 ได้มาจากโปรแกรม Simulink ที่เป็นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 (i_{L1}) และ L_3 (i_{L3}) รวมถึงแรงดันเอาต์พุต (V_o) ของวงจรบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้น จากนั้นบอร์ด TMDSDOCK28335 จะทำการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมภาษาซีที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม CCStudio v3.3 แสดงดังรูปที่ ๗.9 โดยเอาต์พุตที่จะออกจากบอร์ด TMDSDOCK28335 จะเป็นสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1 กับ S_2 (signal1) และ S_3 (signal2) สวิตช์สำรอง S_1' (signal3), S_2' (signal4) และ S_3' (signal5) รวมถึงค่าความชันปกติของกระแส i_{L1} (signal6) และ i_{L3} (signal7) เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ ๖.๘ แผนภาพระบบ RTDX การรับส่งข้อมูลบน โปรแกรม Simulink

```

-----
* SIMULINK_RTIC_C6432M.C
* 1) Add the input buffers and 2) subtracts the second input buffer
* from the first. The outputs are the sum and difference buffers.
* (Initialized data must be filled in before execution!)
* int32 nbuf      - number of valid elements stored in input and
*                 output buffers
* int16 data1[]  - input buffer 1
* int16 data2[]  - input buffer 2
* int16 data_sum[] - input buffer 3
* int16 data_diff[] - input buffer 4
-----
* Copyright 2000-2008 The MathWorks, Inc.
-----
#include <stdio.h>
#include "Simulink.h"
#include <stdint.h> /* RTIC_Ready */
#include "target.h" /* TARGET_INITIALIZE */
#include <math.h>

void add_sub_buffers(float *input1, float *input2, float *input3, float *output1, float *output2, float *output3, float *output4, float *output5, float *output6, float *output7);

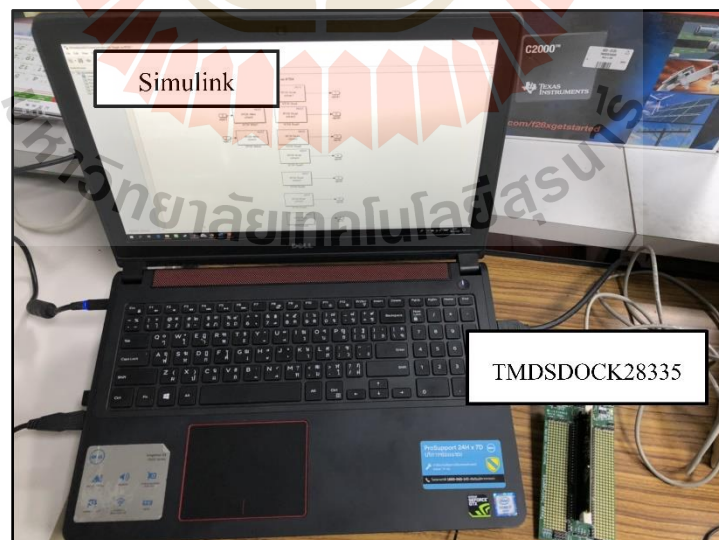
#define MAX_BUFFER_SIZE 1024 /*-- Upper limit on data buffer --*/
/*-- Define buffers, leave uninitialized, to be supplied by MATLAB --*/

long data1[MAX_BUFFER_SIZE];
long data2[MAX_BUFFER_SIZE];
long data_sum[MAX_BUFFER_SIZE];
long data_diff[MAX_BUFFER_SIZE];
int i=1, sum_3=0, sum_3=0, sum_1=0, sum_3=0, F_1=0, F_2=0, F_3=0, H=0, total=0, total_2=0, slope_sig_1=0, slope_sig_3=0, slope_1=0, slope_3=0;
long n=0;
float F1=0, F2=0, F3=0;
float io_01d_1=0, io_01d_2=0;
float output_1[1];
float output_2[1];
float output_3[1];
float output_4[1];
float output_5[1];
float output_6[1];
float output_7[1];
float input1[1], Vref, Vdc;
float input2[1];
float input3[1];
float output1[1];
float output2[1];
float output3[1];
float output4[1];
float output5[1];
float output6[1];
float output7[1];
float I_13;

```

รูปที่ ง.9 หน้าต่างโปรแกรม CCStudio v3.3

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของวงจรมูลฐานคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น สามารถแสดงการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ที่เป็นโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335 แสดงได้ดังรูป ง.10



รูปที่ ง.10 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMDSDOCK28335

ทำการเขียนโค้ดโปรแกรมภาษาซี โดยกำหนดตัวแปรในการเขียนโปรแกรม กำหนดตัวแปรในการเขียนโค้ดโปรแกรม ดังนี้

input1	คือ ตัวแปรรับค่า i_{L1}
input2	คือ ตัวแปรรับค่า i_{L3}
input3	คือ ตัวแปรรับค่า V_o
output1	คือ ตัวแปรรับค่าสัญญาณควบคุมสวิตช์ S_1 กับ S_2
output2	คือ ตัวแปรรับค่าสัญญาณควบคุมสวิตช์ S_3
output3	คือ ตัวแปรรับค่าสัญญาณควบคุมสวิตช์ S_1'
output4	คือ ตัวแปรรับค่าสัญญาณควบคุมสวิตช์ S_2'
output5	คือ ตัวแปรรับค่าสัญญาณควบคุมสวิตช์ S_3'
output6	คือ ตัวแปรรับค่าความชันปกติของกระแส i_{L1}
output7	คือ ตัวแปรรับค่าความชันปกติของกระแส i_{L3}
Vref	คือ แรงดันอ้างอิง กำหนดเท่ากับ 200 V
error_v	คือ ค่าความผิดพลาดของแรงดัน
Ts	คือ Sampling Time
kpv, kiv	คือ ตัวแปรพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดูปแรงดัน
lin_ref	คือ กระแสอ้างอิงจากดูปแรงดัน
Iref1, Iref2	คือ กระแสอ้างอิงที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักแล้ว
error_i, error_i2	คือ ค่าความผิดพลาดของกระแส
kpi, kii	คือ ตัวแปรพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดูปกระแสลูปที่หนึ่ง
kpi2, kii2	คือ ตัวแปรพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดูปกระแสลูปที่สอง
Upi_i, Upi_i2	คือ สัญญาณควบคุมสวิตช์ $S_1, S_2, S_3, S_1', S_2'$ และ S_3'
slope_1, slope_3	คือ ค่าความชันของกระแส i_{L1} และ i_{L3} ตามลำดับ
slopesig_1, slopesig_3	คือ ค่าความชันปกติของกระแส i_{L1} และ i_{L3} ตามลำดับ
F1, F2, F3	คือ สถานะความผิดพลาดของสวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 ตามลำดับ


```

#####
โปรแกรมภาษาซีสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของวงจรมุสต์
คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมพีไอ
และวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

#####
#include <stdio.h>
#include "SumDiff.h"
#include <rtdx.h>
#include "target.h"
#include "math.h"

//=====
//ประกาศฟังก์ชันสำหรับการใช้งาน
//=====
void add_sub_buffers(float *input1, float *input2, float *input3, float *output1, float *output2, float *output3, float *output4,
float *output5, float *output6, float *output7);
//=====
//ประกาศตัวแปร
//=====
int
i=1,sump_1=0,sump_3=0,sum_1=0,sum_3=0,G_2=0,F_1=0,F_2=0,F_3=0,H=0,total=0,total_2=0,slopesig_1=0,slopesig_3=0,
slope_1=0,slope_3=0;
long n=0;
float F1=0.0,F2=0.0,F3=0.0;
float io_old_1=0.0,io_old_3=0.0;
float io_new_1=0.0,io_new_3=0.0;
float output_1[1];
float output_2[1];
float output_3[1]=0.0;
float output_4[1]=0.0;
float output_5[1]=0.0;
float output_6[1]=0.0;
float output_7[1]=0.0;
float input1[1],Vref,Vdc;
float input2[1];
float input3[1];
float output1[1];
float output2[1];
float output3[1];
float output4[1];

```

```

float output5[1];
float output6[1];
float output7[1];
float I,I3;
float kpv=5.63e-4,kiv=4.6502e-2,kpi=0.1695,kii=5.2549,kpi2=0.7032,kii2=43.5965,Ts=1e-5;
float Upv=0,Uiv=0,Uiv_1=0,Upi=0,Uii=0,Uii_1=0,Upi_i=0,Upi2=0,Uii2=0,Uii_2=0,Upi_i2=0;
float err_v=0,err_i=0,err_i2=0;
float Iin_ref=0;
float Iref1=0,Iref2=0;
int nbuf =1;

//=====
//defines RTDX channels
//=====

RTDX_CreateInputChannel (ichan1);
RTDX_CreateInputChannel (ichan2);
RTDX_CreateInputChannel (ichan3);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan2);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan3);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan4);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan5);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan6);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan7);

//=====
//main code
//=====

void main()
{
    TARGET_INITIALIZE();
    RTDX_enableInput (&ichan1);
    RTDX_enableInput (&ichan2);
    RTDX_enableInput (&ichan3);
    RTDX_enableOutput(&ochan1);
    RTDX_enableOutput(&ochan2);
    RTDX_enableOutput(&ochan3);
    RTDX_enableOutput(&ochan4);
    RTDX_enableOutput(&ochan5);
    RTDX_enableOutput(&ochan6);
    RTDX_enableOutput(&ochan7);
    while (1)

```

```

{
    /* Read inputs from host */
    RTDX_read( &ichan1, input1, 1*sizeof(float));
    RTDX_read( &ichan2, input2, 1*sizeof(float));
    RTDX_read( &ichan3, input3, 1*sizeof(float));
    /* Call function */
    add_sub_buffers(input1,input2,input3, output_1, output_2, output_3, output_4, output_5, output_6,
    output_7);
    /* Write outputs to host */
    while ( RTDX_writing != NULL )
    { /* wait for previous write to complete */
        #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
            RTDX_Poll();
        #endif
    }
    RTDX_write( &ochan1, output_1, nbuf*sizeof(float) );
    while ( RTDX_writing != NULL )
    { /* wait for previous write to complete */
        #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
            RTDX_Poll();
        #endif
    }
    RTDX_write( &ochan2, output_2, nbuf*sizeof(float) );

    while ( RTDX_writing != NULL )
    { /* wait for previous write to complete */
        #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
            RTDX_Poll();
        #endif
    }

    RTDX_write( &ochan3, output_3, nbuf*sizeof(float) );
    while ( RTDX_writing != NULL )
    { /* wait for previous write to complete */
        #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
            RTDX_Poll();
        #endif
    }

    RTDX_write( &ochan4, output_4, nbuf*sizeof(float) );
    while ( RTDX_writing != NULL )
    { /* wait for previous write to complete */

