

การควบคุมความเร็วและการวิเคราะห์เสถียรภาพของรถไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**SPEED CONTROL AND STABILITY ANALYSIS OF
ELECTRIC VEHICLE**



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 2013

การควบคุมความเร็วและการวิเคราะห์เสถียรภาพของรถไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ภูริชญ์ งามคง : การควบคุมความเร็วและการวิเคราะห์เสถียรภาพของรถไฟฟ้า (SPEED CONTROL AND STABILITY ANALYSIS OF ELECTRIC VEHICLE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองพล อารีรักษ์, 186 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า แหล่งพลังงานของระบบใช้แบตเตอรี่ที่ต่อพ่วงกับวงจรแปลงผันแบบบัสคัสสองวงจรมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ไซมูเลเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและประยุกต์ใช้ทฤษฎีค่าเจาะจงในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพพบว่า ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามีเสถียรภาพทุกย่านการทำงาน นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมความเร็วรอบของรถไฟฟ้า และจากการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้าโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PHURICH NGAMKONG : SPEED CONTROL AND STABILITY

ANALYSIS OF ELECTRIC VEHICLE. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. KONGPOL AREERAK, Ph.D., 186 PP.

ELECTRIC VEHICLE /PI CONTROLLER/STABILITY ANALYSIS

The thesis presents the stability analysis and speed control of the electric vehicle. The energy source of the system is battery combined with two buck converters. The separately-excited DC motor is used in electric vehicle. In the thesis, The generalized state-space averaging method (GSSA) is used to derive the mathematical model of the system and the eigenvalue theorem is applied to analyze the stability. For the stability analysis results, the electric vehicle drive system is stable at any operating points. Moreover, the PI controller is used to control the speed of the electric vehicle. For the experimental results, this PI controller can control the speed. The error between the speed command and actual speed using this control does not exceed 6 percent.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ รวมทั้งเป็นกำลังใจและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตแก่ผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัยและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณครูและอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกท่านให้กำลังใจ ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ภูริชญ์ งามคง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	3
2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	5
2.1 บทนำ	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	
ชนิดแยกกระตุ้น	5
2.2.1 สมการพื้นฐานของมอเตอร์.....	5
2.2.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	
ชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	8
2.2.3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	
ชนิดแยกกระตุ้น	12
2.3 สรุป.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	
	และการวิเคราะห์เสถียรภาพ	14
3.1	บทนำ	14
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า.....	14
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	24
3.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า.....	41
3.5	สรุป.....	49
4	การออกแบบและการสร้างตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็ว	50
4.1	บทนำ	50
4.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่	50
4.3	การสร้างและทดสอบตัวควบคุมพีไอแบบแอนะล็อก	62
4.4	สรุป.....	84
5	โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	85
5.1	บทนำ	85
5.2	วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์	85
5.2.1	การทำงานของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์	86
5.2.2	การออกแบบอุปกรณ์	88
5.3	โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรจุดชนวนเกท	96
5.3.1	วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย	100
5.3.2	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	103
5.3.3	วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า	107
5.3.4	วงจรแยกโคดสัญญาณ	111
5.3.5	วงจรเลือกโหมดการทำงาน.....	114
5.4	โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม	117
5.4.1	ชุดคั่นเร่ง	120

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5	โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม.....	125
5.5.1	วงจรรองความถี่.....	130
5.5.2	วงจรหน่วง	131
5.5.3	ชุดปรับตั้งความเร็ว	135
5.5.4	ตัวควบคุมพีไอ	137
5.6	ชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า	139
5.6.1	จานหมุน	140
5.6.2	เซนเซอร์.....	143
5.6.3	วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	145
5.6.4	ชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็ว	147
5.7	สรุป.....	148
6	การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	149
6.1	บทนำ	149
6.2	การทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุต ของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า	149
6.3	การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม	154
6.4	การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม	160
6.5	สรุป.....	169
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	171
7.1	สรุป.....	171
7.2	ข้อเสนอแนะ	172
	รายการอ้างอิง	174
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการขับขี่รถไฟฟ้า	175
	ภาคผนวก ข. วิธีชาร์จแบตเตอรี่ของระบบรถไฟฟ้า	180
	ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	184
	ประวัติผู้เขียน	186

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าพารามิเตอร์จากเอกสารข้อมูล 8
2.2	พารามิเตอร์จากการวัดค่า 9
2.3	พารามิเตอร์ที่ใช้เทียบเคียง..... 10
2.4	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์..... 12
3.1	พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 24
3.2	พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์..... 25
3.3	พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์..... 33
4.1	ผลการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้า..... 52
4.2	การทดสอบวงจรตัวควบคุมพี 70
4.3	การทดสอบวงจรตัวควบคุมไอ..... 73
4.4	การทดสอบตัวควบคุมพีไอกรณีปรับค่าตัวควบคุมพี 76
4.5	การทดสอบตัวควบคุมพีไอกรณีปรับค่าตัวควบคุมไอ 78
6.1	ผลการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้า..... 152
6.2	ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม 157
6.3	ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม 168

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	รถไฟฟ้า 1
2.1	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 6
2.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 8
2.3	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 13
3.1	วงจรสมมูลของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 15
3.2	ฟังก์ชันการสวิตช์ 16
3.3	ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรรีเลย์ กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m 25
3.4	ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์มีเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m 26
3.5	ผลการตอบสนองของกระแสอาร์มีเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m 26
3.6	ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m 27
3.7	ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรมอเตอร์ กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m 27
3.8	ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m 28
3.9	ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m 28
3.10	ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรรีเลย์ กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m 29
3.11	ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์มีเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m 30

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ผลการตอบสนองของกระแสดาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m.....	30
3.13 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m.....	31
3.14 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรสนาม กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m.....	31
3.15 ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m.....	32
3.16 ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m.....	32
3.17 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	34
3.18 ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	34
3.19 ผลการตอบสนองของกระแสดาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	35
3.20 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	35
3.21 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรสนาม กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	36
3.22 ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	36
3.23 ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	37
3.24 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m.....	38
3.26 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m.....	39
3.27 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m.....	39
3.28 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางค้ำวงจรสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m.....	40
3.29 ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m.....	40
3.30 ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m.....	41
3.31 ค่าเจาะงกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 0 N.m ถึง 4 N.m	43
3.32 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m.....	43
3.33 ค่าเจาะงกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 0 N.m เป็น 14 N.m	44
3.34 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 14 N.m.....	44
3.35 ค่าเจาะงกรณีปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ของจุดการทำงานที่ 1	45
3.36 ค่าเจาะงกรณีปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ของจุดการทำงานที่ 2	46
3.37 ค่าเจาะงกรณีปรับค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์ของจุดการทำงานที่ 1	47
3.38 ค่าเจาะงกรณีปรับค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์ของจุดการทำงานที่ 2	48

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การทดสอบชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า	51
4.2 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	53
4.3 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น กรณี $T_L = 0$	53
4.4 วงจรหน่วง	54
4.5 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	55
4.6 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุม	55
4.7 ผลตอบสนองของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุม	56
4.8 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีโครงสร้างแบบวงปิด	57
4.9 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบ ตัวควบคุมพีไอ	57
4.10 แผนภาพโบลของระบบวงเปิดที่ใช้พิจารณาค่าความถี่ ω_1	59
4.11 แผนภาพโบลของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ	61
4.12 ผลการตอบสนองของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ	61
4.13 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบก่อนมีตัวควบคุมและเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ	62
4.14 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบขนาน	63
4.15 โครงสร้างของวงจรรขยายความผิดพลาด	64
4.16 วงจรรขยายความผิดพลาดที่ใช้ในการทดสอบ	65
4.17 ผลการทดสอบของวงจรที่มีค่าแรงดันอินพุต $V_{ref} = 5V$ และ $V_{sen} = 3V$	65
4.18 ผลการทดสอบของวงจรที่มีค่าแรงดันอินพุต $V_{ref} = 3V$ และ $V_{sen} = 5V$	66
4.19 วงจรรขยายรวมสัญญาณ	67
4.20 วงจรรขยายรวมสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ	67
4.21 ผลการทดสอบวงจรรขยายรวมสัญญาณ	68
4.22 วงจรตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบขนาน	69
4.23 วงจรตัวควบคุมพีไอ	70
4.24 ผลการทดสอบวงจรถ้าควบคุมพีไกรณี $k_p = 0.5$	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีกรณี $k_p = 1$	71
4.26 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีกรณี $k_p = 2$	72
4.27 วงจรตัวควบคุมไอ.....	73
4.28 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมไอกรณี $k_I = 10000$	74
4.29 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมไอกรณี $k_I = 1000$	74
4.30 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมไอกรณี $k_I = 100$	75
4.31 วงจรตัวควบคุมพีไอ	76
4.32 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 ที่มีค่า $k_p = 0.5$ และ $k_I = 10000$	77
4.33 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 ที่มีค่า $k_p = 1$ และ $k_I = 10000$	77
4.34 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 ที่มีค่า $k_p = 2$ และ $k_I = 10000$	78
4.35 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 ที่มีค่า $k_I = 10000$ และ $k_p = 2$	78
4.36 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 ที่มีค่า $k_I = 1000$ และ $k_p = 2$	79
4.37 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 ที่มีค่า $k_I = 100$ และ $k_p = 2$	79
4.38 วงจรตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอที่ได้จากการออกแบบ.....	81
4.39 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีจากการออกแบบ	81
4.40 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุม ไอจากการออกแบบ.....	82
4.41 วงจรตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบ.....	83
4.42 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบ.....	83
5.1 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์	85
5.2 โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์	86
5.3 รูปสัญญาณที่ใช้ในการอธิบายหลักการทำงานของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์	87
5.4 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	88
5.5 แบตเตอรี่ขนาด 48 V 170 Ah ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	89
5.6 สวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	90
5.7 สวิตช์ที่ใช้ในการกลับขั้วแรงดันเอาต์พุตของวงจรสนาม.....	90
5.8 สวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	91
5.9 สวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 ไอจีบีที่มอดูลที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์.....	92
5.11 ไอจีบีที่ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรสนาม.....	92
5.12 ไดโอดที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์.....	93
5.13 ไดโอดที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรสนาม.....	93
5.14 ฟิวส์ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์.....	94
5.15 ฟิวส์ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรสนาม.....	94
5.16 การติดตั้งสวิตช์ควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้า.....	95
5.17 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์.....	95
5.18 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรสนาม.....	96
5.19 การติดตั้งฟิวส์ทางด้านวงจรสนาม.....	96
5.20 ก) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ข) ลักษณะการทำงานของเทคนิค PWM.....	97
5.21 บล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า.....	97
5.22 วงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทางด้านวงจรสนาม.....	98
5.23 วงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์.....	99
5.24 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย.....	100
5.25 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้จากการออกแบบ.....	101
5.26 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ใช้งานจริง.....	102
5.27 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย.....	102
5.28 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	103
5.29 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	104
5.30 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	105
5.31 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริง.....	105
5.32 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 1.....	106
5.33 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 2.....	106
5.34 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 3.....	107
5.35 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	107
5.36 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.37 ผลการทดสอบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า	110
5.38 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าทางด้านวงจรสนาม	110
5.39 วงจรแยกโคคัลสัญญาณ	111
5.40 วงจรแยกโคคัลสัญญาณสำหรับใช้งาน	112
5.41 วงจรแยกโคคัลสัญญาณที่สร้างจริง	112
5.42 ผลการทดสอบวงจรแยกโคคัลสัญญาณกรณีที่ 1	113
5.43 ผลการทดสอบวงจรแยกโคคัลสัญญาณกรณีที่ 2	113
5.44 วงจรเลือกโหมดการทำงาน	114
5.45 วงจรเลือกโหมดการทำงานที่นำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	115
5.46 สวิตซ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของรีเลย์	116
5.47 ผลการทดสอบวงจรเลือกโหมดการทำงานรถไฟฟ้ากรณีที่ 1	116
5.48 ผลการทดสอบวงจรเลือกโหมดการทำงานรถไฟฟ้ากรณีที่ 2	117
5.49 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม	118
5.50 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกท ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม	118
5.51 โครงสร้างของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม	119
5.52 เป็นเหยียบ	121
5.53 สายคันเร่ง	121
5.54 ก่อคันเร่งพร้อมจานหมุน	121
5.55 ชุดเฟืองขับสายพาน	122
5.56 ชุดเพิ่มรอบการหมุน	122
5.57 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า	122
5.58 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในชุดคันเร่ง	124
5.59 ผลการทดสอบเหยียบคันเร่งกรณีที่ 1	124
5.60 ผลการทดสอบเหยียบคันเร่งกรณีที่ 2	125
5.61 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม	126

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.62 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม	127
5.63 โครงสร้างวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม	128
5.64 วงจรกรองความถี่	130
5.65 วงจรกรองที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	130
5.66 ผลการทดสอบของวงจรกรองความถี่	131
5.67 วงจรหน่วง	132
5.68 วงจรหน่วงที่ได้จากการออกแบบ	133
5.69 วงจรหน่วงที่ใช้งานจริง	133
5.70 ผลการทดสอบวงจรหน่วงกรณีที่ 1	134
5.71 ผลการทดสอบวงจรหน่วงกรณีที่ 2	134
5.72 ชุดปรับตั้งความเร็ว	135
5.73 ชุดปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้า	136
5.74 ผลการทดสอบชุดปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้า	136
5.75 จุดติดตั้งชุดปรับตั้งความเร็ว	137
5.76 วงจรตัวควบคุมพีไอ	138
5.77 วงจรตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบ	138
5.78 วงจรตัวควบคุมพีไอที่ใช้งานจริง	139
5.79 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า	139
5.80 โครงสร้างวงจรชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า	140
5.81 การออกแบบจานหมุนที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	141
5.82 จานหมุนที่นำมาใช้งานจริง	141
5.83 จุดติดตั้งจานหมุน	142
5.84 จานหมุนที่ติดตั้งเสร็จแล้ว	142
5.85 เซนเซอร์ที่นำมาใช้งาน	143
5.86 เซนเซอร์	143
5.87 วงจรของเซนเซอร์ที่ใช้งานจริง	144

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.88 การติดตั้งเซนเซอร์	144
5.89 สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์	145
5.90 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน.....	145
5.91 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันจากการออกแบบ	146
5.92 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันที่ใช้งานจริง	146
5.93 ผลการทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	147
5.94 ไมโครคอนโทรลเลอร์	148
5.95 ชุดแสดงผล	148
6.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุต ของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า	149
6.2 การทดสอบปรับความเร็วของรถไฟฟ้าจากคันเร่งเทียบกับความเร็วของรถจักรยานยนต์	150
6.3 เครื่องมือวัดค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	151
6.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว กับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า	153
6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว กับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น	154
6.6 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ	155
6.7 การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม.....	156
6.8 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม.....	156
6.9 รูปสัญญาณของแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ที่ความเร็ว 5 km/h	157
6.10 รูปสัญญาณของแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ที่ความเร็ว 10 km/h	158
6.11 รูปสัญญาณของแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ที่ความเร็ว 15 km/h	158
6.12 รูปสัญญาณของแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ที่ความเร็ว 20 km/h	159

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 รูปสัญลักษณ์ของแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านวงจรรีเลย์ ที่มีความเร็ว 25 km/h	159
6.14 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ	160
6.15 เครื่องมือวัดในการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม	162
6.16 การติดตั้งงานหมุนและเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	162
6.17 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบกรณีที่ 1.....	163
6.18 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบกรณีที่ 2.....	163
6.19 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอ กรณีที่ 1	164
6.20 ผลผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอ กรณีที่ 2	165
6.21 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอ กรณีที่ 3	165
6.22 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอ กรณีที่ 4	166
6.23 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอ กรณีที่ 5	165
6.24 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอ กรณีที่ 6	167
6.25 ผลการทดสอบปรับค่าตัวควบคุมพีไอเพื่อให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์....	167
ข.1 สวิตซ์ที่ใช้เลือกโหมดใช้งานคันเร่ง.....	178
ข.2 ลำดับการกดสวิตซ์ในกรณีใช้งานรถไฟฟ้า	178
ข.3 ลำดับการกดสวิตซ์ในกรณีหยุดใช้งานรถไฟฟ้า	179
ข.4 สวิตซ์ที่ใช้เลือกโหมดใช้งานแบบมีตัวควบคุม.....	180
ข.5 ลำดับการกดสวิตซ์ในกรณีใช้งานรถไฟฟ้า	180
ข.6 ปุ่มปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้า.....	181
ค.1 อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง.....	183

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.2	ตำแหน่งสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง..... 183
ค.3	ลักษณะการชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง 184
ค.4	แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายของวงจรจุดชนวนเกท 184
ค.5	อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง..... 185
ค.6	ลักษณะการชาร์จแบตเตอรี่ของวงจรจุดชนวนเกท..... 185



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันยานพาหนะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งยานพาหนะส่วนใหญ่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ได้กำลังงานในการขับเคลื่อน การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายด้าน อีกทั้งยังมีอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสูงมากในปัจจุบันส่งผลให้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงของโลกลดน้อยลง (ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, เอ็มเทค สวทช., 2550) ดังนั้นจึงมีความพยายามในการหาพลังงานทางเลือก มาใช้กับยานพาหนะเพื่อลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและเป็นการรักษาสังแวดล้อมไปด้วย ซึ่งพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนยานพาหนะ โดยเรียกยานพาหนะที่ใช้พลังงานไฟฟ้านี้ว่า รถไฟฟ้า ซึ่งเป็นยานพาหนะที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านอุตสาหกรรม ด้านการท่องเที่ยว และด้านกีฬา โดยรถไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 รถไฟฟ้า

การทำงานของรถไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อนแทนการใช้เครื่องยนต์ โดยจะมีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยมุ่งประเด็นไปที่การควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้าให้ได้ตามต้องการในทุกสภาวะขับโหดใด ๆ ซึ่งประโยชน์ของการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า ทำให้สามารถระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางได้ และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวจะมีการกระตุ้นสนามแม่เหล็กแยกจึงทำให้ฟลักซ์หรือสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่ ทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ง่ายและสามารถควบคุมความเร็วได้ตั้งแต่รอบต่ำจนกระทั่งถึงความเร็วรอบที่พิกัด (Chapman, 1999) แต่จากการที่นำเสนอในเบื้องต้นว่า รถไฟฟ้ามีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ ซึ่งคุณลักษณะของแบตเตอรี่ที่มีแรงดันตกดลยลงเรื่อย ๆ ตามสภาวะการจ่ายกระแส (Protogeropoulos, Marshall and Brinkworth, 1994) ดังนั้นการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ จะต้องพิจารณาการควบคุมให้เหมาะสมกับช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน จึงต้องมีตัวควบคุมที่เหมาะสมกับการทำงานในลักษณะดังกล่าว ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวควบคุมพีโอที่ออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจในการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยจะพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้า การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาที่จุดการทำงานต่าง ๆ เพื่อยืนยันเสถียรภาพของระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่สำหรับรถไฟฟ้า

1.2.2 ออกแบบและสร้างตัวควบคุมความเร็วรอบของรถไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมพีโอ

1.2.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับรถไฟฟ้า

1.2.4 วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.3.2 แบตเตอรี่ที่พิจารณาเป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

1.3.3 การจำลองสถานการณ์ของระบบใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB และ Simulink

1.3.4 การดำเนินงานมุ่งเน้นที่การควบคุมความเร็วรอบของรถไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

1.3.5 การพิจารณาย่านการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า จะพิจารณาในโหมดการทำงานกระแสต่อเนื่อง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการควบคุมความเร็วรอบของรถไฟฟ้าเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นของรถไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่

1.5.2 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบและสร้างตัวควบคุมพีไอ สำหรับควบคุมความเร็วรถไฟฟ้า

1.5.3 ได้องค์ความรู้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นของรถไฟฟ้า

1.5.4 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นของรถไฟฟ้า

1.5.5 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือ นานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รายงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การหาค่าพารามิเตอร์และสมการพื้นฐานของมอเตอร์ รวมถึงการหาบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

บทที่ 3 นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอ โดยใช้การออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ และได้ทำการสร้างและทดสอบตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบ

บทที่ 5 กล่าวถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ การทำงาน และการออกแบบของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ที่ประกอบไปด้วย วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ วงจรจุดชนวนเกท และชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า

บทที่ 6 นำเสนอผลการทดสอบชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ที่มีการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถไฟฟ้ากับวงจรตรวจวัดความเร็ว ทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมและเมื่อมีตัวควบคุม

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัย ภาคผนวก ข. ขั้นตอนการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า และภาคผนวก ค. วิธีชาร์จแบตเตอรี่ของระบบรถไฟฟ้า



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

2.1 บทนำ

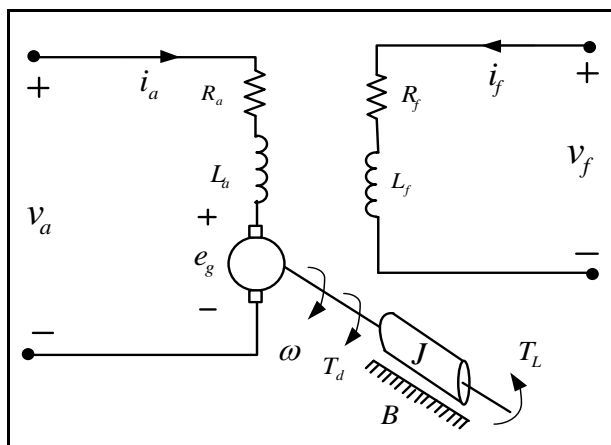
วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ การควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการขับเคลื่อน และในการทำงานจำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุม เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มีความเร็วตามที่ต้องการ ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วจึงมีความจำเป็นที่ต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ และนอกจากนี้ยังมีความจำเป็นที่ต้องใช้ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อน และการวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงได้นำเสนอสมการพื้นฐาน การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การหาค่าพารามิเตอร์ และการหาบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ไว้ในบทนี้

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบไปด้วย สมการพื้นฐานของมอเตอร์ที่พิจารณาจากวงจรสมมูล การหาค่าพารามิเตอร์ และการหาบล็อกไดอะแกรมที่พิจารณาจากสมการพื้นฐานของมอเตอร์ ซึ่งจะนำเสนอดังต่อไปนี้

2.2.1 สมการพื้นฐานของมอเตอร์

สมการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (Chapman, 1999) สามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรอาร์เมเจอร์ (armature circuit) และวงจรสนาม (field circuit) ที่แยกอิสระจากกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ดังรูปที่ 2.1 อธิบายความหมายของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลได้ดังนี้

v_a คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรรอาร์เมเจอร์ (V)

v_f คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรสนาม (V)

i_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

i_f คือ กระแสสนาม (A)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)

L_f คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านสนาม (H)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

R_f คือ ความต้านทานสนาม (Ω)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

B คือ ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)

e_g คือ แรงดันย้อนกลับ (V)

T_L คือ แรงบิดของโหลด ($\text{N} \cdot \text{m}$)

T_d คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ($\text{N} \cdot \text{m}$)

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ในรูปที่ 2.1 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านวงจรรอาร์เมเจอร์ได้ดังสมการที่ (2-1)

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (2-1)$$

พิจารณากรณีกระแสสนามมีค่าคงที่ และเมื่อ $e_g = k_e \omega$ ดังนั้นสมการของแรงดันทางด้านวงจรรอแม่เจอร์จะได้ดังสมการที่ (2-2) เมื่อ k_e คือ ค่าคงที่ของแรงดันย้อนกลับ และเมื่อพิจารณาสมการการหมุนของมอเตอร์ จะได้ดังสมการที่ (2-3)

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_e \omega \quad (2-2)$$

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2-3)$$

จากสมการที่ (2-3) เมื่อกระแสสนามมีค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อแทนค่า $T_d = k_t i_a$ ในสมการที่ (2-3) จะได้ดังสมการที่ (2-4) ดังนี้

$$k_t i_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2-4)$$

เมื่อ k_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิด และโดยส่วนใหญ่แล้วจะกำหนดให้ $k_e = k_t = k$ (N·m/A)

จากสมการที่ (2-2) และ (2-4) เมื่อจัดรูปสมการใหม่และเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสถานะ (state equation) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (2-5)

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k}{L_a} \\ \frac{k}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

2.2.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย วิทยานิพนธ์

การคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุม การจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และเนื่องจากทางบริษัทผู้ผลิตให้ข้อมูลของค่าพารามิเตอร์มาแค่บางค่าเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ตามแนวทางดังต่อไปนี้

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แนวทางดังนี้

แนวทางที่ 1 การหาค่าพารามิเตอร์จากเอกสารข้อมูล

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในการวิจัยวิทยานิพนธ์ มีลักษณะตามรูปที่ 2.2 ซึ่งทางผู้ผลิตจะมีเอกสารข้อมูลของมอเตอร์แนบมาด้วย แสดงได้ตามตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์จากเอกสารข้อมูล

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
พิกัดกำลังงาน	5	hp
พิกัดความเร็ว	2600	rpm
แรงดันอาร์มเจอร์ (V_a)	48	V

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์จากเอกสารข้อมูล(ต่อ)

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
กระแสอาร์เมเจอร์ (i_a)	105	A
แรงดันสนาม (v_f)	6	V
กระแสสนาม (i_f)	10	A

แนวทางที่ 2 การหาค่าพารามิเตอร์จากการวัดค่า

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเอกสารข้อมูลไม่เพียงพอ จึงต้องหาค่าพารามิเตอร์จากการวัดค่าและหาค่าเฉลี่ย โดยใช้อุปกรณ์ทางการวัด คือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และ RLC มิเตอร์ ซึ่งได้ทำการวัดจากมอเตอร์ในรูปแบบที่ 2.2 และทำการวัดค่าจำนวน 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแสดงได้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์จากการวัดค่า

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ค่าความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์ (R_a)	0.14	0.14	0.14	0.14 Ω
ค่าความต้านทานของวงจรสนาม (R_f)	0.6	0.6	0.6	0.6 Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรอาร์เมเจอร์ (L_a)	0.244	0.244	0.244	0.244 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรสนาม (L_f)	15.56	15.56	15.56	15.56 mH

แนวทางที่ 3 การหาค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

การหาค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณจะใช้วิธีการเทียบเคียงทั้งนี้ เนื่องจากพารามิเตอร์บางตัวมีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณ ยกตัวอย่างเช่น การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J) จำเป็นต้องทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์และน้ำหนักของโรเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถถอดตัวโรเตอร์ออกมาวัดและชั่งน้ำหนักได้เนื่องจากไม่มีความชำนาญในการประกอบตัวมอเตอร์ ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายได้ เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ใช้การคำนวณโดยการเทียบเคียงกับมอเตอร์อีกพิคัดหนึ่ง ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิดเดียวกันและมีลักษณะการใช้งานเหมือนกันแต่มีพิคัดโตกว่า ใช้เป็นตัวเทียบเคียง (Kuhn, Komperda and Leuschke, 2010) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้เทียบเคียง

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
พิกัดกำลังงาน	8	hp
แรงดันอาร์เมเจอร์ (v_a)	48	V
แรงดันสนาม (v_f)	48	V
ค่าความต้านทานของวงจรรอาร์เมเจอร์ (R_a)	0.081	Ω
ค่าความต้านทานของวงจрсสนาม (R_f)	1.35	Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรอาร์เมเจอร์ (L_a)	0.1944	mH
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจрсสนาม (L_f)	0.396	H
ค่าคงที่ของมอเตอร์ (k)	0.0156	N·m/A
ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B)	0.00589	N·m·s/rad
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J)	8.2×10^{-5}	kg·m ²

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โดยการเทียบเคียง จะคำนวณเทียบเคียงจากค่าพิกัดกำลังงานของมอเตอร์ทั้งสอง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาด้วยวิธีนี้ คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์ (k) ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J) สามารถแสดงการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

เมื่อ k_u เป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

k_c เป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ที่ใช้เทียบเคียง

P_u เป็นพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

P_c เป็นพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้เทียบเคียง

B_u ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืดที่ใช้ในงานวิจัย

B_c เป็นค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืดที่ใช้เทียบเคียง

J_u เป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

J_c เป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ที่ใช้เทียบเคียง

- การคำนวณหาค่าคงที่ของมอเตอร์ (k)

การคำนวณหาค่า k สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-6)

$$k_u = \frac{P_u}{P_c} \times k_c \quad (2-6)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2-6) จะได้ค่าคงที่ดังนี้

$$k_u = \frac{5}{8} \times 0.0156 = 9.75 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m/A}$$

- การคำนวณหาค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B)
การคำนวณหาค่า B สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-7)

$$B_u = \frac{P_u}{P_c} \times B_c \quad (2-7)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2-7) จะได้ค่าคงที่ดังนี้

$$B_u = \frac{5}{8} \times 0.00589 = 3.681 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$$

- การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J)
การคำนวณหาค่า J สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-8)

$$J_u = \frac{P_u}{P_c} \times J_c \quad (2-8)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2-8) จะได้ค่าคงที่ดังนี้

$$J_u = \frac{5}{8} \times 8.2 \times 10^{-5} = 5.125 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ทั้งการหาค่าจากเอกสารข้อมูล การวัดค่า และการคำนวณเทียบเคียงสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย
วิทยานิพนธ์

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
พิกัดกำลังงาน	5	hp
พิกัดความเร็ว	2600	rpm
แรงดันอาร์เมเจอร์ (v_a)	48	V
กระแสอาร์เมเจอร์ (i_a)	105	A
แรงดันสนาม (v_f)	6	V
กระแสสนาม (i_f)	10	A
ค่าความต้านทานของวงจรรอาร์เมเจอร์ (R_a)	0.14	Ω
ค่าความต้านทานของวงจрсสนาม (R_f)	0.6	Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรอาร์เมเจอร์ (L_a)	0.244	mH
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจрсสนาม (L_f)	15.56	mH
ค่าคงที่ของมอเตอร์ (k)	9.75×10^{-3}	N · m/A
ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B)	3.681×10^{-3}	N · m · s/rad
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J)	5.125×10^{-5}	kg · m ²

2.2.3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้า จำเป็นต้องทราบบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณา เพื่อนำไปสู่การหาฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งการหาบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Rashid, 2004) จะพิจารณาจากสมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากสมการที่ (2-2) และ (2-4) โดยทำการแปลงสมการที่ (2-2) และ (2-4) ให้อยู่ในรูปโดเมนเอสโดยใช้การแปลงลาปลาซ พร้อมทั้งพิจารณาค่าเริ่มต้นต่าง ๆ เป็นศูนย์ แสดงได้ตามสมการที่ (2-9) และ (2-10) ดังนี้

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + k\omega(s) \quad (2-9)$$

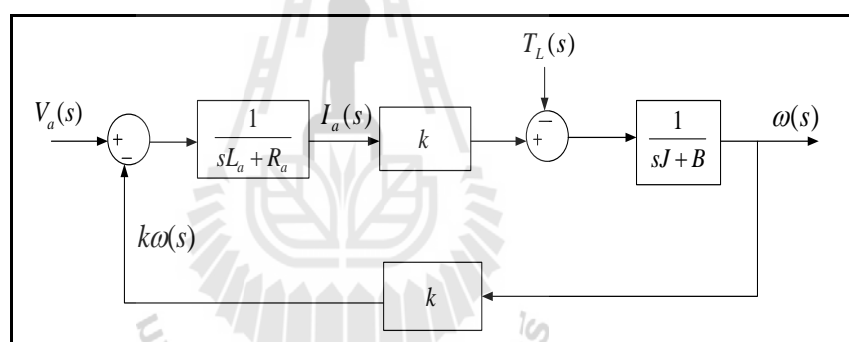
$$kI_a(s) = sJ\omega(s) + B\omega(s) + T_L(s) \quad (2-10)$$

จากสมการที่ (2-9) และ (2-10) เมื่อนำมาจัดรูปสมการใหม่ ให้อยู่ในรูปของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วเชิงมุม จะได้ดังสมการที่ (2-11) และ (2-12) ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - k\omega(s)}{sL_a + R_a} \quad (2-11)$$

$$\omega(s) = \frac{kI_a(s) - T_L(s)}{sJ + B} \quad (2-12)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการทางไฟฟ้าในสมการที่ (2-11) และสมการทางกลในสมการที่ (2-12) สามารถนำมาจัดรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์เมเจอร์และความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามแผนภาพบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

2.3 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อน และการวิเคราะห์เสถียรภาพ อีกทั้งยังเป็นพื้นฐานในการนำไปหาแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม นอกจากนี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ที่ได้จากเอกสารข้อมูล การวัดค่าพารามิเตอร์ และการคำนวณเทียบเคียง ซึ่งการทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าว เป็นสิ่งสำคัญที่จะใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนที่จะอธิบายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3

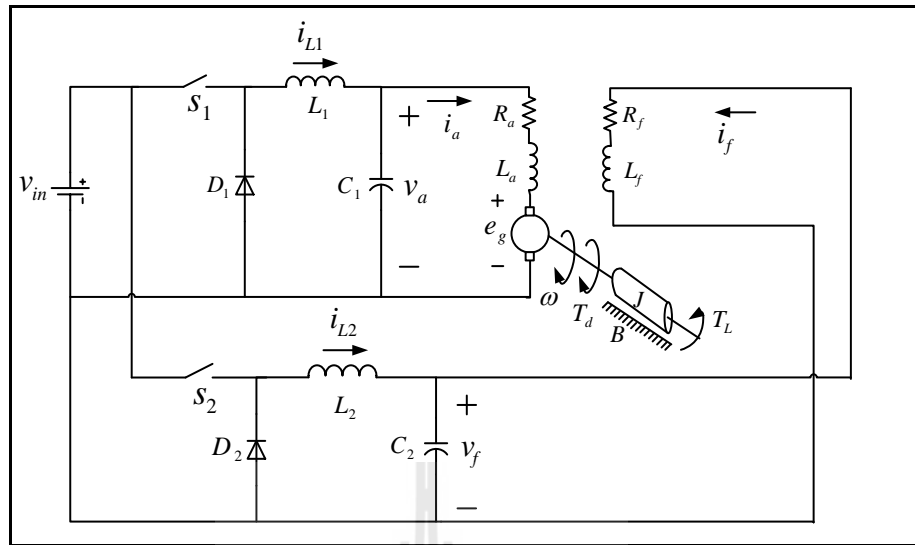
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า และการวิเคราะห์เสถียรภาพ

3.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า มีความสำคัญอย่างมากในการนำไปใช้จำลองสถานการณ์ของระบบ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการทำงานเบื้องต้นของระบบขับเคลื่อน และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของรถไฟฟ้าที่ย่านการทำงานต่าง ๆ ซึ่งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalize state-space averaging) (Mahdavi, Emadi, Bellar and Ehsani, 1997) เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อยและสามารถทำให้ระบบที่พิจารณาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การคำนวณในสถานะคงตัว และการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบักค์ 2 วงจร โดยวงจรแปลงผันแบบบักค์จะเชื่อมต่อกับวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรถ่านของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งระบบดังกล่าวนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าเป็นแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา เนื่องจากผลของการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรแปลงผันแบบบักค์ ทำให้ระบบที่พิจารณามีความยุ่งยากและซับซ้อนในการนำมาวิเคราะห์ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้นำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เนื่องจากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ถูกต้อง มีความซับซ้อนน้อยและเพื่อเป็นการขจัดผลของการสวิตช์ที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นกับเวลา



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในรูปที่ 3.1 โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเริ่มต้นจากการพิจารณาสัญญาณ $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ได้ตามสมการที่ (3-1)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (3-1)$$

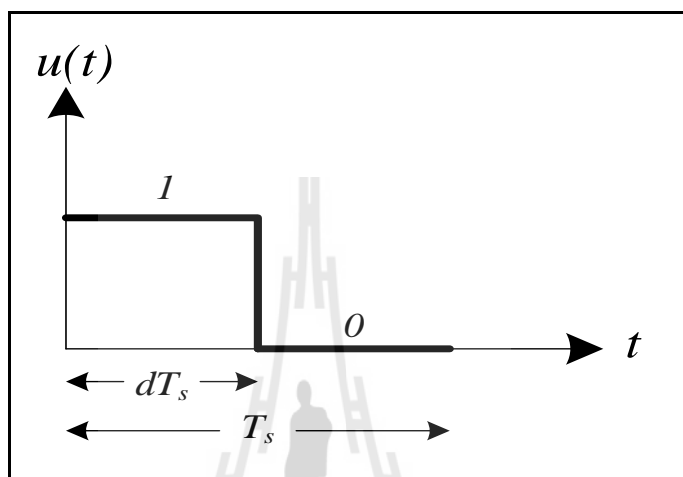
เมื่อ $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ และกำหนดให้ $\langle x \rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier coefficient) ซึ่งมีลักษณะดังสมการที่ (3-2) เมื่อ T คือ คาบทางเวลา k คือ ค่าอันดับ

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-2)$$

และจากสมการที่ (3-2) สามารถนำมาใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ตามสมการที่ (3-3)

$$\langle u \rangle_k = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-3)$$

ซึ่งฟังก์ชันการสวิตช์ของระบบที่พิจารณา มีลักษณะของรูปสัญญาณดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันการสวิตช์

จากรูปที่ 3.2 กำหนดให้มีเงื่อนไขของฟังก์ชันการสวิตช์ตามสมการที่ (3-4)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-4)$$

เมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขของฟังก์ชันการสวิตช์ข้างต้น สามารถนำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ตามสมการที่ (3-5)

$$\langle u \rangle_k = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-5)$$

โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ค่า $k = 0$ ซึ่งสื่อความหมายคือ ไม่พิจารณาการสั่นไหวของสัญญาณ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นการประมาณค่าอันดับศูนย์ (zero-order

approximation) ดังนั้น เมื่อแทนค่า $k = 0$ ในสมการที่ (3-5) จะได้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตช์ตามสมการที่ (3-6)

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3-6)$$

เมื่อ d คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของฟังก์ชันการสวิตช์ และกำหนดให้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตช์ทางด้านวงจรรีเลย์และวงจรถานคือ u_1 และ u_2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3-7) และ (3-8)

$$\langle u_1 \rangle_0 = d_1 \quad (3-7)$$

$$\langle u_2 \rangle_0 = d_2 \quad (3-8)$$

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เป็นการใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของตัวแปรสถานะของวงจรมาเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลของวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 พบว่าตัวแปรสถานะของวงจร คือ i_{L1} , v_a , i_a , ω , i_{L2} , v_f และ i_f และจากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.1 สามารถหาสมการอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะโดยใช้กฎแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ได้ดังนี้

วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ต่อทางด้านวงจรรีเลย์

การหาสมการอนุพันธ์ของ i_{L1} ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ตามรูปที่ 3.1 จะใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ดังสมการที่ (3-9) จากสมการดังกล่าวแทนค่า $v_{L1} = L_1 \dot{i}_{L1}$ จะได้ดังสมการที่ (3-10) และจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่จะได้สมการอนุพันธ์ของ i_{L1} ดังสมการที่ (3-11)

$$+ v_{L1} + v_a - v_{in} u(t) = 0 \quad (3-9)$$

$$L_1 \dot{i}_{L1} + v_a - v_{in} u(t) = 0 \quad (3-10)$$

$$\dot{i}_{L1} = -\frac{1}{L_1} v_a + \frac{1}{L_1} v_{in} u(t) \quad (3-11)$$

การหาสมการอนุพันธ์ของ \dot{v}_a ในวงจรแปลงผันแบบบักก์จะใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ดังสมการที่ (3-12) จากสมการดังกล่าวแทนค่า $i_{C1} = C_1 \dot{v}_a$ จะได้ดังสมการที่ (3-13) และจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่จะได้สมการอนุพันธ์ของ \dot{v}_a ดังสมการที่ (3-14)

$$+i_{L1} - i_{C1} - i_a = 0 \quad (3-12)$$

$$+i_{L1} - C_1 \dot{v}_a - i_a = 0 \quad (3-13)$$

$$\dot{v}_a = \frac{1}{C_1} i_{L1} - \frac{1}{C_1} i_a \quad (3-14)$$

ในส่วนของการหาสมการอนุพันธ์ i_a จะพิจารณาทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ที่ต่ออยู่กับวงจรแปลงผันแบบบักก์ โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ได้ดังสมการที่ (3-15) จากสมการดังกล่าวแทนค่า $v_{R_a} = i_a R_a$, $v_{L_a} = L_a \dot{i}_a$ และ $e_g = k i_f \omega$ จะได้ดังสมการที่ (3-16) และจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่จะได้สมการอนุพันธ์ของ i_a ดังสมการที่ (3-17)

$$+v_{R_a} + v_{L_a} + e_g - v_a = 0 \quad (3-15)$$

$$i_a R_a + L_a \dot{i}_a + k i_f \omega - v_a = 0 \quad (3-16)$$

$$\dot{i}_a = \frac{1}{L_a} v_a - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{k i_f}{L_a} \omega \quad (3-17)$$

สมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การหาสมการอนุพันธ์ $\dot{\omega}$ จะพิจารณาจากสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ได้มีการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 ดังสมการที่ (3-18) จากสมการดังกล่าวแทนค่า $T_d = k i_f i_a$ และ $J \frac{d\omega}{dt} = J \dot{\omega}$ จะได้ดังสมการที่ (3-19) และจัดเทอมสมการใหม่จะได้สมการอนุพันธ์ของ $\dot{\omega}$ ดังสมการที่ (3-20)

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (3-18)$$

$$ki_f i_a = J\dot{\omega} + B\omega + T_L \quad (3-19)$$

$$\dot{\omega} = \frac{ki_f}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L \quad (3-20)$$

วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ต่อทางด้านวงจรสนาม

การหาสมการอนุพันธ์ของ i_{L_2} ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ตามรูปที่ 3.1 จะใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ได้ดังสมการที่ (3-21) จากสมการดังกล่าวแทนค่า $v_{L_2} = L_2 \dot{i}_{L_2}$ จะได้ดังสมการที่ (3-22) และจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่จะได้สมการอนุพันธ์ของ i_{L_2} ดังสมการที่ (3-23)

$$+v_{L_2} + v_f - v_{in} u(t) = 0 \quad (3-21)$$

$$L_2 \dot{i}_{L_2} + v_f - v_{in} u(t) = 0 \quad (3-22)$$

$$\dot{i}_{L_2} = -\frac{1}{L_2} v_f + \frac{1}{L_2} v_{in} u(t) \quad (3-23)$$

การหาสมการอนุพันธ์ของ \dot{v}_f ในวงจรแปลงผันแบบบักก์โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้อสมการที่ (3-24) จากสมการดังกล่าวแทนค่า $i_{C_2} = C_2 \dot{v}_f$ จะได้อสมการที่ (3-25) และจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่จะได้สมการอนุพันธ์ของ \dot{v}_f ดังสมการที่ (3-26)

$$+i_{L_2} - i_{C_2} - i_f = 0 \quad (3-24)$$

$$+i_{L_2} - C_2 \dot{v}_f - i_f = 0 \quad (3-25)$$

$$\dot{v}_f = \frac{1}{C_2} i_{L_2} - \frac{1}{C_2} i_f \quad (3-26)$$

การหาสมการอนุพันธ์ i_f จะพิจารณาทางด้านวงจรสนามที่ต่ออยู่กับวงจรแปลงผันแบบบักก์ โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ได้ดังสมการที่ (3-27) จากสมการดังกล่าวแทนค่า

$v_{R_f} = i_f R_f$ และ $v_{L_f} = L_f \dot{i}_f$ จะได้ตั้งสมการที่ (3-28) และจัดเทอมสมการดังกล่าวใหม่จะได้สมการอนุพันธ์ของ i_a ตั้งสมการที่ (3-29)

$$+v_{R_f} + v_{L_f} - v_f = 0 \quad (3-27)$$

$$i_f R_f + L_f \dot{i}_f - v_f = 0 \quad (3-28)$$

$$\dot{i}_f = \frac{1}{L_f} v_f - \frac{R_f}{L_f} i_f \quad (3-29)$$

การหาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะพิจารณาจากคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนตามสมการที่ (3-30)

$$\frac{d\langle x \rangle_k}{dt} = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \quad (3-30)$$

ดังนั้นในการทำให้ตัวแปรสถานะของวงจร คือ i_{L1} , v_a , i_a , ω , i_{L2} , v_f และ i_f เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะใช้คุณสมบัติของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ตามสมการที่ (3-30) และข้อกำหนดที่ไม่พิจารณาการสั้นไปของสัญญาณ โดยการแทนค่า $k=0$ ในสมการที่ (3-30) จะได้ $i_{L1} = \langle i_{L1} \rangle_0 = x_1$, $v_a = \langle v_a \rangle_0 = x_2$, $i_a = \langle i_a \rangle_0 = x_3$, $\omega = \langle \omega \rangle_0 = x_4$, $i_{L2} = \langle i_{L2} \rangle_0 = x_5$, $v_f = \langle v_f \rangle_0 = x_6$ และ $i_f = \langle i_f \rangle_0 = x_7$ โดยที่ค่า x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 และ x_7 เป็นตัวแปรสถานะของระบบที่พิจารณา และจากนั้นแทนตัวแปรสถานะของระบบที่พิจารณาลงในสมการอนุพันธ์ของแบบจำลองในสมการที่ (3-9) ถึง (3-29) จะได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองตามสมการที่ (3-31) ถึง (3-37) ดังนี้

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{L_1} x_2 + \frac{d_1}{L_1} \quad (3-31)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_1} x_1 - \frac{1}{C_1} x_3 \quad (3-32)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L_a} x_2 - \frac{R_a}{L_a} x_3 - \frac{k}{L_a} x_4 x_7 \quad (3-33)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{k}{J} x_3 x_7 - \frac{B}{J} x_4 - \frac{1}{J} T_L \quad (3-34)$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{1}{L_2} x_6 + \frac{d_2}{L_2} \quad (3-35)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_2} x_5 - \frac{1}{C_2} x_7 \quad (3-36)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{L_f} x_6 - \frac{R_f}{L_f} x_7 \quad (3-37)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-31) ถึง (3-37) พบว่าเป็นสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรืออาจเรียกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น โดยใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ที่พิจารณาเทอมแรกเท่านั้น ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณารอบจุดปฏิบัติการหรือจุดการทำงานของระบบได้ตามสมการที่ (3-38) และ (3-39) ตามลำดับ

$$\dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \quad (3-38)$$

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \quad (3-39)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อกำหนดให้ } \delta \mathbf{x} &= [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3 \ \delta x_4 \ \delta x_5 \ \delta x_6 \ \delta x_7]^T \\ \delta \mathbf{u} &= [\delta v_{in} \ \delta T_L]^T \\ \delta \mathbf{y} &= [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3 \ \delta x_4 \ \delta x_5 \ \delta x_6 \ \delta x_7] \end{aligned}$$

สำหรับเมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ เป็นตามสมการที่ (3-40) ถึง (3-43) ตามลำดับ

$$A(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & \frac{-1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} & \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-(ki_{fo})}{L_a} & 0 & 0 & \frac{-(k\omega_o)}{L_a} \\ 0 & 0 & \frac{(ki_{fo})}{J} & \frac{-B}{J} & 0 & 0 & \frac{(ki_{ao})}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_f} & \frac{-R_f}{L_f} \end{bmatrix} \quad (3-40)$$

$$B(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} \frac{d_1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J} \\ \frac{d_2}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

$$C(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

$$D(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-43)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในสมการที่ (3-38) ถึง (3-43) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของระบบที่พิจารณา โดยสามารถกำหนดค่าที่จุดการทำงานใด ๆ ได้ที่ตัวแปร T_L และ ω ซึ่งมีการคำนวณตามสมการที่ (3-44) ถึง (3-49) (Rashid, 2004) โดยที่ค่า Δi_{Lo} คือ ค่ากระแสพลั่วของวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่จุดการทำงานที่พิจารณา i_{Co} คือ ค่ากระแสของตัวเก็บประจุที่จุดการทำงานที่พิจารณา i_{Lo} คือ ค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำที่จุดการทำงานที่พิจารณา i_{ao} คือ ค่ากระแสของวงจรอาร์เมเจอร์ที่จุดการทำงานที่พิจารณา i_{fo} คือ ค่ากระแสของวงจรสนามที่จุดการทำงานที่พิจารณา และ ω_o คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่จุดการทำงานที่พิจารณา

$$\Delta i_{Lo} = \frac{(V_s - V_a)}{L} dT_s = \frac{(T_s - dT_s)}{L} V_a \quad (3-44)$$

$$i_{Co} = \frac{\Delta i_{Lo}}{4} \quad (3-45)$$

$$i_{Lo} = i_{Co} + i_{ao} \quad (3-46)$$

$$i_{ao} = \frac{V_a - \omega(ki_{fo})}{R_a} \quad (3-47)$$

$$i_{fo} = \frac{V_f}{R_f} \quad (3-48)$$

$$\omega_o = \frac{V_a ki_{fo} - R_a T_L}{(ki_{fo})^2 + R_a B} \quad (3-49)$$

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องก่อนที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ หรือนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของระบบ ดังนั้น จึงได้นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-38) ถึง (3-43) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในรูปแบบที่ 3.1 การตรวจสอบความถูกต้องจะดำเนินการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริง (Exact topology model) โดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB ซึ่งการจำลองสถานการณ์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามตารางที่ 3.1 ซึ่งได้มีการอธิบายรายละเอียดของค่าต่าง ๆ ไว้แล้วในบทที่ 2 โดยการจำลองสถานการณ์ได้กำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าออกเป็น 4 จุดการทำงานดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
ค่าความต้านทานของวงจรรอาร์เมเจอร์ (R_a)	0.14	Ω
ค่าความต้านทานของวงจрсนาม (R_f)	0.6	Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรอาร์เมเจอร์ (L_a)	0.244	mH
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจрсนาม (L_f)	15.56	mH
ค่าคงที่ของมอเตอร์ (k)	9.75×10^{-3}	N · m/A
ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B)	3.681×10^{-3}	N · m · s/rad
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J)	5.125×10^{-5}	kg · m ²

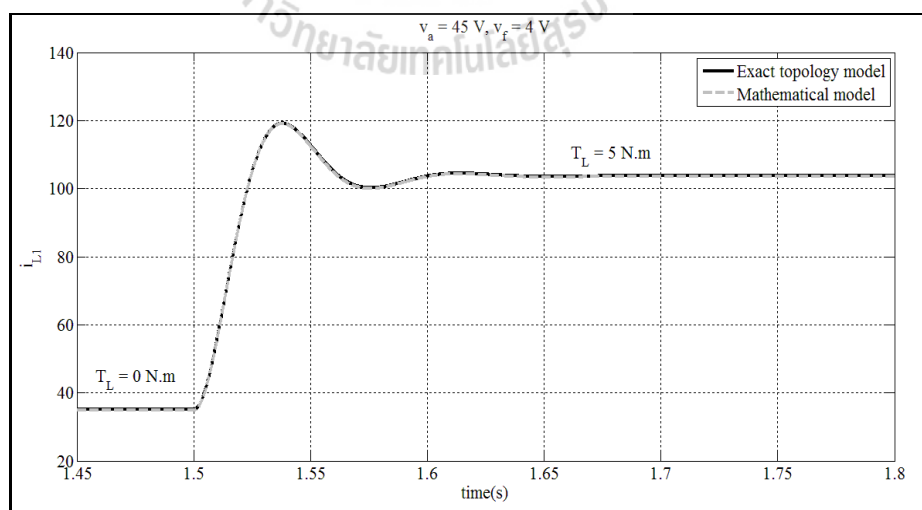
จุดการทำงานที่ 1

การจำลองสถานการณ์ของจุดการทำงานที่ 1 กำหนดเงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์ดังนี้ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรรอาร์เมเจอร์เท่ากับ 45 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจрсนามเท่ากับ 4 V และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 0 N.m เป็น 5 N.m ที่เวลา 1.5 วินาที และค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัทคัมมีค่าตามตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

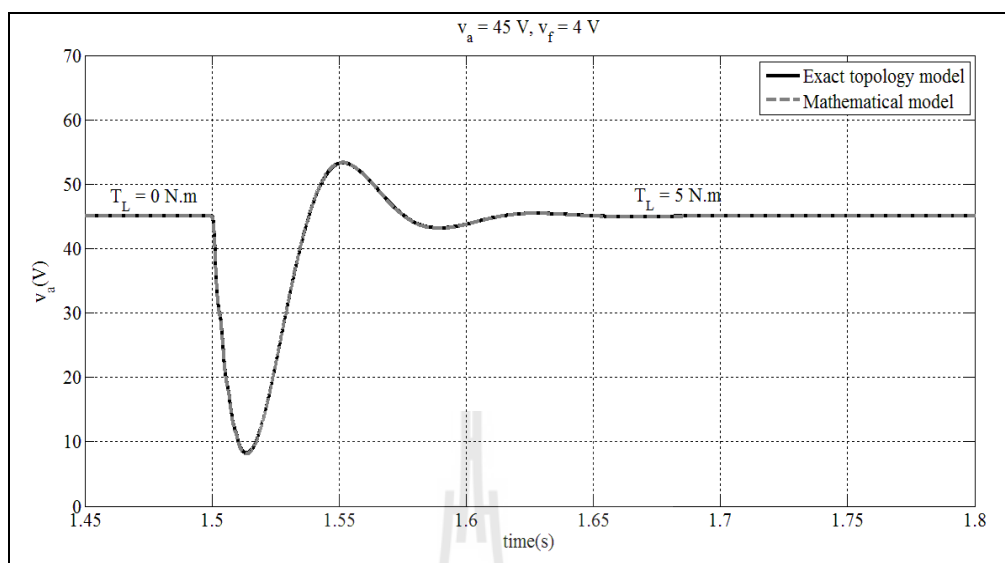
พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_1)	10	mH
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_2)	10	mH
ค่าตัวเก็บประจุ (C_1)	1000	μ F
ค่าตัวเก็บประจุ (C_2)	1000	μ F

จากเงื่อนไขในการกำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าข้างต้น สามารถคำนวณหาค่าจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (3-44) ถึง (3-49) ดังนี้ คือ ที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 0 N.m จะได้ค่า $\Delta i_{Lo} = 0.032$ A, $i_{Co} = 0.08$ A, $i_{Lo} = 34.961$ A, $i_{ao} = 34.953$ A, $i_{fo} = 6.67$ A และ $\omega_o = 616.714$ rad/sec และที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 5 N.m จะได้ค่า $\Delta i_{Lo} = 0.032$ A, $i_{Co} = 0.08$ A, $i_{Lo} = 103.496$ A, $i_{ao} = 103.488$ A, $i_{fo} = 6.67$ A และ $\omega_o = 469.174$ rad/sec ดังนั้น เมื่อนำผลการคำนวณดังกล่าวไปจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นผลของการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเมื่อนำผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริงโดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.9 ดังนี้

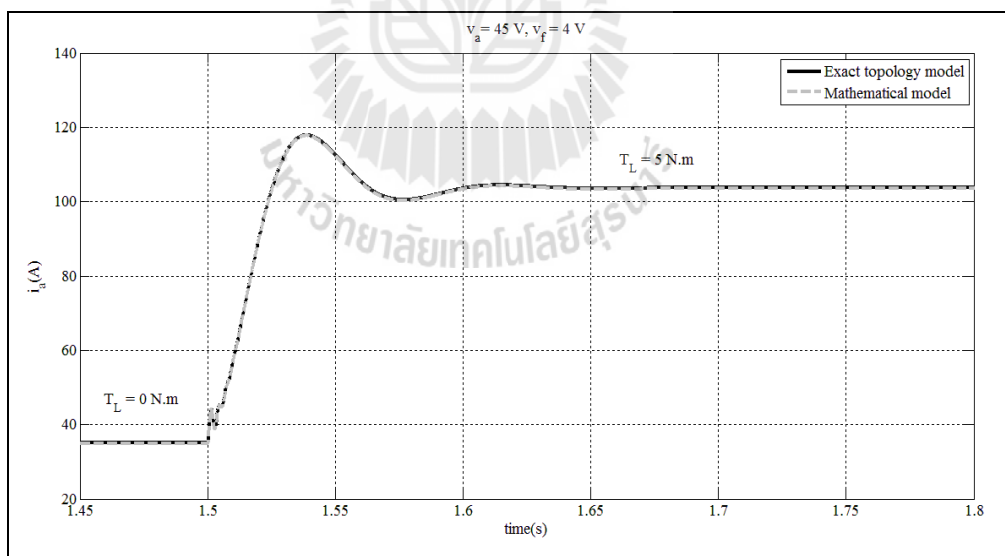


รูปที่ 3.3 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์

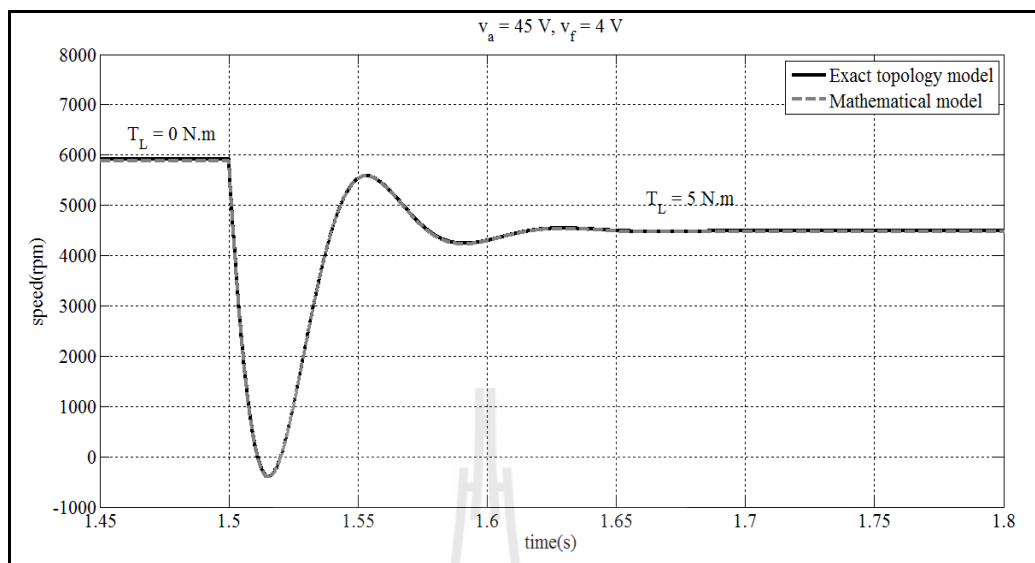
กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m



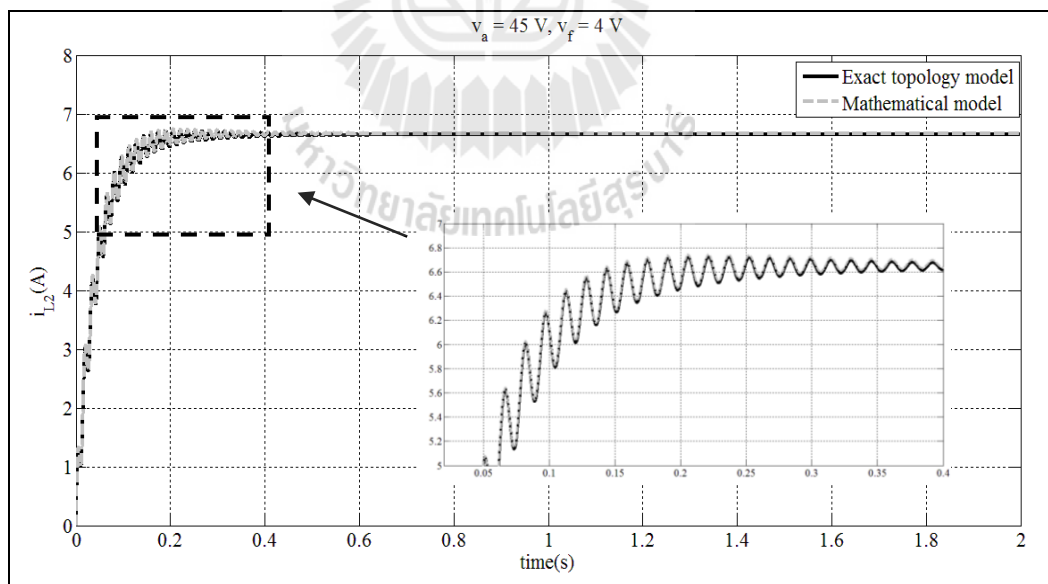
รูปที่ 3.4 ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m



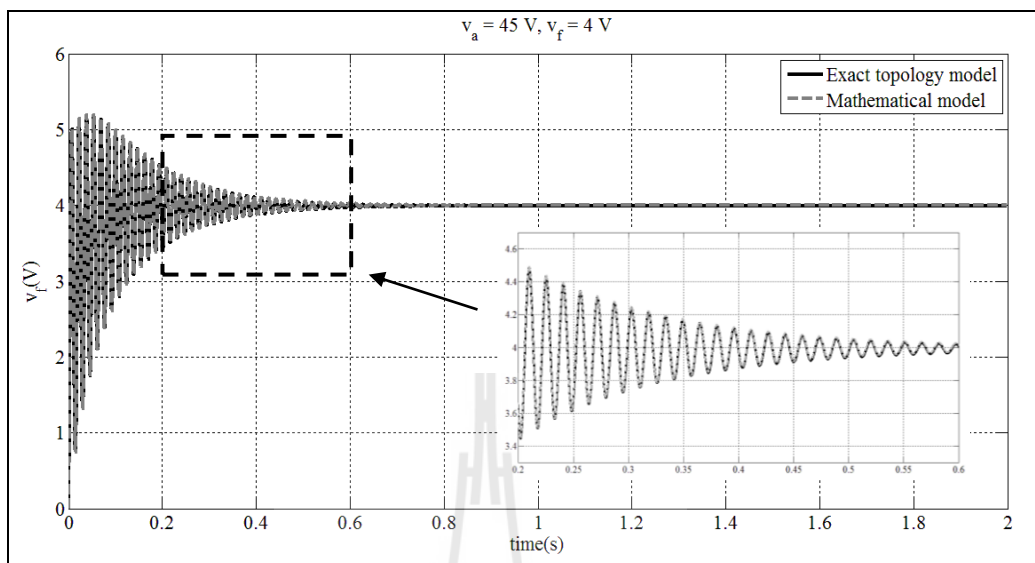
รูปที่ 3.5 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m



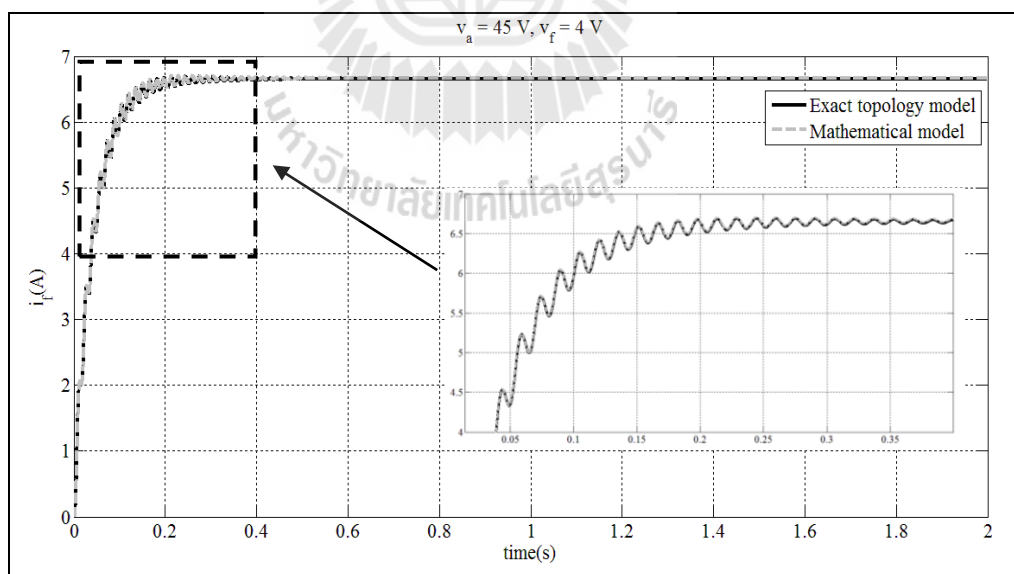
รูปที่ 3.6 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m



รูปที่ 3.7 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรสนาม กรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m



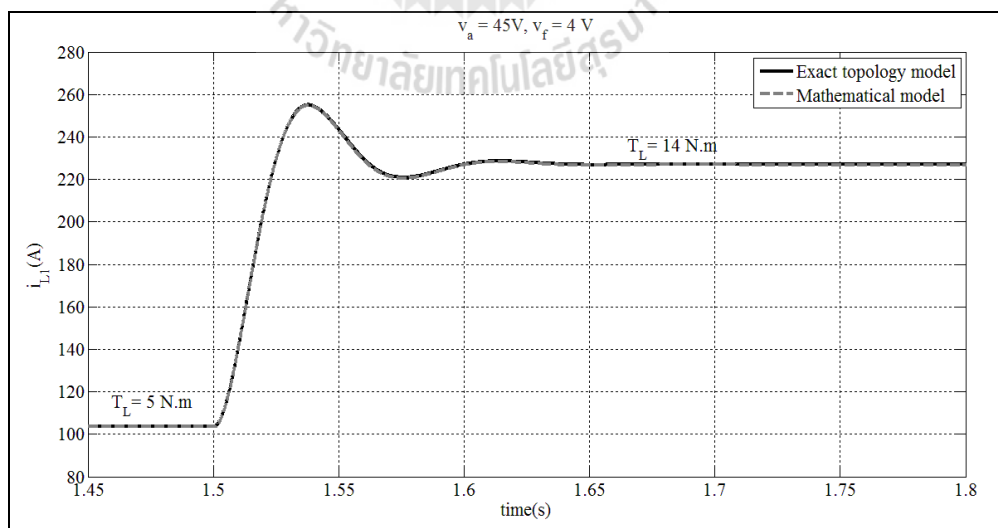
รูปที่ 3.8 ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m



รูปที่ 3.9 ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 5 N.m

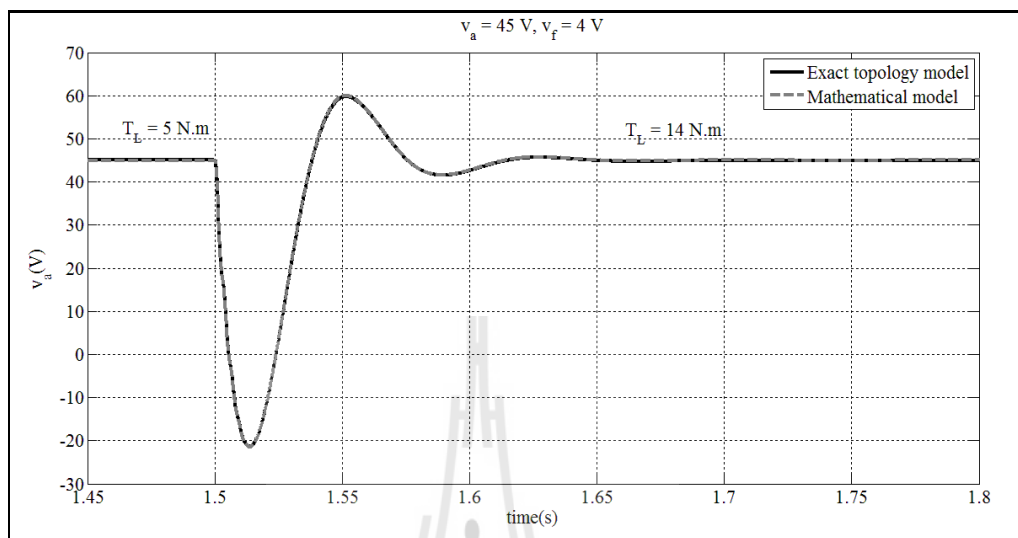
จุดการทำงานที่ 2

การจำลองสถานการณ์ของจุดการทำงานที่ 2 กำหนดเงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์ดังนี้ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรรีเลย์เท่ากับ 45 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรถานเท่ากับ 4 V และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 14 N.m ที่เวลา 1.5 วินาที และค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก็ใช้ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งจากเงื่อนไขในการกำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าข้างต้น สามารถคำนวณหาค่าจุดการทำงานของระบบเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (3-44) ถึง (3-49) ดังนี้ คือ ที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 5 N.m จะได้ค่า $\Delta i_{Lo} = 0.032$ A, $i_{Co} = 0.08$ A, $i_{Lo} = 103.496$ A, $i_{ao} = 103.488$ A, $i_{fo} = 6.67$ A และ $\omega_o = 469.174$ rad/sec และที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 14 N.m จะได้ค่า $\Delta i_{Lo} = 0.032$ A, $i_{Co} = 0.08$ A, $i_{Lo} = 226.818$ A, $i_{ao} = 226.81$ A, $i_{fo} = 6.67$ A และ $\omega_o = 203.69$ rad/sec ดังนั้น เมื่อนำผลการคำนวณดังกล่าวไปจำลองสถานการณ์ซึ่งผลที่ได้จะเป็นผลของการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเมื่อนำผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริง โดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.16 ดังนี้

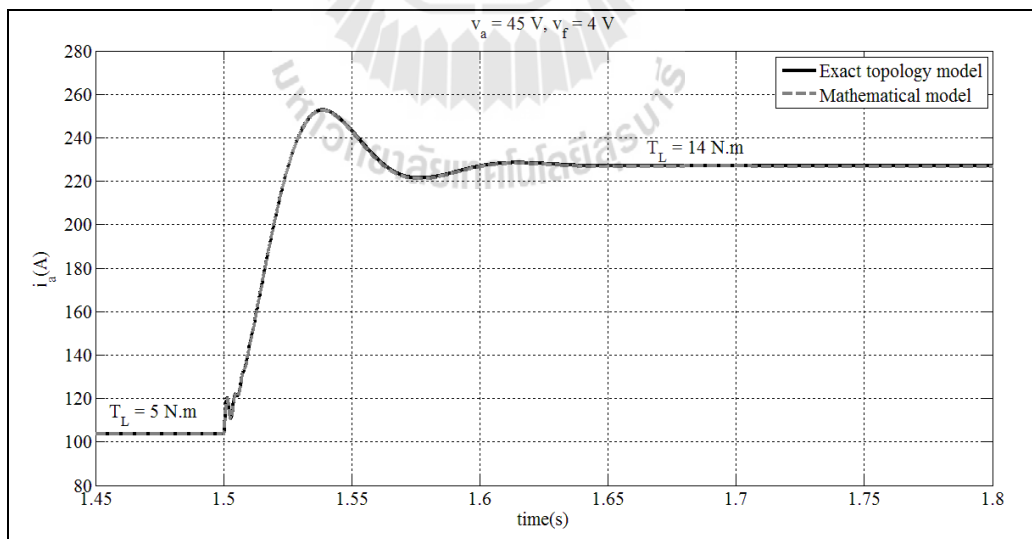


รูปที่ 3.10 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรรีเลย์

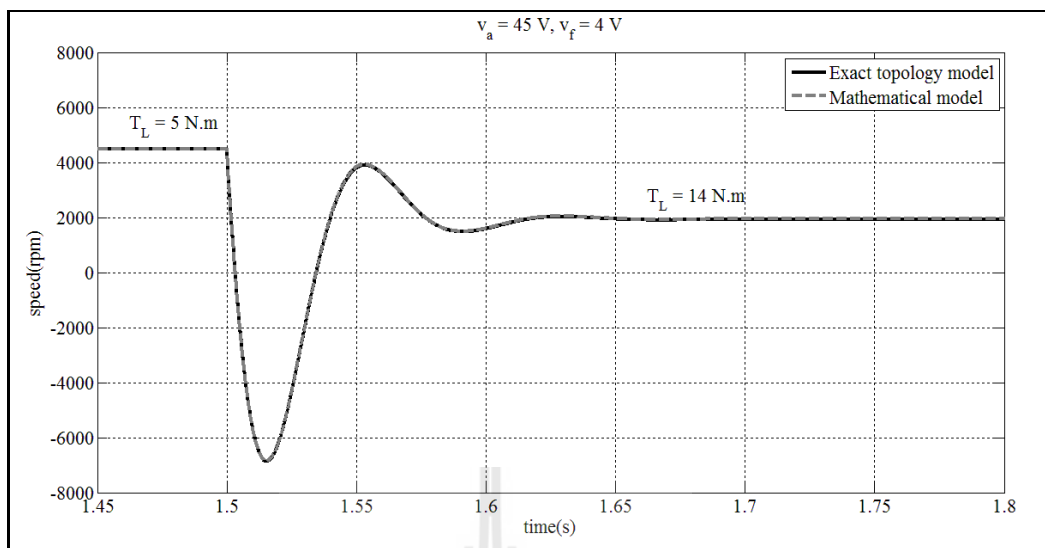
กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m



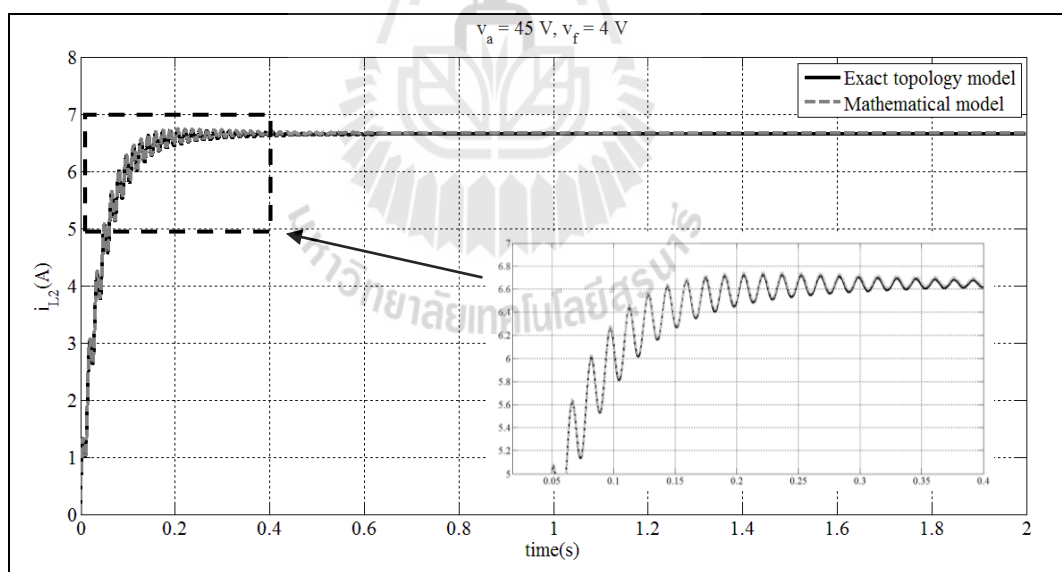
รูปที่ 3.11 ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m



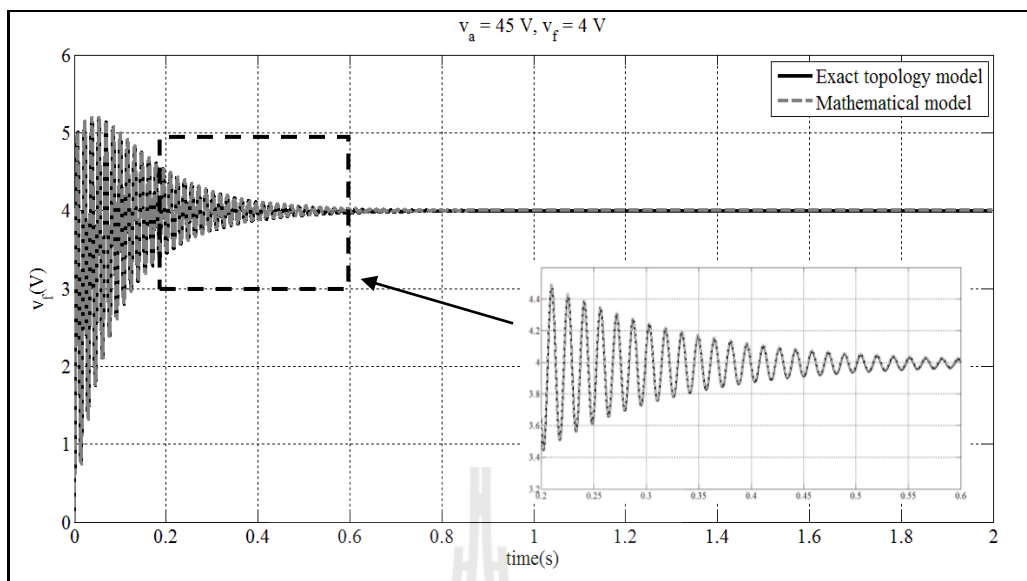
รูปที่ 3.12 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m



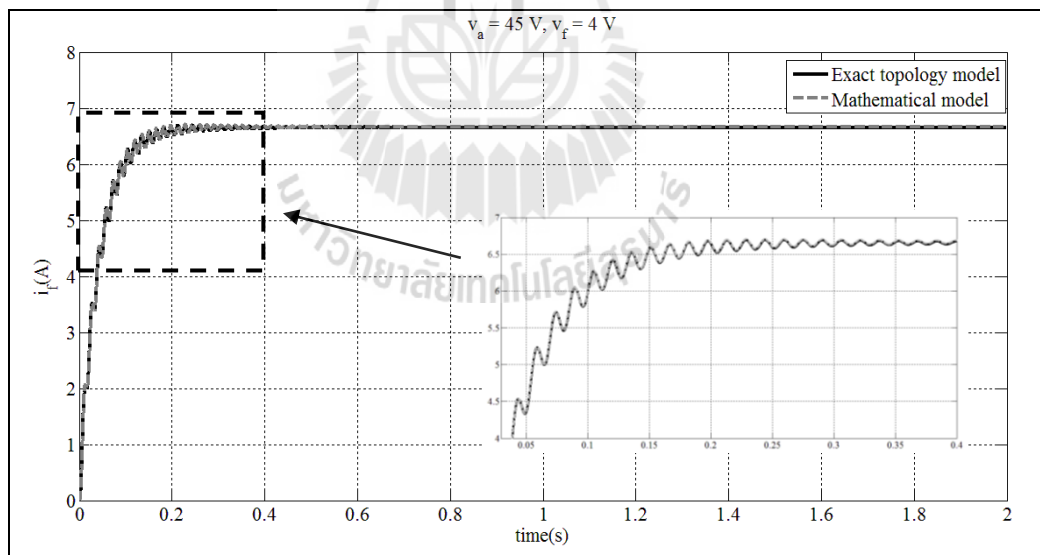
รูปที่ 3.13 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m



รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรสนามกรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m



รูปที่ 3.15 ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m



รูปที่ 3.16 ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 14 N.m

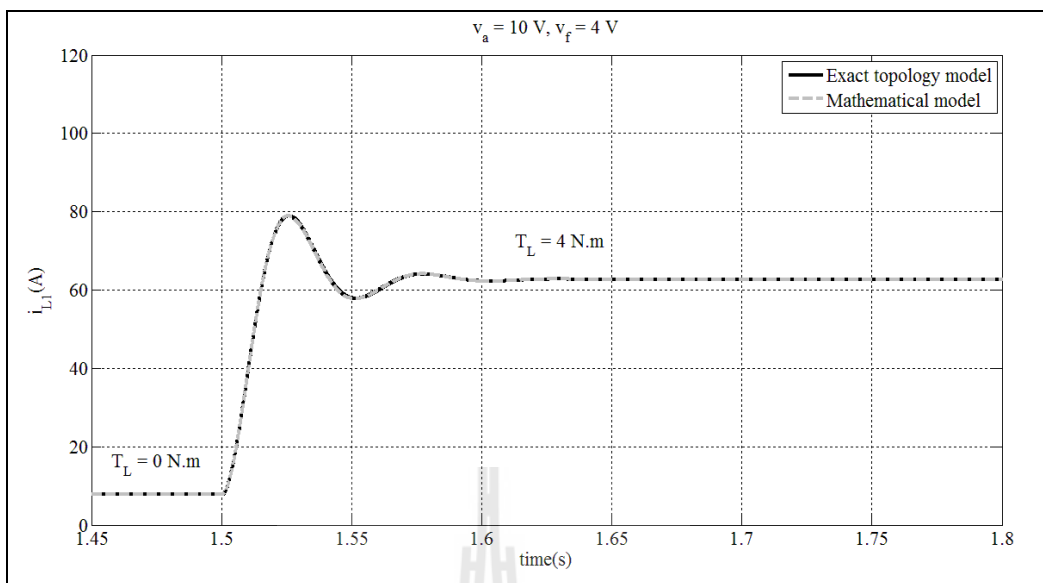
จุดการทำงานที่ 3

การจำลองสถานการณ์ของจุดการทำงานที่ 3 กำหนดเงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์ดังนี้ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรรีเลย์เท่ากับ 10 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรถนอมเท่ากับ 4 V และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดจาก 0 N.m เป็น 4 N.m ที่เวลา 1.5 วินาที และค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าตามตารางที่ 3.3 ดังนี้

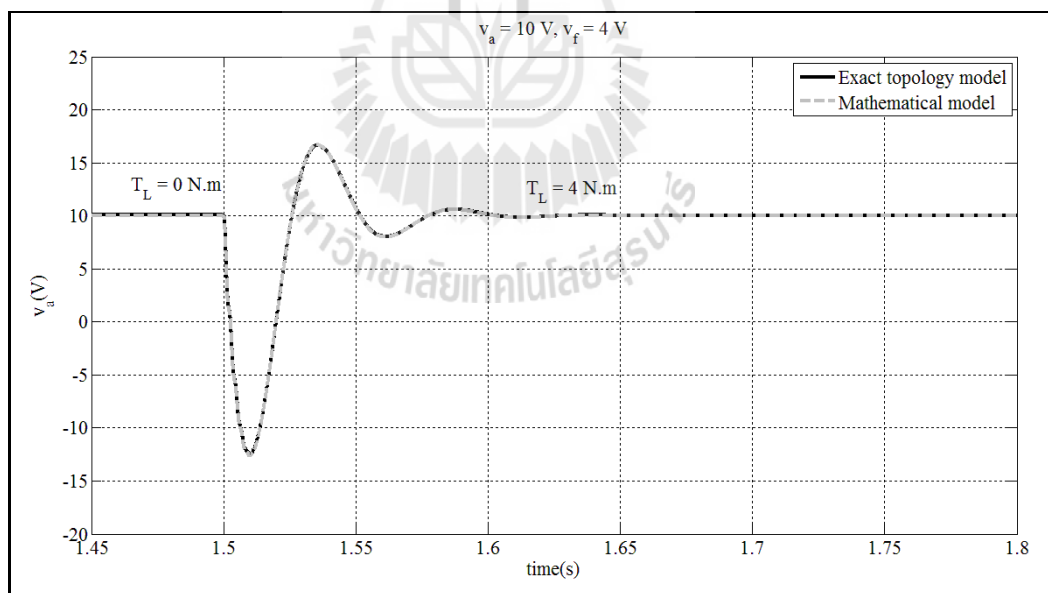
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_1)	5	mH
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_2)	5	mH
ค่าตัวเก็บประจุ (C_1)	500	μ F
ค่าตัวเก็บประจุ (C_2)	500	μ F

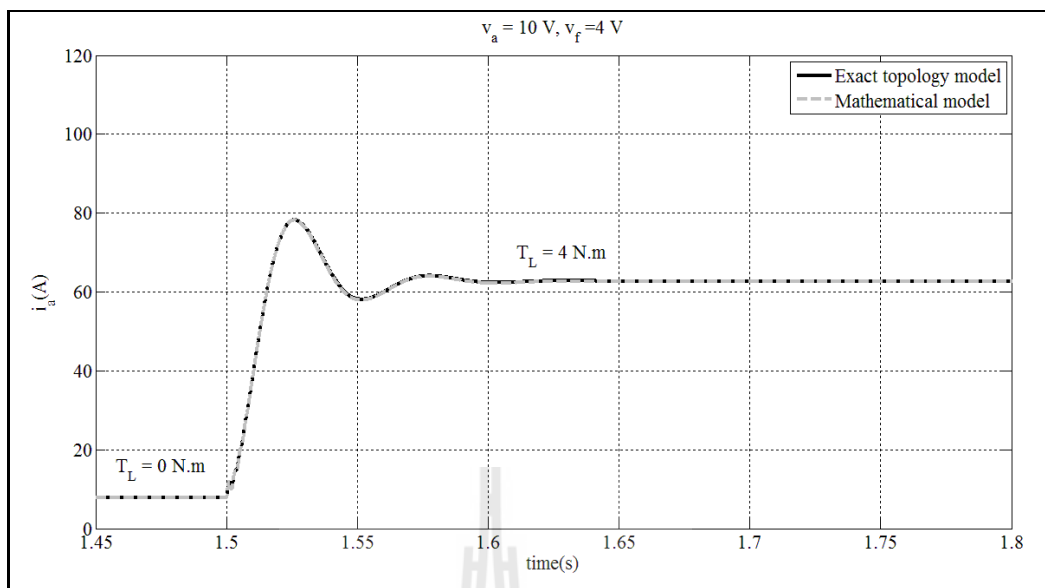
จากเงื่อนไขในการกำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าข้างต้น สามารถคำนวณหาค่าจุดการทำงานของระบบเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (3-44) ถึง (3-49) ดังนี้ คือ ที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิด โหลดเท่ากับ 0 N.m จะได้ว่า $\Delta i_{Lo} = 0.2526$ A, $i_{Co} = 0.0631$ A, $i_{Lo} = 7.821$ A, $i_{ao} = 7.758$ A, $i_{fo} = 6.67$ A และ $\omega_o = 137.067$ rad/sec และที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิด โหลดเท่ากับ 4 N.m จะได้ว่า $\Delta i_{Lo} = 0.2526$ A, $i_{Co} = 0.0631$ A, $i_{Lo} = 62.6431$ A, $i_{ao} = 62.58$ A, $i_{fo} = 6.67$ A และ $\omega_o = 19.037$ rad/sec ดังนั้น เมื่อนำผลการคำนวณดังกล่าวไปจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นผลของการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเมื่อนำผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริง โดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.23 ดังนี้



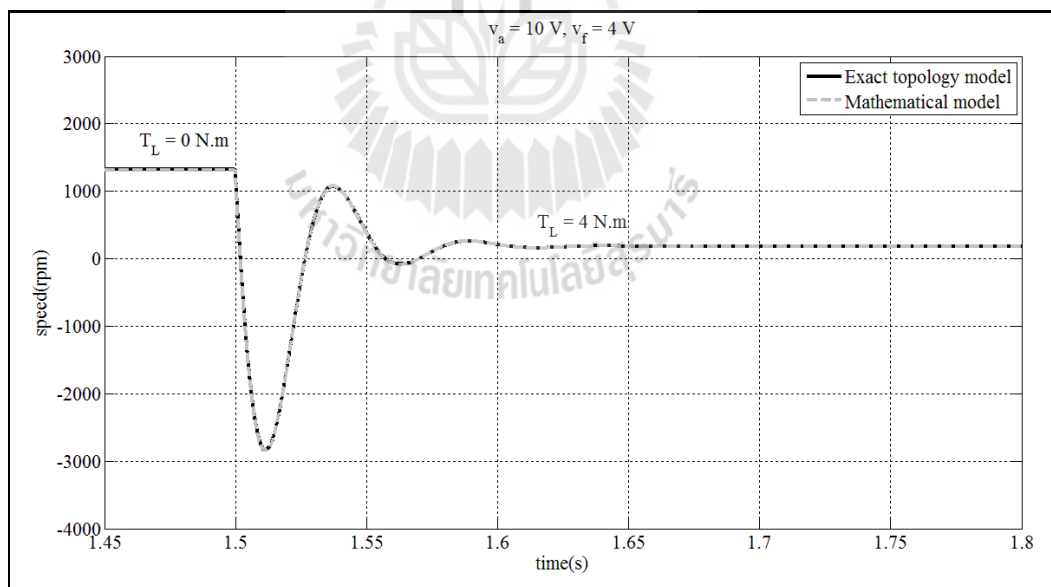
รูปที่ 3.17 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรรำเมเจอร์ กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m