```

```

        #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
            RTDX_Poll();
        #endif
    }
    RTDX_write( &ochan5, output_5, nbuf*sizeof(float) );
    while ( RTDX_writing != NULL )
    { /* wait for previous write to complete */
        #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
            RTDX_Poll();
        #endif
    }
    RTDX_write( &ochan6, output_6, nbuf*sizeof(float) );
    while ( RTDX_writing != NULL )
    { /* wait for previous write to complete */
        #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
            RTDX_Poll();
        #endif
    }
    RTDX_write( &ochan7, output_7, nbuf*sizeof(float) ); }
}

//=====
//add_sub_buffers
//=====

void add_sub_buffers(float *input1, float *input2, float *input3, float *output1, float *output2, float *output3, float *output4,
float *output5, float *output6, float *output7)
{
    Vref=200;
    I=input1[0];
    I3=input2[0];
    Vdc=input3[0];
    // PI controller voltage loop----->>>
        err_v=Vref-Vdc;
        Upv=kpv*err_v;
        Uiv=(kiv*Ts*err_v)+Uiv_1;
        Iin_ref=Upv+Uiv;
    //Current Weighting----->>>
        Iref1=Iin_ref*0.85;
        Iref2=Iin_ref*0.15;
    // PI controller current loop 1----->>>

```

```

err_i=Iref1-I;
Upi=kpi*err_i;
Uii=(kii*Ts*err_i)+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii;
// PI controller current loop 2----->>>
err_i2=Iref2-I3;
Upi2=kpi2*err_i2;
Uii2=(kii2*Ts*err_i2)+Uii_2;
Upi_i2=Upi2+Uii2;
//----> update error value
Uiv_1=Uiv;
Uii_1=Uii;
Uii_2=Uii2;
//fault Detection//
n=n+1;
io_new_1=input1[0];
output1[0]=Upi_i;
output2[0]=Upi_i2;
io_new_3=input2[0];
slope_1=(io_new_1-io_old_1)/(n*Ts-((n-1)*Ts));
slope_3=(io_new_3-io_old_3)/(n*Ts-((n-1)*Ts));
slopesig_1=slope_1/abs(slope_1);
slopesig_3=slope_3/abs(slope_3);
if(n>100000){
    if (slopesig_1==1||slopesig_1==1||slopesig_3==1||slopesig_3==1){
        total=total+1;
        total_2=total_2+1;
        if (slopesig_1==1){
            sum_1=sum_1+1;
            if (sum_1>=10){
                F_1=F_1+1;
            }
        }
        if (slopesig_3==1){
            sum_3=sum_3+1;
            if (sum_3>=10){
                F_3=F_3+1;
            }
        }
        if (slopesig_1==1){

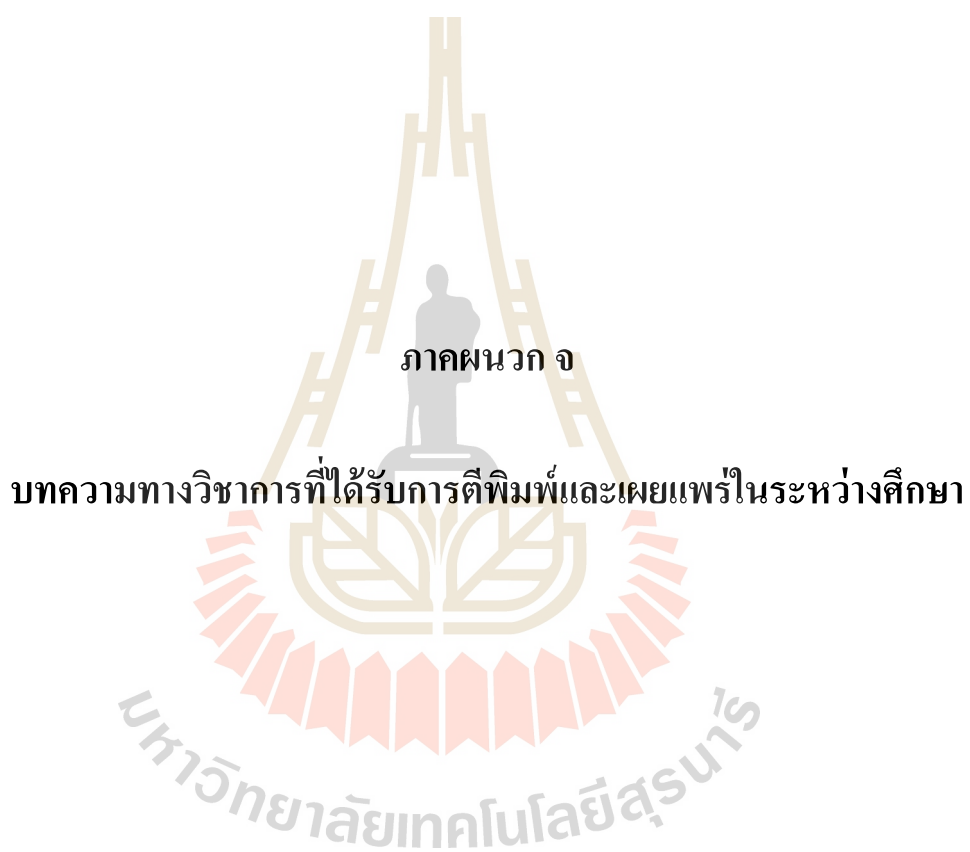
```

```

        sump_1=sump_1+1;
        if (sump_1>=10){
            F_1=F_1+1;
        }
    }
    if (slopesig_3==1){
        sump_3=sump_3+1;
        if (sump_3>=10){
            F_3=F_3+1;
        }
    }
    if (output1[0]>=0.75){
        if (output1[0]-0.8>=0){
            G_2=G_2+1;
        }
        if
(sum_1==10||sump_1==10||sum_3==10||sump_3==10||output2[0]>=1){
            H=H+1;
        }
        if (total_2==20&&H==0){
            if(G_2>=60){
                F_2=F_2+1;
            }
        }
    }
    if (output1[0]<=0.75){
        G_2=0;
    }
    if (total>=10){
        sump_1=0;
        sum_1=0;
        sump_3=0;
        sum_3=0;
        total=0;
    }
    if (total_2>=20){
        total_2=0;
    }
}
if (F_1>=4){

```

```
F1=1;
}
else{
F1=0;
}
if (F_2>=2){
F2=1;
H=0;
F_1=0;
}
else{
F2=0;
}
if (F_3>=4){
F3=1;
}
else{
F3=0;
}
}
io_old_1=io_new_1;
io_old_3=io_new_3;
output3[0]=F1;
output4[0]=F2;
output5[0]=F3;
output6[0]=slopesig_1;
output7[0]=slopesig_3;
return;
}
```

ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ศุภณัฐ เดี้ยวสุรินทร์ สุदारัตน์ ขวัญอ่อน และกองพัน อารีรักษ์ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ” การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON-40) ณ. โรงแรม เดอะชาयน์ จังหวัดชลบุรี วันที่ 15-17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 จำนวน 4 หน้า

ศุภณัฐ เดี้ยวสุรินทร์ และสุदारัตน์ ขวัญอ่อน “การควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกัน สามขั้นสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON-40) ณ. โรงแรม เดอะชาयน์ จังหวัดชลบุรี วันที่ 15-17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 จำนวน 4 หน้า

S. Khwan-on and S. Diewsurin “An Open-Circuit Switch Fault Detection Strategy for a Three- Stage Cascaded Boost Converter” 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON) , Krabi, 2018.

ศุภณัฐ เดี้ยวสุรินทร์ และสุदारัตน์ ขวัญอ่อน “การสังเกตพฤติกรรมความผิดปรongแบบสวิตช์เปิด วงจร สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม” การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41 (EECON-41) ณ. โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี วันที่ 21-23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 จำนวน 4 หน้า

รายชื่ออนุสิทธิบัตรและลิขสิทธิ์ที่ยื่นคำขอในระหว่างศึกษา

ยื่นคำขอลิขสิทธิ์ วิธีการตรวจจับความผิดปรongแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เลขที่คำขออยู่ระหว่างการพิจารณา

ยื่นคำขออนุสิทธิบัตร วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ เลขที่คำขออยู่ระหว่างการพิจารณา



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40)

วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นโดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ
Modeling of Three-Stage Cascaded Boost Converter using Generalized State-Space Averaging Approach

ศุภณัฐ เดี่ยวสุรินทร์¹ สุรัตน์ ขวัญอ่อน¹ และ กองพันธ์ อธิวิวัฒน์¹

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
sudaratt_kb@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นโดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่ช่วงเวลา ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่ช่วงเวลา เนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งบทความนี้มีการนำเสนอวิธีการกำจัดผลของการสวิตช์ เพื่อให้แบบจำลองไม่ขึ้นอยู่ช่วงเวลาซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมของระบบได้โดยง่าย การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะกับผลการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB&SIMULINK ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้แบบจำลองของวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะนี้มีการคำนวณผลที่เร็วกว่ามาก คำสำคัญ: วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ

Abstract

This paper presents the mathematical modeling of a three-stage cascaded boost converter using generalized state-space averaging (GSSA), which is time-invariant model. Power converter models are normally time-varying due to the switching actions of power electronic devices. In this paper the elimination of the switching actions is presented in order to achieve the time-invariant model which can be used to analyze and design the controller of the system without the complexity. The mathematical model of the three-stage cascaded boost converter derived from GSSA is validated in comparison with the simulation results carrying in MATLAB&SIMULINK. The comparison results show the good agreement in both models. In addition, the model generated from GSSA can be calculated faster than the simulation model used in MATLAB&SIMULINK.