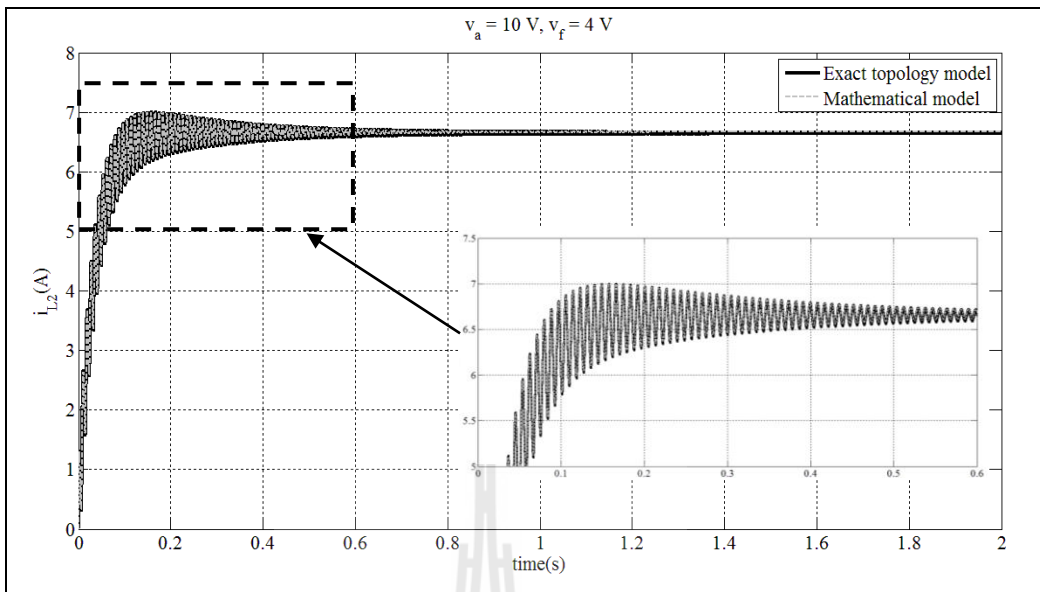
รูปที่ 3.18 ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m



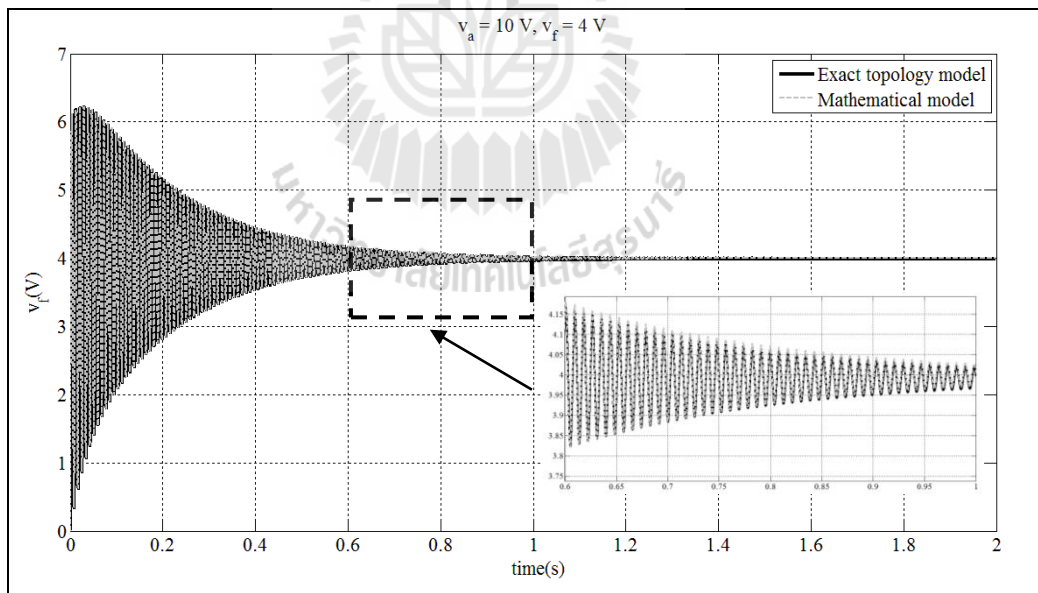
รูปที่ 3.19 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m



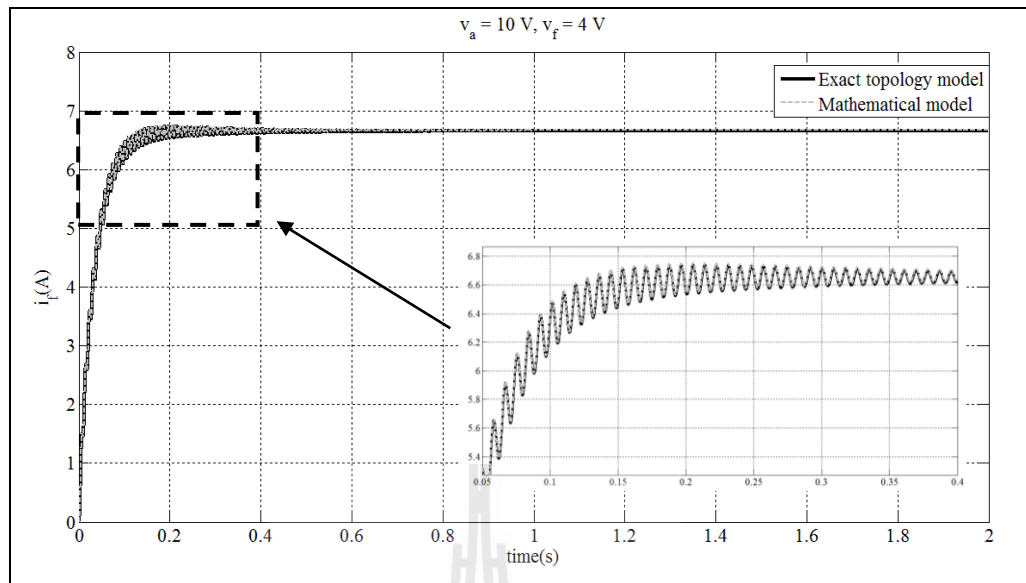
รูปที่ 3.20 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m



รูปที่ 3.21 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรสนาม
กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m



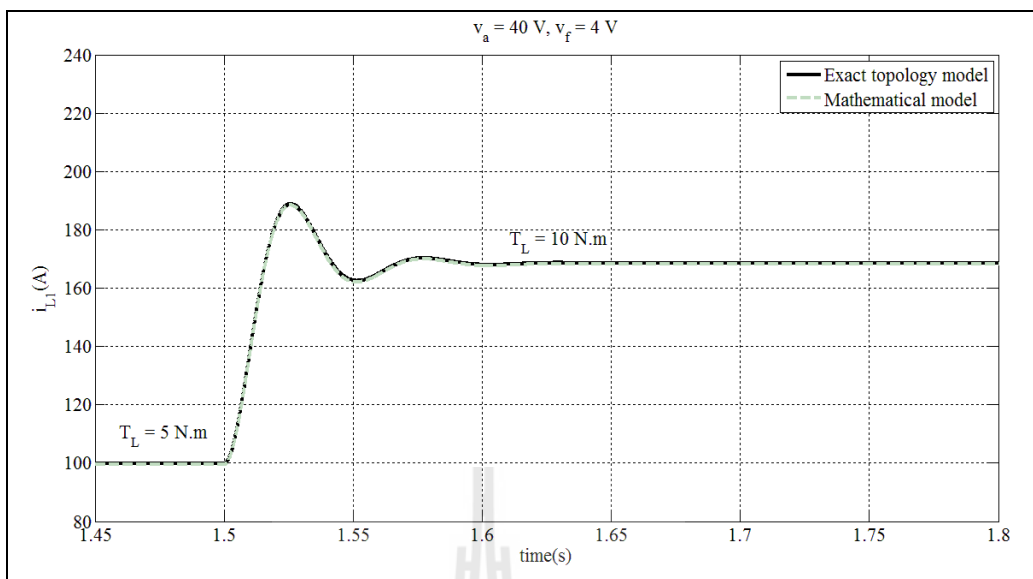
รูปที่ 3.22 ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก
0 N.m เป็น 4 N.m



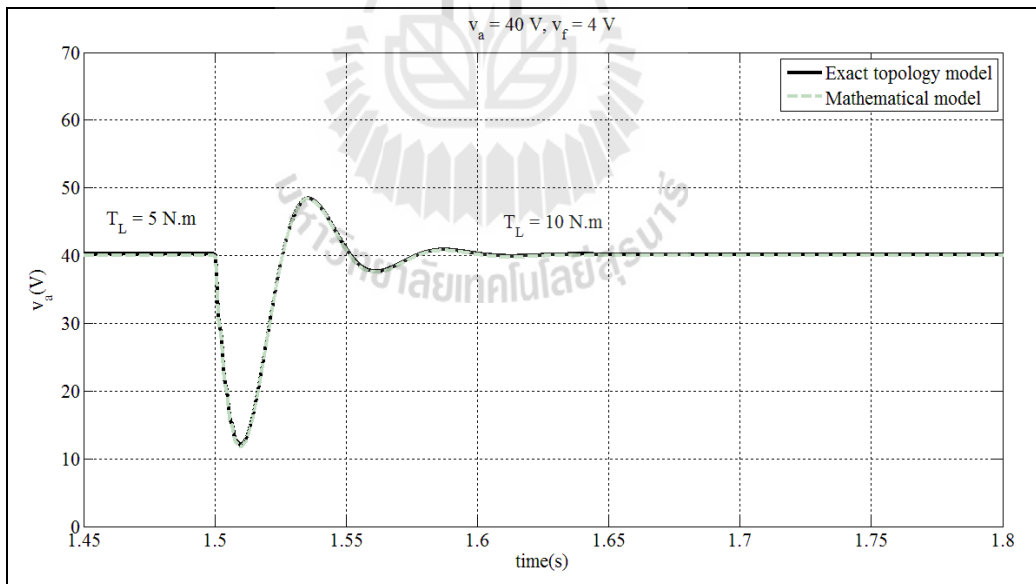
รูปที่ 3.23 ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m

จุดการทำงานที่ 4

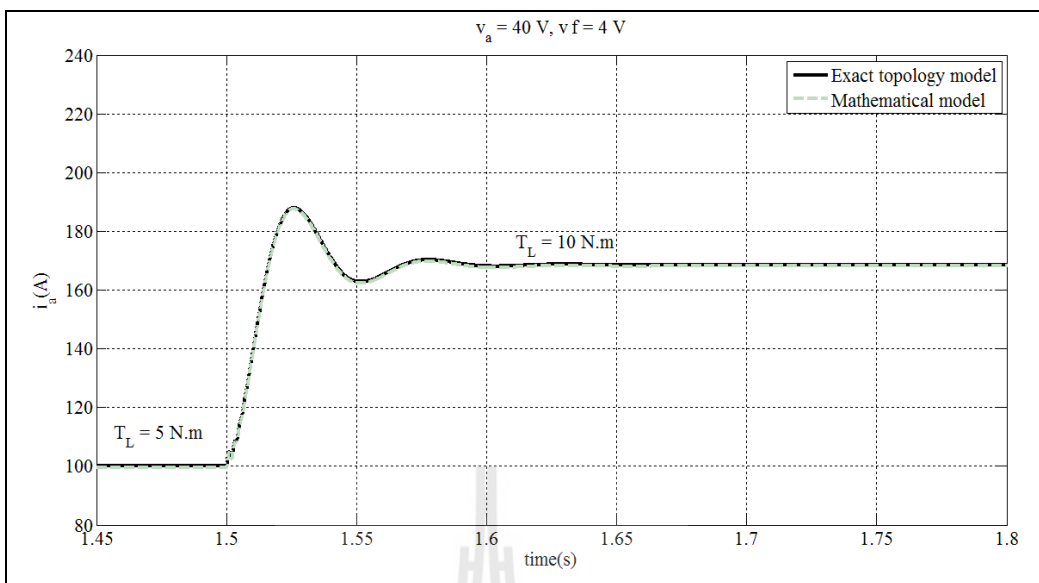
การจำลองสถานการณ์ของจุดการทำงานที่ 4 กำหนดเงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์นี้ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์เท่ากับ 40 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรสนามเท่ากับ 4 V และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 10 N.m ที่เวลา 1.5 วินาที และค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก็มิตค่าตามตารางที่ 3.3 จากเงื่อนไขในการกำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าข้างต้น สามารถคำนวณค่าจุดการทำงานของระบบเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (3-44) ถึง (3-49) ดังนี้ คือ ที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิด โหลดเท่ากับ 5 N.m จะ ได้ค่า $\Delta i_{L_o} = 0.192$ A, $i_{C_o} = 0.048$ A, $i_{L_o} = 99.615$ A, $i_{a_o} = 99.567$ A, $i_{f_o} = 6.67$ A และ $\omega_o = 400.732$ rad/sec และที่จุดการทำงานที่ค่าแรงบิด โหลดเท่ากับ 10 N.m จะ ได้ค่า $\Delta i_{L_o} = 0.192$ A, $i_{C_o} = 0.048$ A, $i_{L_o} = 168.148$ A, $i_{a_o} = 168.1$ A, $i_{f_o} = 6.67$ A และ $\omega_o = 253.195$ rad/sec ดังนั้น เมื่อนำผลการคำนวณดังกล่าวไปจำลองสถานการณ์ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นผลของการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเมื่อนำผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริง โดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ถึงรูปที่ 3.30 ดังนี้



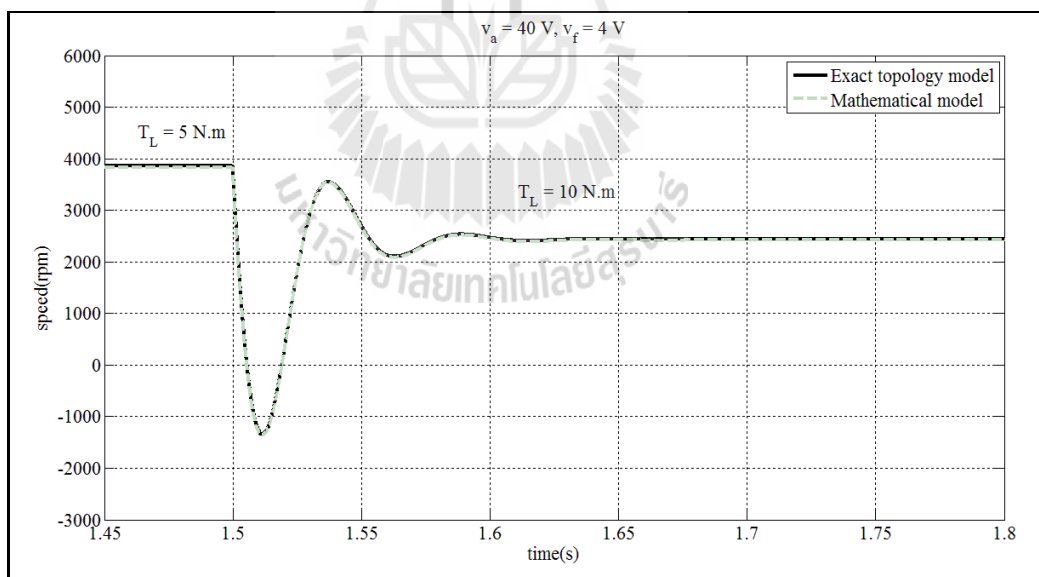
รูปที่ 3.24 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรรีเมเจอร์
กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m



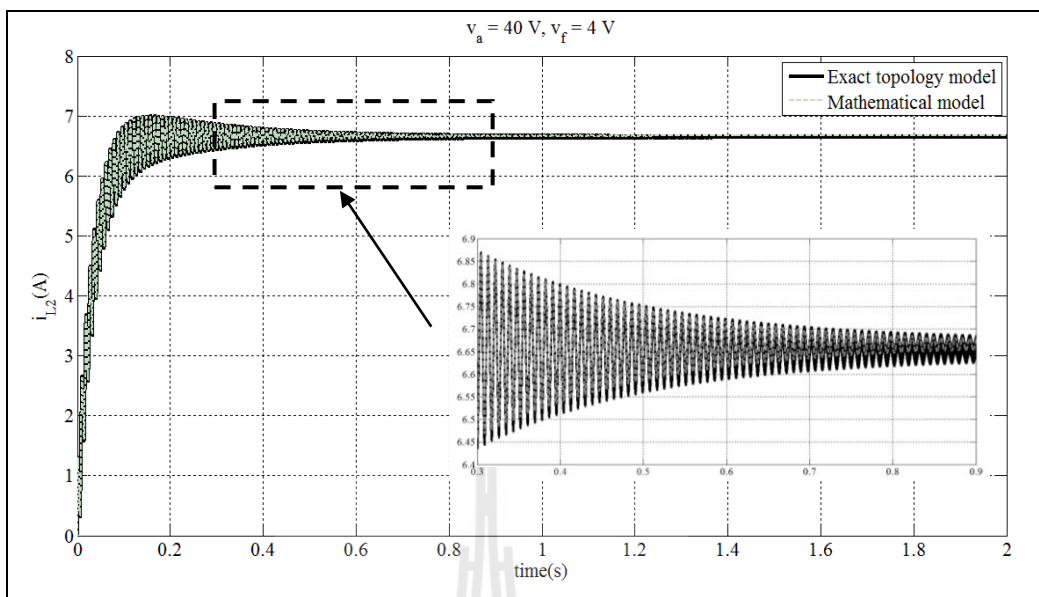
รูปที่ 3.25 ผลการตอบสนองของแรงดันอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก
5 N.m เป็น 10 N.m



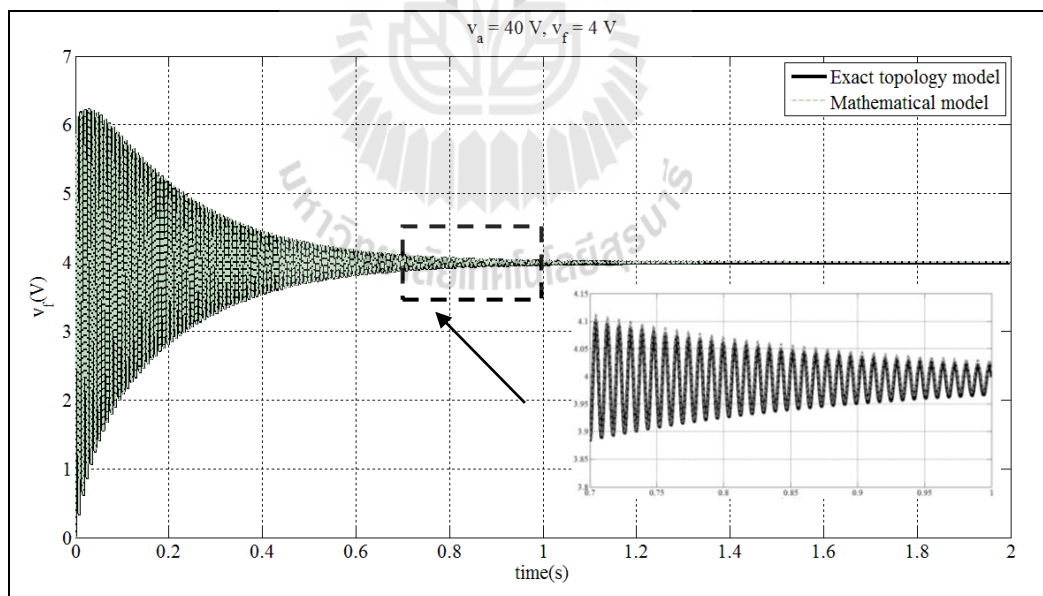
รูปที่ 3.26 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์กรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m



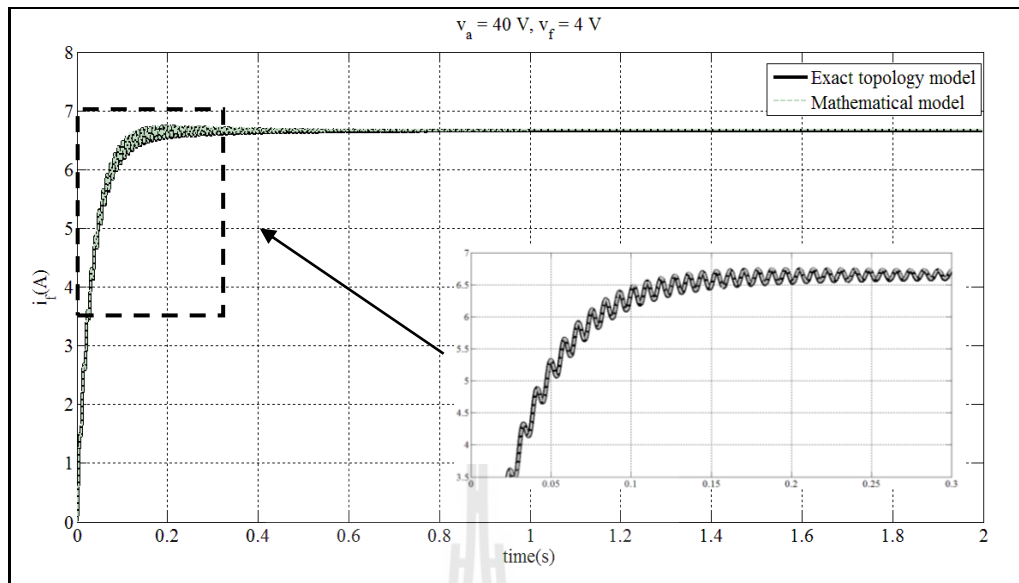
รูปที่ 3.27 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m



รูปที่ 3.28 ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำทางด้านวงจรสนามกรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m



รูปที่ 3.29 ผลการตอบสนองของแรงดันสนามกรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m



รูปที่ 3.30 ผลการตอบสนองของกระแสสนามกรณีแรงบิดโพลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 10 N.m

จากผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทั้ง 4 จุดการทำงานที่แสดงดังรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.30 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริง โดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB จะเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์นั้นมีความคล้ายคลึงกันทั้งสภาวะชั่วครู่และสถานะคงตัว แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ได้ดำเนินการหาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนั้นมีความถูกต้อง และสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของรถไฟฟ้าได้ ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในรูปแบบที่ 3.1 เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของรถไฟฟ้า เนื่องจากในการใช้งานรถไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงบิดที่โพลดของมอเตอร์ รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ของความเหนียวนำและตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันแบบบัสคัท ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้ ดังนั้น จึงได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อน

รถไฟฟ้าที่หาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอาศัยทฤษฎีค่าเฉพาะจริง (Areerak, Bozhko, Asher and Thomas, 2008) ที่คำนวณได้จากเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ตามสมการที่ (3-50)

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (3-50)$$

จากสมการดังกล่าวระบบจะยังคงมีเสถียรภาพถ้าค่าเฉพาะจริงเป็นไปตามสมการที่ (3-51)

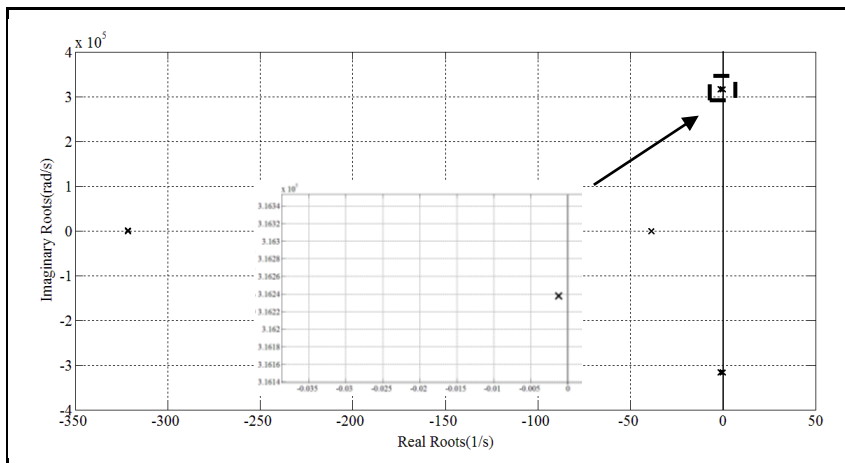
$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (3-51)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ($n =$ จำนวนตัวแปรสถานะ)

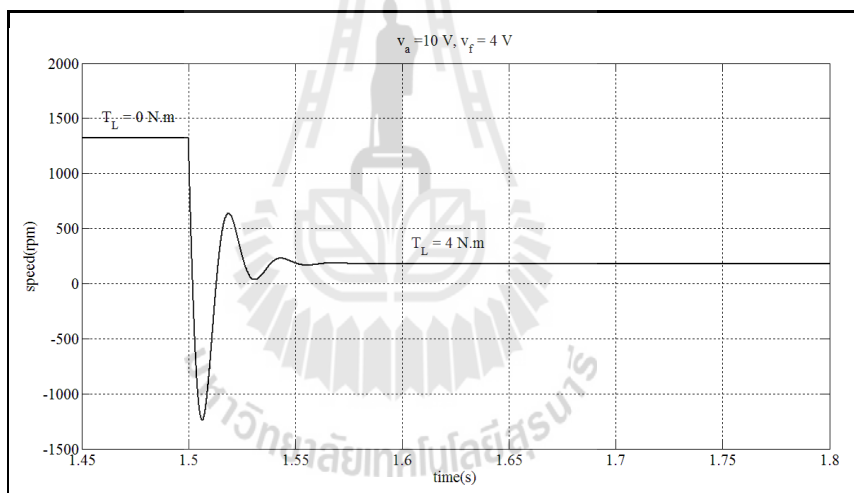
การวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น โดยการคำนวณค่าเฉพาะจริงของเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่แรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลด จะกำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าออกเป็น 2 จุดการทำงานดังนี้ คือ จุดการทำงานที่ 1 กำหนดให้ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 10 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรสนามมีค่าเท่ากับ 4 V ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามเท่ากับ 1 mH และค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามเท่ากับ 10 μF ซึ่งจุดการทำงานที่ 1 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 0 N.m ถึง 4 N.m ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.31 และผลการจำลองสถานการณ์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.32

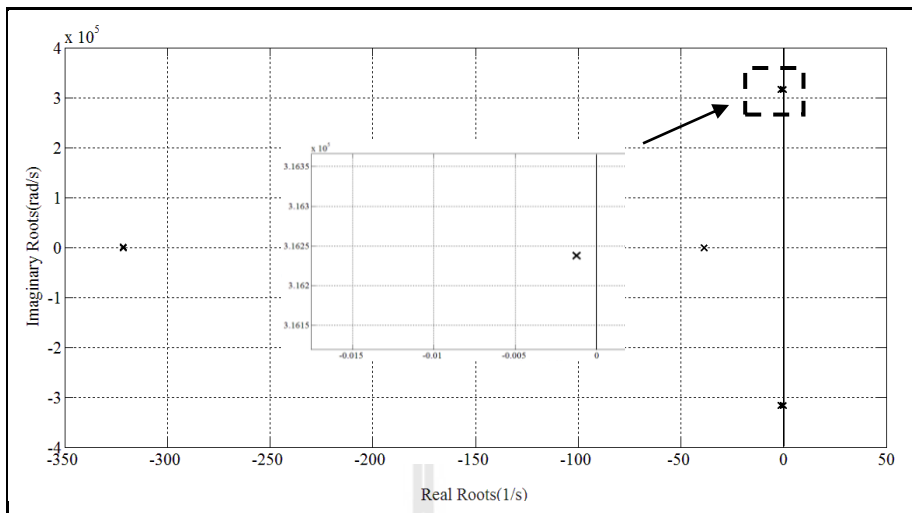


รูปที่ 3.31 ค่าเจาะจงกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดจาก 0 N.m ถึง 4 N.m

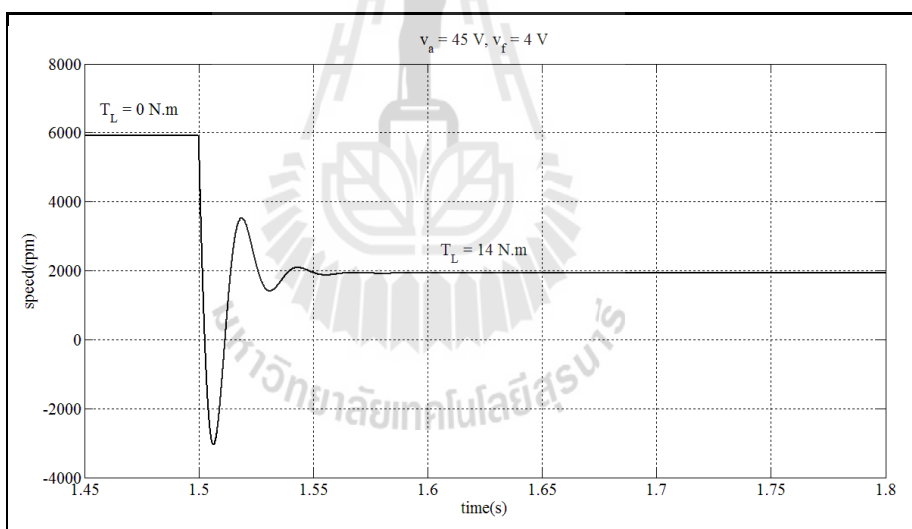


รูปที่ 3.32 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบกรณีแรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 4 N.m

จุดการทำงานที่ 2 กำหนดให้ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรรีเมเจอร์มีค่าเท่ากับ 45 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าเท่ากับ 4 V ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทางด้านวงจรรีเมเจอร์และวงจรมีค่าเท่ากับ 1 mH และค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทางด้านวงจรรีเมเจอร์และวงจรมีค่าเท่ากับ 10 μ F ซึ่งจุดการทำงานที่ 2 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดจาก 0 N.m ถึง 14 N.m มีผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.33 และมีผลการจำลองสถานการณ์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.33 ค่าเจาะจงกรณีเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดจาก 0 N.m เป็น 14 N.m



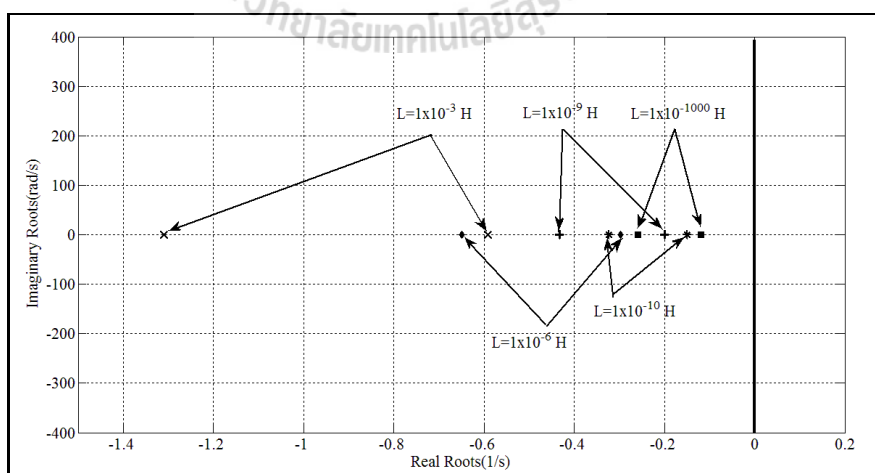
รูปที่ 3.34 ผลการตอบสนองของความเร็วยวกรณ์แรงบิด โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 N.m เป็น 14 N.m

จากการคำนวณค่าเจาะจงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยการปรับค่าแรงบิด โหลดทั้ง 2 จุดการทำงาน ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.31 และรูปที่ 3.33 พบว่า ค่าเจาะจงที่ได้จากการคำนวณของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนค่าแรงบิด โหลดจะขึ้นอยู่กับจุดเดิม ดังนั้น สรุปได้ว่าค่าแรงบิด โหลดไม่มีผลต่อเสถียรภาพการทำงานของ

รตไฟฟ้า และเพื่อเป็นการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรตไฟฟ้า จึงได้จำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริงของระบบขับเคลื่อนรตไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB ที่มีจุดการทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3.32 และรูปที่ 3.34 พบว่า ระบบยังคงมีเสถียรภาพ คือ สามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ได้แม้มีการเปลี่ยนแปลงโหลด ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎีค่าเจาะจง

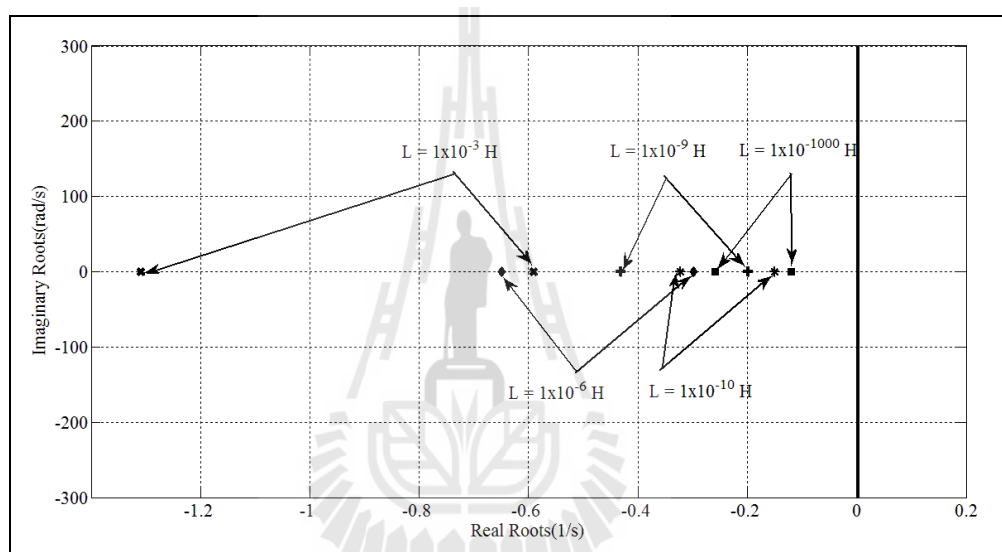
กรณีที่มีการปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก์

การวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่มีการปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก์ ทั้งที่ต่ออยู่กับวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามของมอเตอร์ เพื่อพิจารณาการทำงานของระบบขับเคลื่อนว่ายังคงมีเสถียรภาพหรือไม่ โดยกำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรตไฟฟ้า ออกเป็น 2 จุดการทำงานดังนี้ คือ จุดการทำงานที่ 1 กำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์เท่ากับ 10 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์เท่ากับ 10 V ค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามเท่ากับ 10 μ F และค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 4 N.m ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรตไฟฟ้าโดยการปรับค่าความเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้งทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามกำหนดให้มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 1×10^{-3} H, 1×10^{-6} H, 1×10^{-9} H, 1×10^{-10} H และ 1×10^{-1000} H แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรตไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ค่าเจาะจงกรณีปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก์ของจุดการทำงานที่ 1

จุดการทำงานที่ 2 กำหนดให้มีค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์เท่ากับ 45 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรสนามเท่ากับ 4 V ค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามเท่ากับ 10 μF และค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 14 N.m ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยการปรับค่าความเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้งทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามกำหนดให้มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 1×10^{-3} H, 1×10^{-6} H, 1×10^{-9} H, 1×10^{-10} H และ 1×10^{-1000} H ซึ่งมีผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังรูปที่ 3.36

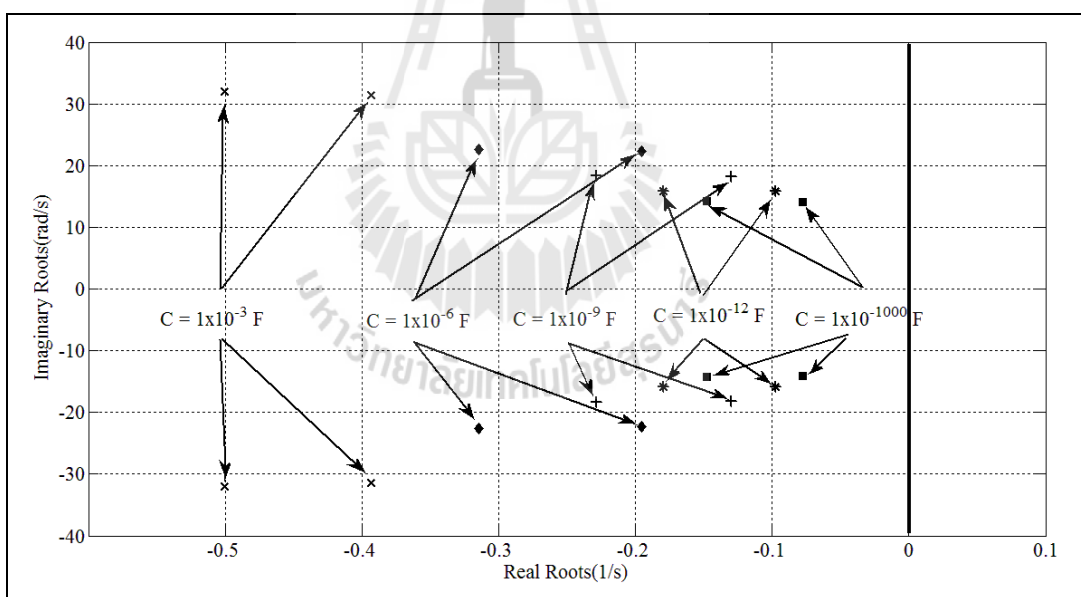


รูปที่ 3.36 ค่าเจาะจงกรณีปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ของจุดการทำงานที่ 2

จากการวิเคราะห์เสถียรของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยการปรับค่าความเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ตามรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36 จะเห็นว่าเมื่อค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ลดลงทำให้ค่าเจาะเข้าใกล้แกนจินตภาพ และเมื่อพิจารณาค่าเจาะจงของค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดทั้งสองจุดการทำงานพบว่ามีค่าไม่เกินแกนจินตภาพ ดังนั้นสรุปได้ว่า ระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งการปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ดังกล่าวนี้ ต้องการแสดงให้เห็นว่า ถ้าค่าความเหนี่ยวนำลดลงหรืออาจสมมุติว่าไม่มีความเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าก็ยังคงมีเสถียรภาพตลอดการทำงาน

กรณีที่มีการปรับค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์

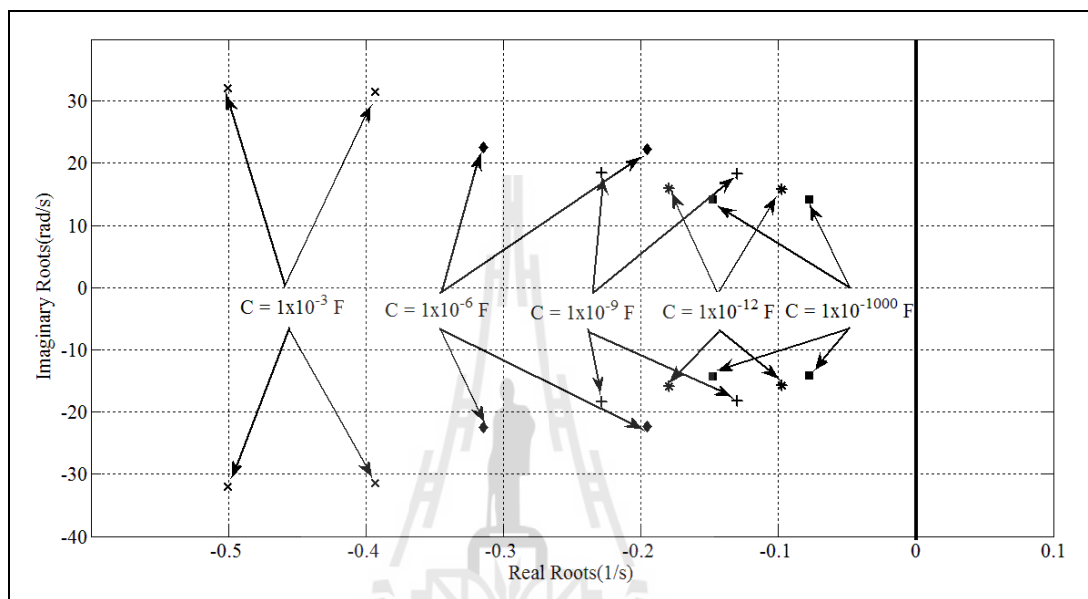
การวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่มีการปรับค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้งที่ต่ออยู่กับวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามของมอเตอร์เพื่อตรวจสอบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุมีผลต่อเสถียรภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าอย่างไร โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพได้กำหนดจุดการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าออกเป็น 2 จุดการทำงานดังนี้ คือ จุดการทำงานที่ 1 กำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์เท่ากับ 10 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรสนามเท่ากับ 4 V ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามเท่ากับ 1 mH และค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 4 N.m ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยการปรับค่าตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้งทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามกำหนดให้มีค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 1×10^{-3} F, 1×10^{-6} F, 1×10^{-9} F, 1×10^{-12} F และ 1×10^{-1000} F แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 ค่าเจาะจงกรณีปรับค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์
ของจุดการทำงานที่ 1

จุดการทำงานที่ 2 กำหนดให้มีค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์เท่ากับ 45 V ค่าแรงดันอินพุตของวงจรสนามเท่ากับ 4 V ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามเท่ากับ 1 mH และค่าแรงบิดโหลดเท่ากับ 14 N.m ซึ่งการวิเคราะห์

เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยการปรับค่าตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันแบบบัตช์ทั้งทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามกำหนดให้มีค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 1×10^{-3} F, 1×10^{-6} F, 1×10^{-9} F, 1×10^{-10} F และ 1×10^{-1000} F ซึ่งมีผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 ค่าเจาะจงกรณีปรับค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัตช์ของจุดการทำงานที่ 2

จากการวิเคราะห์เสถียรของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยการปรับค่าตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันแบบบัตช์ตามรูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.38 จะเห็นว่าเมื่อค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัตช์ลดลงทำให้ค่าเจาะเข้าใกล้แกนจินตภาพ และเมื่อพิจารณาค่าเจาะจงของค่าตัวเก็บประจุที่น้อยที่สุดทั้งสองจุดการทำงานพบว่าไม่มีค่าไม่เกินแกนจินตภาพ ดังนั้นสรุปได้ว่า ระบบมีเสถียรภาพซึ่งการปรับค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัตช์ดังกล่าว ต้องการแสดงให้เห็นว่า การปรับค่าตัวเก็บประจุให้มีค่าน้อยมากหรืออาจสมมุติได้ว่า ไม่มีตัวเก็บประจุวงจรแปลงผันแบบบัตช์ ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก็ยังคงมีเสถียรภาพตลอดการทำงาน

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อนและทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยการจำลองสถานการณ์และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริงโดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องทั้งสถานะชั่วครู่และสถานะคงตัว และยังได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง และการจำลองสถานการณ์ผ่านระบบจริงของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Simulink ของ MATLAB เพื่อเป็นยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ พบว่าระบบมีเสถียรภาพทุกช่วงการทำงานแม้มีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก็ก็ตาม



บทที่ 4

การออกแบบและสร้างตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็ว

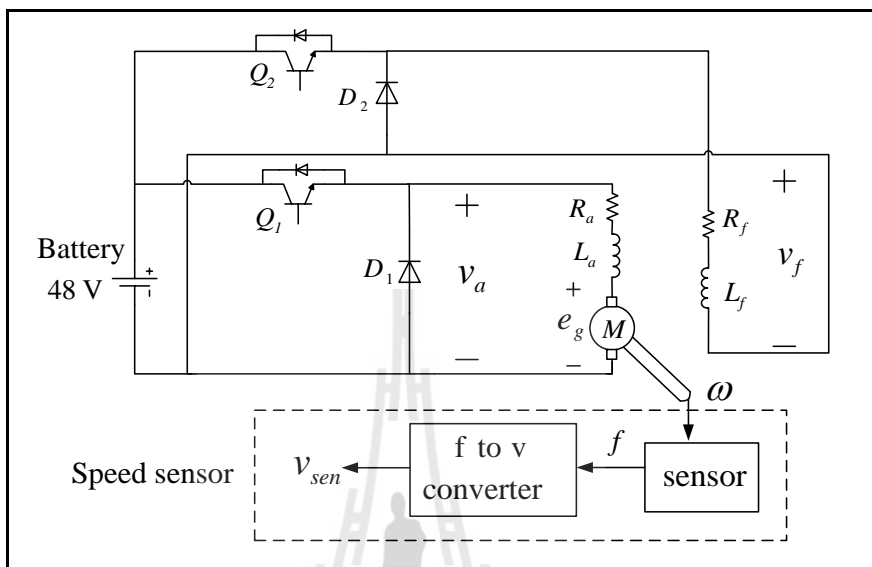
4.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์หลัก คือ การควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการออกแบบ ให้การทำงานของตัวควบคุมมีความเหมาะสมกับการใช้งานรถไฟฟ้า โดยตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ ตัวควบคุมพีไอ ที่ดำเนินการออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ (Phillips and Harbor, 2000) และนอกจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดังกล่าวแล้ว ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างตัวควบคุมพีไอที่ใช้เทคโนโลยีแบบแอนะล็อกโดยใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก และทำการทดสอบตัวควบคุมพีไอด้วยสัญญาณอินพุตรูปพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณเพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของตัวควบคุมพีไอก่อนนำไปใช้งานในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่

การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ของรถไฟฟ้า ต้องคำนึงถึงการใช้งานของรถไฟฟ้าเป็นหลัก โดยที่การทำงานของตัวควบคุมต้องไม่ทำงานเร็วเกินไป ไม่เช่นนั้นอาจทำให้การขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในขณะออกตัวหรือการทำงานในช่วงของการปรับเปลี่ยนความเร็วเกิดการกระชาก ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่และอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายในระบบไฟฟ้าได้ โดยความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ส่งการทำงานให้กับไอดีบีทีไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเร็วเกินไป เพราะถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเร็วหรือเกิดการกระชากของสัญญาณพัลส์จะทำให้ไอดีบีทีเกิดความเสียหายและมีผลกระทบต่อระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมพีไอควรออกแบบให้การทำงานของตัวควบคุมพีไอมีความเหมาะสมกับการใช้งานและเพื่อเป็นการป้องกันความผิดพลาดดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้น ทางผู้ดำเนินงานวิจัยจึงได้เพิ่มวงจรถ่วงที่เอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ เพื่อช่วยให้การทำงานของรถไฟฟ้าเป็นไปอย่างราบเรียบและไม่รวดเร็วเกินไป นอกจากนี้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามีความจำเป็นที่ต้องทราบสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า เนื่องจากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวต้องนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอินพุตของตัวควบคุมพีไอ ดังนั้นการหาสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุด

ตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า พิจารณาได้จากการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้างดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทดสอบชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า

การทดสอบชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ 2 วงจร ที่ต่อทางด้านวงจรรีเลย์และวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยชุดตรวจวัดความเร็ว (Speed sensor) จะทำหน้าที่วัดความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า ได้ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายค่าแรงดันอินพุตที่ระดับแรงดันต่าง ๆ ให้กับวงจรรีเลย์ เมเจอร์ (v_a) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ ซึ่งจะทำให้ได้ความเร็วของรถไฟฟ้า (ω) ในย่านความเร็วต่าง ๆ ตามระดับของค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรรีเลย์ เมเจอร์ โดยค่าความเร็วของรถไฟฟ้าจะถูกวัดด้วยชุดตรวจวัดความเร็วที่ประกอบไปด้วยเซนเซอร์ (sensor) และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (f to v converter) ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดความเร็วของรถไฟฟ้ามีเอาต์พุตเป็นค่าความถี่ จึงต้องมีวงจรที่ใช้แปลงค่าความถี่ดังกล่าวให้อยู่ในรูปของค่าแรงดัน คือ วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน โดยจะเรียกค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันว่า ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว (v_{sen}) และการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้างดังกล่าวจะกำหนดให้คงค่าแรงดันอินพุตของวงจรมอเตอร์ (v_f) คงที่ตลอดการทดสอบ ซึ่งจะคงค่าแรงดันอินพุตของวงจรมอเตอร์เท่ากับ 4 V และ

ดำเนินการปรับค่าแรงดันอินพุตของวงจรรีเลย์ (v_a) เพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 5 V จนถึงค่าแรงดันอินพุตของวงจรรีเลย์ประมาณ 45 V และทำการวัดค่าของความเร็วรถไฟฟ้า และค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วตามระดับแรงดันอินพุตของวงจรรีเลย์ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้าได้ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้า

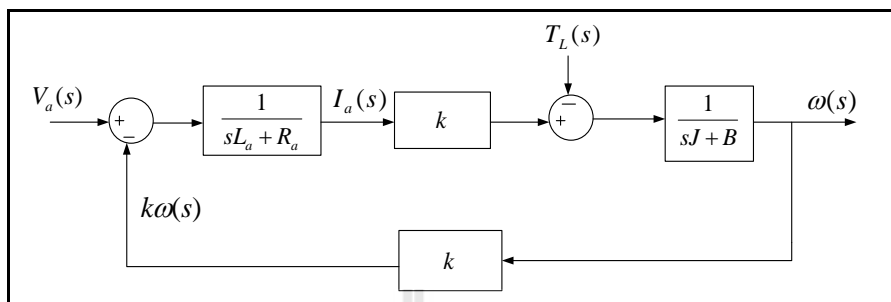
แรงดัน อาร์เมเจอร์ (V)	แรงดัน สนาม (V)	ความเร็ว ของรถไฟฟ้า (km/h)	แรงดันเอาต์พุตของชุด ตรวจวัดความเร็ว(V)	อัตราส่วนของแรงดัน เอาต์พุตต่อความเร็ว ของรถไฟฟ้า
5	4	3	0.6	0.2
10.1	4	5	0.97	0.194
15.5	4	9	1.57	0.174
20.8	4	12	2.18	0.182
25.3	4	15	2.65	0.177
30.5	4	19	3.25	0.171
35.5	4	21	3.75	0.178
39.8	4	23	4.21	0.183
44.7	4	25	4.77	0.191
ค่าอัตราส่วนเฉลี่ย				0.183

จากตารางที่ 4.1 สามารถหาสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วและค่าความเร็วของรถไฟฟ้า ได้จากการประมาณค่าโดยการหาค่าอัตราส่วนของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วต่อค่าความเร็วของรถไฟฟ้าได้ตามสมการที่ 4-1

$$v_{sen} = 0.183 \times \omega \quad (4-1)$$

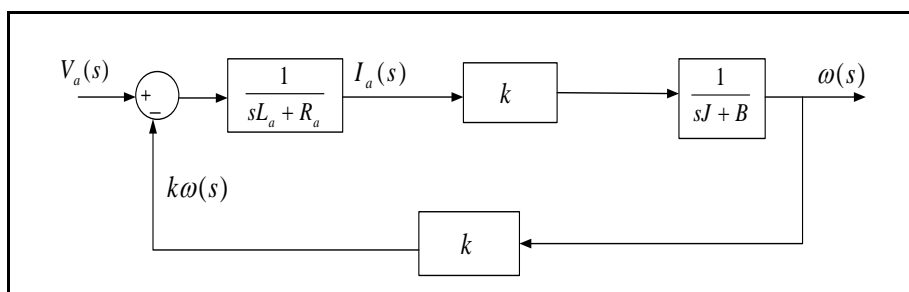
โดยที่ v_{sen} คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว (V) และ ω คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h) ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเริ่มดำเนินการพิจารณาจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามที่ได้อธิบาย

รายละเอียดต่าง ๆ ไว้ในบทที่ 2 ซึ่งมีแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากรูปที่ 4.2 พบว่าแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นมี 2 อินพุต ที่มีผลต่อความเร็วของรถไฟฟ้า คือ $V_a(s)$ และ $T_L(s)$ ซึ่งการหาความสัมพันธ์สามารถพิจารณาได้ทั้งความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{\omega(s)}{V_a(s)}$ และ $\frac{\omega(s)}{T_L(s)}$ (Rashid, 2004) แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญกับความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{\omega(s)}{V_a(s)}$ เป็นหลัก เนื่องจากการใช้งานของรถไฟฟ้าที่มีการปรับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าด้วยการปรับค่าแรงดันอินพุต $V_a(s)$ ตลอดการใช้งาน ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{\omega(s)}{V_a(s)}$ จะกำหนดให้ $T_L = 0$ จึงได้แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกรณี $T_L = 0$ ดังรูปที่ 4.3

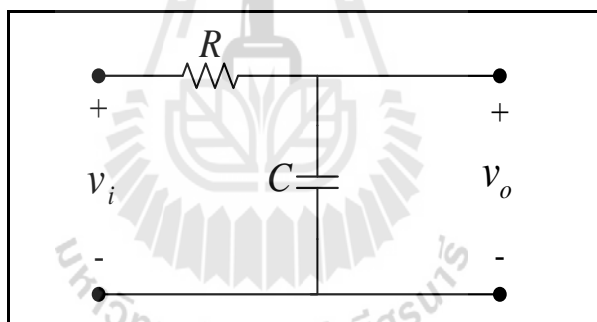


รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกรณี $T_L = 0$

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{\omega(s)}{V_a(s)}$ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามสมการที่ (4-2)

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{k}{(L_a J)s^2 + (L_a B + R_a J)s + R_a B + k^2} \quad (4-2)$$

จากที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นว่า การออกแบบตัวควบคุมพีไอนอกจากจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ในการออกแบบแล้ว ยังมีวงจรถ่วง (Delay circuit) ที่เพิ่มเข้าไปในระบบขับเคลื่อน เพื่อช่วยให้การทำงานเป็นไปอย่างราบเรียบ ซึ่งการทำงานของวงจรถ่วงจะมีพื้นฐานมาจากวงจร RC โดยมีโครงสร้างของวงจรถ่วงรูปที่ 4.4 และจากวงจรถ่วงดังกล่าว ถ้าเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุหรือตัวต้านทานจะมีผลทำให้ค่าคงที่ทางเวลา (time constant: τ) ของวงจรถ่วงเปลี่ยนไป สามารถคำนวณค่าคงที่ทางเวลาได้ตามสมการที่ (4-3)



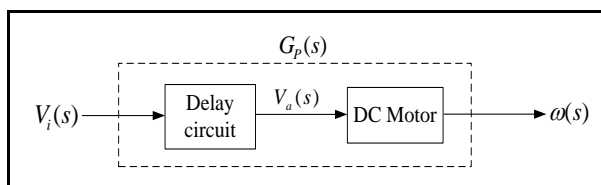
รูปที่ 4.4 วงจรถ่วง

$$\tau = RC \quad (4-3)$$

จากรูปที่ 4.4 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{V_o(s)}{V_i(s)}$ ของวงจรถ่วงได้ตามสมการที่ (4-4)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{sCR + 1} \quad (4-4)$$

ดังนั้นเมื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นและฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรหนึ่งวงมาสร้างเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจะได้ดังรูปที่ 4.5

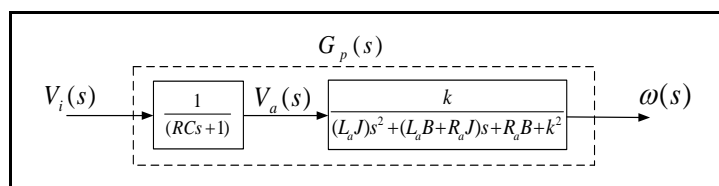


รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

จากแผนบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในรูปที่ 4.5 สามารถหาผลตอบสนองทางเวลาได้โดยกำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามที่ได้อธิบายรายละเอียดต่าง ๆ ไว้ในบทที่ 2 ตารางที่ 2.4 และพารามิเตอร์ของวงจรหนึ่งวง ที่กำหนดให้มีค่าคงที่ทางเวลา (τ) เท่ากับ 5 วินาที ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผู้ดำเนินการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่ใช้งาน โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของค่าคงที่ทางเวลาสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4-3) ที่กำหนดให้มีค่าความต้านทานเท่ากับ $5\text{ k}\Omega$ ดังนั้นสามารถหาค่าตัวเก็บประจุของวงจรหนึ่งวงได้ตามสมการที่ (4-5)

$$C = \frac{5}{5000} = 1 \times 10^{-3} \text{ F} = 1000 \mu\text{F} \quad (4-5)$$

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และค่าพารามิเตอร์ของวงจรหนึ่งวงแทนลงในบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 4.4 จะได้แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุมดังรูปที่ 4.6

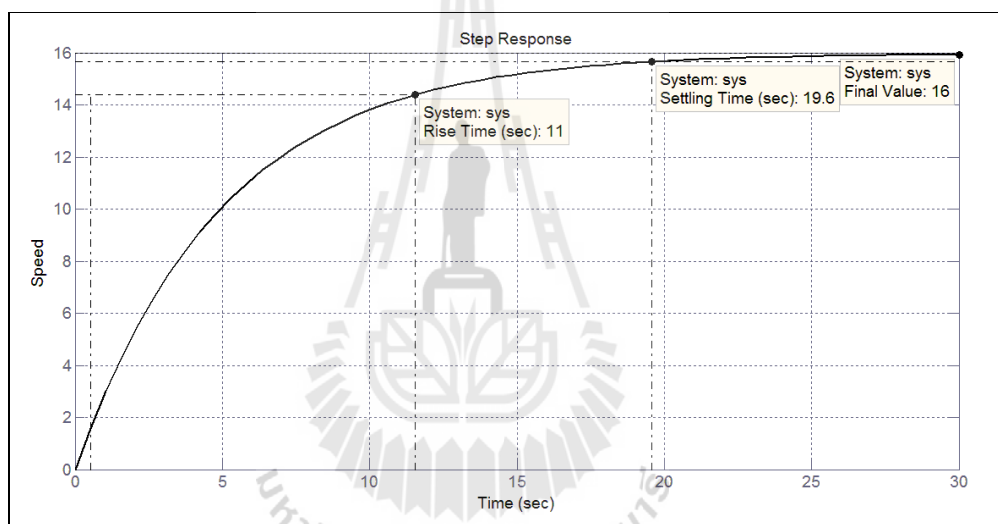


รูปที่ 4.6 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุม

จากรูปที่ 4.6 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุมได้ตามสมการที่ (4-6)

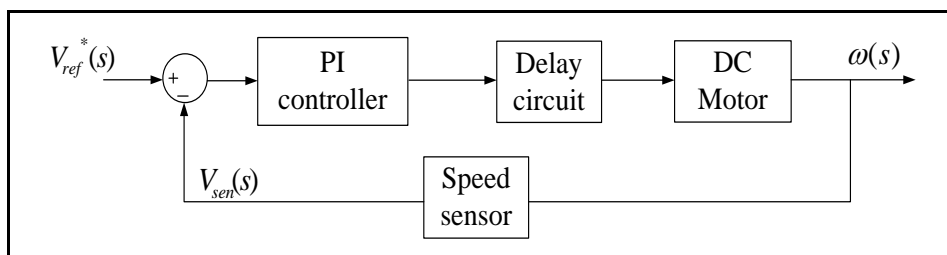
$$G_p(s) = \frac{975000}{6.2525s^3 + 4037.83s^2 + 306007.32s + 61040} \quad (4-6)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุมในสมการที่ (4-6) สามารถหาผลตอบสนองของระบบก่อนมีตัวควบคุม โดยการป้อนอินพุตที่เป็นสัญญาณขั้นบันไดขนาด $1u(t)$ ได้ดังรูปที่ 4.7



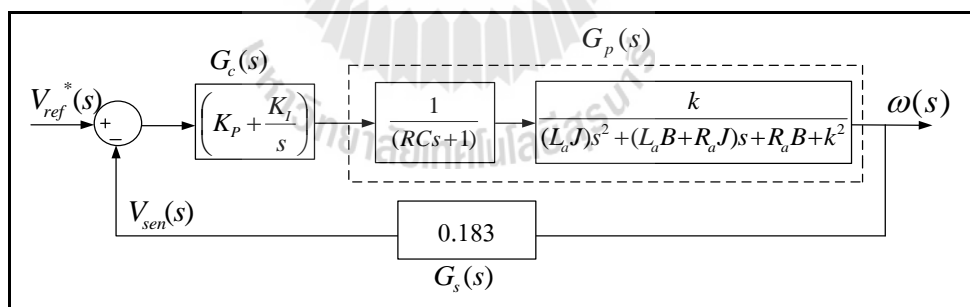
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุม

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองของระบบก่อนมีตัวควบคุมในรูปที่ 4.7 พบว่ามีค่าในสถานะคงตัวเท่ากับ 16 ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากที่ต้องการ คือ 5.46 โดยค่าดังกล่าวพิจารณาได้จากการแทนค่าขนาดแรงดันเท่ากับ 1 V ในสมการที่ (4-1) ที่เป็นสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วและค่าความเร็วของรถไฟฟ้า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบก่อนมีตัวควบคุม มีความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่มากและมีเวลาเข้าที่ช้า จึงต้องมีการดำเนินการออกแบบตัวควบคุมเพื่อปรับปรุงให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ที่ดำเนินการออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ จะมีแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีโครงสร้างแบบวงปิด (close loop) ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีโครงสร้างแบบวงปิด

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่ามี การป้อนกลับค่าความเร็วผ่านชุดตรวจวัดความเร็วที่มีหน้าที่แปลงค่าความเร็วให้เป็นค่าแรงดัน (V_{sen}) เพื่อนำมาหักลบกับค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดันค่าหนึ่งที่เป็นค่าแรงดันอินพุตของตัวควบคุมพีไอ และจากนั้นตัวควบคุมพีไอจะทำการปรับขนาดของแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงให้ได้ค่าความเร็วของรถไฟฟ้าตามที่ต้องการ ดังนั้นในการดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอเมื่อแทนฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น วงจรหน่วงและชุดตรวจวัดความเร็วลงในแผนภาพบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 4.7 จะได้แผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอตามรูปที่ 4.9 ดังนี้

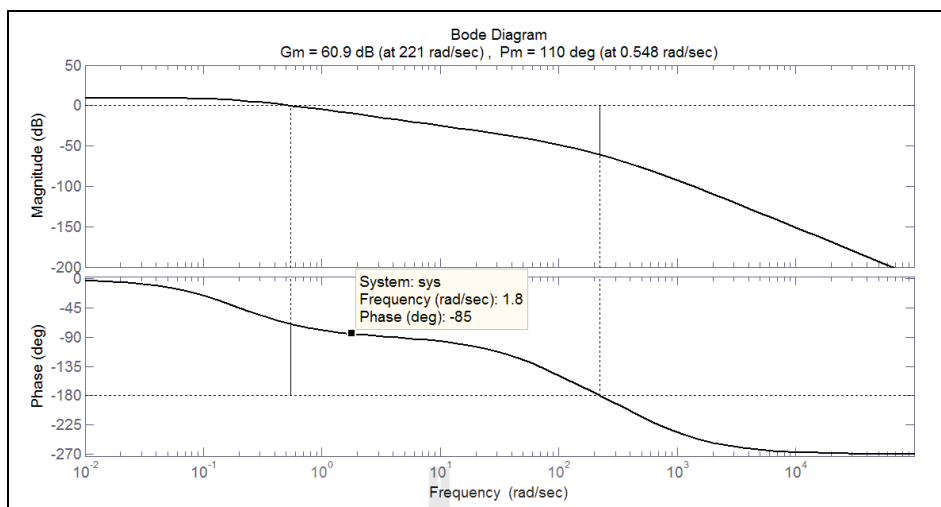


รูปที่ 4.9 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ใช้แผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่มีโครงสร้างระบบเป็นแบบวงปิดตามดังรูปที่ 4.9 ซึ่งได้ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ โดยมีค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นและ

พารามิเตอร์ของวงจรถ่วงตามที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น และมีเงื่อนไขทางเวลาของระบบเมื่อมีตัวควบคุมพีไอแล้วดังนี้ กำหนดให้ ค่าผิดพลาดในสถานะคงตัว $e_{ss} \leq 1\%$ การพุ่งเกิน $P.O \leq 5\%$ ซึ่งจะมีขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดังต่อไปนี้ (Phillips and Harbor, 2000)

ขั้นตอนที่ 1 หากค่าความถี่ ω_1 ที่ทำให้มุม $G_p G_s(j\omega_1)$ มีค่าเท่ากับ $-180^\circ + \phi_m + 5^\circ$ เมื่อ ϕ_m คือ ค่าส่วนเฟสในการออกแบบ โดยการกำหนดค่าส่วนเฟสที่ใช้ในการออกแบบจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio : ζ) และค่าส่วนเฟส (Gopal, 1997) ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า ถ้าต้องการเพิ่มค่าอัตราส่วนการหน่วงของระบบทำได้โดยการเพิ่มค่าส่วนเฟส และเช่นเดียวกันถ้าต้องการที่จะลดอัตราส่วนการหน่วงลงทำได้โดยการปรับลดค่าส่วนเฟสที่ใช้ในการออกแบบให้ลดลง ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบขับเคลื่อนในรูปที่ 4.7 พบว่าระบบมีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่มาก และมีเวลาเข้าที่ช้า ดังนั้นในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบจึงต้องปรับลดค่าอัตราส่วนการหน่วงของระบบลง เพื่อให้ระบบมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการหน่วงและค่าส่วนเฟสดังกล่าว พบว่า เมื่อต้องการปรับลดค่าอัตราส่วนการหน่วงของระบบลง ทำได้โดยการกำหนดค่าส่วนเฟสที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมให้มีค่าน้อยกว่าค่าส่วนเฟสของระบบก่อนมีตัวควบคุม ซึ่งเมื่อพิจารณาแผนภาพ โปดของระบบวงเปิดในรูปที่ 4.10 พบว่าส่วนเฟสมีค่าเท่ากับ 110° ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ควรที่จะกำหนดให้ค่าส่วนเฟสที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต้องมีค่าน้อยกว่า 110° ตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้มีค่าส่วนเฟสที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอมีค่าเท่ากับ 90° เนื่องจากทางผู้ดำเนินงานวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ค่าส่วนเฟสต่าง ๆ พบว่าที่ค่าส่วนเฟสเท่ากับ 90° ทำให้ผลตอบสนองของระบบเมื่อมีตัวควบคุมพีไอเป็นไปตามข้อกำหนดที่ได้กำหนดไว้ในเบื้องต้น ดังนั้น การหาค่าความถี่ ω_1 ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ทำได้โดยแทนค่าส่วนเฟสเท่ากับ 90° ในสมการการหาค่ามุมของ $G_p G_s(j\omega_1)$ จะได้ $-180^\circ + 90^\circ + 5^\circ$ จึงได้มุมเท่ากับ -85° และที่มุมดังกล่าวจะมีค่าความถี่ $\omega_1 = 1.8 \text{ rad/s}$ ซึ่งพิจารณาได้จากแผนภาพ โปดของระบบวงเปิดในรูปที่ 4.10 ดังนี้



รูปที่ 4.10 แผนภาพโบดของระบบวงเปิดที่ใช้พิจารณาค่าความถี่ ω_1

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาค่า k_p

การคำนวณหาค่า k_p สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (4-7) ดังนี้ (Phillips and Harbor, 2000)

$$k_p = \frac{1}{|G_p G_s(j\omega_1)|} \quad (4-7)$$

จากสมการที่ (4-7) มีความจำเป็นที่ต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพบล็อกโคแอมแกรมของระบบวงปิดในรูปที่ 4.9 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมตามสมการที่ (4-8)

$$G_p G_s(s) = \frac{178425}{6.2525s^3 + 4037.83s^2 + 306007.32s + 61040} \quad (4-8)$$

เมื่อแทนค่า $s = j\omega_1$ ในสมการที่ (4-8) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ใช้ในการคำนวณค่า k_p ตามสมการที่ (4-9)

$$G_p G_s(j\omega_1) = \frac{178425}{6.2525(j\omega_1)^3 + 4037.83(j\omega_1)^2 + 306007.32(j\omega_1) + 61040} \quad (4-9)$$

การคำนวณค่า k_p สามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าความถี่ $\omega_1 = 1.8 \text{ rad/s}$ ที่ได้จากการพิจารณาแผนภาพโพลของระบบวงเปิดในรูปที่ 4.10 ลงในสมการที่ (4-9) และจากนั้นนำสมการที่ (4-9) ไปแทนลงในสมการที่ (4-7) จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า k_p ตามสมการที่ (4-10)

$$k_p = \frac{1}{\left| \frac{178425}{6.2525(1.8j)^3 + 4037.83(1.8j)^2 + 306007.32(1.8j) + 61040} \right|} \quad (4-10)$$

จะได้ค่า $k_p = 3.10$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาค่า k_I

เมื่อทราบค่า k_p จากการคำนวณตามขั้นตอนที่ 2 และค่าความถี่ ω_1 จากแผนภาพโพลของระบบวงเปิดในรูปที่ 4.10 นำไปแทนในสมการที่ (4-11) เพื่อหาค่า k_I ได้ดังนี้

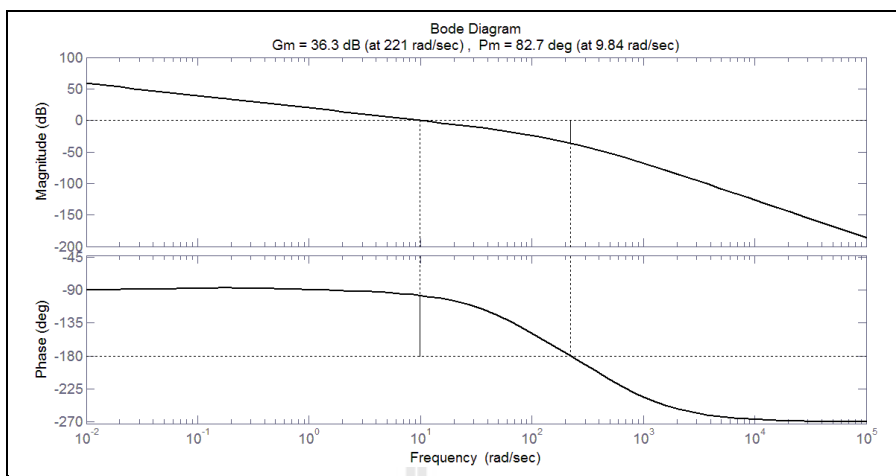
$$k_I = 0.1\omega_1 k_p \quad (4-11)$$

จะได้ค่า $k_I = 0.56$

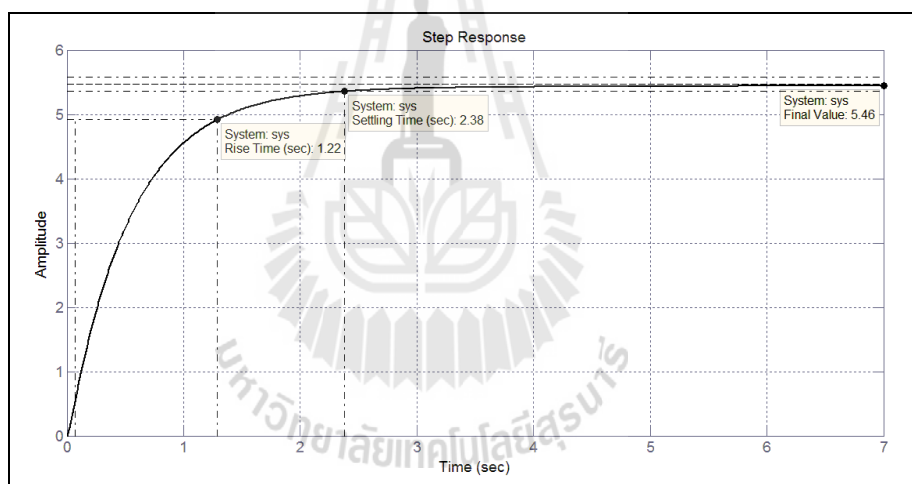
ขั้นตอนที่ 4 แทนค่าพารามิเตอร์ของ k_p และ k_I ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (4-12) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมฟีดแบ็คของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังนี้

$$G_c(s) = \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) = \left(3.10 + \frac{0.56}{s} \right) \quad (4-12)$$

จากนั้นนำค่าตัวควบคุมฟีดแบ็คที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ สร้างเป็นแผนภาพโพลและผลตอบสนองของระบบเมื่อมีตัวควบคุมที่มีสัญญาณอินพุตขั้นบันไดขนาด $1u(t)$ ได้ดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ



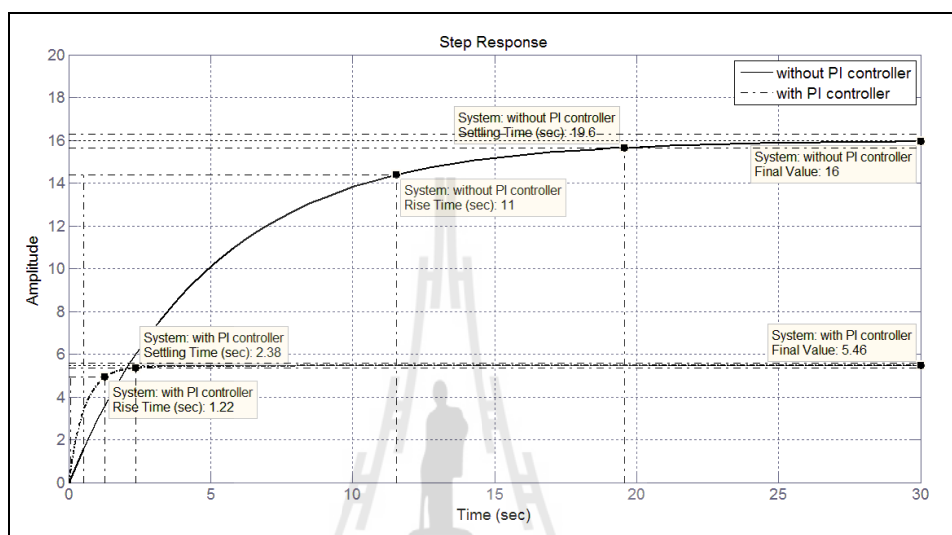
รูปที่ 4.11 แผนภาพโบคของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพโบคของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 4.11 พบว่ามีค่าส่วนเฟสเท่ากับ 82.7° ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าส่วนเฟสของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามอเตอร์ก่อนมีตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 4.10 ที่มีค่าส่วนเฟสเท่ากับ 110° ซึ่งเป็นไปตามความต้องการของผู้ดำเนินการออกแบบที่พยายามลดค่าส่วนเฟสของระบบลง เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.12 พบว่าผลตอบสนองของระบบเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ มีเวลาเข้าที่เท่ากับ 2.38 วินาที และมีค่าใน

สถานะคงตัวเท่ากับ 5.46 ซึ่งก็คือไม่มีค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว และเมื่อนำผลตอบสนองของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าก่อนมีตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 4.13

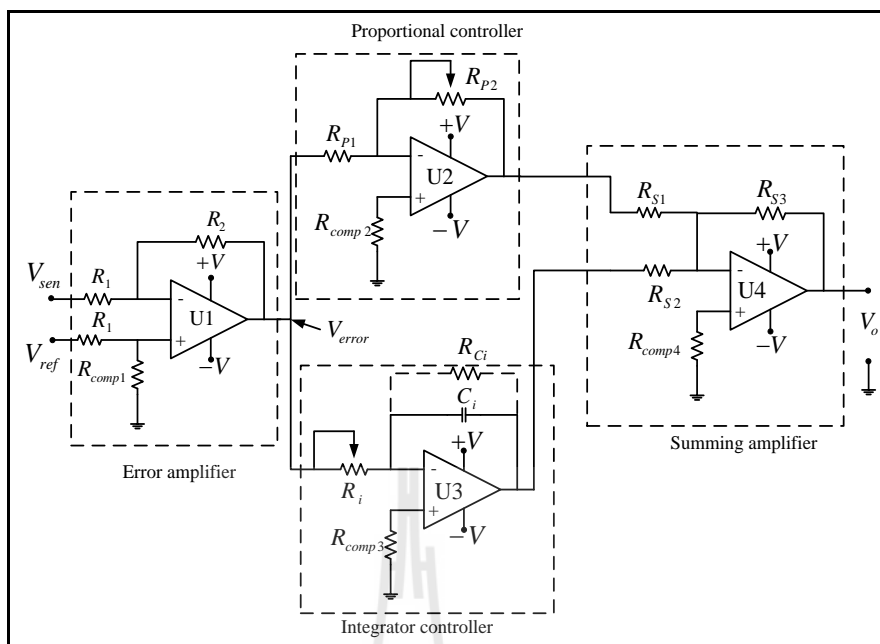


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบก่อนมีตัวควบคุมและเมื่อมีตัวควบคุมพีไอ

จากผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบก่อนมีตัวควบคุมและเมื่อมีตัวควบคุมในรูปที่ 4.13 พบว่า มีความแตกต่างที่ชัดเจน โดยผลการตอบสนองของระบบก่อนมีตัวควบคุม มีเวลาเข้าที่เท่ากับ 19.6 วินาที และมีค่าในสถานะคงตัวเท่ากับ 16 ซึ่งสรุปได้ว่าเป็นระบบที่มีสมรรถนะที่ไม่ดีไม่เหมาะกับการนำมาใช้งาน ดังนั้นเมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่แล้ว ทำให้ระบบเมื่อมีตัวควบคุมพีไอมีผลการตอบสนองของระบบที่ดีขึ้น คือ ระบบไม่มีการพุ่งเกินชั่วคราว มีเวลาเข้าที่เท่ากับ 2.38 วินาที และมีค่าในสถานะคงตัวเท่ากับ 5.46 ซึ่งหมายถึง ไม่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัว ซึ่งก็เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบในเบื้องต้น

4.3 การสร้างและทดสอบตัวควบคุมพีไอแบบแอนะล็อก

การสร้างตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้เทคโนโลยีแบบแอนะล็อก โดยมีโครงสร้างของวงจรเป็นแบบขนานและมีอปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบขนาน

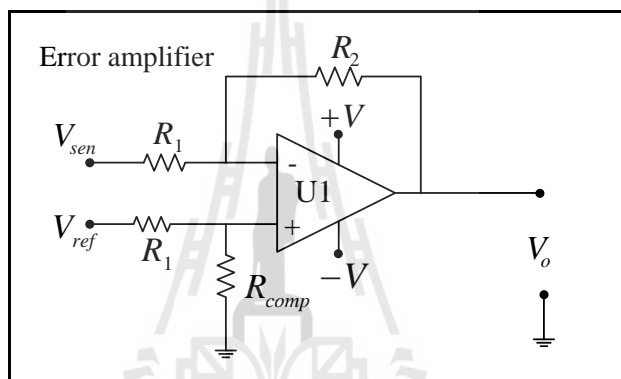
จากรูปที่ 4.14 ประกอบไปด้วย วงจรขยายความผิดพลาด (Error amplifier) วงจรตัวควบคุมพี (Proportional controller) วงจรตัวควบคุมไอ (Integrator controller) วงจรขยายรวมสัญญาณ (Summing amplifier) ซึ่งค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวในวงจรมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- | | |
|-----------------------|---|
| R_1 และ R_2 | มีหน้าที่เป็นตัวปรับอัตราขยายของสัญญาณเอาต์พุตในวงจรขยายความผิดพลาด |
| R_{comp1} | มีหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนเข้าขาบวกของวงจรขยายความผิดพลาด |
| R_{p1} และ R_{p2} | มีหน้าที่เป็นตัวปรับอัตราขยายของสัญญาณเอาต์พุตในวงจรตัวควบคุมพี |
| R_{comp2} | มีหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนเข้าขาบวกของวงจรตัวควบคุมพี |
| R_i และ C_i | ส่งผลต่อความชันของสัญญาณเอาต์พุตในวงจรตัวควบคุมไอ |
| R_{Ci} | ทำหน้าที่ช่วยให้ C_i คายประจุเร็วขึ้น โดยจะส่งผลต่อสัญญาณเอาต์พุตให้มีการตอบสนองที่เร็วขึ้น ซึ่งจะมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นอยู่กับผู้ดำเนินการออกแบบ |
| R_{comp3} | มีหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนเข้าขาบวกในวงจรตัวควบคุมไอ |

- R_{S1} , R_{S2} และ R_{S3} มีหน้าที่เป็นตัวปรับอัตราขยายของสัญญาณเอาต์พุตในวงจรขยายรวมสัญญาณ
- R_{comp4} มีหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนเข้าขาบวกในวงจรขยายรวมสัญญาณ

วงจรรขยายความผิดพลาด

วงจรรขยายความผิดพลาดเป็นวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบความแตกต่างระหว่างอินพุตอ้างอิง (V_{ref}) และค่าจริง (V_{sen}) ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 โครงสร้างของวงจรรขยายความผิดพลาด

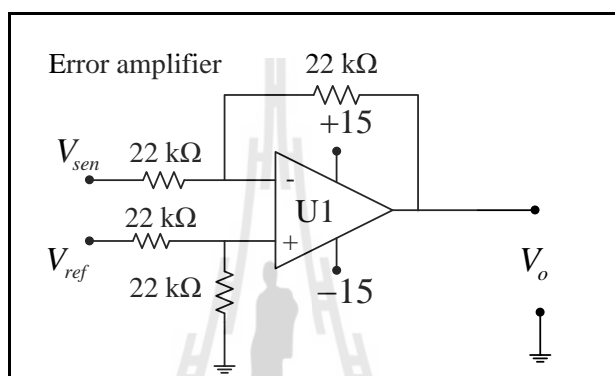
การทำงานของวงจรรขยายความผิดพลาดจะพิจารณาจากอินพุตอ้างอิง (V_{ref}) และค่าจริง (V_{sen}) ที่ได้ เมื่อค่าจริงมีค่าน้อยกว่าอินพุตอ้างอิง ค่าความผิดพลาดจะมีค่าเป็นบวก และถ้าค่าจริงมีค่ามากกว่าอินพุตอ้างอิง ค่าความผิดพลาดจะมีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรขยายความผิดพลาดได้ตามสมการที่ (4-13)

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_{ref} - V_{sen}) \tag{4-13}$$

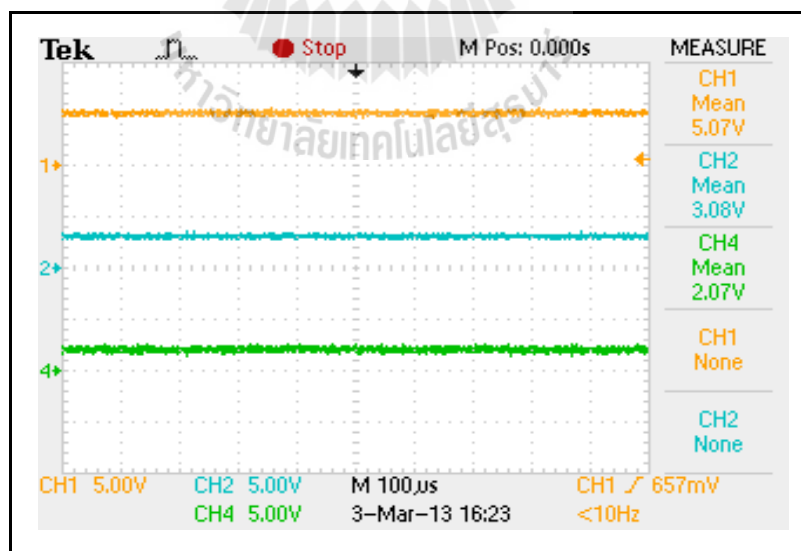
กำหนดให้ตัวต้านทาน $R = R_1 = R_2$ และนำไปแทนในสมการที่ (4-13) จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรขยายความผิดพลาดตามสมการที่ (4-14)

$$V_o = (V_{ref} - V_{sen}) \tag{4-14}$$

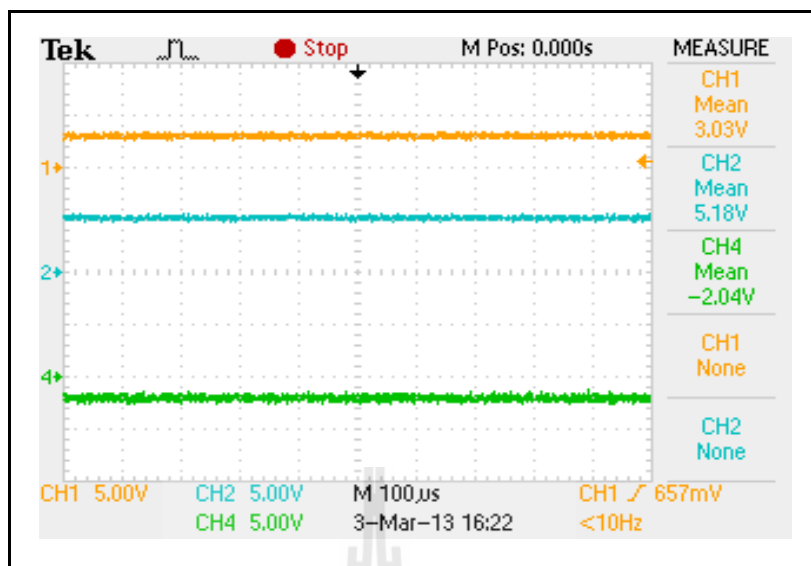
การทดสอบการทำงานของวงจรรขยายความผิดพลาด กำหนดให้มีความพารามิเตอร์ของตัวต้านทาน $R_1 = R_2 = R_{comp} = 22 \text{ k}\Omega$ และไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ $\pm 15 \text{ V}$ ซึ่งจะได้วงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.16 โดยการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่หนึ่งกำหนดให้มีความแรงดันอินพุตของ $V_{ref} = 5 \text{ V}$ และ $V_{sen} = 3 \text{ V}$ และกรณีที่สองกำหนดให้มีความแรงดันอินพุตของ $V_{ref} = 3 \text{ V}$ และ $V_{sen} = 5 \text{ V}$ ซึ่งจะมีผลของการทดสอบวงจรรขยายความผิดพลาดดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 วงจรรขยายความผิดพลาดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบของวงจรที่มีความแรงดันอินพุต $V_{ref} = 5 \text{ V}$ และ $V_{sen} = 3 \text{ V}$

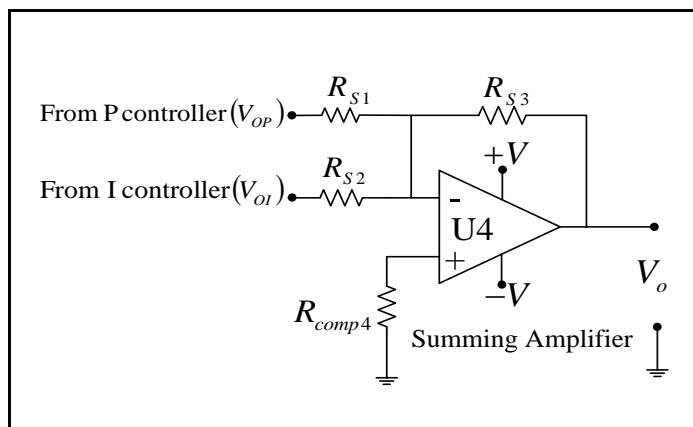


รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบของวงจรที่มีค่าแรงดันอินพุต $V_{ref} = 3V$ และ $V_{sen} = 5V$

จากกราฟผลการทดสอบวงจรขยายความผิดพลาดในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ แรงดันอินพุตอ้างอิง (V_{ref}) ช่องสัญญาณที่ 2 คือ แรงดันอินพุตของค่าจริง (V_{sen}) และช่องสัญญาณที่ 4 คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายความผิดพลาด (V_o) ซึ่งจากการทดสอบโดยการป้อนแรงดันอินพุตของกรณี $V_{ref} = 5V$ และ $V_{sen} = 3V$ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $2V$ และกรณีที่มีค่าแรงดันอินพุตของ $V_{ref} = 3V$ และ $V_{sen} = 5V$ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $-2V$ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น

วงจรรวมสัญญาณ

วงจรรวมสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้โอปแอมป์ในการรวมสัญญาณอินพุตที่ได้จากสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอ โดยจะมีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบกลับเฟส มีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 4.19

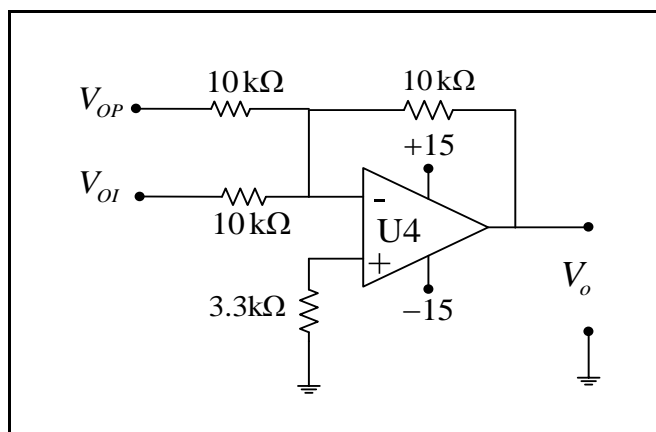


รูปที่ 4.19 วงจรขยายรวมสัญญาณ

จากวงจรในรูปที่ 4.19 สามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (4-15)

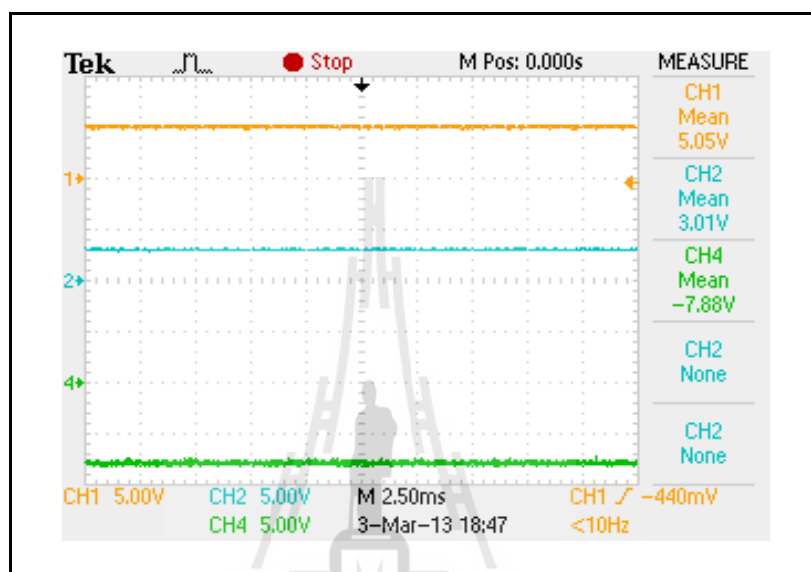
$$V_o = -\left(\frac{R_{S3}}{R_{S1}} V_{OP} + \frac{R_{S3}}{R_{S2}} V_{OI} \right) \quad (4-15)$$

การทดสอบการทำงานของวงจรขยายรวมสัญญาณ กำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์ของตัวต้านทาน $R_{S1} = R_{S2} = R_{S3} = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_{comp4} = 3.3 \text{ k}\Omega$ และมีไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ $\pm 15 \text{ V}$ ซึ่งได้วงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 วงจรขยายรวมสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบกำหนดให้มีค่าแรงดันอินพุตของ $V_{OP} = 5\text{ V}$ และ $V_{OI} = 3\text{ V}$ ซึ่งมีผลของการทดสอบวงจรรขยายรวมสัญญาณดังรูปที่ 4.21 โดยที่ช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุต (V_{OP}) ช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณอินพุต (V_{OI}) และช่องสัญญาณที่ 4 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรรขยายรวมสัญญาณ (V_o)



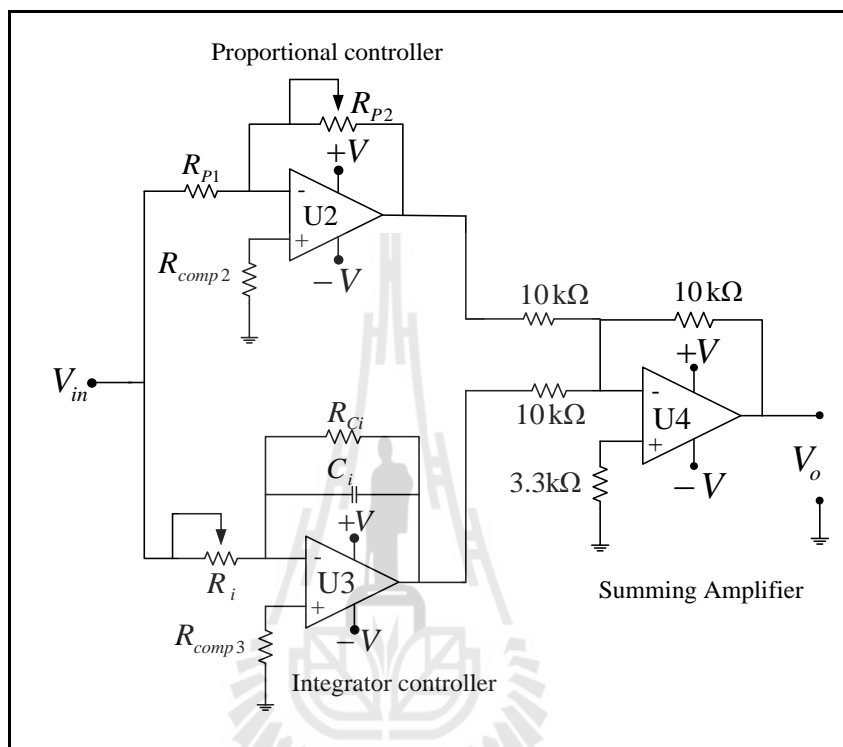
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบวงจรรขยายรวมสัญญาณ

จากผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 4.21 โดยการป้อนแรงดันอินพุตของ $V_{OP} = 5\text{ V}$ และ $V_{OI} = 3\text{ V}$ เมื่อพิจารณาจากกราฟ จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าประมาณ -8 V ที่ค่าแรงดันเอาต์พุตดังกล่าว มีค่าเป็นลบเนื่องมาจากการต่อวงจรรขยายรวมในลักษณะแบบกลับเฟส ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ พบว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น

วงจรตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมที่ช่วยในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ โดยผลของตัวควบคุมพีไอจะช่วยในการปรับปรุงค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว และช่วงเวลาเข้าที่ของระบบให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถดูลักษณะของผลการตอบสนองของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอได้จากรูปที่ 4.12 ตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการสร้างตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบเพื่อ

ไปใช้ในการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งการสร้างตัวควบคุมพีไอจะใช้โครงสร้างของวงจรแบบขนานมีลักษณะดังรูปที่ 4.22 และในการดำเนินการสร้างตัวควบคุมพีไอสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรได้ตามสมการ (4-16) และ (4-17) ดังนี้



รูปที่ 4.22 วงจรตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบขนาน

$$k_p = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} \quad (4-16)$$

$$k_I = \frac{1}{R_i C_i} \quad (4-17)$$

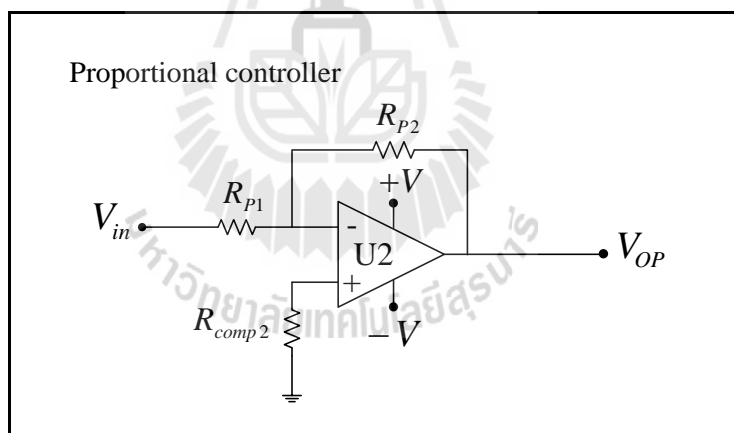
จากรูปที่ 4.22 ประกอบด้วยวงจรถวลคุมพี วจรถวลคุมไอ และวงจรถวลรวมสัญญาณ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการทดสอบการทำงานของวงจรถวลคุมพีไอตามที่จะนำเสนอต่อไปนี้

วงจรถ้าควบคุมพี

วงจรถ้าควบคุมพีสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรถ้าได้ตามสมการที่ (4-16) โดยกำหนดให้ตัวต้านทาน $R_{P1} = 10\text{k}\Omega$ และสามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_{P2} ได้ตามสมการที่ (4-18)

$$R_{P2} = k_p \times R_{P1} = k_p \times (10 \times 10^3) \quad (4-18)$$

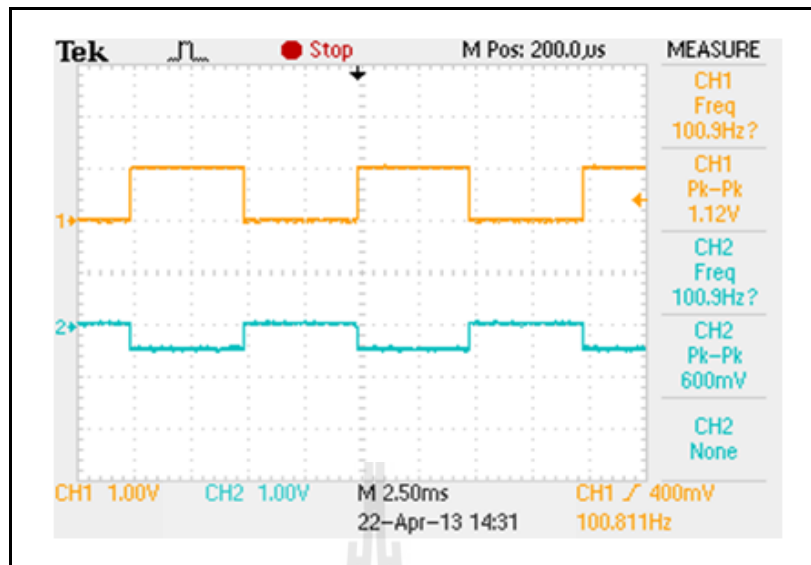
การทดสอบการทำงานของวงจรถ้าควบคุมพีตามรูปที่ 4.23 ได้ดำเนินการทดสอบโดยการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นพัลส์ และกำหนดให้ค่าตัวต้านทาน $R_{P1} = 1\text{k}\Omega$ และ $R_{comp2} = 10\text{k}\Omega$ ซึ่งค่า k_p ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.5, 1 และ 2 และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (4-18) จะได้ค่าพารามิเตอร์ R_{P2} ที่ใช้ในการทดสอบวงจรถ้าควบคุมพีตามตารางที่ 4.2 ซึ่งผลการทดสอบของวงจรถ้าควบคุมพีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.26 ตามลำดับ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุต (V_{in}) และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพี (V_{OP})



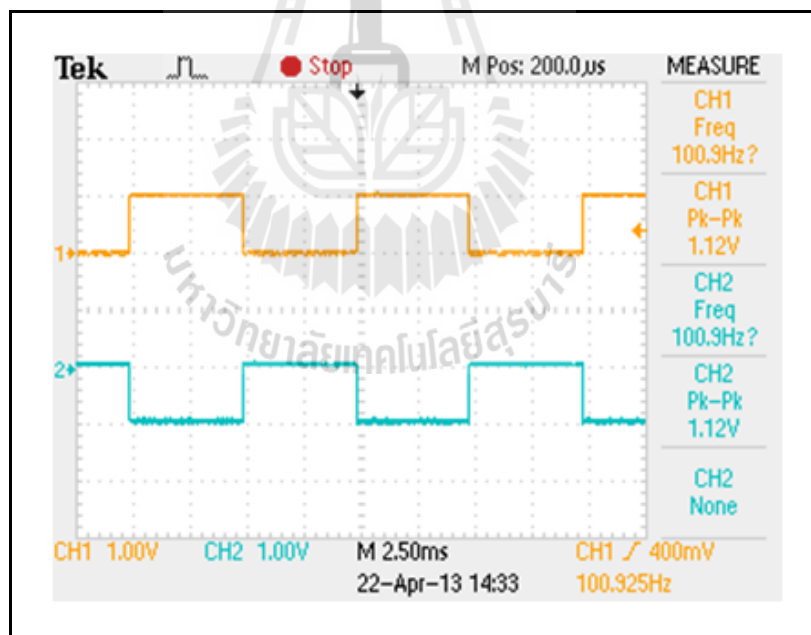
รูปที่ 4.23 วงจรถ้าควบคุมพี

ตารางที่ 4.2 การทดสอบวงจรถ้าควบคุมพี

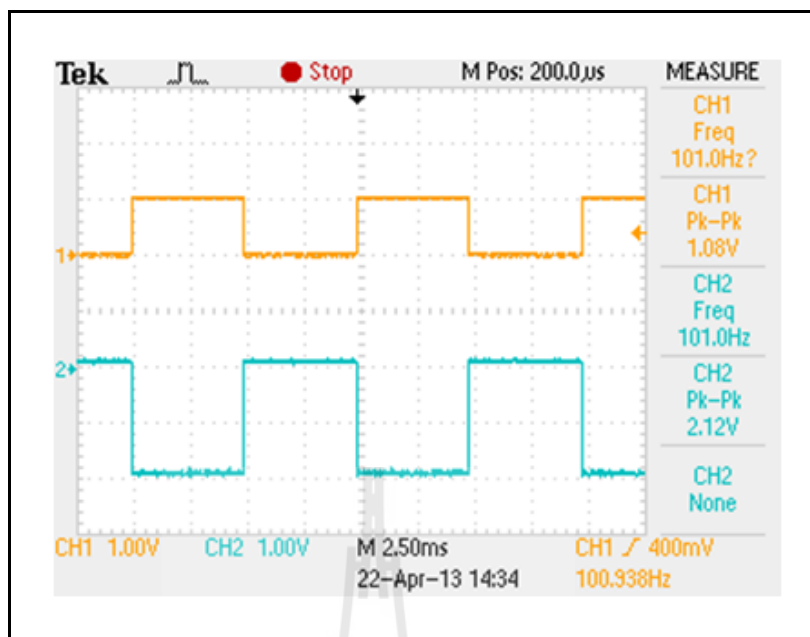
k_p	R_{P1}	R_{P2}	R_{comp2}
0.5	1 k Ω	500 Ω	10 k Ω
1	1 k Ω	1 k Ω	10 k Ω
2	1 k Ω	2 k Ω	10 k Ω



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีกรณี $k_p = 0.5$



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีกรณี $k_p = 1$



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีกรณี $k_p = 2$

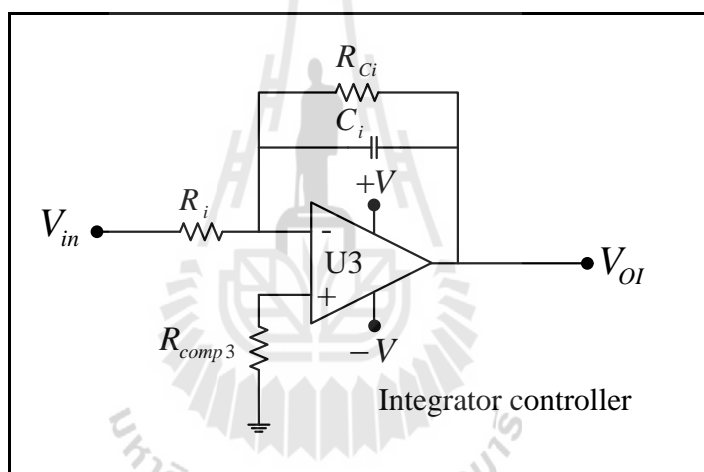
จากผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีกรณีในรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.26 พบว่าสามารถปรับค่า k_p ได้โดยการปรับค่าตัวต้านทานในวงจร ซึ่งเมื่อทำการปรับค่า $k_p = 1$ ซึ่งมีผลการทดสอบตามรูปที่ 4.25 ส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต แต่ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะเป็นแบบกลับเฟส เนื่องจากการต่อวงจรตัวควบคุมพีกรณีเป็นการต่อวงจรแบบกลับเฟสจึงได้สัญญาณเอาต์พุตในลักษณะดังกล่าว เมื่อทำการทดสอบโดยการปรับค่า $k_p < 1$ ซึ่งมีผลการทดสอบตามรูปที่ 4.24 พบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต และเมื่อทำการทดสอบโดยการปรับค่า $k_p > 1$ ซึ่งมีผลการทดสอบตามรูปที่ 4.26 พบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต ซึ่งการทำงานของวงจรตัวควบคุมพีกรณีดังกล่าว เป็นวงจรที่ใช้ในการปรับสัดส่วนของสัญญาณเอาต์พุตนั่นเอง

วงจรตัวควบคุมไอ

วงจรตัวควบคุมไอสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรได้ตามสมการที่ (4-17) โดยกำหนดให้ตัวเก็บประจุ $C_i = 1\mu\text{F}$ และสามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_i ได้ตามสมการที่ (4-19)

$$R_i = \frac{1}{k_I \times C_i} = \frac{1}{k_I \times (10 \times 10^{-6})} \quad (4-19)$$

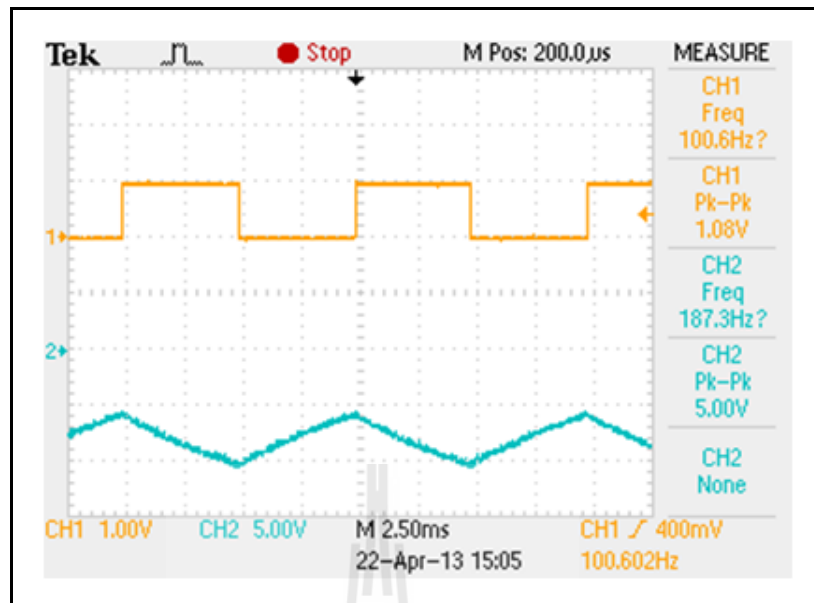
การทดสอบการทำงานของวงจรวัดควบคุมโอในรูปที่ 4.27 ได้ดำเนินการทดสอบโดยการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นพัลส์ และกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุ $C_i = 1\mu\text{F}$, $R_{Ci} = 10\text{k}\Omega$ และ $R_{comp3} = 10\text{k}\Omega$ ซึ่งค่า k_I ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 10000, 1000 และ 100 โดยเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (4-19) จะได้ค่าพารามิเตอร์ R_i ที่ใช้ในการทดสอบวงจรวัดควบคุมโอตามตารางที่ 4.3 ซึ่งผลการทดสอบวงจรวัดควบคุมโอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.30 ตามลำดับ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุต (V_{in}) และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมโอ (V_{OI})



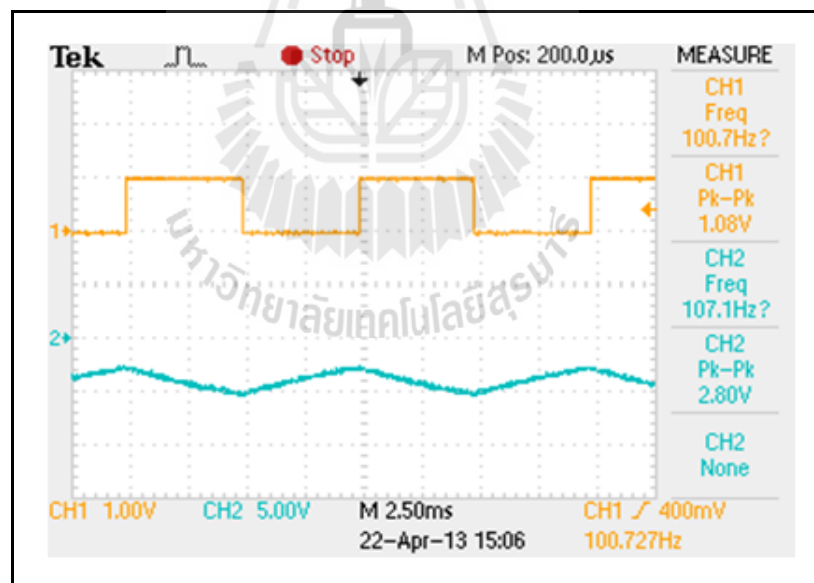
รูปที่ 4.27 วงจรวัดควบคุมโอ

ตารางที่ 4.3 การทดสอบวงจรวัดควบคุมโอ

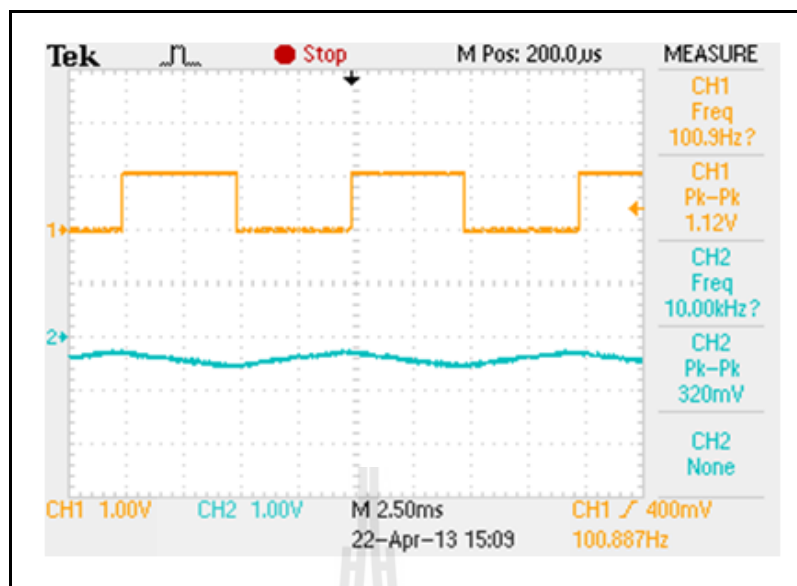
k_I	R_i	C_i	R_{Ci}	R_{comp3}
10000	500 Ω	1 μF	10 $\text{k}\Omega$	10 $\text{k}\Omega$
1000	1 $\text{k}\Omega$	1 μF	10 $\text{k}\Omega$	10 $\text{k}\Omega$
100	10 $\text{k}\Omega$	1 μF	10 $\text{k}\Omega$	10 $\text{k}\Omega$



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมไครณี $k_f = 10000$



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมไครณี $k_f = 1000$

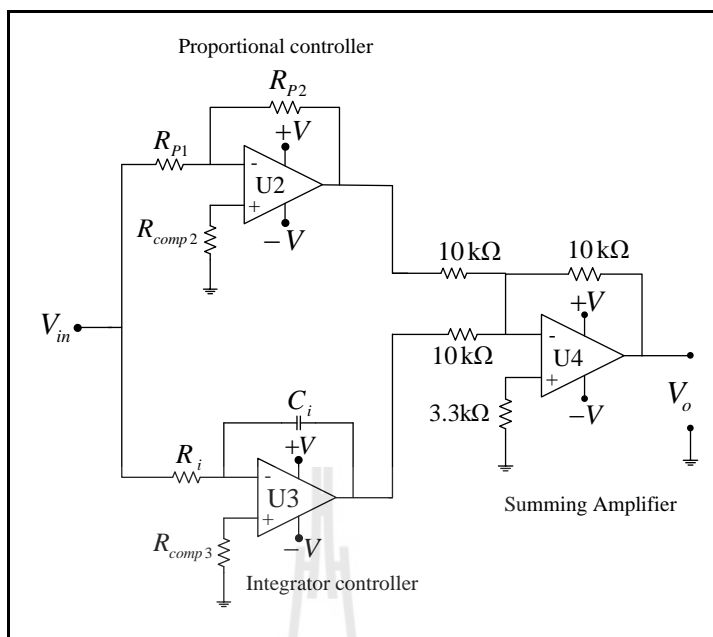


รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมไครณี $k_f = 100$

การทดสอบวงจรตัวควบคุมไครในรูปที่ 4.27 พบว่าสามารถปรับค่า k_f ได้โดยการปรับค่าตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุในวงจร แต่ในทางปฏิบัติแล้วการปรับค่าตัวต้านทานจะดำเนินการง่ายกว่าการปรับค่าตัวเก็บประจุ ดังนั้นการทดสอบวงจรตัวควบคุมไครจะดำเนินการปรับค่า k_f ด้วยการปรับค่าตัวต้านทาน ซึ่งจากผลการทดสอบปรับค่า k_f ในรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.30 พบว่าค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุในวงจรตัวควบคุมพีไอ จะส่งผลต่อความชันและแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตของวงจร ซึ่งจากการทดสอบโดยการปรับค่าความต้านทาน R_f ในรูปที่ 4.27 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า k_f น้อยลง และเมื่อค่า k_f มีค่าน้อยลง จะส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตัวควบคุมไครมีความชันและแอมพลิจูดน้อยลงตามค่า k_f ที่ลดลง

วงจรตัวควบคุมพีไอ

จากการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีและวงจรตัวควบคุมไครเบื้องต้น เป็นการทดสอบการทำงานของแต่ละวงจร เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไครว่าจะส่งผลต่อสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอย่างไร โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไครมาใช้งานร่วมกัน ซึ่งได้นำวงจรตัวควบคุมพีและวงจรตัวควบคุมไครมาต่อกันแบบขนานและมีวงจรขยายรวมสัญญาณ ซึ่งเป็นวงจรที่นำมาใช้ในการรวมสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไคร สามารถแสดงโครงสร้างของวงจรตัวควบคุมพีไอที่มีการต่อวงจรแบบขนานได้ดังรูปที่ 4.31

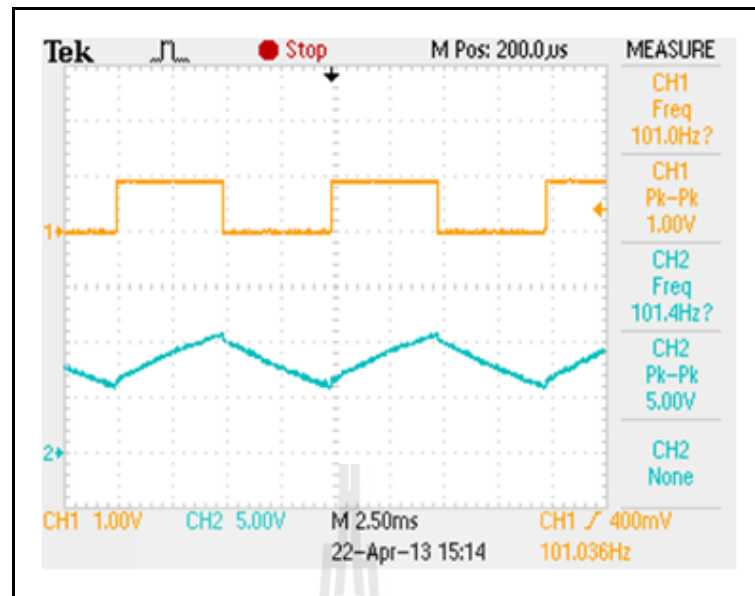


รูปที่ 4.31 วงจรตัวควบคุมพีไอ

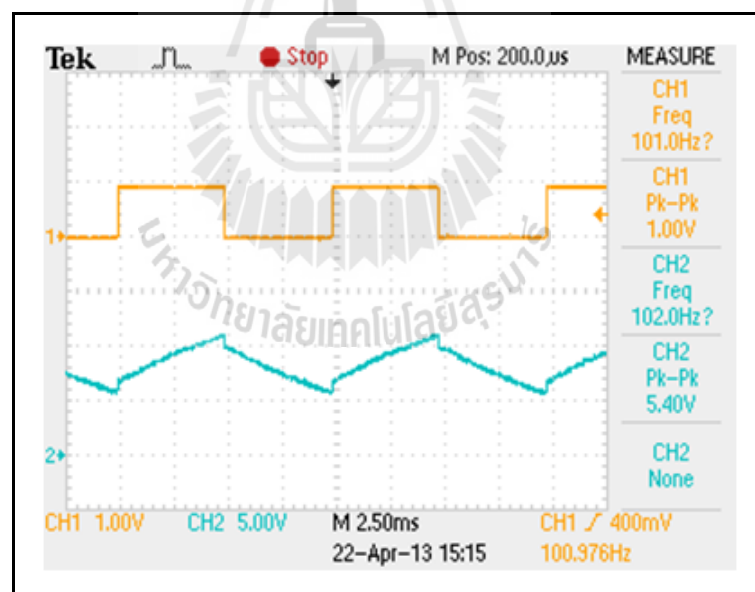
การทดสอบการทำงานของวงจรตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 4.31 ได้ดำเนินการทดสอบโดยการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นพัลส์ เช่นเดียวกับการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีและวงจรตัวควบคุมไอ ซึ่งการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีไอแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 การทดสอบวงจรตัวควบคุมพีไอกรณีปรับค่าตัวควบคุมพี ซึ่งมีการทดสอบตามตารางที่ 4.4 โดยผลการทดสอบของกรณีที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.32 ถึงรูปที่ 4.34 ตามลำดับ และกรณีที่ 2 การทดสอบวงจรตัวควบคุมพีไอกรณีปรับค่าตัวควบคุมไอ ซึ่งมีการทดสอบตามตารางที่ 4.5 โดยผลการทดสอบของกรณีที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.35 ถึงรูปที่ 4.37 ตามลำดับ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุต (V_{in}) และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตัวควบคุมพีไอ (V_o)

ตารางที่ 4.4 การทดสอบตัวควบคุมพีไอกรณีปรับค่าตัวควบคุมพี

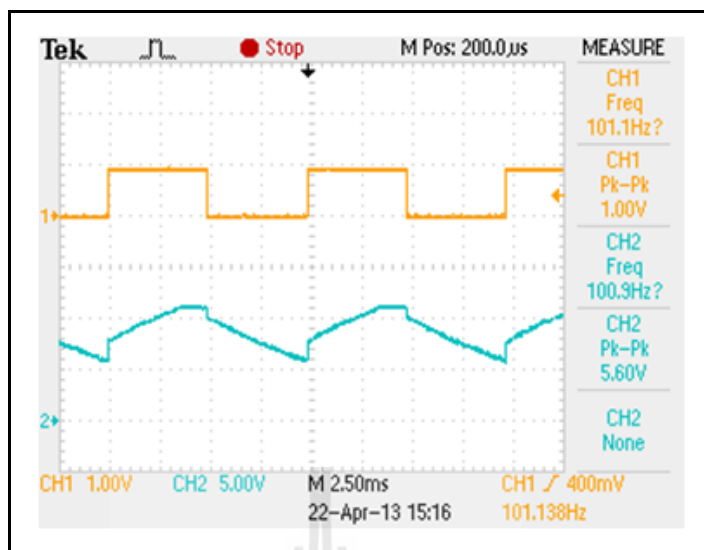
k_p	R_{P1}	R_{P2}	R_{comp2}	k_I	C_i	R_i	R_{Ci}	R_{comp3}
0.5	1 kΩ	500 Ω	10 kΩ	10000	1 μF	500 Ω	10 kΩ	10 kΩ
1	1 kΩ	1 kΩ	10 kΩ					
2	1 kΩ	2 kΩ	10 kΩ					



รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 ที่มีค่า $k_p = 0.5$ และ $k_I = 10000$



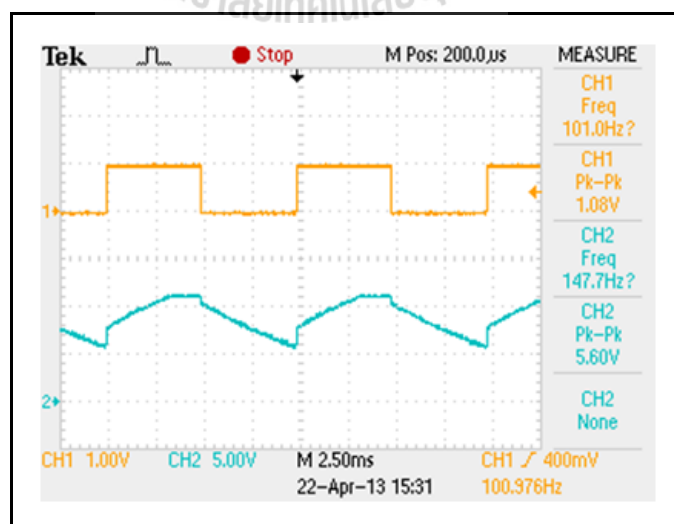
รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 ที่มีค่า $k_p = 1$ และ $k_I = 10000$



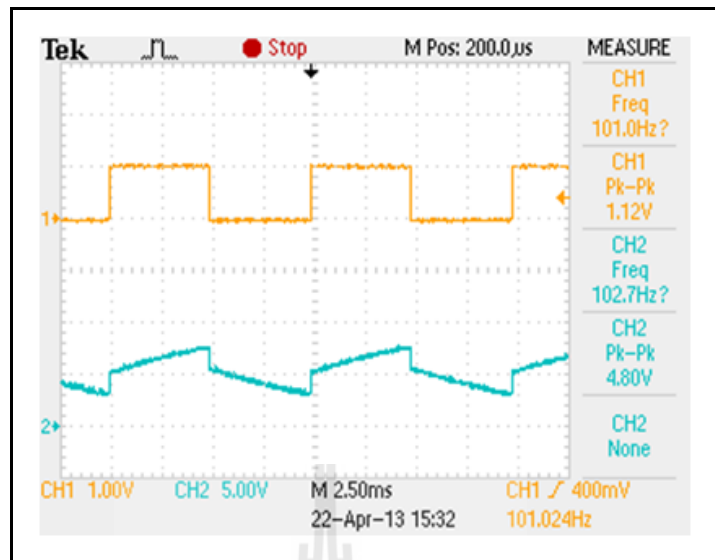
รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 ที่มีค่า $k_p = 2$ และ $k_I = 10000$

ตารางที่ 4.5 การทดสอบตัวควบคุมพีไอกรณีปรับค่าตัวควบคุมไอ

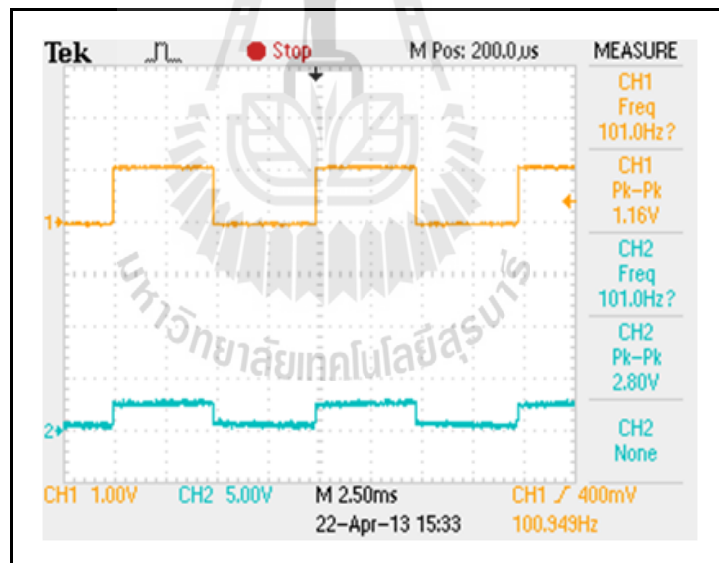
k_I	R_i	C_i	R_{Ci}	R_{comp3}	k_p	R_{P1}	R_{P2}	R_{comp2}
10000	500 Ω	1 μF	10 k Ω	10 k Ω	2	1 k Ω	2 k Ω	10 k Ω
1000	1 k Ω	1 μF	10 k Ω	10 k Ω				
100	10 k Ω	1 μF	10 k Ω	10 k Ω				



รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 ที่มีค่า $k_I = 10000$ และ $k_p = 2$



รูปที่ 4.36 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 ที่มีค่า $k_I = 1000$ และ $k_P = 2$



รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 ที่มีค่า $k_I = 100$ และ $k_P = 2$

จากผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอทั้ง 2 กรณี โดยมีวงจรมีขั้วรวมสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้ในการรวมสัญญาณของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอ พบว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการรวมกันของเอาต์พุตของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอ จะมีลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตแตกต่างกันไป

ตามค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอ เนื่องจากการนำสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอมารวมกันทั้งรูปสัญญาณและขนาดของแอมพลิจูด

การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบ

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพี จะพิจารณาจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอของรถไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งมีค่า $k_p = 3.10$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4-16) โดยจะกำหนดให้ตัวต้านทาน $R_{p1} = 10\text{k}\Omega$ และสามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_{p2} ได้ตามสมการที่ (4-20)

$$R_{p2} = k_p \times R_{p1} = (10 \times 10^3) \times 3.10 = 31\text{k}\Omega \quad (4-20)$$

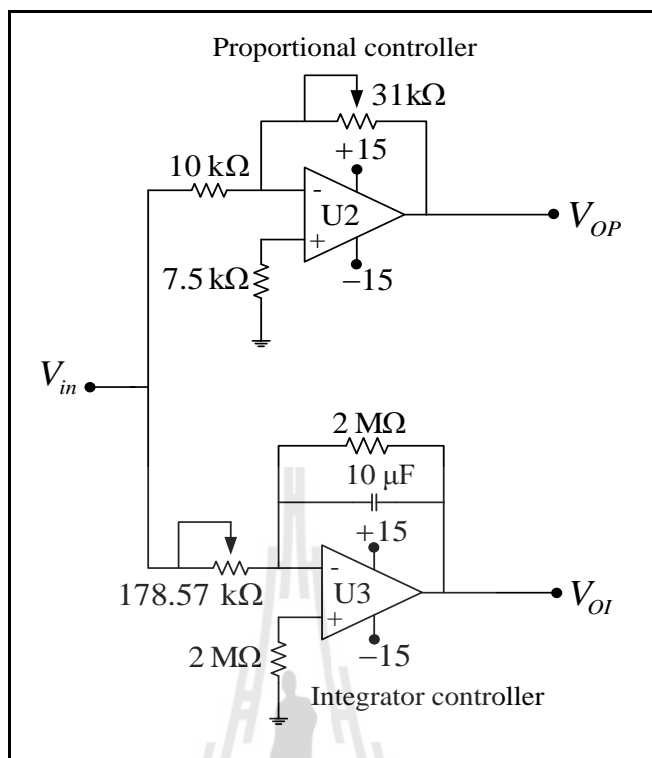
โดยที่ค่าตัวต้านทาน $R_{comp2} \approx R_{p1} // R_{p2} \approx 7.5\text{k}\Omega$

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4-17) ซึ่งมีค่า $k_I = 0.56$ เป็นค่าที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอในหัวข้อที่ 4.2 และจะกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุ $C_i = 10\mu\text{F}$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_i ได้ตามสมการที่ (4-21)

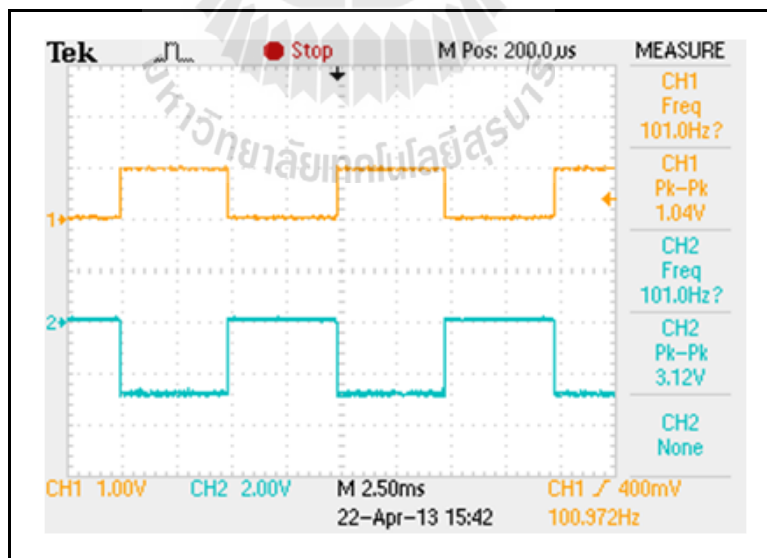
$$R_i = \frac{1}{k_I \times C_i} = \frac{1}{0.56 \times (10 \times 10^{-6})} = 178.57\text{k}\Omega \quad (4-21)$$

โดยที่ค่า $R_{Ci} = R_{comp3} > 10R_i \approx 2\text{M}\Omega$

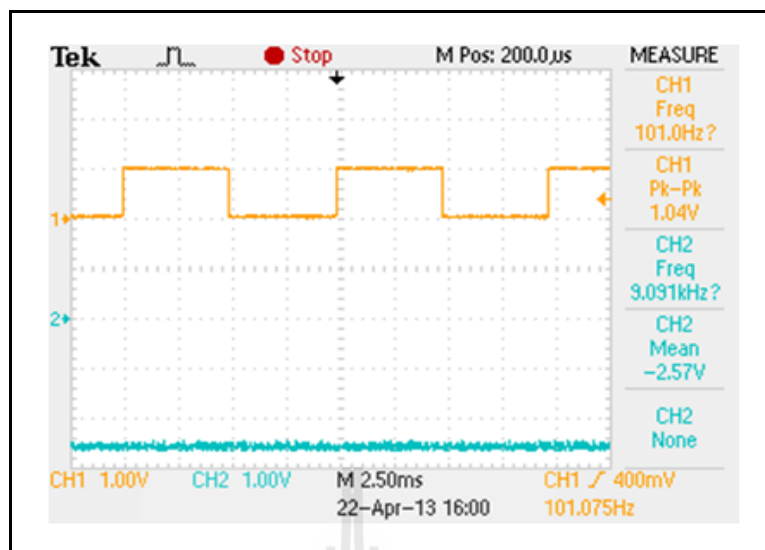
การทดสอบการทำงานของวงจรตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอจากการออกแบบจะกำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์ของวงจร ตามที่ได้ออกแบบไว้ในข้างต้น โดยการทดสอบจะป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณอินพุตที่เป็นพัลส์ และไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ $\pm 15\text{V}$ ซึ่งจะได้วงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.38 และผลของการทดสอบตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอเป็นดังรูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40 ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ช่องสัญญาณที่ 1 เป็นสัญญาณอินพุต (V_{in}) และช่องสัญญาณที่ 2 เป็นสัญญาณเอาต์พุต (V_o)



รูปที่ 4.38 วงจรตัวควบคุมพีและตัวควบคุม ไอทีที่ได้จากการออกแบบ



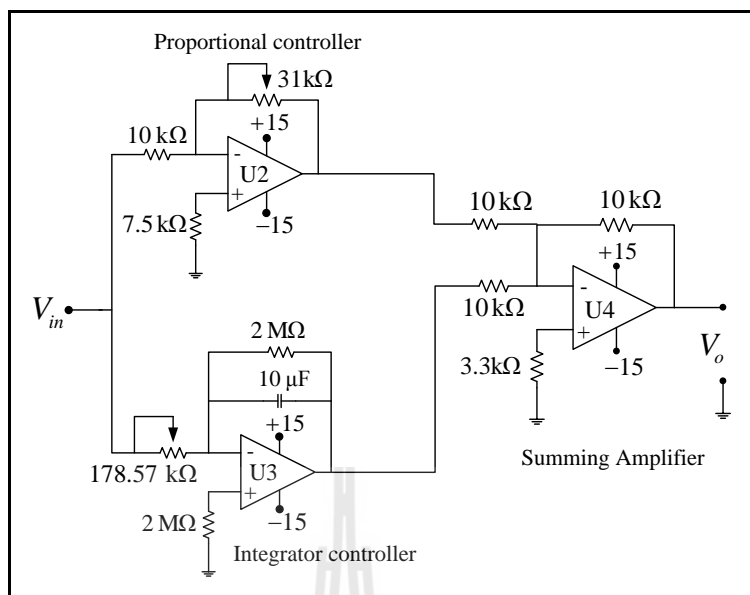
รูปที่ 4.39 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีจากการออกแบบ



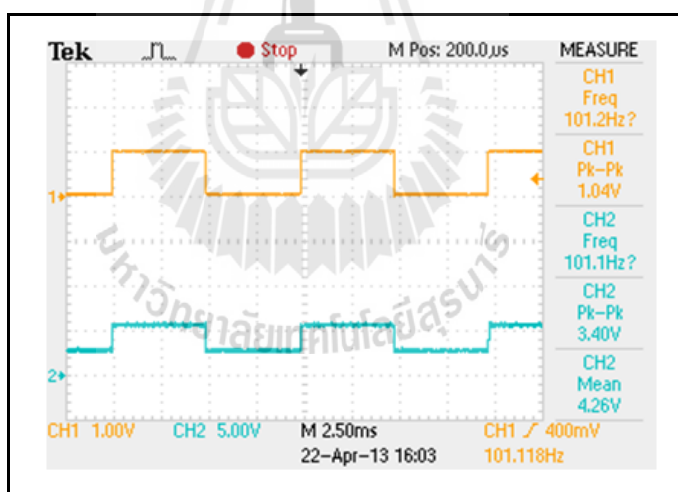
รูปที่ 4.40 ผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมไอยูจากการออกแบบ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวควบคุมพีที่ได้จากการออกแบบในรูปที่ 4.39 พบว่าค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่ามากกว่าค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต เนื่องจากค่าของตัวควบคุมพีที่ได้จากการออกแบบมีค่าเท่ากับ 3.10 ซึ่งเป็นไปตามการทดสอบของตัวควบคุมพีที่ได้อธิบายการทดสอบไว้ในเบื้องต้น แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นแบบกลับเฟสเนื่องจากวงจรตัวควบคุมพีที่นำมาใช้งานมีการต่อวงจรในลักษณะแบบกลับเฟส และในส่วนของผลการทดสอบของตัวควบคุมไอยูที่ได้จากการออกแบบในรูปที่ 4.40 พบว่าค่าเมื่อค่าของตัวควบคุมไอยูที่ได้จากการออกแบบมีเท่ากับ 0.56 ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตัวควบคุมไอยูในลักษณะที่เป็นเส้นตรง ตามที่ได้มีการทดสอบปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอยูไว้ในเบื้องต้น

การทดสอบการทำงานของวงจรตัวควบคุมพีไอยูจากการออกแบบตามรูปที่ 4.41 ได้ดำเนินการทดสอบโดยการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณพัลส์ เช่นเดียวกับการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีและวงจรตัวควบคุมไอยู ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.42 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุต (V_m) และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตัวควบคุมพีไอยู (V_o)



รูปที่ 4.41 วงจรตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบ



รูปที่ 4.42 ผลการทดสอบวงจรถวลควบคุมพีไอจากการออกแบบ

จากผลการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมพีไอตามรูปที่ 4.42 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้เกิดจากการรวมกันของสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมไอด้วยวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งจะรวมกันทั้งลักษณะของรูปสัญญาณและขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยลักษณะของรูปสัญญาณเอาต์พุตจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับสัญญาณอินพุต เนื่องจากการทำงานของวงจรรวมสัญญาณที่มีการต่อวงจรเป็นแบบกลับเฟส

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยคำนึงถึงลักษณะการทำงานของรถไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมพีไอได้ดำเนินการออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ และจากการจำลองผลการตอบสนองของระบบในทางเวลาในกรณีมีตัวควบคุม พบว่าผลตอบสนองของระบบมีเวลาเข้าที่ไม่รวดเร็วจนเกินไปและไม่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัว เป็นไปตามเงื่อนไขที่ทางผู้ดำเนินงานวิจัยได้กำหนดไว้ ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้งานในระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า และนอกจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดังกล่าวแล้ว ทางผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำการสร้างวงจรตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก โดยผลการทดสอบวงจรตัวควบคุมพีไอเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น โดยตัวควบคุมพีไอดังกล่าวจะนำไปใช้ในการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม ซึ่งได้มีการอธิบายการทดสอบและผลของการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมไว้ในบทที่ 6



บทที่ 5

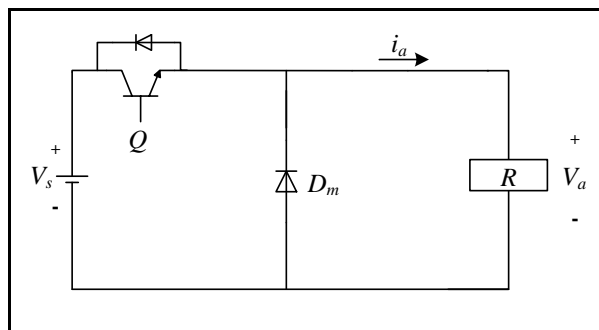
โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

5.1 บทนำ

ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุม โดยการควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าสามารถควบคุมการทำงานได้จากวงจรจุดชนวนเกท ที่เป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ ซึ่งในบทนี้ได้มีการอธิบายถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ และวงจรจุดชนวนเกท โดยได้อธิบายถึงการทำงาน การออกแบบและการทดสอบวงจรต่าง ๆ และนอกจากการอธิบายถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้างดกล่าวแล้ว ทางผู้ดำเนินงานวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอ โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้าในขณะใช้งานของรถไฟฟ้าไว้ด้วยเช่นกัน

5.2 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์

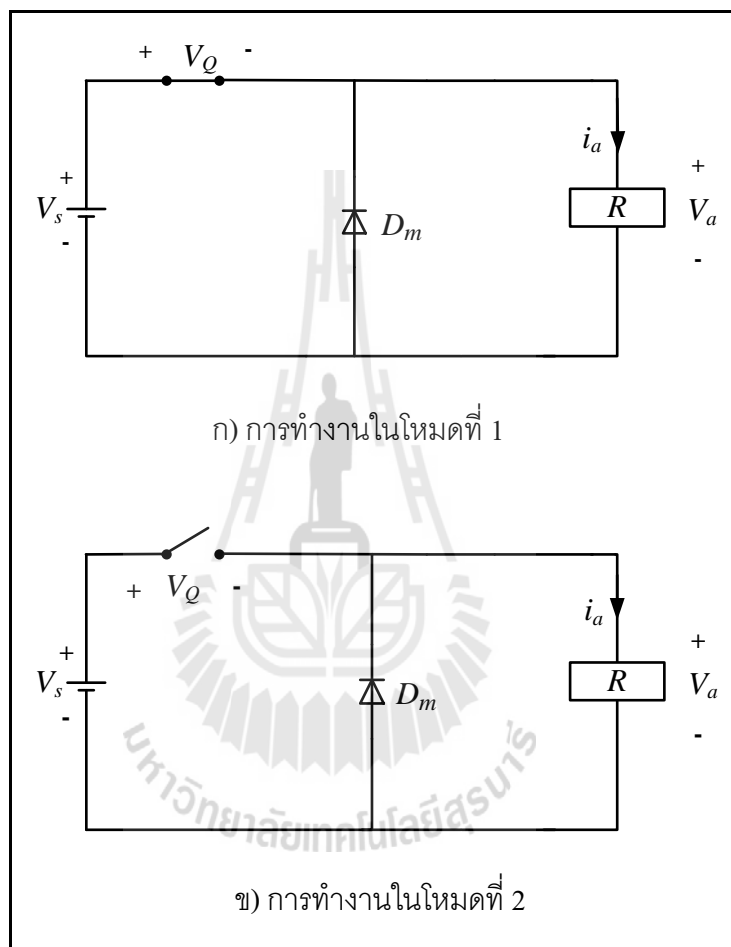
วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์เป็นวงจรที่ใช้ในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้มีค่าต่ำกว่าหรือมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ประกอบด้วย ไดโอด และ ไอจีบีทีที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างวงจรที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์

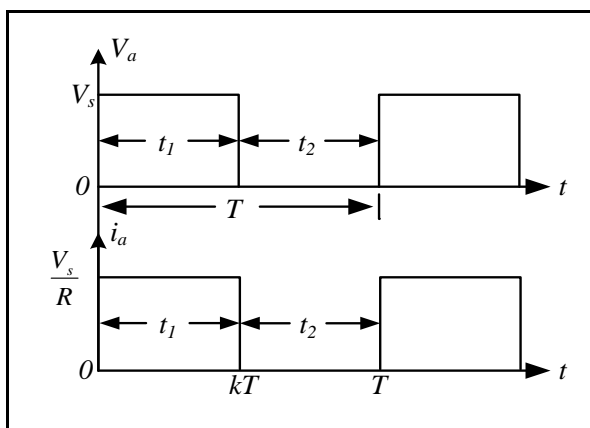
5.2.1 การทำงานของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์

การทำงานของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์แบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดที่ 1 เป็นโหมดที่ไอจีบีทีทำงาน โหมดที่ 2 เป็นโหมดที่ไอจีบีทีหยุดทำงาน สามารถแสดงการทำงานในแต่ละโหมดได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์

จากวงจรในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าการทำงานในโหมดที่ 1 เมื่อไอจีบีทีทำงาน เป็นเวลา t_1 จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่โหลด (v_a) ส่วนการทำงานของโหมดที่ 2 ไอจีบีทีหยุดทำงาน เป็นเวลา t_2 ทำให้แรงดันตกคร่อมที่โหลดเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 รูปสัญญาณที่ใช้ในการอธิบายหลักการทํางานของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์

เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตในรูปที่ 5.3 สามารถคำนวณหาค่าแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตได้ดังสมการที่ (5-1)

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a dt = \frac{V_s}{T} \times t_1 \quad (5-1)$$

กำหนดให้ t_1 คือ ช่วงเวลาที่ไอจีบีทีทำงาน ซึ่งจะคำนวณได้ตามสมการที่ (5-2) และ t_2 คือ ช่วงเวลาที่ไอจีบีทีหยุดทํางาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-3) ดังนี้

$$t_1 = kT \quad (5-2)$$

$$t_2 = (1-k)T \quad (5-3)$$

เมื่อ k คือ รอบทํางาน (duty cycle)

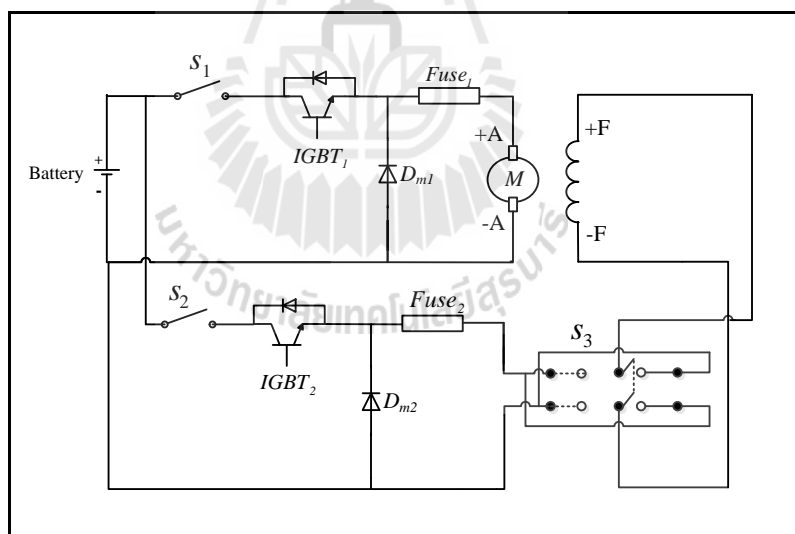
T คือ คาบการทํางานของไอจีบีที (s)

แทนค่า t_1 จากสมการที่ (5-2) ลงในสมการที่ (5-1) จะได้สมการคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ (5-4) ดังนี้

$$V_a = kV_s \quad (5-4)$$

5.2.2 การออกแบบอุปกรณ์

การออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์จะพิจารณาจากค่าแรงดันและค่ากระแสสูงสุดจากการใช้งาน โดยการออกแบบอุปกรณ์ดังกล่าวต้องคำนึงถึงค่าประกอบนิรภัย ซึ่งจะเผื่อค่าประกอบนิรภัยไว้ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการออกแบบอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์เป็น 2 ส่วน คือ วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยการออกแบบอุปกรณ์จะพิจารณาจากค่าพิกัดแรงดันและกระแสสูงสุดของวงจรอาร์เมเจอร์ ซึ่งจะมีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ 48 V ค่ากระแสสูงสุดเท่ากับ 105 A ดังนั้น การเลือกอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานจะต้องมีค่าการทนแรงดันมากกว่า 60 V (48×1.25) และค่าการทนกระแสมากกว่า 131.25 A (105×1.25) และในส่วนของวงจรถานที่มีค่าพิกัดของค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ 6 V และค่ากระแสสูงสุดเท่ากับ 10 A ดังนั้น อุปกรณ์ที่นำมาใช้งานต้องมีค่าการทนแรงดันมากกว่า 7.5 V (6×1.25) และค่าการทนกระแสต้องมากกว่า 12.5 A (10×1.25) วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ในรูปที่ 5.4 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายที่เป็นแบตเตอรี่ ไอจีบีทีทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ($IGBT_1$) ไอจีบีทีทางด้านวงจรถาน ($IGBT_2$) ไดโอดทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ (D_{m1}) ไดโอดทางด้านวงจรถาน (D_{m2}) สวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ (S_1) สวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจรถาน (S_2) สวิตช์กลับขั้วแรงดัน

ทางด้านวงจรสนาม (S_3) ฟิวส์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ($Fuse_1$) และฟิวส์ทางด้านวงจรสนาม ($Fuse_2$) ดังนั้น การออกแบบอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัย วิทยานิพนธ์สามารถอธิบายการออกแบบได้ดังต่อไปนี้

การออกแบบแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอินพุตของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ในการออกแบบแบตเตอรี่ที่นำมาใช้งานจะพิจารณาจากพิกัดแรงดันและกระแสสูงสุดของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 48 V 105 A ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้แบตเตอรี่ยี่ห้อ U.S. Battery ขนาด 8 V 170 Ah จำนวน 6 ลูก ต่ออนุกรมเพื่อให้ได้ค่าแรงดันตามการใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แบตเตอรี่ขนาด 48 V 170 Ah ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การออกแบบสวิตช์

สวิตช์ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์มีหน้าที่ในการตัดต่อวงจรและสวิตช์ที่ทำหน้าที่ในการกลับขั้วแรงดันเอาต์พุตของวงจรสนามเพื่อใช้ในการกลับทางหมุนของมอเตอร์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.4 ประกอบด้วย สวิตช์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ (S_1) สวิตช์ทางด้านวงจรสนาม (S_2) และสวิตช์กลับขั้วของแรงดันเอาต์พุตทางด้านวงจรสนาม (S_3) ซึ่งการเลือกสวิตช์ที่นำมาใช้งานจะพิจารณาจากค่าพิกัดแรงดันและกระแสของการทำงานเป็นหลัก ดังนั้น การออกแบบสวิตช์ทางด้านวงจรสนามเมื่อพิจารณาจากค่าแรงดันและค่ากระแสที่ได้คำนวณค่าประกอบนิรภัยแล้ว คือ ค่าแรงดันเท่ากับ 7.5 V และค่ากระแสเท่ากับ 12.5 A ดังนั้น สวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจร

สนามจะใช้ ยี่ห้อ Tyco Electronic เบอร์ W91-X152-20 มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 65 V และพิกัดกระแสเท่ากับ 20 A และสวิตช์ที่ใช้ในการกลับขั้วแรงดันเอาต์พุตของวงจรสนามที่นำมาใช้งาน คือ ยี่ห้อ nikkai เบอร์ S-822 มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 30 V และค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 30 A ซึ่งสวิตช์ที่นำมาใช้งานทางด้านวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ตามลำดับ และในส่วนของสวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสวิตช์ที่มีมากับรถไฟฟ้า ซึ่งได้นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ด้วย โดยสวิตช์ที่นำมาใช้ในการตัดต่อวงจรทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.6 สวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 5.7 สวิตช์ที่ใช้ในการกลับขั้วแรงดันเอาต์พุตของวงจรสนาม



รูปที่ 5.8 สวิตช์ตัดต่อวงจรทางด้านวงจรรีเลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 5.8 เป็นสวิตช์ที่นำมาใช้ในการตัดต่อวงจรทางด้านอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบรีเลย์ คือ สามารถควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ได้ด้วยการจ่ายกระแสให้กับขดลวดภายในตัวของอุปกรณ์ ดังนั้น ในควบคุมการทำงานของสวิตช์ดังกล่าวจึงต้องมีสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของรีเลย์ โดยสวิตช์ที่นำมาใช้ในการควบคุมการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของรีเลย์ คือ ยี่ห้อ Honeywell พิกัด 12 Vdc, 20 A; 24 Vdc, 10 A; 48 Vdc, 4 A สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



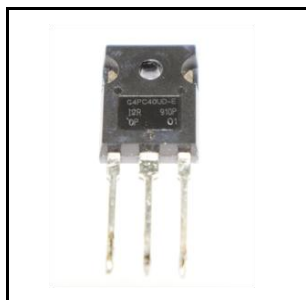
รูปที่ 5.9 สวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1

การออกแบบไอจีบีที

การออกแบบไอจีบีทีของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ แบ่งเป็นการออกแบบไอจีบีทีทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และทางด้านวงจรสนาม เนื่องจากมีพิกัดการใช้งานที่ต่างกัน โดยในการออกแบบไอจีบีทีทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ จะพิจารณาจากค่าพิกัดแรงดันและกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งาน โดยมีค่าประกอบนิรภัยที่ได้มีการคำนวณแล้วเท่ากับ 60 V และ 131.25 A ดังนั้น ไอจีบีทีที่นำมาใช้งาน คือ ไอจีบีทีแบบมอดูล ยี่ห้อ Mitsubishi เบอร์ CM300HA-24H ที่มีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 1200 V และค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 300 A และในส่วนของไอจีบีทีที่นำมาใช้งานทางด้านวงจรสนาม จะพิจารณาจากพิกัดค่าแรงดันและค่ากระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งาน โดยมีค่าประกอบนิรภัยทางด้านวงจรสนาม คือ ค่าแรงดันเท่ากับ 7.5 V และค่ากระแสเท่ากับ 12.5 A ดังนั้น ไอจีบีทีที่นำมาใช้งาน คือ ยี่ห้อ International Rectifier เบอร์ IRG4PC40UDPbF ที่มีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 600 V และค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 20 A ซึ่งไอจีบีทีที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ ทั้งด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ดังนี้



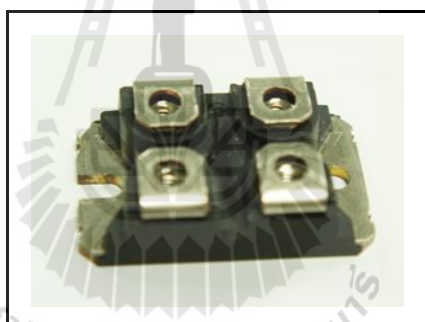
รูปที่ 5.10 ไอจีบีทีมอดูลที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์



รูปที่ 5.11 ไอจีบีทีที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรสนาม

การออกแบบไดโอด

การออกแบบไดโอดจะพิจารณาจากค่าพิกัดแรงดันและกระแสเช่นเดียวกันกับการออกแบบไอจีบีที ซึ่งการออกแบบไดโอดที่ใช้งานทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ต้องมีค่าการทนแรงดันและกระแสสูงสุดที่ได้จากการคำนวณค่าประกอบนิรภัยแล้ว คือ 60 V และ 131.25 A ดังนั้นไดโอดที่นำมาใช้งานทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์จะมีลักษณะของไดโอดเป็นแบบมอดูล คือ ยี่ห้อ STMicroelectronics เบอร์ STTH20004TV1 ที่มีค่าพิกัดการทนแรงดันเท่ากับ 400 V และค่าพิกัดการทนกระแสเท่ากับ 240 A และไดโอดที่ใช้งานทางด้านวงจรสนามเมื่อพิจารณาจากค่าประกอบนิรภัยที่มีค่าแรงดันเท่ากับ 7.5 V และค่ากระแสเท่ากับ 12.5 A ดังนั้น ไดโอดที่นำมาใช้งานทางด้านวงจรสนาม คือ ยี่ห้อ STMicroelectronics เบอร์ STTH30R04W ที่มีค่าพิกัดการทนแรงดันเท่ากับ 400 V และค่าพิกัดการทนกระแสเท่ากับ 30 A ซึ่งไดโอดที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทั้งด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ดังนี้



รูปที่ 5.12 ไดโอดที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์



รูปที่ 5.13 ไดโอดที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรสนาม

การออกแบบฟิวส์

การออกแบบฟิวส์ที่นำมาใช้ในชุดขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า จะพิจารณาจากค่าพิกัดของวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรถนามของมอเตอร์ ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากค่าพิกัดแรงดันและกระแสทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ที่มีค่าเท่ากับ 48 V และ 105 A จึงเลือกใช้ฟิวส์ ยี่ห้อ PUDENZ ที่มีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 80 V พิกัดกระแสเท่ากับ 125 A จะเห็นได้ว่าการเลือกฟิวส์ให้มีความมากกว่าค่าพิกัดกระแสของวงจรอาร์เมเจอร์ เนื่องมาจากการทำงานของรถไฟฟ้าในขณะที่ออกตัวจะมีค่ากระแสตอนสตาร์ทสูงมาก และการเปลี่ยนย่านการทำงานต่าง ๆ ที่อาจทำให้เกิดกระแสพุ่งสูง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้ฟิวส์ในพิกัดดังกล่าว และทางด้านวงจรถนามที่มีค่าพิกัดแรงดันและกระแสเท่ากับ 6 V และ 10 A จึงเลือกใช้ฟิวส์ ยี่ห้อ PUDENZ ที่มีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 80 V พิกัดกระแสเท่ากับ 10 A เนื่องจากการปรับตั้งการทำงานของวงจรถนามไม่ได้กำหนดให้มีการทำงานที่ค่าพิกัด ดังนั้นการเลือกใช้ฟิวส์ที่ค่าดังกล่าวเป็นการเผื่อการใช้งานที่อาจจะมีเปลี่ยนแปลงในอนาคตหรือเพื่อในกรณีเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดที่อาจเกิดขึ้น จากการออกแบบฟิวส์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทั้งด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรถนามสามารถดูได้จากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 ดังนี้

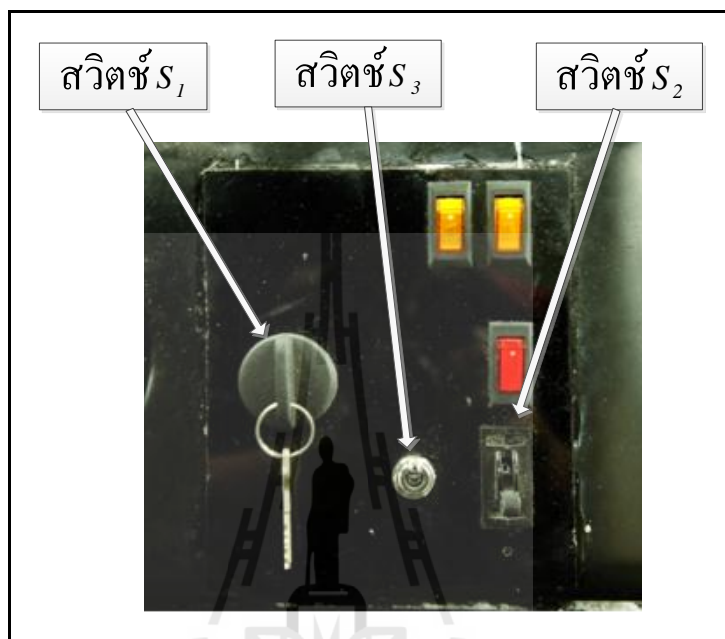


รูปที่ 5.14 ฟิวส์ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์

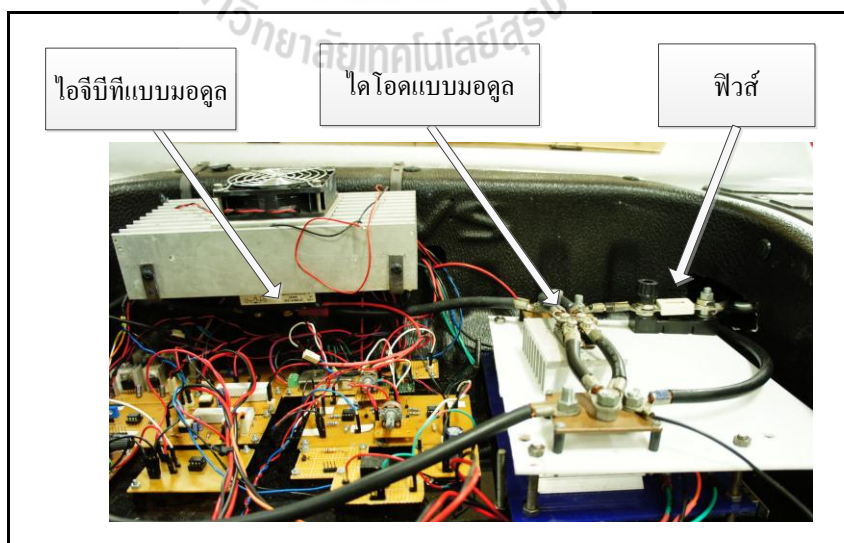


รูปที่ 5.15 ฟิวส์ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรถนาม

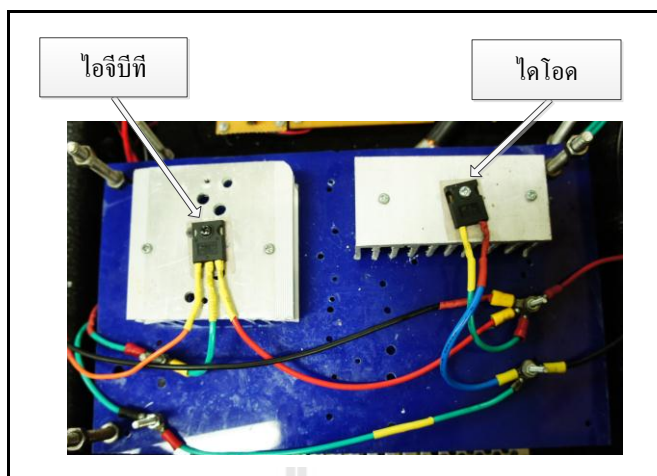
จากการออกแบบอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ในเบื้องต้น ผู้ดำเนินงานวิจัย วิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ จากการออกแบบในรูปไฟฟ้าง่ายรูปที่ 5.16 ถึงรูปที่ 5.19 ดังนี้



รูปที่ 5.16 การติดตั้งสวิตช์ควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้า



รูปที่ 5.17 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์



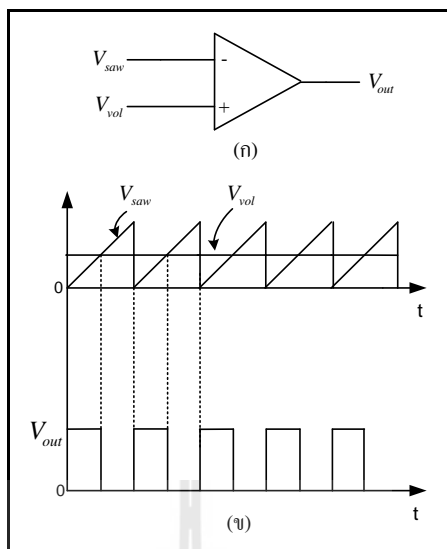
รูปที่ 5.18 วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรสนาม



รูปที่ 5.19 การติดตั้งฟิวส์ทางด้านวงจรสนาม

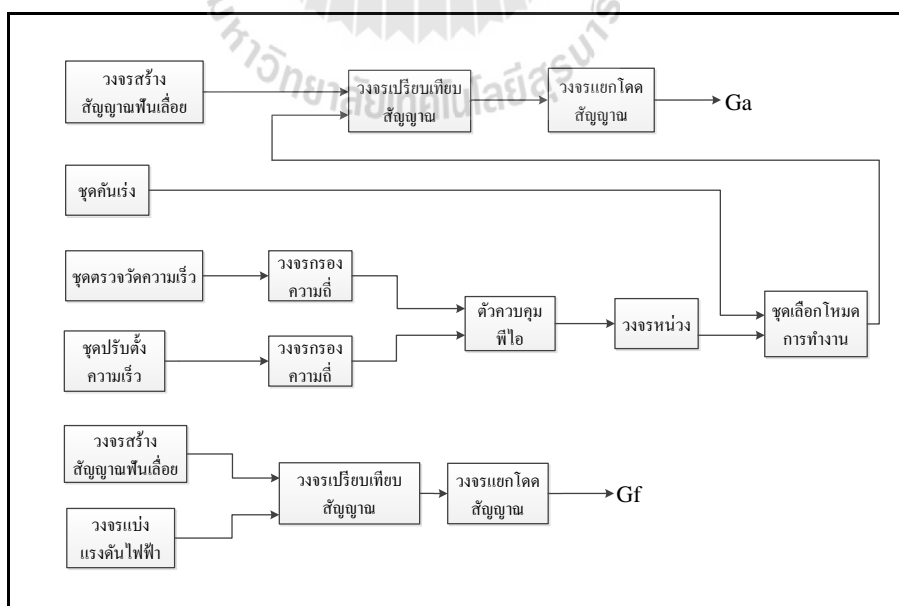
5.3 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรจุดชนวนเกท

วงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจะใช้เทคนิคแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation : PWM) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ แต่ความถี่ของรูปสัญญาณจะมีค่าคงที่ ซึ่งจะใช้เทคนิคดังกล่าวในการควบคุมการทำงานของไอจีบีที โดยเทคนิคแบบ PWM เป็นการเปรียบเทียบกันของสัญญาณอ้างอิง คือ ระดับของแรงดันไฟฟ้า และสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบ คือ สัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งสามารถแสดงการทำงานของเทคนิคแบบ PWM ได้ดังรูปที่ 5.20



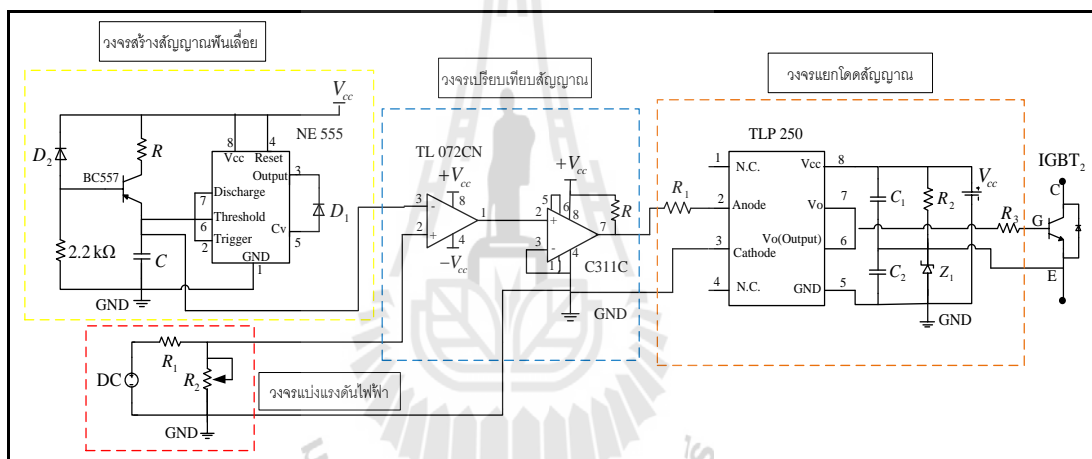
รูปที่ 5.20 ก) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ข) ลักษณะการทำงานของเทคนิค PWM

การควบคุมการทำงานของไอจีบีทีจากวงจรจุดชนวนเกทด้วยเทคนิคแบบ PWM จะนำมาใช้ควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทั้งทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนาม ซึ่งจะมีโครงสร้างของแผนภาพบล็อกโคอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทแสดงได้ดังรูปที่ 5.21

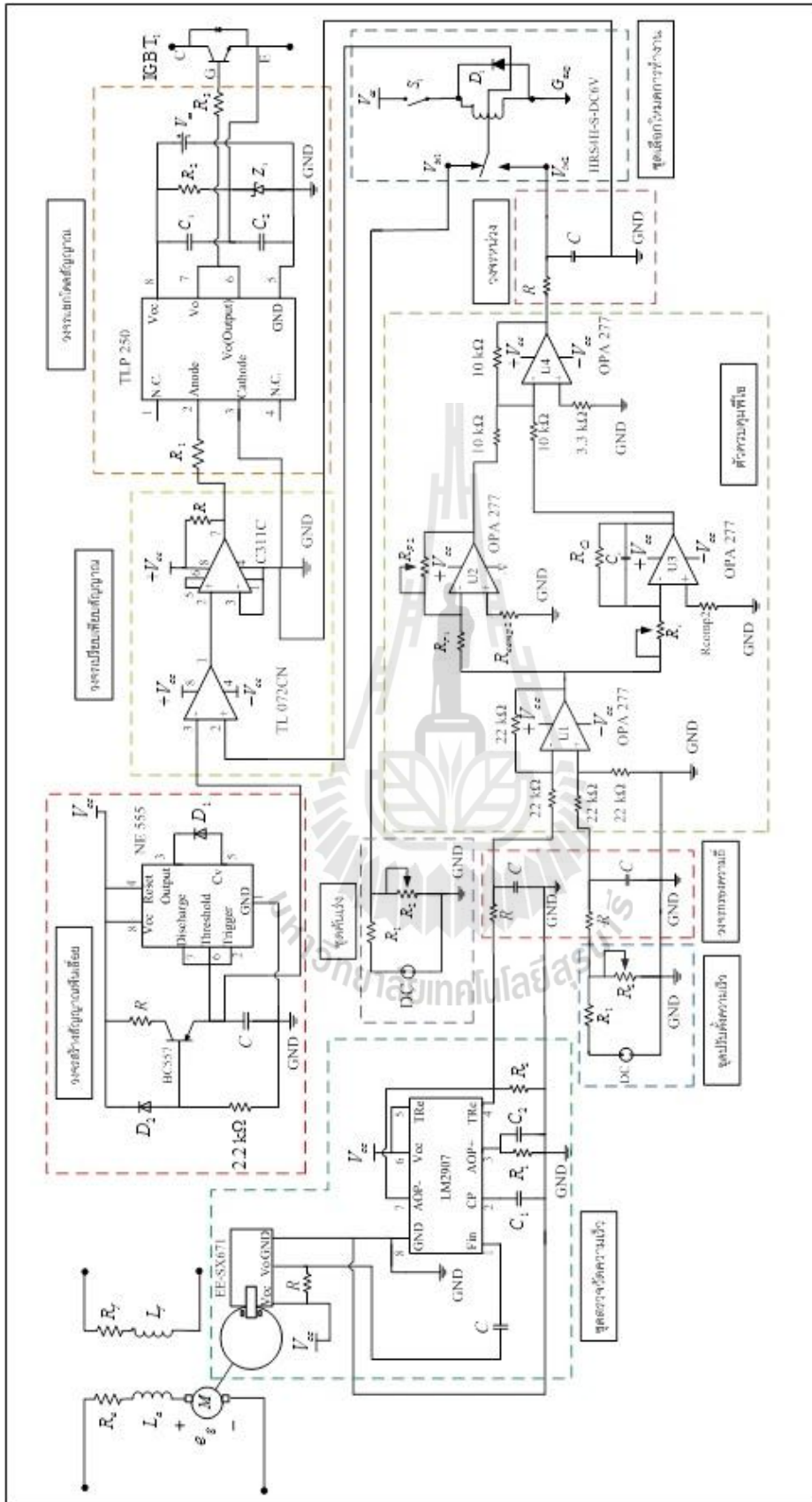


รูปที่ 5.21 บล็อกโคอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า

จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกณฑ์ตามรูปที่ 5.21 ประกอบไปด้วย วงจรสร้างสัญญาณพัลส์เลื่อย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรแยกโคตสัญญาณ ชุดคันเร่ง วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ชุดปรับตั้งความเร็ว ชุดตรวจวัดความเร็ว วงจรกรองความถี่ ตัวควบคุมพีไอ วงจรหน่วง และชุดเลือกโหมดการทำงาน โดยที่ Ga คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนเกณฑ์ด้านวงจรอาร์เมเจอร์และ Gf คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนเกณฑ์ด้านวงจรสนาม ซึ่งจากบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกณฑ์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังกล่าว สามารถเขียนเป็นโครงสร้างวงจรทั้งหมดที่นำไปใช้งานได้โดยการแบ่งวงจรจุดชนวนเกณฑ์ออกเป็น 2 วงจร คือ วงจรจุดชนวนเกณฑ์ด้านวงจรสนาม และวงจรจุดชนวนเกณฑ์ด้านวงจรอาร์เมเจอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 วงจรจุดชนวนเกณฑ์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทางด้านวงจรสนาม

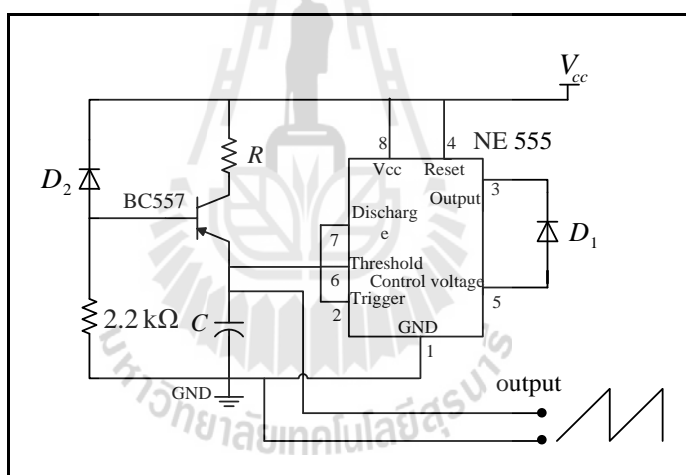


รูปที่ 5.23 วงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทางด้านจอร์นเจอร์

จากรูปวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟในรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 ทางผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการอธิบายการทำงานและการออกแบบของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า วงจรแยกโคตสัญญาณ และวงจรเลือกโหมดการทำงานไว้ในหัวข้อนี้ โดยในส่วนของวงจรอื่น ๆ นอกจากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น จะได้มีการอธิบายการทำงาน และการออกแบบของวงจรตามหัวข้อของการใช้งานรถไฟในลักษณะของการขับเคลื่อนรถไฟแบบต่าง ๆ

5.3.1 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (sawtooth wave generator) เป็นสัญญาณที่นำมาเพื่อเป็นสัญญาณที่ใช้ในการเปรียบเทียบ โดยสามารถสร้างได้จากไอซี ยี่ห้อ TEXAS INSTRUMENTS เบอร์ NE555 ซึ่งจะมีโครงสร้างของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

จากวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในรูปที่ 5.24 ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด และตัวต้านทาน โดยการต่อวงจรในลักษณะดังกล่าว ทำให้ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ $2/3$ เท่าของแรงดันไฟเลี้ยงของวงจร ซึ่งการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (5-5)

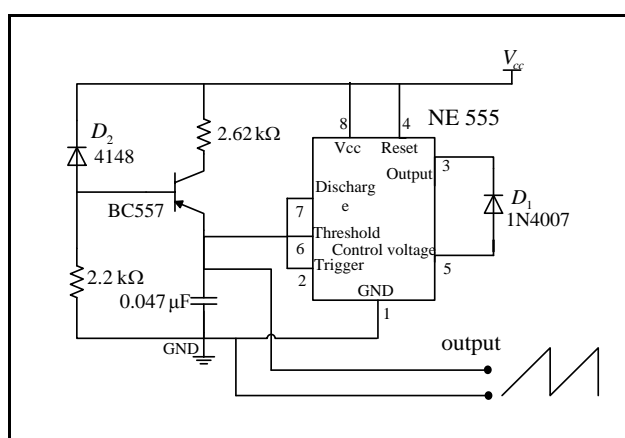
$$f = \frac{(V_{cc} - 2.7)}{R \times C \times V_{pp}} \quad (5-5)$$

โดยที่	V_{cc}	คือ	แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร (V)
	V_{pp}	คือ	ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต (V)
	f	คือ	ค่าความถี่ในการออกแบบ (Hz)
	C	คือ	ค่าตัวเก็บประจุ (F)
	R	คือ	ตัวต้านทาน (Ω)

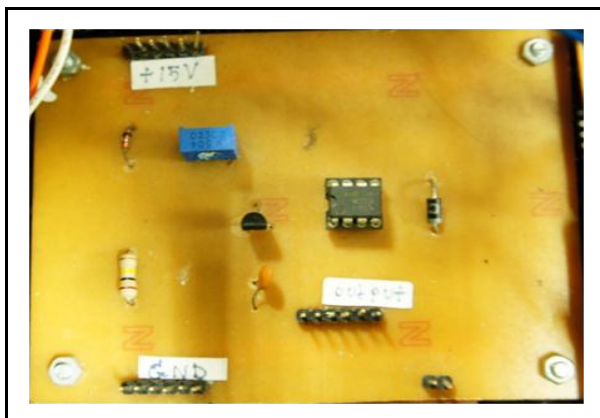
การออกแบบสัญญาณพื่นเหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้มีค่าความถี่ของสัญญาณเท่ากับ 10 kHz ไฟเลี้ยงของวงจร (V_{cc}) เท่ากับ 15 V ดังนั้น ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยม (V_{pp}) มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3} \times 15 = 10V$ และการออกแบบจะกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุในวงจรมีค่าเท่ากับ 0.047 μF ดังนั้น การคำนวณหาตัวต้านทานจะพิจารณาจากสมการที่ (5-5) โดยจัดรูปสมการเพื่อหาตัวต้านทานได้ตามสมการที่ (5-6)

$$R = \frac{(V_{cc} - 2.7)}{f \times C \times V_{pp}} \quad (5-6)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรตามที่ได้กำหนดไว้ในเบื้องต้นลงในสมการที่ (5-6) จะได้ค่าตัวต้านทาน $R = 2.62 k\Omega$ ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยมที่ได้จากการออกแบบได้ดังรูปที่ 5.25 และวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยมที่นำมาใช้งานจริงดังรูปที่ 5.26

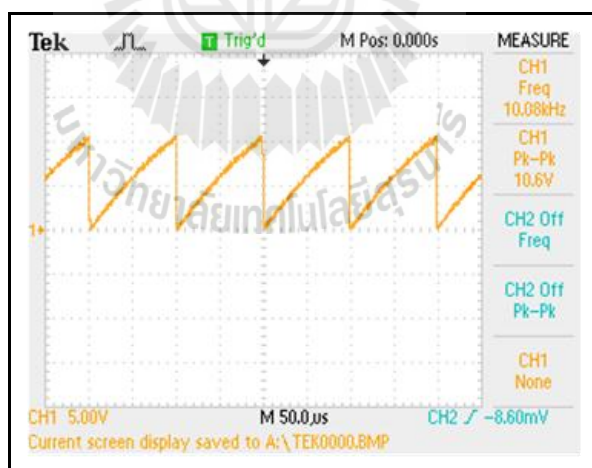


รูปที่ 5.25 วงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยมที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 5.26 วงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยมที่ใช้งานจริง

การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยมในรูปที่ 5.26 ได้ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ 15 V ตามที่ได้มีการออกแบบไว้ และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยม ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5.27 ดังนี้

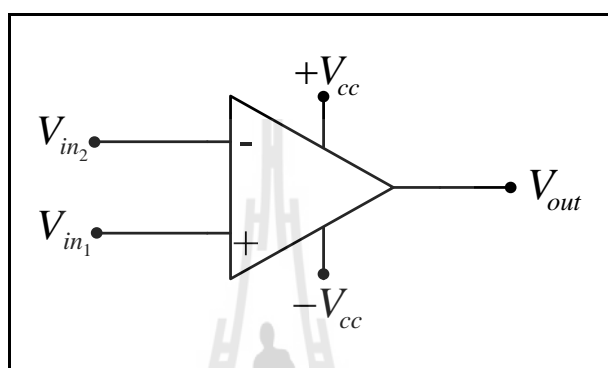


รูปที่ 5.27 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยม

จากผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณพื่นเหลี่ยมในรูปที่ 5.27 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีขนาดของแอมพลิจูดเท่ากับ 10 V และมีค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 10 kHz ซึ่งเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น