Keywords: Three-stage Cascaded Boost Converter, mathematical model, GSSA (Generalized State-Space Averaging)

1. บทนำ

ในปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่นำมามีใช้งานกับระบบต่าง ๆ มากมาย เช่น ระบบพลังงานทดแทนและระบบมอเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้วิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมจึงเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสวิตช์ จึงส่งผลให้แบบจำลองนั้นเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่ช่วงเวลา (time-varying model) ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมได้โดยง่าย ในการกำจัดผลของการสวิตช์เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่ช่วงเวลา (time-invariant model) มีหลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (generalized state-space averaging: GSSA) [1-3] และ วิธี ดี คิว (DQ method) เป็นต้น โดยวิธีดีคิวนิยมใช้ในการหาแบบจำลองแปลงผันกำลังในระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสที่แปลงไปเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะจะนิยมใช้ในการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังในระบบไฟฟ้ากระแสตรงกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ดังนั้นวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะจึงเหมาะสมสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นซึ่งเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม [4] เป็นวงจรเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้น แต่ถ้าต้องการแรงดันที่สูงมาก ๆ ก็จะส่งผลให้ค่าวัฏจักรการทำงาน (duty cycle) ของสวิตช์สูงขึ้น ส่งผลให้สวิตช์ได้รับภาระการทำงานที่หนักและเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็วและยังส่งผลให้เกิดพลังงานสูญเสียภายในวงจรสูงขึ้น มีการกระแทกของกระแสและแรงดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดภาระการทำงานของสวิตช์ที่ค่าวัฏจักรการทำงานสูงสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนขั้นของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมให้มากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มจำนวนขั้นของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ยังช่วยให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้นจากเดิมเป็นอย่างมาก ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นโดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ

บทความนี้ประกอบไปด้วย วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นซึ่งจะนำเสนออยู่ในส่วนที่ 2 สำหรับส่วนที่ 3 จะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ และในส่วนที่ 4 จะแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ย



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40)

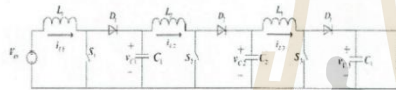
วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐



ปริภูมิสถานะกับผลการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB & SIMULINK และในที่สุดก็จะกล่าวถึงบทสรุปของบทความนี้

2. วงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

วงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายแรงดัน (v_{DN}), สวิตช์สามตัว (S_1, S_2, S_3), ไดโอดสามตัว (D_1, D_2, D_3), ตัวเก็บประจุสามตัว (C_1, C_2, C_3), ตัวเหนี่ยวนำสามตัว (L_1, L_2, L_3) และโหลดตัวต้านทาน (R) สำหรับแรงดันเอาต์พุตจะได้ว่า $v_o = v_{C3}$ วงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นจะมีลักษณะคล้ายวงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสองขั้น



รูปที่ 1 วงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

เนื่องจากภายในวงจรมีสวิตช์สามตัว จึงเป็นผลให้เกิดช่วงที่สวิตช์แต่ละตัวทำงานไม่พร้อมกัน ซึ่งสามารถแบ่งโหมดการทำงานของสวิตช์ได้ตามสมการดังนี้

$$Mode = 2^N \quad (1)$$

โดยที่ N เป็นจำนวนสวิตช์ในวงจร จากสมการดังกล่าวจะได้โหมดการทำงานทั้งหมด 8 โหมด ซึ่งจะพิจารณาการทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง (Continuous conduction mode: CCM) และสำหรับแรงดันเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$v_o = \frac{1}{(1-d_1)(1-d_2)(1-d_3)} v_{DN} \quad (2)$$

โดยที่ d_1, d_2, d_3 คือ วัฏจักรการทำงานของสวิตช์ S_1, S_2, S_3 ตามลำดับ

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาและเป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์และออกแบบควบคุม โดยการวิเคราะห์เพื่อหาลักษณะการสวิตช์ [5] นั้นมีอยู่ 3 ขั้นตอนดังนี้

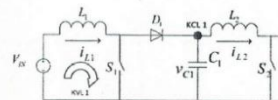
- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตัวแปรสถานะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งหมดในวงจรดังรูปที่ 1 ซึ่งมีตัวแปรสถานะอยู่ 6 ตัว ได้แก่ $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}$
- ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์วงจรดังรูปที่ 2 ในแต่ละขั้นของวงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าและกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL, KCL) เพื่อหาสมการการ

เปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและสมการการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ จะได้สมการดังนี้

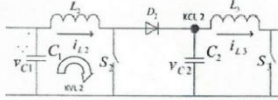
$$-v_{DN} + L_1 \dot{i}_{L1} + v_{S1} = 0, \quad i_{D1} = C_1 \dot{v}_{C1} + i_{L2} \quad (3)$$

$$-v_{C1} + L_2 \dot{i}_{L2} + v_{S2} = 0, \quad i_{D2} = C_2 \dot{v}_{C2} + i_{L3} \quad (4)$$

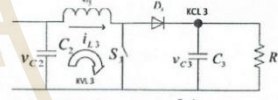
$$-v_{C2} + L_3 \dot{i}_{L3} + v_{S3} = 0, \quad i_{D3} = C_3 \dot{v}_{C3} + \frac{v_{C3}}{R} \quad (5)$$



(a) วิเคราะห์ KVL และ KCL ขั้นที่ 1 ของวงจร



(b) วิเคราะห์ KVL และ KCL ขั้นที่ 2 ของวงจร



(c) วิเคราะห์ KVL และ KCL ขั้นที่ 3 ของวงจร

รูปที่ 2 แสดงการวิเคราะห์ KVL และ KCL ในแต่ละขั้นของวงจรรูปสตัคคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาหาความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ (v_{S1}, v_{S2}, v_{S3}) และกระแสที่ไหลผ่านไดโอด (i_{D1}, i_{D2}, i_{D3}) ที่ขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานของสวิตช์ ซึ่งได้สมการดังต่อไปนี้

กำหนดสถานะสวิตช์เมื่อสวิตช์ทำงานให้ $u_i(t)=1$ และเมื่อสวิตช์ไม่ทำงาน $u_i(t) = 0$ โดยที่ i คือสวิตช์ตัวที่พิจารณา

$$i_{D1} = i_{L1}(1 - u_1(t)), \quad v_{S1} = v_{C1}(1 - u_1(t)) \quad (6)$$

$$i_{D2} = i_{L2}(1 - u_2(t)), \quad v_{S2} = v_{C2}(1 - u_2(t)) \quad (7)$$

$$i_{D3} = i_{L3}(1 - u_3(t)), \quad v_{S3} = v_{C3}(1 - u_3(t)) \quad (8)$$

และนำสมการ (6) - (8) แทนลงในสมการในขั้นตอนที่ 2 จะได้

$$\dot{i}_{L1} = \frac{v_{DN}}{L_1} - \frac{v_{C1}}{L_1} + \frac{v_{C1}}{L_1}(u_1(t)), \quad \dot{v}_{C1} = \frac{i_{L1}}{C_1} - \frac{i_{L2}}{C_1} - \frac{i_{L1}}{C_1}(u_1(t)) \quad (9)$$

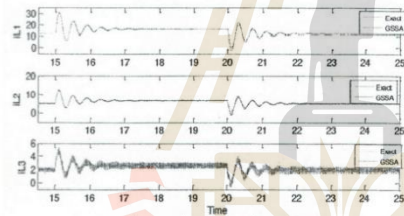
$$\dot{i}_{L2} = \frac{v_{C1}}{L_2} - \frac{v_{C2}}{L_2} + \frac{v_{C2}}{L_2}(u_2(t)), \quad \dot{v}_{C2} = \frac{i_{L2}}{C_2} - \frac{i_{L3}}{C_2} - \frac{i_{L2}}{C_2}(u_2(t)) \quad (10)$$



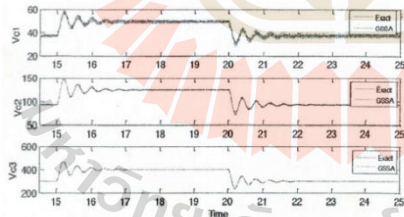
4. ผลการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ ดังสมการที่ (35) เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลากลางวงจรในรูปที่ 1 ซึ่งจะนำมาตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับผลจำลองสถานการณ์ใน MATLAB&SIMULINK โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ แหล่งจ่ายแรงดัน $V_{IN} = 15V, 20V$ ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = C_3 = 500\mu F$ ตัวเหนี่ยวนำ $L_1 = L_2 = L_3 = 15mH$ โหลดตัวต้านทาน $R = 500\Omega$ และความถี่ของสวิตช์ $f_s = 10kHz$

รูปที่ 3 และรูปที่ 4 จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ โดยการประมาณอันดับหนึ่งกับผลการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB&SIMULINK โดยวงจรถูกตัดคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นทำงานภายใต้กฎการ ทำงานของสวิตช์ที่ $d_1 = 0.6, d_2 = 0.6$ และ $d_3 = 0.6875$ ซึ่งผลการจำลองที่นำมาเปรียบเทียบมีกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 3 ตัว (i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}) และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}) ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว



รูปที่ 4 แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามตัว

จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรถูกตัดคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นกับผลจำลองสถานการณ์ใน MATLAB&SIMULINK มีแนวโน้มสอดคล้องไปในทางเดียวกัน โดยในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้นได้ทำการเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 15V ที่สถานะอยู่ตัวไปเป็น 20V ในวันที่ที่ 15 ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแรงดันอินพุตจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวนั้นมีความสอดคล้องกัน และได้ทำการเปลี่ยนแรงดันจาก 20V กลับไปเป็น 15V ใน

วันที่ที่ 20 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองว่ายังสามารถทำให้แรงดันเอาต์พุตมีผลที่สอดคล้องกันอยู่ ซึ่งผลการจำลองจากการเปลี่ยนแรงดันอินพุตลดลง แรงดันเอาต์พุตในช่วงเปลี่ยนแรงดันลดลงจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวนั้นยังมีความสอดคล้องกันไปในทิศทางเดียวกัน โดยแรงดันเอาต์พุตที่แรงดันอินพุต 20V จะมีค่าเท่ากับ 400V และแรงดันเอาต์พุตที่แรงดันอินพุต 15V จะมีค่าเท่ากับ 300V และจากผลการจำลองวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 5 วินาที ส่วนผลที่จากการคำนวณด้วยการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB&SIMULINK นั้นใช้เวลา 240 วินาที ดังนั้นวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะใช้เวลาในการคำนวณเร็วกว่าผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB&SIMULINK ประมาณ 50 เท่า

5. สรุป

บทความนี้ได้มีเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรถูกตัดคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบประมาณอันดับหนึ่งซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลาเพื่อใช้วิเคราะห์และนำไปออกแบบตัวควบคุมได้ง่าย ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB&SIMULINK นั้นมีความสอดคล้องกัน โดยพบว่าแรงดันเอาต์พุตที่สถานะชั่วครู่และสถานะอยู่ตัวที่ได้จากวิธีปริภูมิสถานะและผลการจำลองจาก MATLAB&SIMULINK มีความสอดคล้องกันใกล้เคียงกันมากแม้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์ในการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะนั้นมีความรวดเร็วมากกว่าวิธีจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB&SIMULINK 50 เท่าโดยประมาณ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Saswalek Wongwisai, Sadarat Khwan-on, and Kongpan Arerak, "Modeling of Two-Stage Cascaded Boost Converter using Generalized State-Space Averaging Approach", The 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, pp. 418-421, 2015.
- [2] J. Mahdavi, A. Esmadi, M. D. Bellar, and M. Ehasani, "Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach", IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. 44, No. 8, August 1997, pp. 767 - 770.
- [3] Sasiya Udumuk, Kongpan Arerak, and Kongpol Arerak, "Mathematical Model of a Single-Phase Uncontrolled Rectifier Feeding a Buck Converter", European Journal of Scientific Research, Vol. 50, No. 1, 2011, pp. 89 - 98.
- [4] B. M. Hasaneen, Adel A. Elbaset Mohammed, "Design and simulation of DC/DC Boost Converter", Power System Conference, 2008.
- [5] Seddik Bacha, Iulian Munteanu, and Antoneta Iuliana Bratu, "Power Electronic Converters Modeling and Control with Case Studies", Springer, February 2013, Part I, ch.3 pp. 27 - 46 and ch.5 pp. 97 - 129.