5.3.2 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบสัญญาณแรงดันของอินพุตหนึ่งกับสัญญาณแรงดันของอีกอินพุตหนึ่ง โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะตามความแตกต่างของสัญญาณอินพุต ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ซอฟต์แวร์เป็นอุปกรณ์ในการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยมีโครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากรูปที่ 5.28 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (5-7)

$$V_{out} = (V_{in_1} - V_{in_2}) \quad (5-7)$$

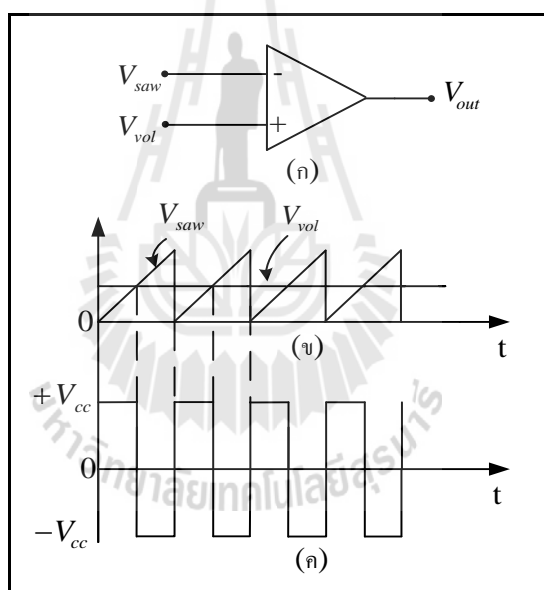
โดยที่	V_{in_1}	คือ	แรงดันอินพุตที่ 1
	V_{in_2}	คือ	แรงดันอินพุตที่ 2
	V_{out}	คือ	แรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5-7) พบว่า ถ้า V_{in_1} มีค่ามากกว่า V_{in_2} ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นบวก และถ้า V_{in_1} มีค่าน้อยกว่า V_{in_2} ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นลบ โดยทางปฏิบัติแล้วค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะถูกจำกัดด้วยไฟเลี้ยงของออปแอมป์ (V_{cc}) ซึ่งจากที่อธิบายมาข้างต้น จะพบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณมีสภาวะการทำงาน 2 สภาวะ คือ

$$\text{สถานะที่ 1 } V_{out} = +V_{cc} \text{ เมื่อ } V_{in_1} > V_{in_2} \quad (5-8)$$

$$\text{สถานะที่ 2 } V_{out} = -V_{cc} \text{ เมื่อ } V_{in_1} < V_{in_2} \quad (5-9)$$

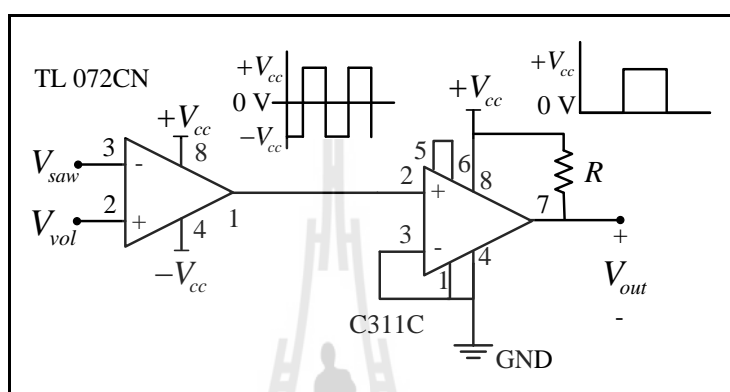
จากการทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณตามที่ได้กล่าวมาเบื้องต้น กำหนดให้ V_{vol} เป็นสัญญาณที่ใช้ในการอ้างอิง (reference signal) ในส่วนของสัญญาณสามเหลี่ยม V_{saw} เป็นสัญญาณพาหะ (carrier signal) โดยให้แรงดันอ้างอิงจ่ายเข้าที่ขาอินเวอร์ต (+) และสัญญาณพาหะจ่ายเข้าที่ขาอินเวอร์ต (-) ของออปแอมป์ ซึ่งมีลักษณะของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังรูปที่ 5.29 (ก) และมีลักษณะการเปรียบเทียบกันของสัญญาณดังรูปที่ 5.29 (ข) ซึ่งทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังรูปที่ 5.29 (ค) ดังนี้



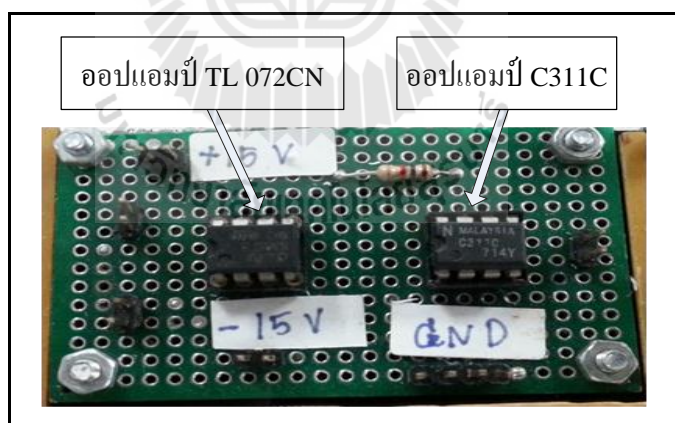
รูปที่ 5.29 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากรูปที่ 5.29 (ค) พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนสถานะจาก $-V_{cc}$ ไปเป็น $+V_{cc}$ หรือจาก $+V_{cc}$ ไปเป็น $-V_{cc}$ ตรงจุดที่แรงดันอ้างอิง V_{vol} มีค่าเท่ากับสัญญาณแรงดันพาหะ V_{saw} และเมื่อสังเกตสัญญาณเอาต์พุตจะพบว่า เมื่อ $V_{vol} > V_{saw}$ จะให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ $+V_{cc}$ และเมื่อ $V_{vol} < V_{saw}$ จะให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ $-V_{cc}$ ตามที่ได้อธิบายการทำงาน of วงจรไว้แล้วในตอนต้น แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ต้องการให้ระดับสัญญาณอยู่บนชิกบวกรจึงได้นำออปแอมป์เบอร์ C311C มาช่วยในการยกระดับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบ

สัญญาณ โดยจะมีลักษณะของการต่อวงจรในลักษณะแบบไม่กลับเฟส ดังนั้นออปแอมป์ที่นำมาใช้ในวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ คือ ออปแอมป์ ยี่ห้อ ST Microelectronics เบอร์ TL 072CN และออปแอมป์ ยี่ห้อ Malaysia เบอร์ C311C ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณได้ดังรูปที่ 5.30 และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่นำมาใช้งานจริงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังรูปที่ 5.31



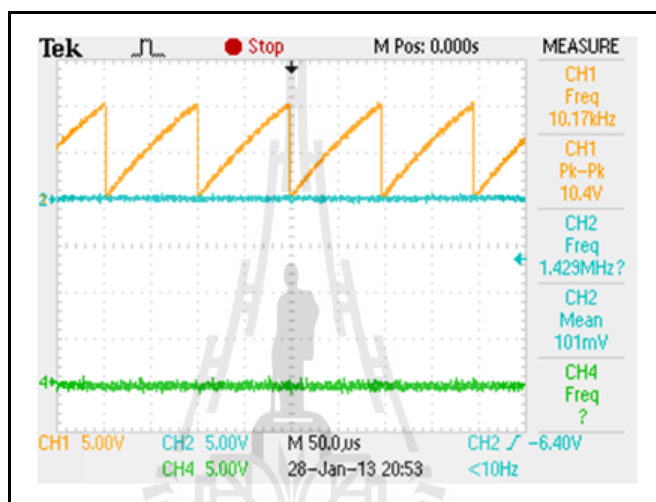
รูปที่ 5.30 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์



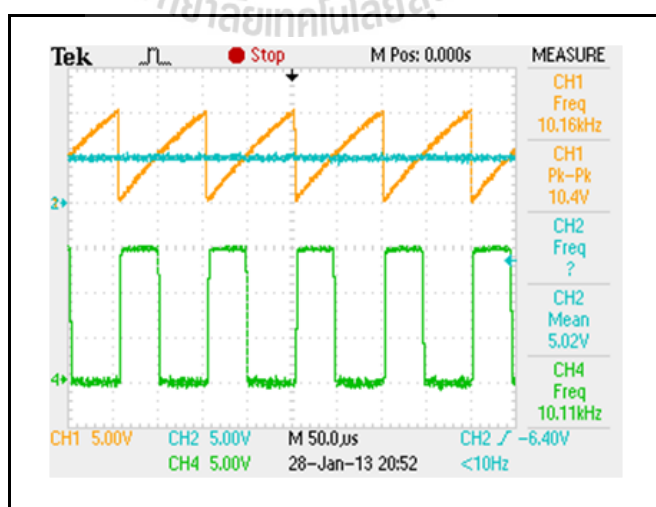
รูปที่ 5.31 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริง

การทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้วงจรตามรูปที่ 5.31 ทำการทดสอบโดยการจ่ายอินพุตที่เป็นระดับแรงดัน (V_{vol}) และสัญญาณฟันเลื่อย (V_{saw}) ซึ่งในการทดสอบจะดำเนินการทดสอบโดยการปรับระดับของแรงดันอินพุตออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ระดับแรงดัน

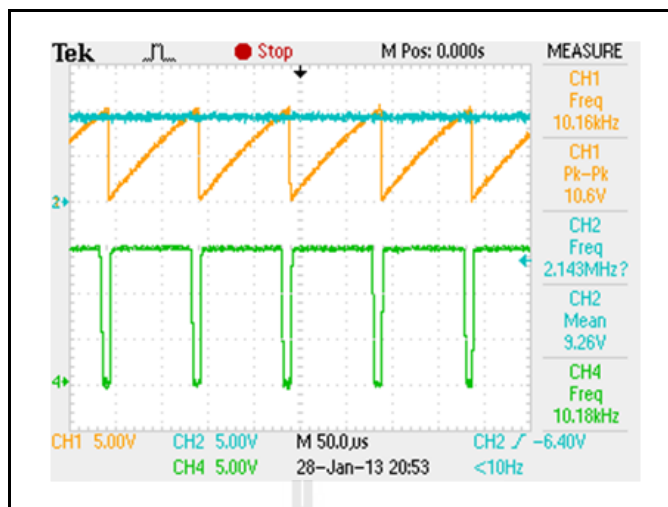
อินพุตเท่ากับ 0 V กรณีที่ 2 ระดับแรงดันอินพุตเท่ากับ 5 V และกรณีที่ 3 ระดับแรงดันอินพุตเท่ากับ 9 V ซึ่งไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับวงจรเปรียบเทียบสัญญาณมีค่าเท่ากับ ± 15 V และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณฟันเลื่อย ช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณอินพุตที่เป็นระดับแรงดัน และช่องสัญญาณที่ 4 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณทั้ง 3 กรณีได้ดังรูปที่ 5.32 ถึงรูปที่ 5.34 ดังนี้



รูปที่ 5.32 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 1



รูปที่ 5.33 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 2

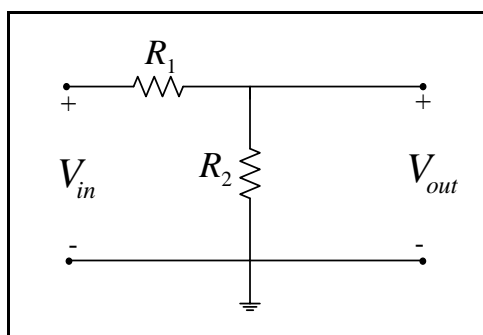


รูปที่ 5.34 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 3

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณตามรูปที่ 5.32 ถึงรูปที่ 5.34 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้ เป็นไปตามที่ได้มีการอธิบายการทำงานไว้ในเบื้องต้น

5.3.3 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการปรับระดับของแรงดันไฟฟ้า ออกเป็นระดับต่าง ๆ ซึ่งการนำมาใช้งานในรถไฟฟ้าจะนำมาใช้เป็นค่าแรงดันอ้างอิง (V_{vol}) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื้อยจะทำให้ได้สัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีที โดยวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้ามี่โครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.35 สามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันได้ตามสมการที่ (5-10)

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5-10)$$

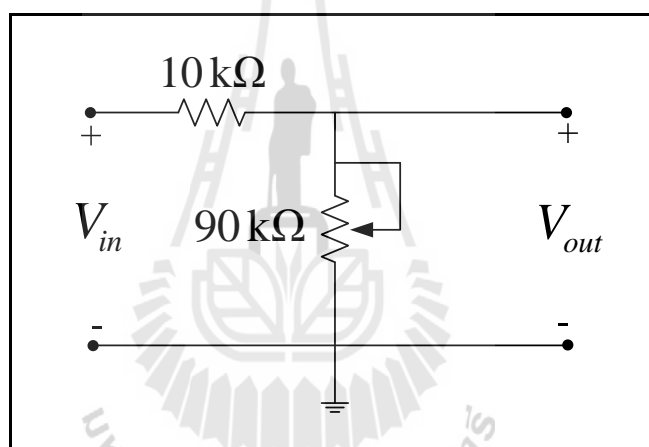
โดยที่	V_{in}	คือ	ค่าแรงดันอินพุตของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า
	V_{out}	คือ	ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า
	R_1	คือ	ตัวต้านทานตัวที่ 1
	R_2	คือ	ตัวต้านทานตัวที่ 2

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้นำมาใช้ในงานในวงจรจุดชนวนเกททั้งทางด้านวงจรรีเลย์และวงจรถานาม โดยการทำงานของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าทางด้านวงจรรีเลย์ จะมีการปรับระดับแรงดันในการใช้งานตลอดการทำงาน เนื่องจากเป็นวงจรหลักที่ใช้ในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้า ส่วนวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าทางด้านวงจรถานามจะมีการตั้งค่าการทำงานของวงจรให้คงที่ตลอดการทำงาน ซึ่งการออกแบบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าจะพิจารณาจากแอมพลิจูดสูงสุดของวงจรถานามสร้างสัญญาณพื้นเลื้อย เนื่องจากการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีด้วยสัญญาณพัลส์ได้จากการเปรียบเทียบกันของระดับแรงดันของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณพื้นเลื้อยตามที่ได้อธิบายลักษณะการทำงานแล้วไว้ในเบื้องต้น ซึ่งสัญญาณพื้นเลื้อยที่นำมาใช้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 10 V ตามที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 5.3.1 ดังนั้น ในการออกแบบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าต้องดำเนินการออกแบบให้มีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของวงจรถานามเท่ากับ 9 V คือ วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าสามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรถานามได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 9 V ซึ่งการกำหนดค่าแรงดันสูงสุดดังกล่าว เป็นการกำหนดขยับการทำงานของรถไฟฟ้า ซึ่งก็คือ รถไฟฟ้าสามารถปรับความเร็วในการใช้งานได้สูงสุดได้เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้า ซึ่งเพียงพอกับการใช้งานและเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งานรถไฟฟ้า โดยที่การกำหนดเงื่อนไขในการทำงานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับผู้ดำเนินงาน เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานรถไฟฟ้างานดังกล่าว ดังนั้น การออกแบบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตของวงจรถานามเท่ากับ 10 V ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรถานามเท่ากับ 9 V และตัวต้านทาน R_1 กำหนดให้มีค่าความต้านทานเท่ากับ 10k Ω และเมื่อ

พิจารณาจากสมการที่ (5-10) และจัดเทอมสมการใหม่เพื่อหาค่าตัวต้านทาน R_2 ได้ตามสมการที่ (5-11)

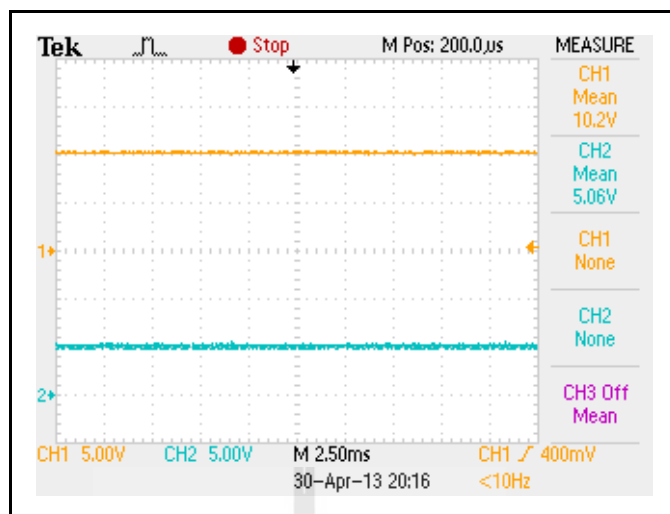
$$R_2 = V_{out} \frac{R_1}{V_{in} - V_{out}} \quad (5-11)$$

เมื่อแทนค่าที่กำหนดมาใช้ในการออกแบบลงในสมการที่ (5-11) จะได้ค่าตัวต้านทาน $R_2 = 90\text{k}\Omega$ ดังนั้นในการใช้งานจะกำหนดให้ตัวต้านทาน R_2 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อให้สามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 9 V จึงได้วงจรแบ่งแรงดันที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังรูปที่ 5.36



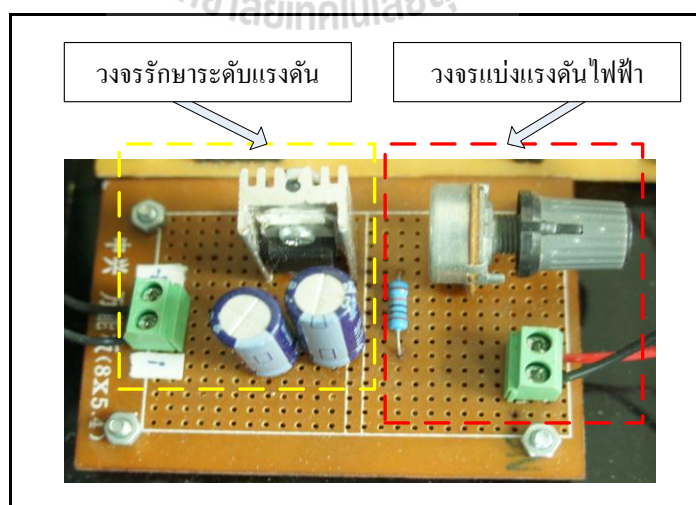
รูปที่ 5.36 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การทดสอบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าจะต้องวงจรตามรูปที่ 5.36 และกำหนดให้มีค่าแรงดันอินพุตเท่ากับ 10 V และต้องการให้มีค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5 V ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5-11) พบว่าต้องปรับค่าตัวต้านทาน $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ซึ่งจะมีผลการทดสอบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้างดังรูปที่ 5.37 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ ค่าแรงดันอินพุต และช่องสัญญาณที่ 2 คือ ค่าแรงดันเอาต์พุต

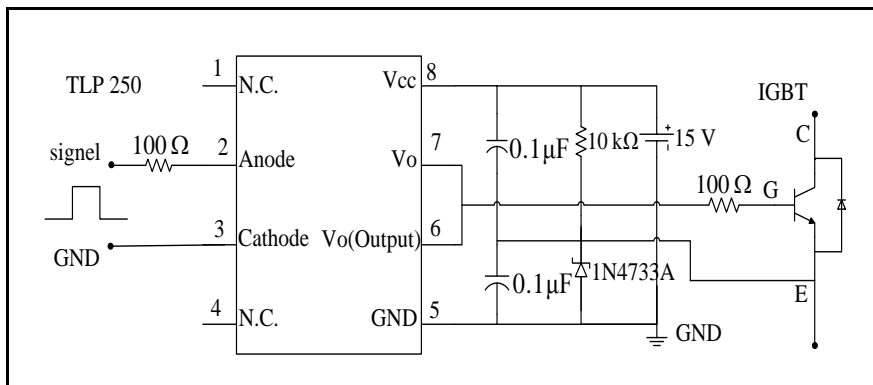


รูปที่ 5.37 ผลการทดสอบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

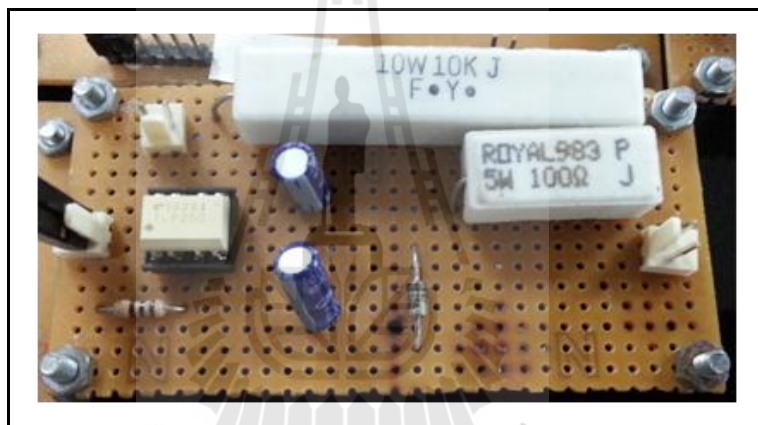
จากผลการทดสอบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.37 พบว่าเมื่อต่อวงจรตามรูปที่ 5.36 และปรับค่าตัวต้านทาน $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5 V เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ในเบื้องต้น ซึ่งวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในเบื้องต้นจะนำไปใช้ในวงจรจุดชนวนเกททางด้านวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 5.38 ส่วนทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์จะมีการอธิบายการออกแบบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าไว้ในหัวข้อที่ 5.4



รูปที่ 5.38 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าทางด้านวงจรมอเตอร์

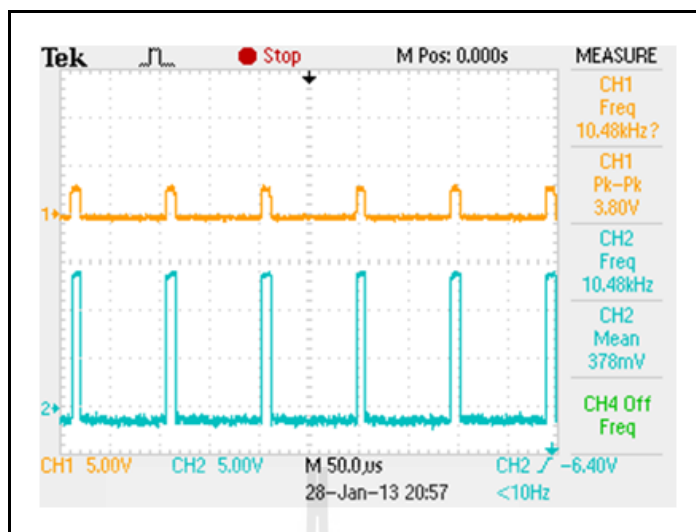


รูปที่ 5.40 วงจรแยกโคดสัญญาณสำหรับใช้งาน

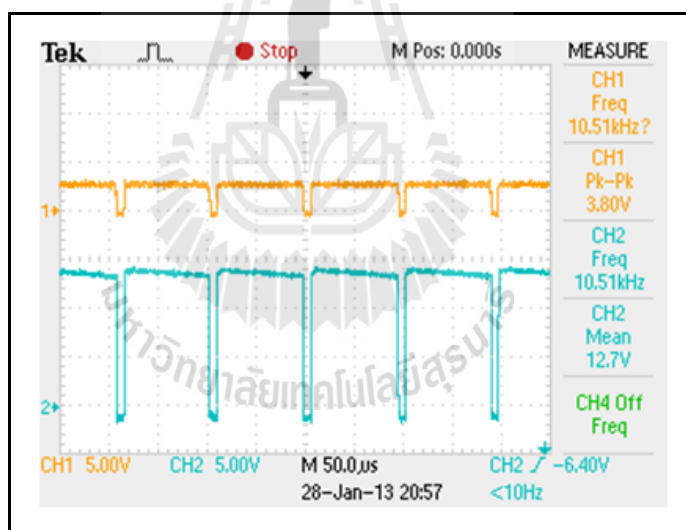


รูปที่ 5.41 วงจรแยกโคดสัญญาณที่สร้างจริง

การทดสอบวงจรแยกโคดสัญญาณในรูปที่ 5.41 ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ 15 V ซึ่งจะทดสอบโดยการจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณพัลส์ และวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจร โดยจะทำการทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 สัญญาณอินพุตรูปพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 10 % และกรณีที่ 2 สัญญาณอินพุตรูปพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 90 % สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.42 และรูปที่ 5.43 ตามลำดับ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตของวงจรแยกโคดสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตแยกโคดสัญญาณ



รูปที่ 5.42 ผลการทดสอบวงจรแยกโศดสัญญาณกรณีที่ 1

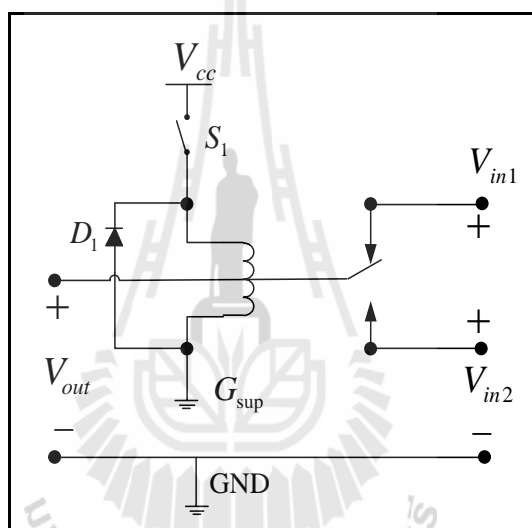


รูปที่ 5.43 ผลการทดสอบวงจรแยกโศดสัญญาณกรณีที่ 2

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.42 และรูปที่ 5.43 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตจะมีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 15 V ตามค่าแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร และขนาดของสัญญาณเอาต์พุตบางส่วนจะมีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นความต้องการของผู้ดำเนินการออกแบบ เนื่องจากถ้านำลักษณะของสัญญาณดังกล่าวไปควบคุมการทำงานของไอจีบีที จะทำให้การทำงานในกรณีไอจีบีทีหยุดการทำงานแบบสนิท

5.3.5 วงจรเลือกโหมดการทำงาน

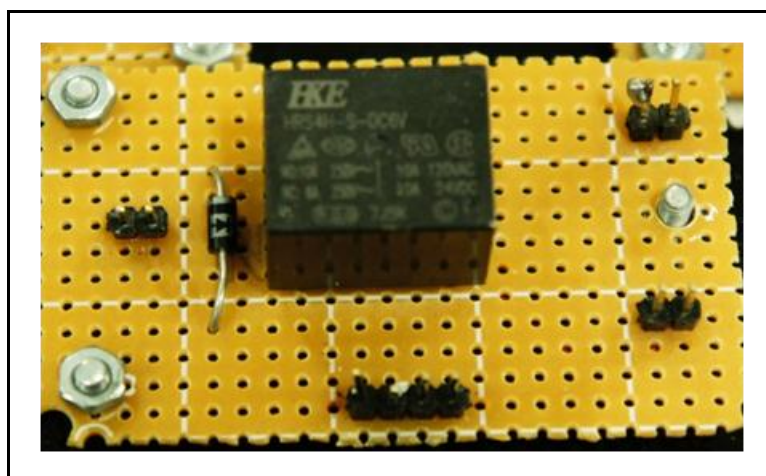
วงจรเลือกโหมดการทำงานเป็นวงจรที่ใช้ในการเลือกการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจะมีการใช้งานทั้งแบบไม่มีตัวควบคุมและการใช้งานแบบมีตัวควบคุม ซึ่งการเลือกโหมดการใช้งานต้องทำการเลือกใช้งานในโหมดใดโหมดหนึ่งในขณะที่รถไฟฟ้าหยุดนิ่ง โดยไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการใช้งานได้ในขณะรถวิ่ง เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งาน ซึ่งวงจรเลือกโหมดการทำงานของรถไฟฟ้าดังกล่าว เป็นการประยุกต์ใช้งานจากการทำงานของรีเลย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมนำมาทำเป็นสวิตช์ โดยมีโครงสร้างของวงจรเลือกโหมดการทำงานดังรูปที่ 5.44



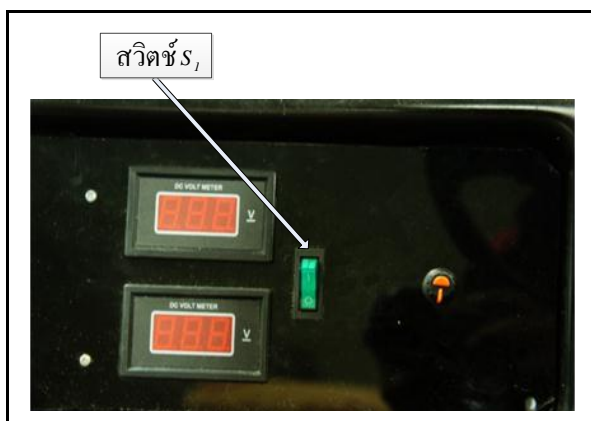
รูปที่ 5.44 วงจรเลือกโหมดการทำงาน

โดยที่	V_{cc}	คือ	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของรีเลย์
	S_1	คือ	สวิตช์เลือกโหมด
	D_1	คือ	ไดโอดป้องกัน
	V_{in1}	คือ	แรงดันอินพุตที่ 1
	V_{in2}	คือ	แรงดันอินพุตที่ 2
	V_{out}	คือ	แรงดันเอาต์พุตของวงจรเลือกโหมดการทำงาน
	G_{sup}	คือ	กราวด์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดของรีเลย์
	GND	คือ	กราวด์ของระบบ

การทำงานของวงจรถเลือกโหมคการทำงานในรูปที่ 5.44 จะอาศัยลักษณะของการทำงานรีเลย์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจร ซึ่งการทำงานของรีเลย์ในรูปที่ 5.44 จะมีการควบคุมหน้าสัมผัส (contact) ของรีเลย์โดยการจ่ายกระแสเข้าที่ขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นทำให้หน้าสัมผัสเปลี่ยนทิศทางมาแตะที่ V_{in2} และเมื่อหยุดจ่ายกระแสเข้าที่ขดลวดของรีเลย์ จะทำให้หน้าสัมผัสกลับมาแตะที่ V_{in1} จากลักษณะการทำงานของรีเลย์ดังกล่าว ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเลือกโหมคการทำงานของรถไฟฟ้า โดยสามารถเลือกการทำงานได้ด้วยการกดสวิตช์ S_1 เพื่อเลือกโหมคการใช้งานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งการกดสวิตช์ S_1 เป็นการควบคุมการจ่ายกระแสให้ขดลวดของรีเลย์นั่นเอง ดังนั้น การนำวงจรถเลือกโหมคการทำงานมาใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ากำหนดให้ V_{in1} คือ อินพุตของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม V_{in2} คือ อินพุตของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม และ V_{out} คือ เอาต์พุตของวงจรถเลือกโหมคการทำงาน ซึ่งเอาต์พุตของวงจรถเลือกโหมคการทำงานจะนำไปเป็นอินพุตของวงจรถเลือกโหมคการทำงานเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีที ดังนั้น อุปกรณ์ของวงจรถเลือกโหมคการทำงานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้รีเลย์ยี่ห้อ HKE เบอร์ HRS4H-S-DC6V ที่มีพิกัดแรงดันของขดลวดเท่ากับ 6 V พิกัดกระแสเท่ากับ 10 A สวิตช์ S_1 ยี่ห้อ FEIBEN เบอร์ KCD3 ที่มีพิกัดแรงดัน 250 VAC พิกัดกระแส 15 A และ ไดโอด ยี่ห้อ WTE เบอร์ 1N4007 พิกัดแรงดันไบอัสย้อนกลับสูงสุดเท่ากับ 1000 V พิกัดกระแสสูงสุดเท่ากับ 1 A โดยมีวงจรถเลือกโหมคการทำงานที่นำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังรูปที่ 5.45 และสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของรีเลย์ดังรูปที่ 5.46

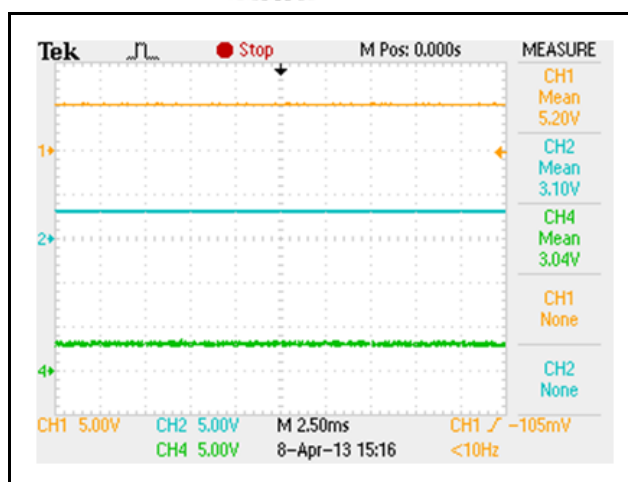


รูปที่ 5.45 วงจรถเลือกโหมคการทำงานที่นำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

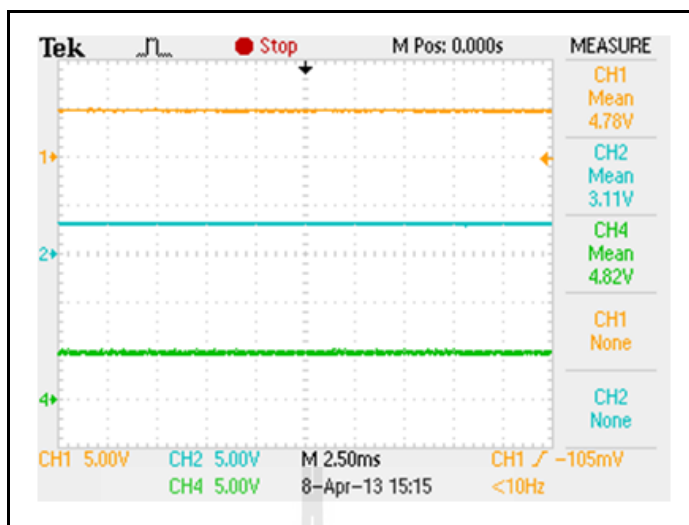


รูปที่ 5.46 สวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของรีเลย์

จากวงจรเลือกโหมมการทำงานที่นำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในรูปที่ 5.45 สามารถทดสอบการทำงานของวงจรได้ดังนี้ กำหนดให้แรงดันอินพุต V_{in1} ของวงจรมีค่าเท่ากับ 5 V แรงดันอินพุต V_{in2} ของวงจรมีค่าเท่ากับ 3 V และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของรีเลย์เท่ากับ 6 V ซึ่งการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 จ่ายกระแสให้ขดขดของรีเลย์ และกรณีที่ 2 หยุดจ่ายกระแสให้รีเลย์ และวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเลือกโหมมการทำงาน โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุต V_{in1} ช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณอินพุต V_{in2} ช่องสัญญาณที่ 4 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเลือกโหมมการทำงาน ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบวงจรเลือกโหมมการทำงานของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ได้ดังรูปที่ 5.47 และรูปที่ 5.48 ตามลำดับ



รูปที่ 5.47 ผลการทดสอบวงจรเลือกโหมมการทำงานรถไฟฟ้ากรณีที่ 1

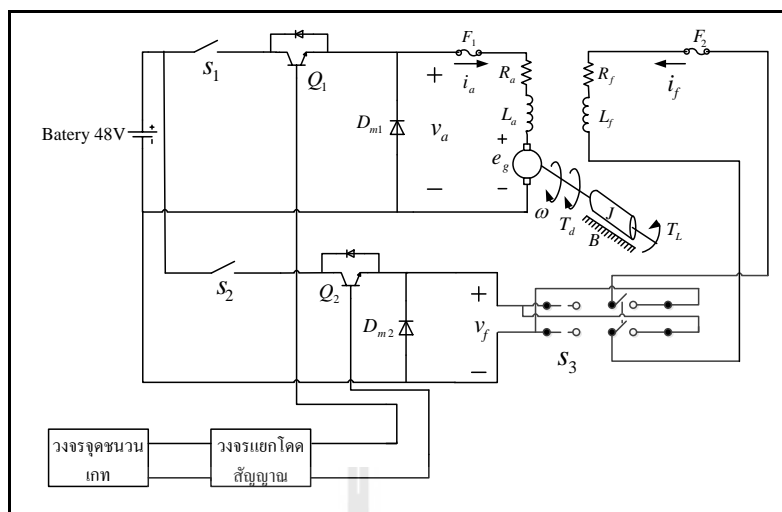


รูปที่ 5.48 ผลการทดสอบวงจรเลือกโหมดการทำงานรถไฟฟ้ากรณีที่ 2

จากผลการทดสอบวงจรเลือกโหมดการทำงานในรูปที่ 5.47 พบว่าเมื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดของรีเลย์ ทำให้ได้เอาต์พุตของวงจรเลือกโหมดการทำงานเท่ากับ 3 V และจากผลการทดสอบวงจรเลือกโหมดการทำงานรถไฟฟ้าในรูปที่ 5.48 ของกรณีที่ 2 คือ หยุดจ่ายกระแสให้วงจรเลือกโหมดการทำงาน ทำให้ได้เอาต์พุตของวงจรเลือกโหมดการทำงานเท่ากับ 5 V ดังนั้นจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการทำงานของวงจรเลือกโหมดการทำงานเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น

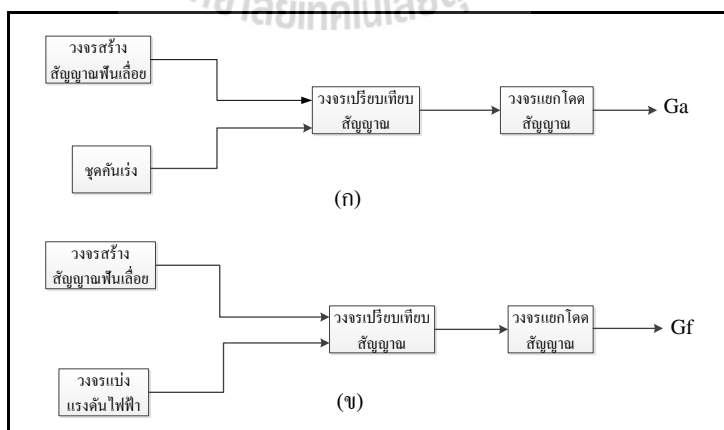
5.4 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม

การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม สามารถปรับความเร็วในการใช้งานของรถไฟฟ้าได้ด้วยชุดคันเร่ง ซึ่งจะมีโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.49



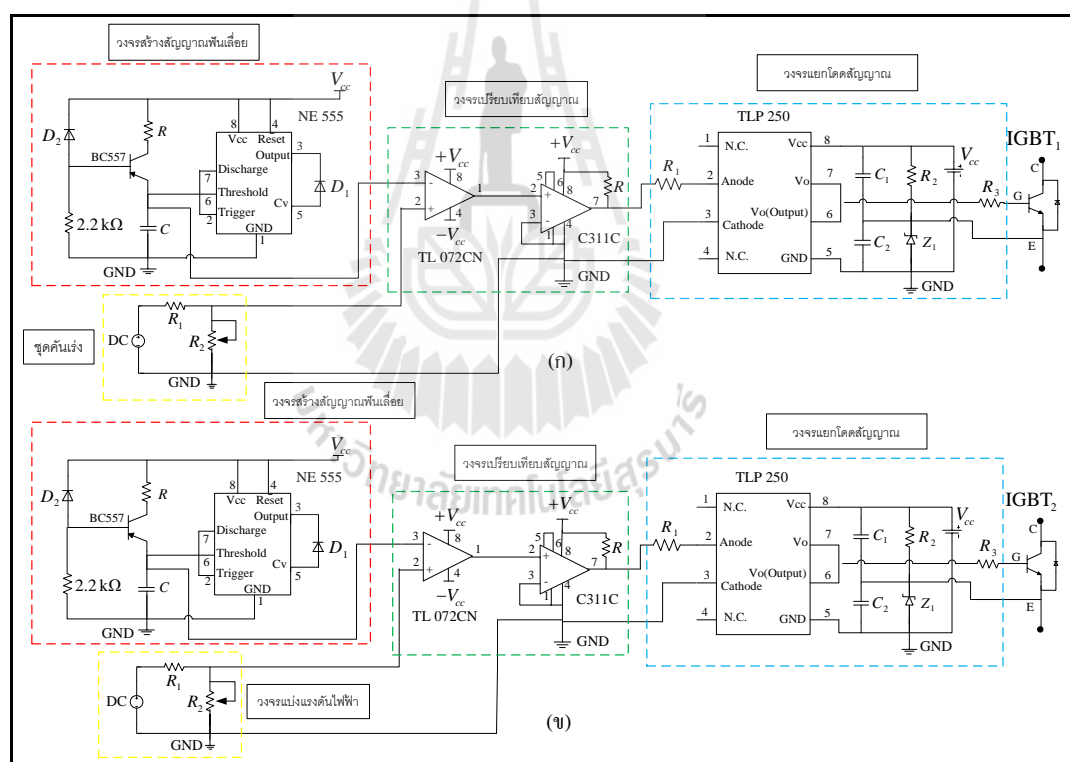
รูปที่ 5.49 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม

การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมตามรูปที่ 5.49 สามารถควบคุมการปรับความเร็วของรถไฟฟ้าได้ด้วยการควบคุมการทำงานของไอจีบีที เพื่อปรับค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจรอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนทางด้านวงจรสนามจะปรับตั้งให้การทำงานของไอจีบีทีมีค่าคงที่ ซึ่งการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีทำได้โดยการควบคุมจากวงจรถัดจนวนเกทตามที่ได้มีการอธิบายไว้ในข้างต้น ซึ่งจะมีแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรถัดจนวนเกทที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.50 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรถัดจนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมในรูปแบบที่ 5.50 ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทจำนวน 2 ชุด คือ ชุดบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 5.50 (ก) เป็นบล็อกที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ประกอบไปด้วย วงจรสร้างสัญญาณพัลส์เลื่อย ชุดคันเร่ง วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรแยกโคดสัญญาณ โดยมีสัญญาณเอาต์พุตที่ไปควบคุมการทำงานของไอจีบีที คือ Ga ในส่วนของชุดบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 5.50 (ข) เป็นบล็อกที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีทางด้านวงจรสนาม ประกอบไปด้วย วงจรสร้างสัญญาณพัลส์เลื่อย แบ่งแรงดันไฟฟ้า วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรแยกโคดสัญญาณ โดยมีสัญญาณเอาต์พุตที่ไปควบคุมการทำงานของไอจีบีที คือ Gf ซึ่งจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทดังกล่าว สามารถแสดงเป็นโครงสร้างของวงจรจุดชนวนเกทที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 โครงสร้างของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม

การทำงานของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมในรูปแบบที่ 5.51 แบ่งการทำงานออกเป็น การทำงานทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ดังรูปที่ 5.51 (ก) และการ

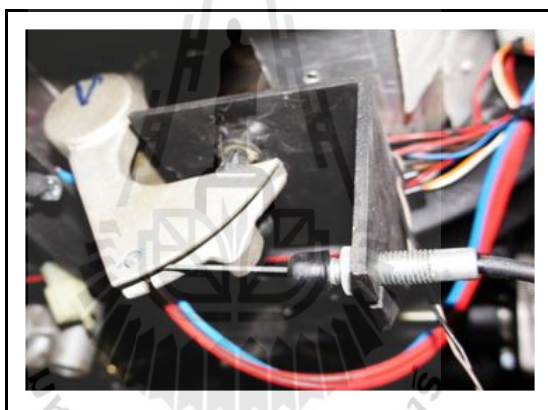
ทำงานทางด้านวงจรสนามดังรูปที่ 5.51 (ข) การทำงานทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์จะเป็นวงจรหลักที่ใช้ในการปรับค่าความเร็วของรถไฟฟ้ โดยการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์เพื่อปรับแรงดันอินพุตในระดับแรงดันต่าง ๆ ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีการควบคุมการทำงานดังกล่าวจากวงจรจุดชนวนเกท ซึ่งสามารถปรับความเร็วของรถไฟฟ้ได้จากชุดคันเร่ง ดังนั้น เมื่อมีการใช้งานชุดคันเร่งเอาต์พุตของชุดคันเร่งที่ได้ จะเป็นระดับแรงดันค่าต่าง ๆ ตามการใช้งานของชุดคันเร่ง และเมื่อนำเอาต์พุตของชุดคันเร่งไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่เป็นสัญญาณพัลส์ ที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันเอาต์พุตของชุดคันเร่ง และสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการทำงานของชุดคันเร่งจะนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์เพื่อปรับความเร็วของรถไฟฟ้ และในส่วนของการทำงานทางด้านวงจรสนามได้ปรับตั้งให้มีการทำงานคงที่ตลอดการทำงาน จะเห็นได้ว่าการควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้เป็นการควบคุมจากวงจรจุดชนวนเกท ซึ่งได้มีการอธิบายการทำงานและการออกแบบวงจรไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ในส่วนของหัวข้อนี้จะได้มีการอธิบายการทำงานและการออกแบบชุดคันเร่ง ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้เมื่อไม่มีตัวควบคุม โดยสามารถอธิบายรายละเอียดต่าง ๆ ได้ดังนี้

5.4.1 ชุดคันเร่ง

ชุดคันเร่งที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ของรถไฟฟ้เดิมที่ได้มาจากทางผู้ผลิต ซึ่งนำมาดัดแปลงให้มีลักษณะการทำงานเป็นแบบแอนะล็อก เนื่องจากชุดคันเร่งเดิมของรถไฟฟ้านั้นเป็นการควบคุมความเร็วด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับกล่องควบคุม แต่เนื่องด้วยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีโครงสร้างของวงจรเป็นแบบแอนะล็อก ดังนั้น ทางผู้ดำเนินงานวิทยานิพนธ์จึงได้ดัดแปลงอุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อนำมาใช้งานในรูปแบบของวงจรแอนะล็อก โดยชุดคันเร่งที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย แป้นเหยียบ สายคันเร่ง กล่องคันเร่งพร้อมจานหมุน ชุดเฟืองขับสายพาน ชุดเพิ่มรอบ และวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสร้างชุดคันเร่งได้ดังรูปที่ 5.52 ถึงรูปที่ 5.57 ดังนี้



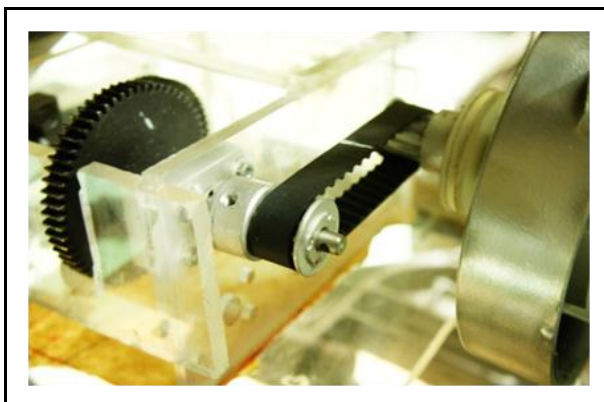
รูปที่ 5.52 แป้นเหยียบ



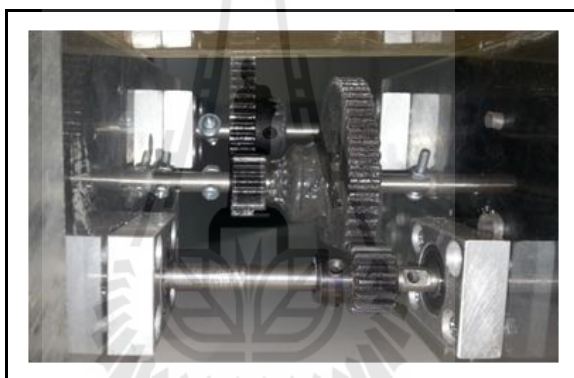
รูปที่ 5.53 สายคันเร่ง



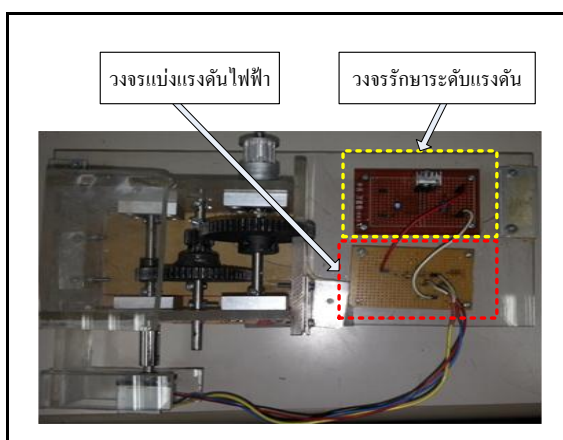
รูปที่ 5.54 ก่อ่งคันเร่งพร้อมจานหมุน



รูปที่ 5.55 ชุดเฟืองขับสายพาน



รูปที่ 5.56 ชุดเพิ่มรอบการหมุน



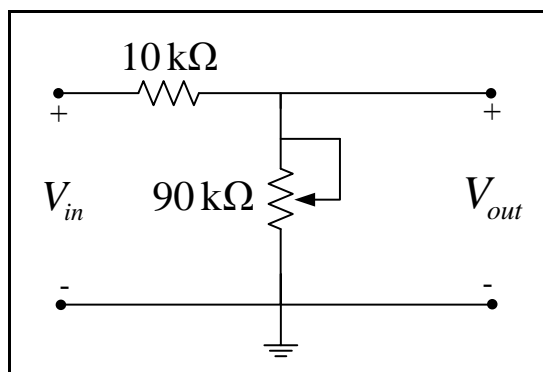
รูปที่ 5.57 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

การทำงานของชุดคันเร่งรถไฟฟ้า จะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับคันเร่งในรถยนต์ทั่วไปที่ใช้เป็นเหยียบในการควบคุมความเร็ว ซึ่งเมื่อเหยียบเป็นเหยียบในรูปที่ 5.52 ทำให้สายคันเร่งในรูปที่ 5.53 ที่ติดอยู่กับแป้นเหยียบถูกดึง ซึ่งจะทำให้จานหมุนที่กลองคันเร่งในรูปที่ 5.54 มีการหมุน โดยรอบในการหมุนจะขึ้นอยู่กับการเหยียบเป็นเหยียบของชุดคันเร่ง แต่เนื่องจากการทดสอบรอบการหมุนโดยการเหยียบเป็นเหยียบจนสุด พบว่ามีรอบการหมุนน้อยมาก ซึ่งไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้เพิ่มชุดเพิ่มรอบการหมุน โดยมีชุดเฟืองขับสายพานในรูปที่ 5.55 เป็นอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อการทำงานของจานหมุนและชุดเพิ่มรอบการหมุน โดยชุดเพิ่มรอบการหมุนในรูปที่ 5.56 จะทำหน้าที่ในการเพิ่มรอบของการหมุนที่ได้จากจานหมุน ซึ่งรอบจากการหมุนจะนำไปหมุนตัวด้านทานปรับค่าได้ของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.57 โดยตัวด้านทานในวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้างดกล่าวมีรอบของการหมุนเท่ากับ 5 รอบ ทำให้การปรับระดับแรงดันของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้ามีความละเอียดกว่าการใช้ตัวด้านทานแบบปรับค่าได้ทั่วไปที่มีรอบการหมุนเพียงหนึ่งรอบ ซึ่งเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าจะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื่อยด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณพัลส์ที่นำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ ดังนั้น การทำงานของชุดคันเร่งรถไฟฟ้า คือ การใช้เป็นเหยียบคันเร่งเพื่อปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์นั่นเอง

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้งานในชุดคันเร่ง กำหนดให้มีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 9 V นั่นคือ วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าสามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 9 V ดังนั้น การออกแบบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในชุดคันเร่ง กำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตของวงจรเท่ากับ 10 V ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเท่ากับ 9 V และตัวด้านทาน $R_1 = 10k\Omega$ ซึ่งสามารถหาค่าตัวด้านทาน R_2 ได้ตามสมการที่ (5-12)

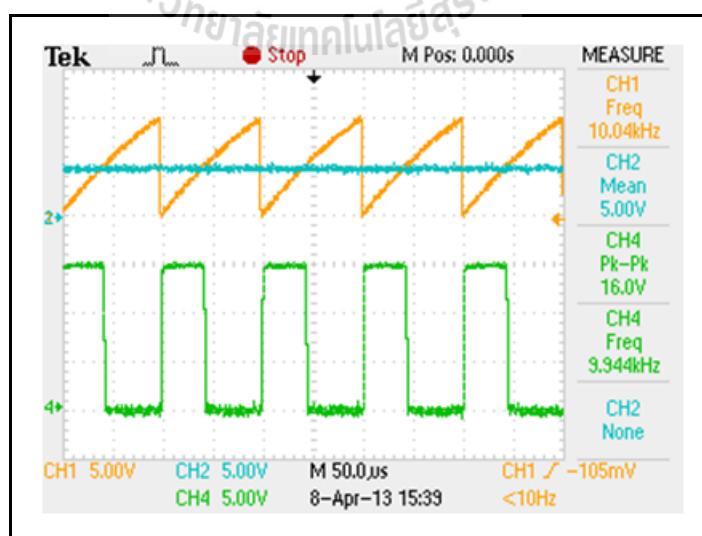
$$R_2 = V_o \frac{R_1}{V_{in} - V_o} \quad (5-12)$$

เมื่อแทนค่าที่กำหนดมาใช้ในการออกแบบลงในสมการที่ (5-12) จะได้ค่าตัวด้านทาน $R_2 = 90k\Omega$ ดังนั้นในการใช้งานจะกำหนดให้ตัวด้านทาน R_2 เป็นตัวด้านทานปรับค่าได้ เพื่อให้สามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 9 V จึงได้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้ในชุดคันเร่งดังรูปที่ 5.58

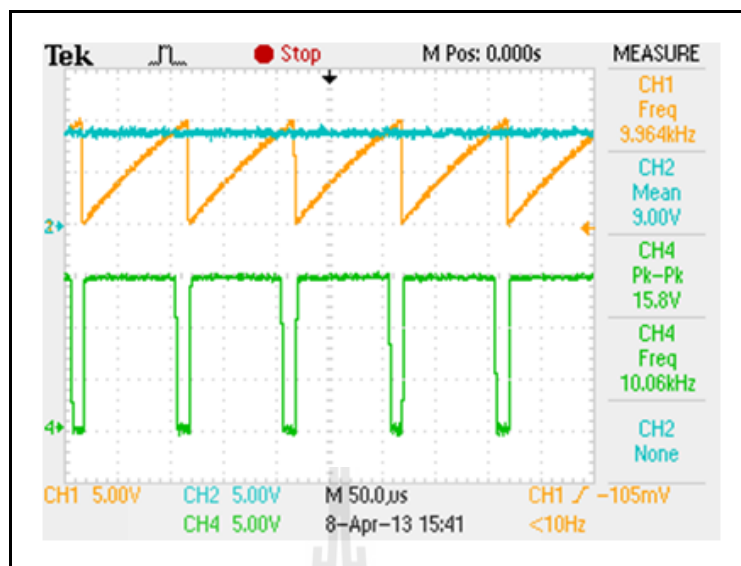


รูปที่ 5.58 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในชุดคันเร่ง

การทดสอบการทำงานของชุดคันเร่งรถไฟฟ้า ได้ดำเนินการทดสอบโดยการนำระดับแรงดันเอาต์พุตของชุดคันเร่งรถไฟฟ้า ไปต่อร่วมกับวงจรจุดชนวนเกณฑ์ตามรูปที่ 5.51 ที่มีการทดสอบโดยการเหยียบคันเร่ง ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 เหยียบคันเร่งให้มีค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดคันเร่งเท่ากับ 5 V กรณีที่ 2 เหยียบคันเร่งให้มีค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดคันเร่งเท่ากับ 9 V และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการเหยียบคันเร่ง ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.59 และรูปที่ 5.60 ตามลำดับ โดยที่ช่องสัญญาณที่ 1 คือ เอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย ช่องสัญญาณที่ 2 คือ เอาต์พุตของชุดคันเร่งรถไฟฟ้า และช่องสัญญาณที่ 4 คือ เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ



รูปที่ 5.59 ผลการทดสอบเหยียบคันเร่งกรณีที่ 1

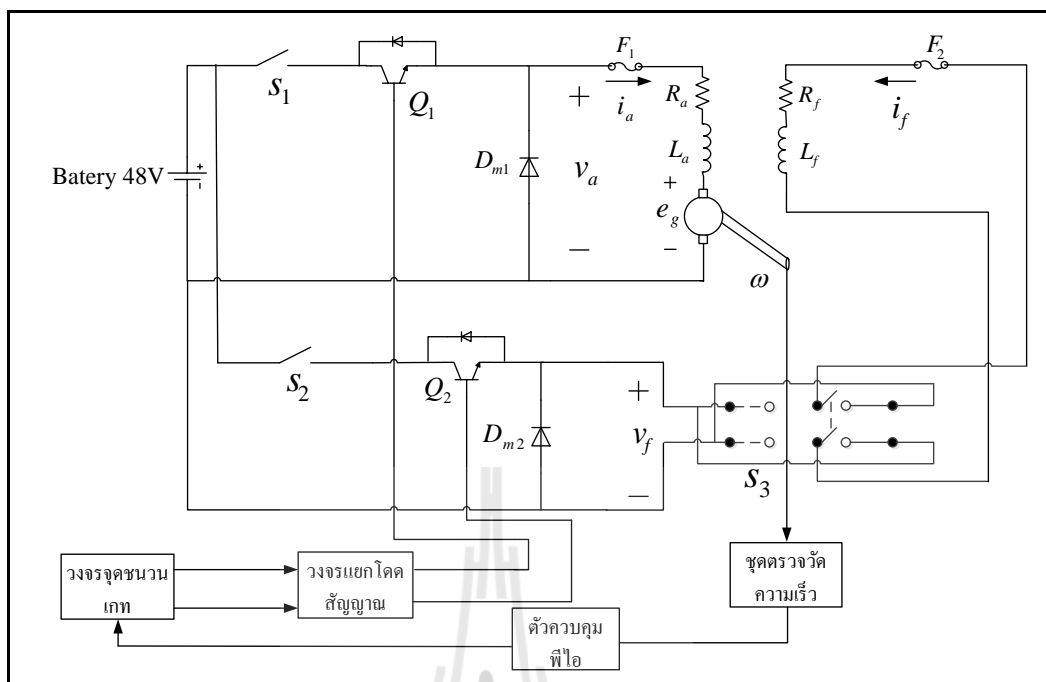


รูปที่ 5.60 ผลการทดสอบเหยียบคันเร่งกรณีที่ 2

จากรูปผลการทดสอบชุดคันเร่งในรูปที่ 5.59 และรูปที่ 5.60 จะเห็นว่าชุดคันเร่งรถไฟฟ้า สามารถนำไปใช้ในการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ ซึ่งการทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมได้มีการนำเสนอวิธีการทดสอบและผลการทดสอบไว้ในบทที่ 6

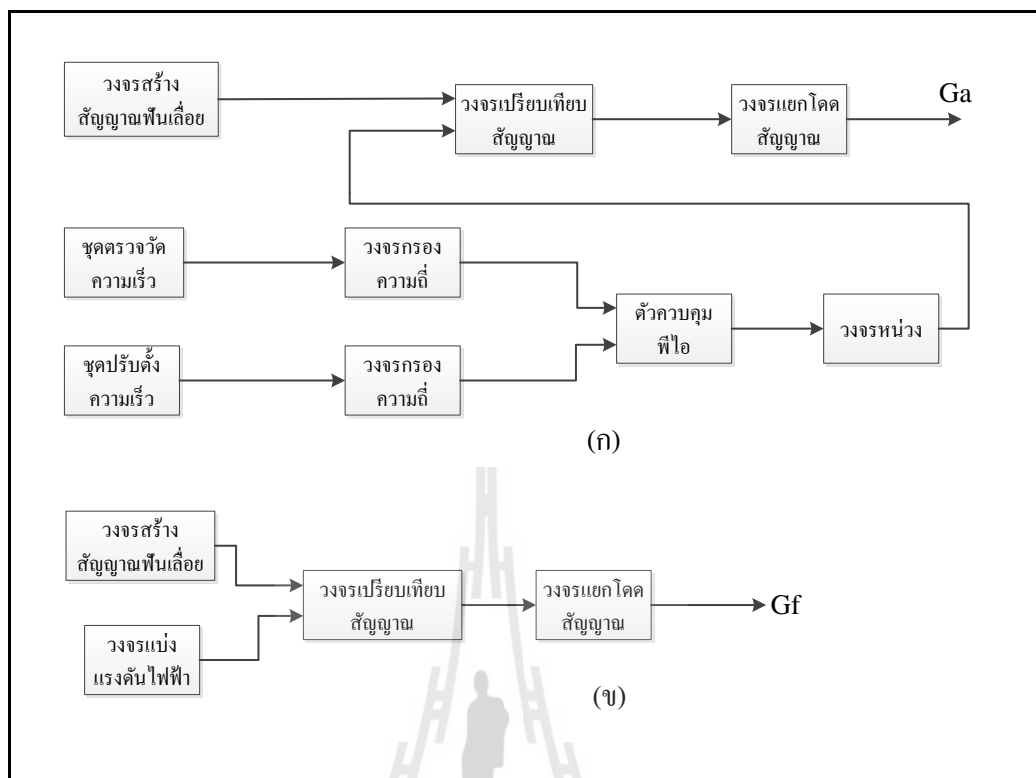
5.5 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม

การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม สามารถปรับความเร็วของรถไฟฟ้าได้โดยการปรับตั้งค่าความเร็วจากชุดปรับตั้งความเร็ว โดยการปรับความเร็วจากชุดปรับตั้งความเร็วจะทำให้รถไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนไปได้เองตามความเร็วที่ได้มีการปรับตั้งไว้ โดยไม่ต้องใช้คันเร่งในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมจะมีโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนดังรูปที่ 5.61



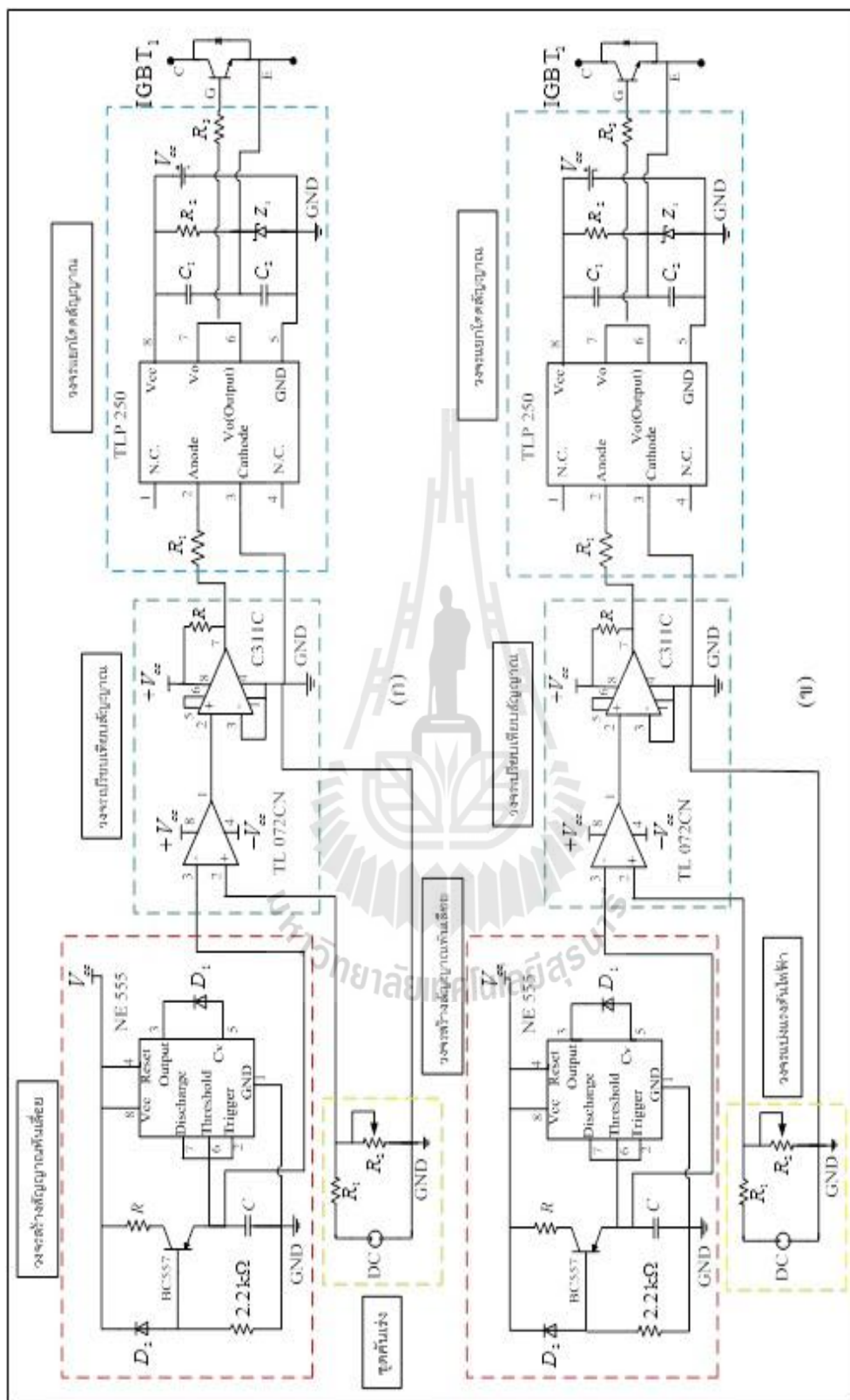
รูปที่ 5.61 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม

การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมตามรูปที่ 5.61 สามารถควบคุมการปรับความเร็วของรถไฟฟ้าได้ด้วยการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ เพื่อปรับค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจรอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนทางด้านวงจรสนามจะปรับตั้งให้มีการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์คงที่ตลอดการทำงาน ซึ่งการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีทำได้โดยการควบคุมจากวงจรจุดชนวนเกต เช่นเดียวกับการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม แต่สิ่งที่แตกต่างกัน คือ การขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมจะมีการป้อนกลับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าในขณะนั้น เพื่อนำมาใช้ในการตรวจความเร็วของรถไฟฟ้า และควบคุมการทำงานเพื่อให้ได้ความเร็วตามที่ได้ปรับตั้งไว้ ดังนั้น สามารถแสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกตที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 5.62



รูปที่ 5.62 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกท
ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมในรูปที่ 5.62 ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทจำนวน 2 ชุด คือ ชุดบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 5.62 (ก) เป็นบล็อกที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ประกอบไปด้วย วงจรสร้างสัญญาณพื้นเลื้อย ชุดตรวจวัดความเร็ว ชุดปรับตั้งความเร็ว วงจรกรองความถี่ ตัวควบคุมพีไอ วงจรหน่วง วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและวงจรแยกโคตสัญญาณ โดยมีสัญญาณเอาต์พุตที่ไปควบคุมการทำงานของไอจีบีที คือ Ga ในส่วนของชุดบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 5.62 (ข) เป็นบล็อกที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีทางด้านวงจรสนาม ประกอบไปด้วย วงจรสร้างสัญญาณพื้นเลื้อย แบ่งแรงดันไฟฟ้า วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรแยกโคตสัญญาณ โดยมีสัญญาณเอาต์พุตที่ไปควบคุมการทำงานของไอจีบีที คือ Gf ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างของวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 5.63

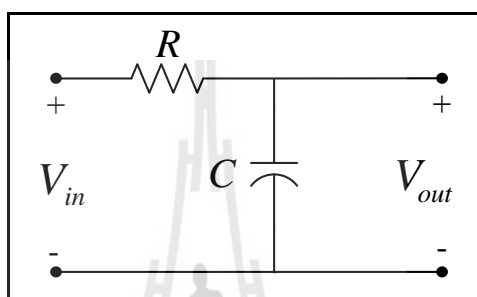


รูปที่ 5.63 โครงสร้างของวงจรชุดขนานเกาของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามอเตอร์ไม่มีตัว

การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมในรูปที่ 5.63 จะเริ่มต้นทำงานโดยการกำหนดค่าความเร็วของรถไฟฟ้า โดยค่าความเร็วดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วของรถไฟฟ้ากับค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วที่มีการอธิบายไว้ในบทที่ 6 การปรับตั้งค่าแรงดันดังกล่าวสามารถปรับได้จากวงจรปรับตั้งความเร็ว ที่ปรับจากวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า โดยที่ค่าแรงดันดังกล่าวเป็นค่าแรงดันอินพุตอ้างอิงของวงจรตัวควบคุมพีไอ แต่ก่อนที่จะนำแรงดันดังกล่าวไปใช้เพื่อเป็นแรงดันอินพุตอ้างอิงของวงจรตัวควบคุมพีไอต้องผ่านวงจรกรองก่อน เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากถ้าหากมีสัญญาณรบกวนเข้าไปในวงจรตัวควบคุมพีไอ จะส่งผลให้วงจรตัวควบคุมพีไอเกิดการทำงานผิดพลาด และเมื่อจ่ายแรงดันอินพุตอ้างอิงให้วงจรตัวควบคุมพีไอ วงจรตัวควบคุมพีไอก็จะดำเนินการปรับขนาดของแรงดันเอาต์พุตของวงจร และเมื่อนำแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื่อยด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ที่นำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ ซึ่งจะทำให้รถไฟฟ้าเริ่มเคลื่อนที่และเมื่อรถไฟฟ้าเริ่มมีการเคลื่อนที่ ชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้าก็จะทำการตรวจวัดความเร็วในขณะนั้นและจะส่งค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอินพุตอ้างอิง ซึ่งก่อนที่จะนำแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วไปเปรียบเทียบกับแรงดันอินพุตอ้างอิงก็ต้องผ่านวงจรกรองด้วยเช่นกันกับแรงดันอินพุตอ้างอิง ซึ่งถ้าค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วยังไม่เท่ากับค่าแรงดันอินพุตอ้างอิง วงจรตัวควบคุมพีไอก็จะปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรและนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื่อย เพื่อให้ได้สัญญาณรูปพัลส์ที่นำไปควบคุมการทำงานของไอจีบีทีในวงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์เพื่อปรับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าให้ได้ตามที่ตั้งไว้ โดยค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วต้องมีค่าเท่ากับค่าแรงดันอินพุตอ้างอิง และเมื่อมีการเปลี่ยนจุดการทำงาน โดยการปรับตั้งจากชุดปรับตั้งความเร็ว ตัวควบคุมพีไอจะปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื่อยเพื่อให้ได้สัญญาณรูปพัลส์ที่นำไปควบคุมการทำงานของไอจีบีทีของวงจรแปลงผันเพื่อปรับให้ได้ความเร็วตามต้องการ โดยมีชุดตรวจวัดความเร็วเป็นตัวตรวจสอบ และแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วที่ได้ก็จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ในข้างต้น และในส่วนของวงจรถามก็จะปรับตั้งให้วงจรจุดชนวนเกททำงานคงที่ที่ค่า ๆ หนึ่งตลอดการทำงาน และจากที่ได้อธิบายมาในเบื้องต้นจะเห็นได้ว่า การควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมเป็นการควบคุมการทำงานจากวงจรถามจุดชนวนเกท ซึ่งได้มีการอธิบายการทำงานและการออกแบบบางวงจรแล้วในหัวข้อที่ 5.3 ในส่วนของหัวข้อนี้จะได้มีการอธิบายถึงการทำงานและการออกแบบวงจรกรองความถี่ วงจรหน่วง ชุดปรับตั้งความเร็ว และตัวควบคุมพีไอ

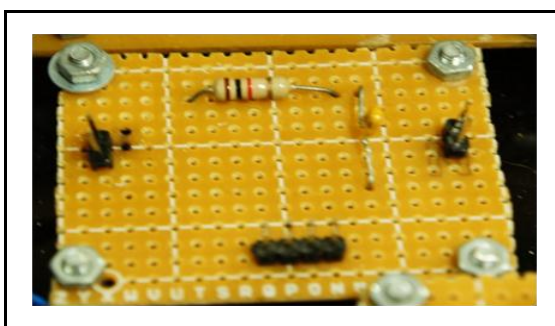
5.5.1 วงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่ใช้ในการกรองความถี่ใด ๆ ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นที่ยอมให้ผ่านไปได้ ซึ่งการนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนเพื่อเป็นการลดผลกระทบของความถี่ที่เข้าไปในวงจรตัวควบคุมพีไอ ซึ่งความถี่ดังกล่าวจะส่งผลให้ตัวควบคุมพีไอเกิดการทำงานผิดพลาด จึงมีความจำเป็นที่ต้องลดทอนผลกระทบดังกล่าวโดยการใช้วงจรกรองความถี่ และวงจรกรองความถี่ที่นำมาใช้งานมีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 5.64



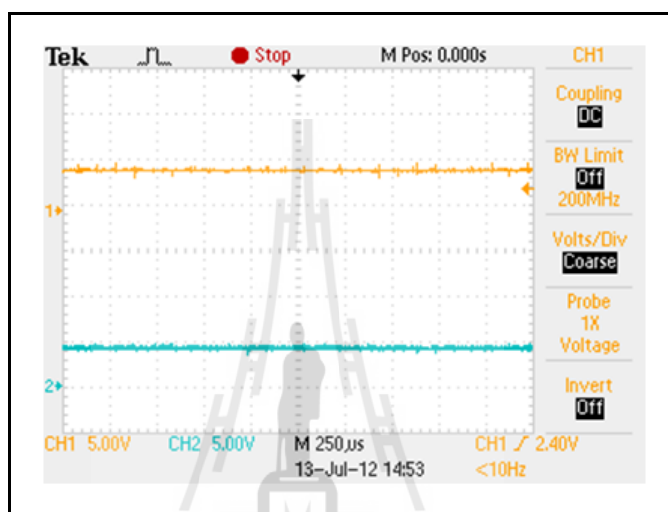
รูปที่ 5.64 วงจรกรองความถี่

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ในรูปที่ 5.64 เป็นลักษณะของวงจรกรองความถี่แบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ยอมให้ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนดให้สามารถผ่านไปได้ โดยวงจรกรองความถี่ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะกำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์ของตัวต้านทาน $R = 1\text{k}\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C = 0.01\mu\text{F}$ ค่าดังกล่าวได้จากการทดสอบวงจร ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความพึงพอใจของผู้ดำเนินการออกแบบ และจะได้วงจรกรองที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังรูปที่ 5.65



รูปที่ 5.65 วงจรกรองที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

จากรูปที่ 5.65 ได้ดำเนินการทดสอบวงจรรองความถี่ในเบื้องต้น โดยจ่ายแรงดันอินพุตให้วงจรรองความถี่ ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซิง ซึ่งจะมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นและทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรองความถี่ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ อินพุตของวงจรรองความถี่ และช่องสัญญาณที่ 2 คือ เอาต์พุตของวงจรรองความถี่ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบของวงจรรองความถี่ได้ดังรูปที่ 5.66



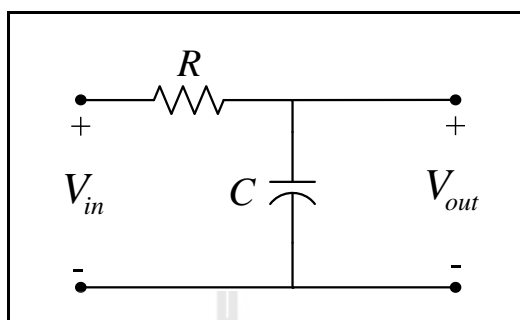
รูปที่ 5.66 ผลการทดสอบของวงจรรองความถี่

จากผลการทดสอบวงจรรองความถี่ในรูปที่ 5.66 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีสัญญาณรบกวนน้อยลง ซึ่งก็เป็นไปตามความต้องการของผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้นำวงจรรองความถี่มาลดผลกระทบของสัญญาณรบกวน ก่อนที่จะสัญญาณดังกล่าวไปใช้งานต่อไป

5.5.2 วงจรหน่วง

วงจรหน่วงเป็นวงจรที่เพิ่มเข้ามาในวงจรจุดชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม ซึ่งเป็นวงจรที่ช่วยหน่วงการทำงานของตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้ตัวควบคุมพีไอทำงานเร็วเกินไป ซึ่งถ้าตัวควบคุมพีไอทำงานเร็วเกินไปจะทำให้การขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเกิดการกระชากทั้งในขณะออกตัวและในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการใช้งาน ดังนั้นวงจรหน่วงจะช่วยให้การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเป็นไปอย่างราบเรียบ โดย

วงจรหนึ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีพื้นฐานมาจากวงจร RC โดยมีโครงสร้างของวงจรหนึ่งวงดังรูปที่ 5.67



รูปที่ 5.67 วงจรหนึ่งวง

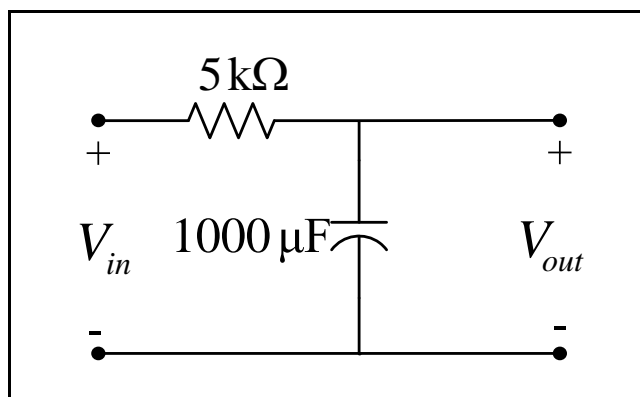
จากวงจรหนึ่งวงในรูปที่ 5.67 ถ้าเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุหรือตัวต้านทานจะมีผลทำให้ค่าคงที่ทางเวลา (time constant: τ) ของวงจรเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ทางเวลาได้ตามสมการที่ (5-13)

$$\tau = RC \quad (5-13)$$

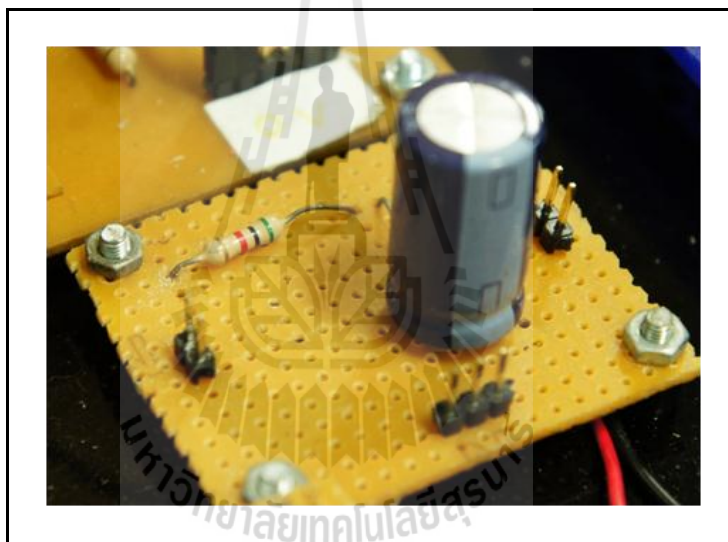
พารามิเตอร์ของวงจรหนึ่งวงที่ใช้งานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำหนดให้มีค่าคงที่ทางเวลา (τ) เท่ากับ 5 วินาที ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผู้ดำเนินวิจัยเพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบที่ใช้งาน โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรหนึ่งวงสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5-13) โดยเมื่อกำหนดให้มีค่าคงที่ทางเวลาเท่ากับ 5 วินาที และมีค่าความต้านทานเท่ากับ $5\text{ k}\Omega$ ดังนั้นสามารถหาค่าตัวเก็บประจุของวงจรหนึ่งวงได้ตามสมการที่ (5-14)

$$C = \frac{5}{5000} = 1 \times 10^{-3} \text{ F} = 1000 \mu\text{F} \quad (5-14)$$

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของวงจรหนึ่งวงที่ได้จากการออกแบบไปแทนลงในรูปที่ 5.67 จะได้วงจรหนึ่งวงที่ได้จากการออกแบบตามรูปที่ 5.68 และวงจรหนึ่งวงที่ใช้งานจริงดังรูปที่ 5.69

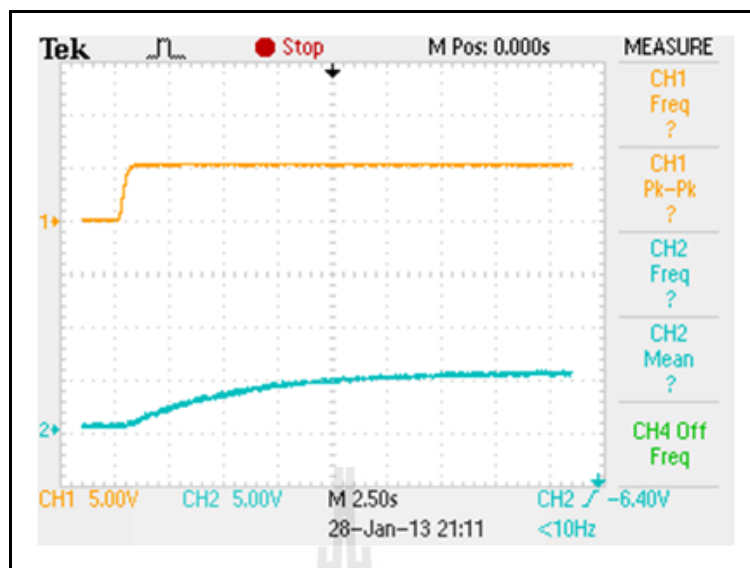


รูปที่ 5.68 วงจรหน่วงที่ได้จากการออกแบบ

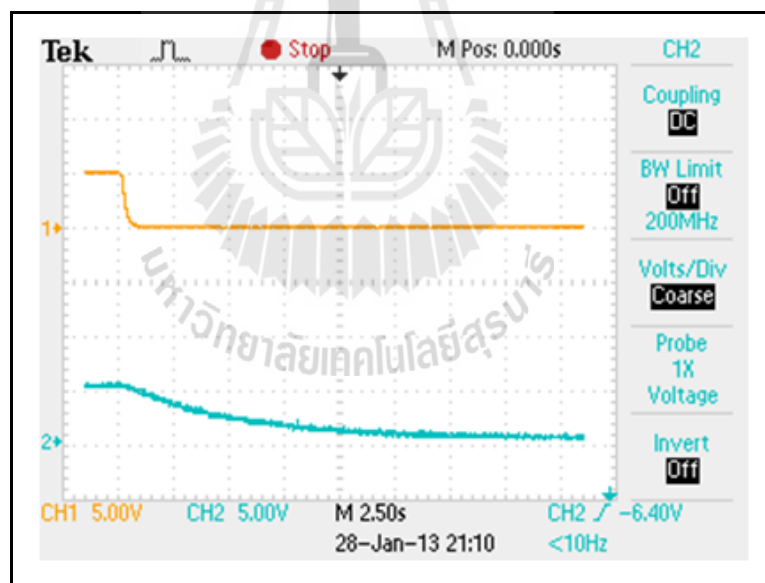


รูปที่ 5.69 วงจรหน่วงที่ใช้งานจริง

การทดสอบการทำงานของวงจรหน่วงในรูปที่ 5.69 ได้ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอินพุตให้กับวงจรหน่วงในรูปที่ 5.69 ซึ่งจะดำเนินการทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ปรับแรงดันอินพุตของวงจรหน่วงขึ้นเท่ากับ 5 V กรณีที่ 2 ปรับลดแรงดันอินพุตของวงจรหน่วงลงเท่ากับ 0 V และทำการพิจารณาสัญญาณเอาต์พุตของวงจรหน่วงจากการทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบวงจรหน่วงได้ดังรูปที่ 5.70 และรูปที่ 5.71 ตามลำดับ โดยที่ช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตของวงจรหน่วง ช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรหน่วง



รูปที่ 5.70 ผลการทดสอบวงจรหน่วยกรณ์ที่ 1

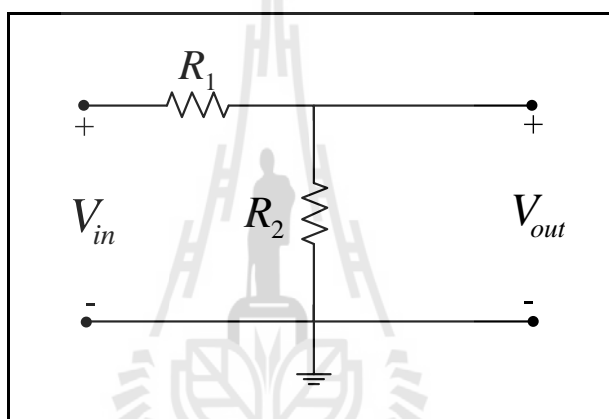


รูปที่ 5.71 ผลการทดสอบวงจรหน่วยกรณ์ที่ 2

จากผลการทดสอบวงจรหน่วยกรณ์ในรูปที่ 5.70 และรูปที่ 5.71 จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและค่อย ๆ ลดลง ซึ่งเกิดจากผลของค่าคงที่ทางเวลาของวงจรหน่วยกรณ์เอง

5.5.3 ชุดปรับตั้งความเร็ว

ชุดปรับตั้งความเร็วเป็นวงจรที่ใช้ในการปรับระดับแรงดันอินพุตของวงจรควบคุมพีไอ โดยจะอาศัยการทำงานของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวงจรดังกล่าวได้มีการอธิบายวิธีการทำงานและการออกแบบแล้วในเบื้องต้น ดังนั้นในการออกแบบชุดปรับตั้งความเร็วจะพิจารณาจากการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้าที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 โดยจะพิจารณาจากค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกความเร็วของรถไฟฟ้า โดยการออกแบบชุดปรับตั้งความเร็วต้องสามารถปรับค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 0 V จนถึงค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งจะมีโครงสร้างวงจรของชุดปรับตั้งความเร็วดังรูปที่ 5.72

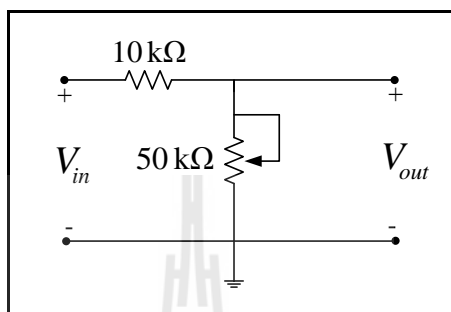


รูปที่ 5.72 ชุดปรับตั้งความเร็ว

ในการออกแบบชุดปรับตั้งความเร็วจะพิจารณาจากค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า ที่ได้แสดงผลการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้าไว้ในบทที่ 6 พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้ามียุคสูงสุดเท่ากับ 5 V ดังนั้น ในการออกแบบชุดปรับตั้งความเร็วจึงต้องให้ชุดปรับตั้งความเร็วสามารถปรับระดับแรงดันได้ตั้งแต่ 0 V จนถึง 5 V โดยการออกแบบชุดปรับตั้งความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำหนดให้มีค่าแรงดันอินพุตเท่ากับ 6 V ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 5 V และตัวต้านทาน $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ซึ่งสามารถหาค่าตัวต้านทาน R_2 ได้ตามสมการที่ (5-15)

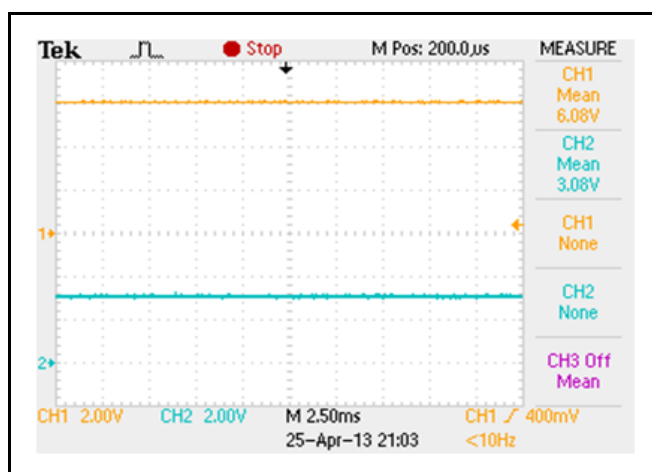
$$R_2 = V_o \frac{R_1}{V_{in} - V_o} \quad (5-15)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดมาให้ลงในสมการที่ (5-15) จะได้ค่าตัวต้านทาน $R_2 = 50\text{k}\Omega