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40)

วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐



การควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
The Control of a Three-Stage Cascaded Boost Converter for Renewable Energy System Applications

สุภณัฐ เตียวสุรินทร์¹ และ สุदारัตน์ ขวัญอ่อน^๑

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
sudaratt.kh@su.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน โดยอาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI Controller) ซึ่งประกอบด้วยลูปควบคุมแรงดันหนึ่งลูปและลูปในการควบคุมกระแสสองลูป นอกจากนี้ได้เสนอเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองเพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ ในบทความนี้ได้อธิบายการออกแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในวงจร ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมที่พัฒนาขึ้นในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่และเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป
คำสำคัญ: วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น, ตัวควบคุมชนิดพีไอ, ระบบพลังงานทดแทน

Abstract

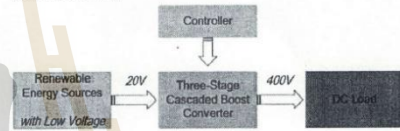
This paper proposes the control strategy of a three-stage cascaded boost converter based on the PI Controller for renewable energy system applications. The proposed controller consists of one voltage-control loop and two current-control loops. In addition, the current weighting technique is proposed for both current-control loop in order to achieve the desired output voltage level. In this paper the design of the capacitors and the inductors is described in order to reduce the voltage and current ripples. Simulation results show the effectiveness of the proposed control strategy to obtain the constant desired output voltage under the various operating conditions.

Keywords: Three-Stage Cascaded Boost Converter, PI Controller, Renewable energy system

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากปัญหาหนึ่งที่พบบ่อยคือสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากพลังงานฟอสซิลต่าง ๆ ทำให้ในปัจจุบันพลังงานทดแทนเป็นระบบพลังงานที่ได้รับความนิยมสูงเป็นอย่างมาก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น ส่งผลให้มีการพัฒนาขงระบบต่าง

กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทน วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นถูกพัฒนาขึ้น เพื่อใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทนสำหรับเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น เมื่อแรงดันอินพุตที่ได้จากพลังงานทดแทนมีค่าค่อนข้างต่ำ รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบสำหรับแรงดันอินพุตที่ต้องการระดับเอาต์พุตสูง

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมที่มีเพียงขั้นเดียว [1-3] ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ สวิตช์ และไดโอดอย่างละหนึ่งตัว ซึ่งสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงกว่าแรงดันอินพุต แต่ถ้าต้องการแรงดันเอาต์พุตที่สูงขึ้นจะส่งผลให้วัฏจักรการทำงาน (duty cycle) ของสวิตช์สูงขึ้นส่งผลให้สวิตช์มีอายุการใช้งานที่ลดลงและมีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นสูงภายในวงจร ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง จึงได้มีการพัฒนาขงระบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันหลายขั้นเพื่อให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นตามต้องการ เมื่อแรงดันอินพุตที่ได้จากระบบพลังงานทดแทนมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยที่สวิตช์แต่ละตัวในวงจรทำงานด้วยวัฏจักรการทำงานที่ไม่สูงมากเกินไป นอกจากนี้เนื่องจากการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสในวงจรส่งผลต่อประสิทธิภาพของวงจร จึงได้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสดังกล่าว ซึ่งช่วยให้อายุการใช้งานของสวิตช์ให้ยาวนานและลดกำลังงานสูญเสียในวงจร ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป

บทความนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นและการออกแบบตัวพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุเพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุซึ่งถูกนำเสนออยู่ในส่วนที่ 2 สำหรับส่วน



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40)

วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐



ที่ 3 จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่โอทีที่พัฒนาขึ้นสำหรับ วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น และในส่วนที่ 4 จะ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรที่ทำงานภายใต้สถานการณ์ที่ เปลี่ยนแปลงไป และในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุปของบทความนี้

2. วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายแรงดัน (V_{IN}), สวิตช์สามตัว (S_1, S_2, S_3), ไดโอดสามตัว (D_1, D_2, D_3), ตัวเก็บประจุสามตัว (C_1, C_2, C_3), ตัวเหนี่ยวนำสามตัว (L_1, L_2, L_3) และโหลดตัวต้านทาน (R) สำหรับแรงดันเอาต์พุตจะกำหนดให้ $V_o = V_{C3}$ วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นมีลักษณะคล้ายวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมที่มีการต่อเนื่องกันเป็นสามขั้นแสดงดังรูปที่ 2

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 จะเห็นว่าภายในวงจรมีสวิตช์สามตัวซึ่ง ส่งผลให้ในช่วงที่สวิตช์แต่ละตัวทำงานไม่พร้อมกัน ซึ่งสามารถหาโหมดการทำงานของสวิตช์ได้ดังสมการนี้

$$Mode = 2^n \tag{1}$$

โดยที่ n เป็นจำนวนสวิตช์ในวงจร

จากสมการ (1) จะได้ว่าโหมดการทำงานของสวิตช์ทั้งหมด 8 โหมด ขึ้นอยู่กับการนำกระแสและไม่มีการแสดงสวิตช์ในแต่ละขั้นของวงจร เช่น เมื่อสวิตช์ S_1, S_2, S_3 นำกระแส จะมีการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 ตามลำดับ โดยอาศัยแรงดัน V_{IN}, V_{C1}, V_{C2} ตามลำดับ ซึ่งตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3 จะคายประจุ และเมื่อ S_1, S_2, S_3 ไม่นำกระแส L_1, L_2, L_3 จะคายพลังงานเพื่อไปอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3 ตามลำดับ โดยแรงดันเอาต์พุตในแต่ละขั้นของวงจรดังรูปที่ 2 แสดงดังนี้

$$V_{C1} = \frac{1}{(1-d_1)} V_{IN}, V_{C2} = \frac{1}{(1-d_2)} V_{C1}, V_{C3} = \frac{1}{(1-d_3)} V_{C2} \tag{2}$$

$$V_o = V_{C3} = \frac{1}{(1-d_1)(1-d_2)(1-d_3)} V_{IN} \tag{3}$$

โดยที่ d_1, d_2, d_3 คือ วัฏจักรการทำงานของสวิตช์ S_1, S_2, S_3 ตามลำดับ ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำภายในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นจะส่งผลกระทบต่อแรงดันของแรงดันและกระแสตามลำดับ ดังนั้นการออกแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำนั้นเป็นสิ่งจำเป็นในวงจรนี้ เพื่อให้การกระตุ้นของแรงดันและกระแสอยู่ใน

ขอบเขตที่พอใจ ในส่วนของการออกแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นจะอาศัยวิธีการออกแบบตามแนวทางของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม โดยจะมีสมการดังนี้

$$C_1 = \frac{i_{L2} d_1}{f_s \Delta v_{C1}}, L_1 = \frac{d_1 V_{IN}}{f_s \Delta i_{L1}} \tag{4}$$

$$C_2 = \frac{i_{L3} d_2}{f_s \Delta v_{C2}}, L_2 = \frac{d_2 V_{C1}}{f_s \Delta i_{L2}} \tag{5}$$

$$C_3 = \frac{i_o d_3}{f_s \Delta v_{C3}}, L_3 = \frac{d_3 V_{C2}}{f_s \Delta i_{L3}} \tag{6}$$

โดยที่ f_s คือ ความถี่ของสวิตช์, i_o คือ กระแสเอาต์พุต

V_{IN} คือ แรงดันอินพุต

$\Delta v_{C1}, \Delta v_{C2}, \Delta v_{C3}$ คือ ค่าแรงดันกระเพื่อมที่ลดรอบตัวเก็บประจุแต่ละตัว

$\Delta i_{L1}, \Delta i_{L2}, \Delta i_{L3}$ คือ ค่ากระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัว

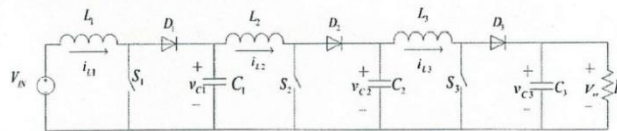
โดยในการออกแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำนั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ แหล่งจ่ายแรงดัน $V_{IN} = 20V$, $v_{C1} = 50$ กับ $v_{C2} = 125$, วัฏจักรการทำงานของสวิตช์ $d_1 = 0.6$, $d_2 = 0.6$ และ $d_3 = 0.6875$, ความถี่สวิตช์ของ 10 kHz, โหลดตัวต้านทาน 1000 โอห์ม ซึ่งจะทำให้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (7)

$$L_1 = 15mH, L_2 = 18.75mH, L_3 = 70mH, C_1 = C_2 = C_3 = 500\mu F \tag{7}$$

ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเหล่านี้จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นในส่วนถัดไป

3. การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นนั้นจะอาศัยตัวควบคุมที่โอทีซึ่งตัวควบคุมนี้จะมีรูปแบบแรงดันและกระแส ซึ่งเป็นการควบคุมแบบวงรอบปิดที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่และได้ตามที่ต้องการ เมื่อสถานการณ์การทำงานเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือแรงดันเอาต์พุตอาจมีการเปลี่ยนแปลงและแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง โดยโครงสร้างการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น



โดยจะมีการวัดแรงดันคูลและวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง (i_{L1}) และตัวที่สุดท้าย (i_{L3})

จากรูปที่ 3 จะแสดงโครงสร้างตัวควบคุมที่พัฒนาสำหรับวงจรสวิตคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น โดยมีรูปควบคุมแรงดันคูลเดี่ยว (PI Voltage loop) ซึ่งจะวัดค่าแรงดันคูลเดี่ยวเปรียบเทียบกับแรงดันคูลเดี่ยวอ้างอิง จะได้กระแสอ้างอิง (i_{ref}) สำหรับรูปควบคุมกระแส แต่เนื่องจากวิธีการควบคุมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยรูปควบคุมกระแสสองรูป (PI Current loop) ดังนั้นจำเป็นต้องมีการถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิงให้เหมาะสม โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (current weighting technique) เพื่อได้กระแสอ้างอิง i_{ref1}, i_{ref2} สำหรับเปรียบเทียบกับกระแส i_{L1}, i_{L3} ตามลำดับ โดยการออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักสามารถคำนวณดังสมการนี้

$$i_{ref1} = X_1 i_{ref}, i_{ref2} = X_2 i_{ref} \quad (8)$$

เมื่อ X_1, X_2 คือค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง i_{ref1}, i_{ref2} ตามลำดับ โดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

$$X_1 = \frac{i_{L1} + i_{L2}}{i_{total}}, X_2 = \frac{i_{L3}}{i_{total}} \quad (9)$$

โดยที่ i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} พิจารณาจากสมการดังนี้

$$i_{L1} = \frac{1}{(1-d_1)(1-d_2)(1-d_3)} \frac{V_o}{R} \quad (10)$$

$$i_{L2} = \frac{1}{(1-d_2)(1-d_3)} \frac{V_o}{R} \quad (11)$$

$$i_{L3} = \frac{1}{(1-d_3)} \frac{V_o}{R} \quad (12)$$

จากสมการที่ (10) - (12) ถ้าพิจารณาให้ $d_1 = 0.6, d_2 = 0.6, d_3 = 0.6875, V_o = 400V$ และ $R = 1000\Omega$ จะได้ค่า i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} เท่ากับ 8A, 3.2A และ 1.28A ตามลำดับ จะได้ว่า X_1, X_2 เท่ากับ 0.897 และ 0.103 ตามลำดับ จะได้กระแสอ้างอิง i_{ref1}, i_{ref2} สำหรับเปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และตัวที่สุดท้าย และเข้าสู่ตัว

ควบคุมที่โอสสำหรับรูปกระแส จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าสัญญาณสวิตซ์ S_1 และ S_2 จะเหมือนกันคือได้จากรูปควบคุมกระแสรูปที่หนึ่ง (PI Current loop 1) ในขณะที่สัญญาณสวิตซ์ S_3 จะได้จากรูปควบคุมกระแสรูปที่สอง (PI Current loop 2)

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอสสำหรับรูปแรงดันและรูปกระแสทั้งสองรูป ดังที่ปรากฏในรูปที่ 3 พิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้

$$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C_{total} - \frac{1}{R}, K_{fv} = K\omega_n^2 C_{total} \quad (13)$$

$$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_n(L_1+L_2)}{V_{IN}}, K_{fi1} = \frac{\omega_n^2(L_1+L_2)}{V_{IN}} \quad (14)$$

$$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_n L_3}{V_{IN}}, K_{fi2} = \frac{\omega_n^2 L_3}{V_{IN}} \quad (15)$$

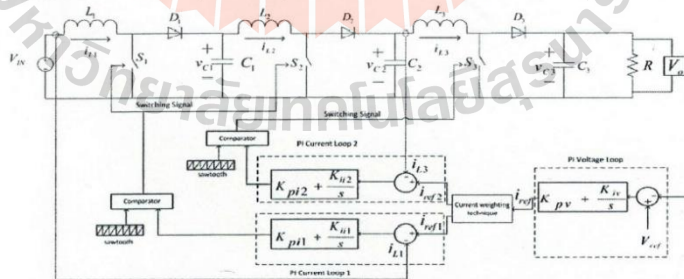
โดยที่ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ ($\omega_n = \frac{1}{RC}$), K คือ อัตราขยาย ($K=100$), ω_m คือ ความถี่การทำงานของรูปกระแส ($\omega_m = \omega_n N$), N คือ จำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติ ($N=100$), ζ คือ อัตราการหน่วงแบบหน่วงวิกฤต ($\zeta=1$) ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โอสสำหรับรูปแรงดันและรูปกระแสทั้งสองรูปของวงจรสวิตคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นนี้ ได้ค่าพารามิเตอร์ดังสมการนี้

$$K_{pv} = 0.001, K_{fv} = 0.06667 \quad (16)$$

$$K_{pi1} = 0.3375, K_{fi1} = 16.875, K_{pi2} = 1.4, K_{fi2} = 140 \quad (17)$$

4. ผลการจำลองสถานการณ์

ในการดำเนินการจำลองสถานการณ์ของวงจรสวิตคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นนี้ได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่โอสไว้แล้ว จะอาศัยโปรแกรม MATLAB&SIMULINK ที่ทั้งที่พารามิเตอร์ของวงจร ได้แก่ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทาน ใช้ตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3 โครงสร้างการควบคุมของวงจรสวิตคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

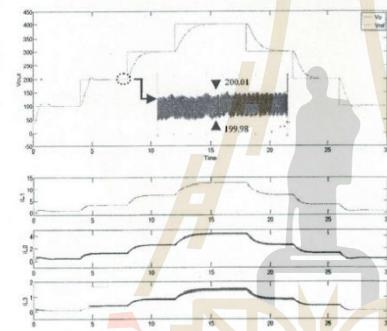


การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40)

วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐

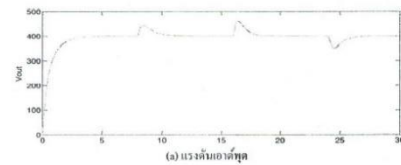


ในการจำลองผลเริ่มจากการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจร เพื่อที่พิจารณาว่าตัวควบคุมสามารถที่จะควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ โดยการปรับเพิ่มแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่ 100V, 200V, 300V และ 400V และจำลองผลการปรับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงดังแสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่จำลองนั้นเป็นไปตามที่ต้องการและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวยังคงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุตเช่นกัน กล่าวคือถ้าแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังไฟที่เอาต์พุตสูงขึ้นทำให้กระแสเพิ่มขึ้นด้วยและถ้าแรงดันเอาต์พุตลดลงก็จะส่งผลให้กระแสลดลงตาม นอกจากนี้จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตปรากฏการกระเพื่อมของแรงดันที่อินพุตเล็กน้อย

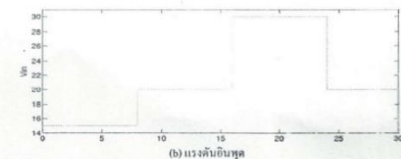


รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง

จากรูปที่ 5 และ 6 ให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V แล้วจำลองผลด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่ 15V, 20V, 30V และ 20V ที่วินาทีที่ 0, 8, 16 และ 24 ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระดับแรงดันอินพุตที่ 15V, 20V และ 30V ตามลำดับ ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่ 400V โดยในสภาวะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงเพื่อเล็กน้อยก่อนจะกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว และในส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำนั้นจะลดลง เนื่องจากเมื่อแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นกำลังไฟที่เอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการลดแรงดันอินพุตเป็น 20V ที่ $t = 24s$ ตัวควบคุมที่พัฒนาซึ่งสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ โดยในสภาวะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตที่ลดลงเพียงเล็กน้อยก่อนจะกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำนั้นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตลดลงกำลังไฟที่เอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม ซึ่งจากรูปที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นว่าผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความสอดคล้องกัน และตัวควบคุมที่ออกแบบไว้สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ

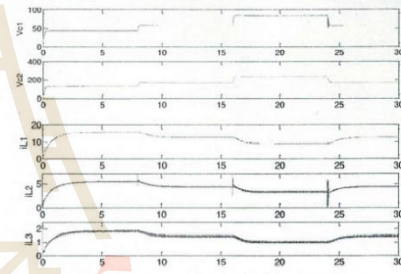


(a) แรงดันเอาต์พุต



(b) แรงดันอินพุต

รูปที่ 5 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต



รูปที่ 6 ผลการจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมวงจรถูกคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบพลังงานทดแทน โดยอาศัยตัวควบคุมชนิดฟลูตที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีอุปควบคุมแรงดันหนึ่งขั้วและอุปควบคุมกระแสสองขั้ว นอกจากนี้ได้นำเสนอเทคนิคการดาวน์น้ำหนักเพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสม โดยผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้เน้นตัวควบคุมที่โอที ได้ออกแบบไว้สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. M. Hasanen, Adel A. Elbaset Mohammed, "Design and simulation of DC/DC Boost Converter", *Power System Conference*, 2008.
- [2] André Elias Lucena da Costa, Romero Leandro Andersen, "High-gain boost-boost-flyback converter for renewable energy sources applications", *Power Electronics Conference*, 2015
- [3] Mohammad Lotfi Nejad, Behzad Poorali, Ehsan Adib, Ali Akbar Motie Bijandi, "New cascade boost converter with reduced losses", *IET Power Electron*, 2016, Vol. 9, Iss. 6, pp. 1213-1219

An Open-Circuit Switch Fault Detection Strategy for a Three-Stage Cascaded Boost Converter

Sudarat Khwan-on and Supanut Diewsurin

Power electronics, Energy, Machines and Control Research Group
School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand

sudarat_kh@sut.ac.th

Abstract—This paper proposes a fault detection technique for a three-stage cascaded boost converter with open-circuit switch fault occurrence. The proposed fault detection algorithm is based on the behavior investigation of the three-stage cascaded boost converter under normal and fault operating conditions. The PI controller with one outer voltage loop and two inner current loops is employed to control the operation of the converter under both healthy and faulty modes. The slopes of two inductor currents and two controlled signals generated by the current loops of the PI controller are applied to the proposed fault detection strategy in order to identify the faulted switch. There is no additional sensor needed for fault detection. The simulation results are shown to validate the effectiveness of the proposed fault detection technique under different open-circuit switch fault operating conditions.

Keywords—open-circuit switch fault, fault detection, three-stage cascaded boost converter, reliability, fault tolerant system

I. INTRODUCTION

The step up DC-DC converters have been increasingly employed in many applications such as renewable energy systems and electric vehicles in order to boost up the relatively low input voltage to the desired higher levels of the output voltage. The conventional boost converters are widely used in general applications because of its simplicity. However, they are unsuitable for the applications that the high step-up conversion ratio is mainly required. Due to the step-up ratio limitation of the traditional boost converter, the multi-stage cascaded boost converter plays an important role to increase the step-up conversion gain. Unfortunately, when the number of cascaded stage increases, the number of power switch also increases. As a result, the system reliability usually reduces due to the power switch failures. When the open-circuit switch fault occurs in the multi-stage cascaded boost converter, this converter can operate continuously with the deteriorated system performance. Therefore, the fast switch fault detection and the correct identification of the faulty switch are required to implement in the multi-stage cascaded boost converters, providing the fault tolerant system capability.

Recently, there are several fault detection techniques proposed for dc-dc converters to detect the open-circuit switch fault. In [1] the source-to-ground voltage of the MOSFET is measured to detect the fault occurring in a buck-boost converter. The current estimation of the dc-link current using the information of the controller is used to detect the fault in interleaved converter [2]. In [3-4] the fault detection technique for dc-dc converters is based on the inductor current, the input

and output voltages, generating the predictive current emulator. In [5] the fast fault detection method for boost converters used in the PV systems is based on the shape of the inductor current. In addition, the diode voltage can be used as the detection signature in fault diagnosis method for nonisolated dc-dc converter [6]. In [7] the control variables and capacitor voltage are used to detect the fault in a photovoltaic dc-dc converter.

In this paper, the open-circuit switch fault detection technique is proposed for the three-stage cascaded boost converter used in renewable energy systems. In order to regulate the output voltage of the converter the PI controller with one outer voltage loop and two inner current loops is designed. The electrical behavior of the three-stage cascaded boost converter under normal and fault operating conditions is investigated. The proposed fault detection algorithm based on the measured inductor currents and the controlled signals will be described in detail. The simulation results are presented to validate the effectiveness of the proposed fault detection strategy applied to the three-stage cascaded boost converter under different faulted switch operating conditions.

II. THREE-STAGE CASCADED BOOST CONVERTER

The structure of the three-stage cascaded boost converter system is shown in Fig. 1. As it can be seen, the considered system consists of three main parts: three-stage cascaded boost converter topology, the control strategy using the PI controller and the open-circuit switch fault detection algorithm.

The configuration of the three-stage cascaded boost converter as shown in Fig. 1 is similar to the conventional boost converter in series connection. V_N is the input voltage, generating from the renewable energy source such as PV modules. Therefore, the relatively low input voltage, approximately 20V-50V, is supplied to the converter. V_O is the output voltage. R is represented as the load. S_1 , S_2 and S_3 are the power switches. D_1 , D_2 and D_3 are the power diodes. i_{L1} , i_{L2} and i_{L3} are the currents flowing through the inductors, L_1 , L_2 and L_3 , respectively. v_{C1} , v_{C2} and v_{C3} are the voltages across the capacitors, C_1 , C_2 and C_3 , respectively. These capacitor voltages depend on the duty cycles, d_1 , d_2 and d_3 , activating the switches, S_1 , S_2 and S_3 , respectively, as follow:

$$v_{C1} = \frac{1}{(1-d_1)} V_N, \quad v_{C2} = \frac{1}{(1-d_2)} v_{C1}, \quad v_{C3} = \frac{1}{(1-d_3)} v_{C2} \quad (1)$$

$$V_o = v_{C3} = \frac{1}{(1-d_1)(1-d_2)(1-d_3)} V_N \quad (2)$$

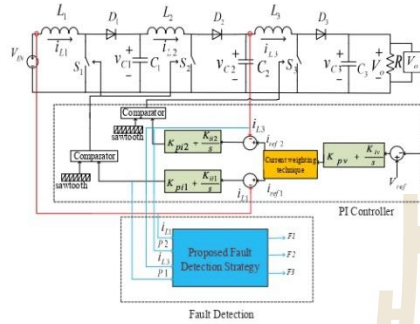


Fig. 1 Multi-input boost converter for renewable energy system

In order to select the appropriate size of inductors and capacitors, the converter parameters can be designed as follows:

$$C_1 = \frac{i_{L2} d_1}{f_s \Delta v_{C1}}, L_1 = \frac{d_1 V_{IN}}{f_s \Delta i_{L1}} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{i_{L3} d_2}{f_s \Delta v_{C2}}, L_2 = \frac{d_2 V_{C1}}{f_s \Delta i_{L2}} \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{i_o d_3}{f_s \Delta v_{C3}}, L_3 = \frac{d_3 V_{C2}}{f_s \Delta i_{L3}} \quad (5)$$

Where $\Delta v_{C1}, \Delta v_{C2}, \Delta v_{C3}$ are the ripple voltages across the capacitors, C_1, C_2 and C_3 , respectively. The $\Delta i_{L1}, \Delta i_{L2}, \Delta i_{L3}$ are the ripple currents flowing through the inductors, L_1, L_2 and L_3 , respectively. The f_s is the switching frequency. Finally, the converter parameters are designed as

$$L_1 = 15\text{mH}, L_2 = 18.75\text{mH}, L_3 = 70\text{mH}, C_1 = C_2 = C_3 = 500\mu\text{F} \quad (6)$$

III. CONTROL STRATEGY

The control scheme of the three-stage cascaded boost converter with the proposed fault detection strategy is shown in Fig. 1. The PI controller is employed to regulate the output voltage of the converter at the desired level. In order to achieve the satisfactory performance of the three-stage cascaded boost converter, one outer voltage loop and two inner current loops with current weighting technique are proposed in this control strategy. The inductor currents, i_{L1} and i_{L3} , and the output voltage, V_o , are measured to compare with referent currents, i_{ref1} and i_{ref2} , and referent voltage, V_{ref} , respectively. The current weighting technique provides the proper referent currents for both PI current loops. These referent currents can be calculated by using the weighting factors, X_1 and X_2 , as shown below:

$$i_{ref1} = X_1 i_{ref}, i_{ref2} = X_2 i_{ref} \quad (7)$$

$$X_1 = \frac{i_{L1} + i_{L2}}{i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}}, X_2 = \frac{i_{L3}}{i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}} \quad (8)$$

As can be seen in Fig. 1, the controlled signals, P_1 and P_2 , provide by the first and second PI current loops, respectively. The switching signals for S_1 and S_2 are identical due to the first

PI current loop while the switching signal for S_3 is generated by using the second PI current loop. The gain parameters for voltage and current loops can be expressed as

$$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C_{total} \frac{1}{R}, K_{iv} = K\omega_n^2 C_{total} \quad (9)$$

$$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_m(L_1+L_2)}{V_{IN}}, K_{ni1} = \frac{\omega_m^2(L_1+L_2)}{V_{IN}} \quad (10)$$

$$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_m L_3}{V_{IN}}, K_{ni2} = \frac{\omega_m^2 L_3}{V_{IN}} \quad (11)$$

IV. PROPOSED FAULT DETECTION STRATEGY

In order to develop the appropriate fault detection algorithm the behavior of the three-stage cascaded boost converter during normal and faulty modes is investigated. Based on converter behavior investigation the proposed fault detection algorithm can be presented in Fig. 2. As it can be seen in Fig. 1 and Fig. 2, the measured currents, i_{L1} and i_{L3} , and the controlled signals, P_1 and P_2 , act as the inputs of this proposed fault detection strategy. After that the slopes of these two currents are calculated and then normalized in order to scale down the level of the slopes. In healthy mode each normalized current slope keep changing every switching period. In faulty mode the normalized slope maintains constant. Therefore, time evaluation of each normalized slope needs to be observed to compare to the fault cycle (FC). This FC is the defined switching period. It is used to indicate the fault behavior where the normalized slope keeps unchanged. In addition, the controlled signals, P_1 and P_2 , will be compared with the defined threshold level (Th) obtained from the converter investigation. By applying the proposed fault detection strategy shown in Fig. 2 to the converter, the fault signals, F_1, F_2 and F_3 , are used as the fault indicators for the switches, S_1, S_2 and S_3 , respectively. The status '0' or '1' represents the healthy and faulty mode operation, respectively.

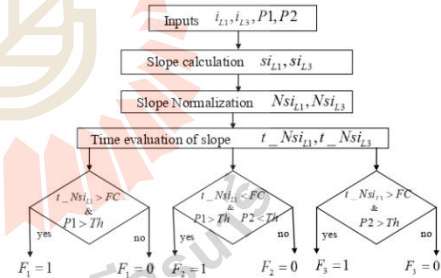


Fig. 2 Proposed fault detection algorithm

V. SIMULATION RESULTS

The behavior of the three-stage cascaded boost converter under normal and fault operating condition has been carried out using MATLAB. The designed converter parameters and the designed parameters of the PI controller are employed in the simulation with the input voltage of 20V and the load of 1 kΩ. The switching frequency is chosen at 10kHz.

In order to validate the effectiveness of the proposed control strategy the converter needs to be operated in many conditions. Fig. 3 shows the performance of the converter in normal mode with different referent voltages. As can be seen, the output voltage can be satisfactorily controlled both transient and steady states. The output voltage is regulated at the desired level with a small ripple. The currents flow continuously through the inductors.

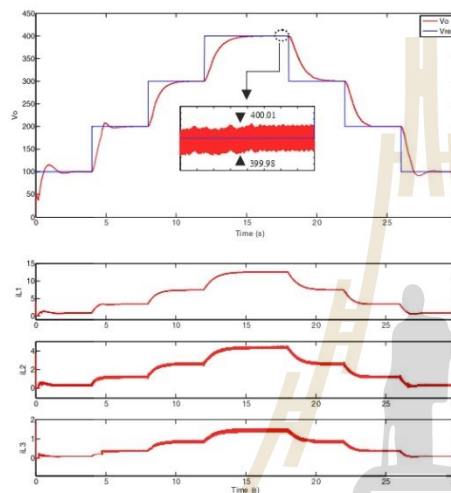


Fig. 3 Converter performance in normal mode operation

In order to validate the effectiveness of the proposed fault detection strategy, an open-circuit fault is created by removing one switching signal sending to the converter at the time $t = 4$ s. Fig. 4 shows the performance of the converter under both healthy and faulty modes where the open-circuit fault occurs in S_7 . It is obviously seen that the unacceptable ripples appear in inductor currents and capacitor voltages, leading converter degradation. This situation may damage the remaining healthy switches, especially switch S_2 . Moreover, the power loss increases significantly, resulting in converter efficiency reduction. It is necessary to detect the fault quickly. Due to the use of two PI current loops the current i_{L3} can be controlled both healthy and faulty modes.

Fig. 5 shows the observed signals used in the proposed fault detection algorithm. In healthy mode all fault-signals state as '0'. The normalized slope of current i_{L1} keeps changing in each switching period. After the fault occurred, this normalized slope maintain constant longer than the defined fault cycle of 3. The controlled signal P_1 keeps increasing and then higher than the threshold level of 0.75. As can be seen in Fig. 5, the fault signal F_1 indicates that the open-circuit fault in S_7 is detected at the time of 4.004 s, about four switching periods after fault occurrence. The status of remaining healthy switches are '0'.

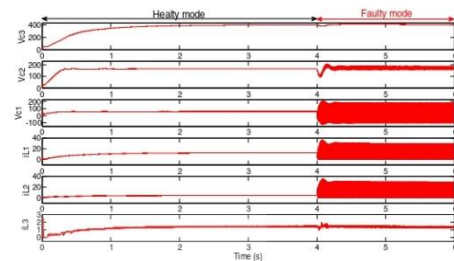


Fig. 4 Converter performance with open-circuit fault in S_7

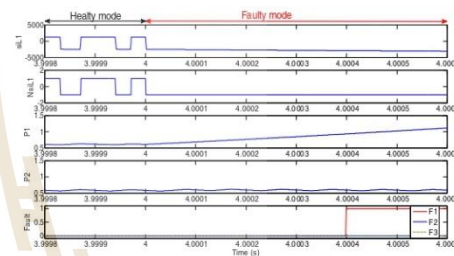


Fig. 5 Open-circuit switch fault detection of S_7

Fig. 6 shows the performance of the converter when the open-circuit fault occurred in S_2 . In faulty mode the converter can continue to operate at the desired level of output voltage without unacceptable oscillations in currents and voltages of the converter. There are significant changes in i_{L2} and v_{C1} , whereas the currents, i_{L1} and i_{L3} , remain the same compared to the operation in healthy mode. In this case it is quite difficult to detect the fault because there is no high ripple in both measured currents. As it can be seen in Fig. 7, the normalized slope of current i_{L1} keeps changing in each switching period. The controlled signals, P_1 and P_2 , play an important role to detect the fault and identify the failed switch. By applying the proposed fault detection strategy, S_2 is identified as the faulted switch and the fault is detected at the time $t = 4.007$ s.

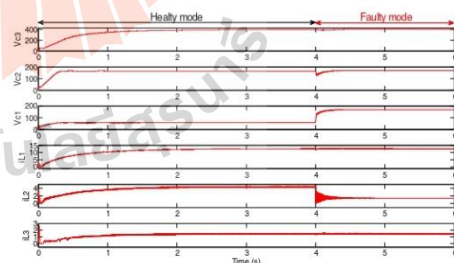


Fig. 6 Converter performance with open-circuit fault in S_2

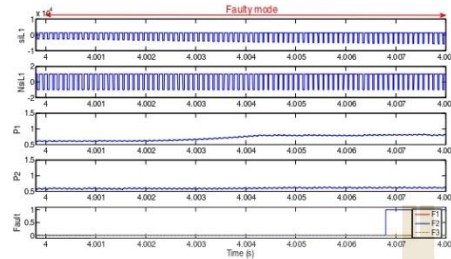


Fig. 7 Open-circuit switch fault detection of S_3

Fig. 8 presents the performance of the three-stage cascaded boost converter under an open-circuit fault of S_3 . After the fault occurrence at the time $t = 4$ s the output voltage decreases and then recovers back to the desired level of 400 V. The capacitor voltages, v_{C2} and v_{C3} , increase significantly during transient and maintain constant at the steady state with higher levels, approximately 100 V and 400 V, respectively. The voltage stress across the capacitors increases twice, resulting in converter degradation. The currents i_{L1} flows through the first inductor normally under both healthy and fault operations of the converter. The remaining inductor currents, i_{L2} and i_{L3} , decrease to the lower level with some ripples.

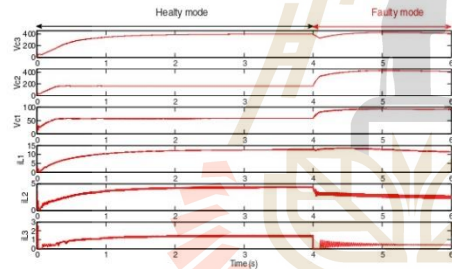


Fig. 8 Converter performance with open-circuit fault in S_3

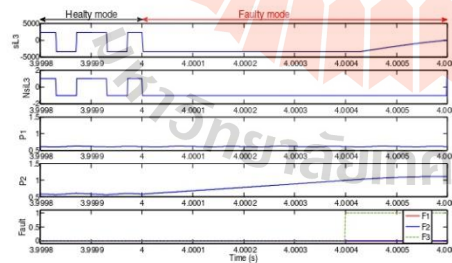


Fig. 9 Open-circuit switch fault detection of S_3

Fig. 9 shows simulation waveforms of the slope of current i_{L3} with its normalized value. In comparison between healthy and faulty modes the normalized slope provides different behavior signatures. In faulty mode this normalized slope stays constant whereas this slope keeps changing periodically during healthy mode. In addition, the controlled signals, P_1 and P_2 , are also different under normal and fault operating conditions. During faulty mode P_2 keeps rising continuously while P_1 keeps constant at the similar level compared to healthy mode. As it can be seen in Fig. 9, the open-circuit fault is detected at the time $t = 4.004$ s. The fault signal F_3 states that S_3 is the faulty switch. Therefore, the accurate switch fault identification can be achieved.

VI. CONCLUSION

This paper has been presented the open-circuit switch fault detection strategy for the three-stage cascaded boost converter. The behavior of the converter under normal and fault operating conditions is investigated. The proposed fault detection strategy requires the measurement of two currents flowing through the first and the third inductors of the three-stage boost converter. The controlled signals provided by two current loops of the PI controller and the slopes of the inductor currents are considered to detect and identify the open-circuited switch. There is no extra sensor required to detect the fault. The simulation results indicate that the open-circuit switch fault can be detected quickly and the faulted switch can be identified correctly by using the proposed fault detection strategy. The experiment set up will be prepared as the future work in order to confirm the satisfactory performance of the proposed open-circuit switch fault strategy.

ACKNOWLEDGMENT

The research work was fully supported by Suranaree University of Technology, Thailand

REFERENCES

- [1] J. L. Soon and D. D.-C. L., "A simple open-circuit fault detection method for a fault-tolerant DC/DC converter," in Proc. PEDS, 2015, pp. 98-103.
- [2] M. Shahbazi, M. R. Zolghadri and S. Ouni, "Fast and simple open-circuit fault detection method for interleaved DC-DC converters," in Proc. PEDSTC, 2016, pp. 440-445.
- [3] E. Pazouki, J. A. De Abreu-Garcia, and Y. Sozer, "Fault diagnosis method for DC-DC converters based on the inductor current estimator," in Proc. ECCE, 2016, pp. 1-6.
- [4] E. Pazouki, Y. Sozer and J. A. De Abreu-Garcia, "Fault diagnosis and fault tolerant operation of non-isolated dc-dc converter," DOI 10.1109/TIA.2017.2751547, IEEE Transactions on Industry Applications
- [5] 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. On Ind. Elec., Vol. 62, No. 11, November 2015, pp. 7247-7255.
- [6] H. Givi, E. Farjah and T. Ghanbari, "Switch and diode fault diagnosis in non-isolated dc-dc converters using diode voltage signature," DOI 10.1109/TIE.2017.2733486, IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [7] E. Ribeiro, A. J. M. Cardoso and C. Boccaletti, "Fault-tolerant strategy for a photovoltaic dc-dc converter," IEEE Trans. On Pow. Elec., Vol. 28, No. 6, June 2013, pp. 3008-3018.

การสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรของวงจรboostคอนเวอร์เตอร์เรียงต่อกันสามขั้นที่ถูกรบกวน

Open-Circuit Fault Behavior Investigation of Controlled Three-Stage Cascaded Boost Converter

คุณัญญา เตียวสุรินทร์ และ สุรัตน์ ขวัญอ่อน

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

sudarat_kh@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับวงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม โดยพิจารณาในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติของในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ซึ่งจะอาศัยตัวควบคุมชนิดที่โอทีพัฒนาขึ้นในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น นอกจากนี้ได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงานแบบปกติและเกิดความผิดปกติ การสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้

คำสำคัญ: วงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น, การสังเกตพฤติกรรม, ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร, วิธีการตรวจจับความผิดปกติ

Abstract

This paper proposes the behavior investigation under open-circuit switch fault of three-stage cascaded boost converter with its controller. The continuous current conduction mode is considered. The behavior of three-stage cascaded boost converter under normal and fault operations in different operating conditions is studied. The developed PI controller is employed to control the output voltage of three-stage cascaded boost converter. In addition, simulation results show the behavior of three-stage cascaded boost converter under healthy and faulty operating conditions. This open-circuit switch fault behavior investigation will be able to use in the development of open-circuit switch fault detection technique in future research.

Keywords: Three-Stage Cascaded Boost Converter, Behavior Investigation, Open-Circuit Switch Fault, Fault Detection Technique

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก จึงมีการพัฒนาวงจรแปลงกำลังไฟฟ้ามากขึ้น [1] เช่น วงจรboostแบบดั้งเดิมเพื่อใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทน เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นถึง 400 V เพื่อนำแรงดันเอาต์พุตดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ต่อไป แต่เนื่องจากแรงดันอินพุตจากพลังงานทดแทนมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20V ซึ่งวงจรboostแบบดั้งเดิมไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ ดังนั้นจึงได้นำวงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่อาศัยตัวควบคุมชนิดที่โอที [2] มาเพื่อใช้สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ แต่ภายในวงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตช์ที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีโอกาสเกิดความผิดปกติภายในวงจรมากขึ้น เนื่องจากอายุการใช้งานและกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นที่มากขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานของอุปกรณ์ ดังนั้นการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของสามารถช่วยอธิบายได้ว่าสวิตช์ใดเกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งความคิดที่ถูกต้องแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบสวิตช์เปิดวงจร [3] (Open-Circuit Switch Fault) กับ แบบสวิตช์ลัดวงจร (Short-Circuit Switch Fault) โดยแบบสวิตช์ลัดวงจรนั้นพฤติกรรมทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติจะไม่ซับซ้อน สามารถตรวจจับได้โดยง่าย ซึ่งในปัจจุบันมีกลไกการป้องกันมาตรฐานระบบภายใต้การลัดวงจร ในขณะที่สวิตช์เปิดวงรณั้นมักจะไม่มีกลไกในการป้องกัน รวมทั้งการตรวจจับความผิดปกติได้ยาก ดังนั้นการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

บทความนี้ได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรboostคอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่อาศัยตัวควบคุมชนิดที่โอที ทั้งภายใต้สภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งภายในตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์หนึ่งรูป อุปกรณ์แสดงรูป และเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิงให้เหมาะสม ทั้งนี้ในการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของสวิตช์แบบเปิดวงจรได้ในอนาคต [4] เพื่อให้สามารถลดผลกระทบที่ต้องงาให้น้อยลงได้

2. วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมชนิดฟีดแบ็คไว้ดังรูปที่ 1 โดยในส่วนของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น เกิดจากการนำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมมาต่อยอดกันสามขั้น ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน (V_{IN}) , สวิตช์ S_1, S_2, S_3 , ไดโอด D_1, D_2, D_3 , ตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3 , ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 และโหลดตัวต้านทาน (R)

โดยสามารถหาแรงดันเอาต์พุตในแต่ละขั้นของวงจรดังรูปที่ 1 แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$V_{C1} = \frac{1}{(1-d_1)} V_{IN}, V_{C2} = \frac{1}{(1-d_2)} V_{C1}, V_{C3} = \frac{1}{(1-d_3)} V_{C2} \quad (1)$$

$$V_o = V_{C3} = \frac{1}{(1-d_1)(1-d_2)(1-d_3)} V_{IN} \quad (2)$$

โดยที่ d_1, d_2, d_3 คือวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ S_1, S_2, S_3 ตามลำดับ

3. การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมจะอาศัยตัวควบคุมฟีดแบ็คเพื่อจะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ แม้สถานการณ์การทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยโครงสร้างตัวควบคุมฟีดแบ็คดังรูปที่ 1 จะประกอบไปด้วยลูปควบคุมแรงดันหนึ่งลูป (PI Voltage loop) และลูปควบคุมกระแสสองลูป (PI Current loops) โดยลูปควบคุมแรงดันจะสร้างกระแสอ้างอิง (i_{ref}) แต่เนื่องจากวิธีการควบคุมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยลูปควบคุมกระแสสองลูป ดังนั้นจำเป็นต้องมีกระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับลูปกระแส ซึ่งจะอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (current weighting technique) เพื่อให้กระแสอ้างอิง i_{ref1}, i_{ref2} สำหรับเปรียบเทียบกับกระแส i_{L1}, i_{L3} ตามลำดับ โดยการออกแบบหาค่าถ่วงน้ำหนักสามารถคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$i_{ref1} = X_1 i_{ref}, i_{ref2} = X_2 i_{ref} \quad (3)$$

เมื่อ X_1, X_2 คือค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง i_{ref1}, i_{ref2} ตามลำดับ โดยค่าถ่วงน้ำหนักคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$X_1 = \frac{i_{L1} L_2}{L_1 + L_2 + L_3}, X_2 = \frac{i_{L3}}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (4)$$

ซึ่งจากสมการดังกล่าวจะได้กระแสอ้างอิง สำหรับเปรียบเทียบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวหนึ่งและตัวสุดท้าย และเข้าสู่ตัวควบคุมฟีดแบ็คสำหรับกระแส จากรูปที่ 1 เห็นว่าสัญญาณสวิตช์ S_1 และ S_2 เหมือนกันคือได้จากลูปควบคุมกระแสลูปที่หนึ่ง (PI Current loop 1) ในขณะที่สัญญาณสวิตช์ S_3 จะได้จากลูปควบคุมกระแสลูปที่สอง (PI Current loop 2) โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดแบ็คสำหรับแรงดันและลูปกระแสทั้งสองลูป พิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้

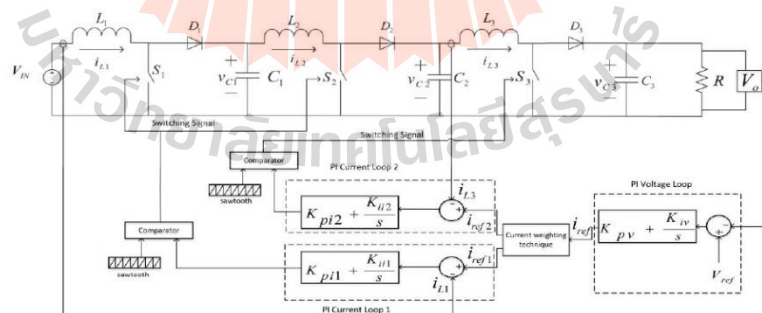
$$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C_{total} \frac{1}{R}, K_{iv} = K\omega_n^2 C_{total} \quad (5)$$

$$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_n(L_1+L_2)}{V_{IN}}, K_{i1} = \frac{\omega_n^2(L_1+L_2)}{V_{IN}} \quad (6)$$

$$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_n L_3}{V_{IN}}, K_{i2} = \frac{\omega_n^2 L_3}{V_{IN}} \quad (7)$$

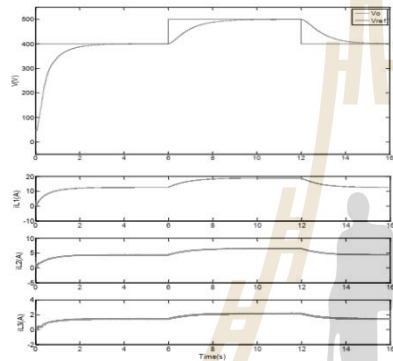
4. ผลการจำลองสถานการณ์

ในการสังเกตพฤติกรรมความถี่ของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม จะอาศัยโปรแกรม MATLAB&SIMULINK ในการจำลองสถานการณ์ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรมีดังนี้ แรงดันอินพุต $V_{IN} = 20V$, ตัวเหนี่ยวนำ $L_1 = 15mH, L_2 = 18.75mH, L_3 = 70mH$, ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = C_3 = 500\mu F$, โหลดตัวต้านทาน $R = 1k\Omega$ และความถี่ของสวิตช์ $f_s = 10kHz$



รูปที่ 1 โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้น

จากรูปที่ 2 ผลการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถจะควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่ 400V และ 500V ตามลำดับ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวยังคงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับแรงดันเอาต์พุตเช่นกัน กล่าวคือถ้าแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้นทำให้กระแสเพิ่มขึ้นด้วยและถ้าแรงดันเอาต์พุตลดลงก็ส่งผลให้กระแสลดลงตาม



รูปที่ 2 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง

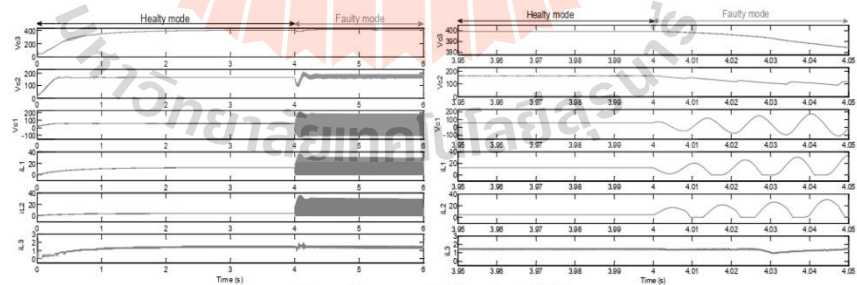
ในส่วนของการจำลองสถานการณ์เพื่อใช้ในการอธิบายการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของเบสสวิทช์เปิดวงจรสำหรับวงจรเบสสวิตช์คอนเวอร์เตอร์แบบเบี่ยงคอกันสามขั้นที่มีตัวควบคุม จะพิจารณากรณีที่สวิทช์ตัวใดหนึ่งเกิดความผิดปกติของขึ้นเท่านั้น โดยจะกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V

จากรูปที่ 3 จำลองผลให้เกิดความผิดปกติของสวิทช์ S_1 ที่วินาทีที่ 4 ซึ่งจากรูปจะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวงจรขณะทำงานในสภาวะ

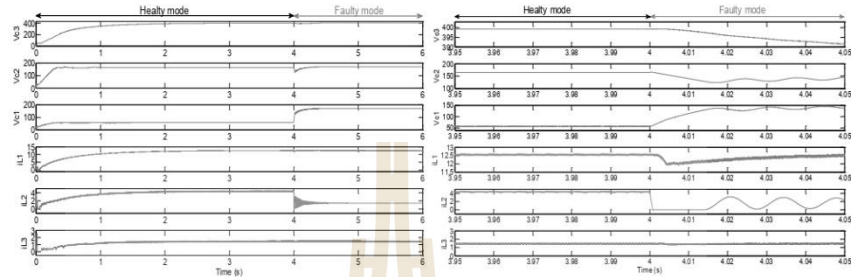
ปกติ (Healthy mode) และเกิดความผิดปกติของเบสสวิทช์เปิดวงจร (Faulty mode) โดยในสภาวะปกติตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำก็ยังมีผลการจำลองสถานการณ์ที่สอดคล้องกันในช่วงสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 4 แต่ในสภาวะเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 4 จะเห็นว่า v_{C1}, v_{C2} กับ i_{L1}, i_{L2} นั้นเกิดการสั่นไกวเกิดขึ้นอย่างชัดเจน แต่แรงดันเอาต์พุตหรือ v_{C3} ในสภาวะเกิดความผิดปกติของขึ้นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นนั้นพยายามที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นในการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของเบสสวิทช์เปิดวงจรที่ S_1 สามารถนำเอาผลของ v_{C1}, v_{C2} และ i_{L1}, i_{L2} ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นอย่างมาก มาพิจารณาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของสวิทช์ S_1 ได้

จากรูปที่ 4 จำลองผลให้เกิดความผิดปกติของสวิทช์ S_2 ที่วินาทีที่ 4 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าในสภาวะเกิดความผิดปกติของขึ้น v_{C1} มีการเพิ่มระดับแรงดันที่สูงขึ้น แต่ v_{C2} มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิม เนื่องจากสวิทช์ S_2 นั้นมีการเปิดวงจร และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีเพียง i_{L2} ที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นเราสามารถนำพฤติกรรมของแรงดันและกระแสดังกล่าวมาพิจารณาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของสวิทช์ S_2 ได้

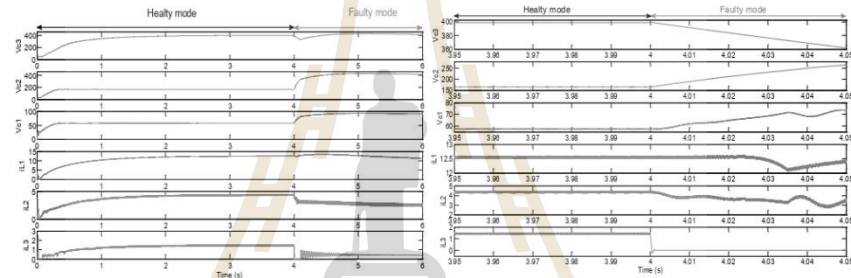
จากรูปที่ 5 จำลองผลให้เกิดความผิดปกติของสวิทช์ S_3 ที่วินาทีที่ 4 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าในสภาวะเกิดความผิดปกติของขึ้น v_{C1}, v_{C2} มีการเพิ่มระดับแรงดันที่สูงขึ้น เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการคือ 400V และในส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมี i_{L2}, i_{L3} ที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นเราสามารถนำพฤติกรรมของแรงดันและกระแสดังกล่าวมาพิจารณาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของสวิทช์ S_3 ได้



รูปที่ 3 ผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดความผิดปกติของสวิทช์ S_1



รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิทช์ S_2



รูปที่ 5 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิทช์ S_3

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดจะเห็นว่า ถ้าภายในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นเกิดความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรขึ้น จะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีการผันไปสูงทั้งสามกรณี และอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของวงจรเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ เพื่อใช้ในการพัฒนาวิธีการตรวจเช็คความผิดปกติขึ้นในอนาคต เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นดังกล่าว

5. สรุป

บทความนี้เน้นเสนอการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจร สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นที่มีตัวควบคุมภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ ซึ่งจะอาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อวงจรดังกล่าวอยู่ในสภาวะเกิดความผิดปกติขึ้น พฤติกรรมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด และมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิทช์แต่ละตัว ดังนั้นพฤติกรรมเหล่านี้สามารถนำไป

พิจารณา เพื่อใช้พัฒนาวิธีการตรวจเช็คความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรที่ถูกต้องและรวดเร็วได้สำหรับงานวิจัยในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. M Hasmeen, Adel A. Elbaset Mohammed, "Design and simulation of DC/DC Boost Converter", *Power System Conference*, 2008.
- [2] สุภณัฐ เดี่ยวสุวรรณ และศุภรัตน์ ขวัญอ่อน, "การควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน," *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40*, ชลบุรี, 15-17 พฤศจิกายน 2560.
- [3] J. L. Soon and D. D-C. L, "A simple open-circuit fault detection method for a fault-tolerant DC/DC converter," in *Proc. PEDS*, 2015, pp. 98-103.
- [4] Sudarat Khwan-on and Supanut Diewsuwin, "An Open-Circuit Switch Fault Detection Strategy for a Three-Stage Cascaded Boost Converter," *The 6th International Electrical Engineering Congress*, 7-9 March 2018, Krabi, Thailand.

ประวัติผู้เขียน

นายศุภณัฐ เดียวสุรินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ. 2537 ศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนมหาไถ่ศึกษาบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2559 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในรายวิชาปฏิบัติการระบบควบคุม (Control System Laboratory) และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontrollers Laboratory) ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยมีความสนใจในงานด้าน การพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในระหว่างทำวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ แสดงในภาคผนวก จ.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี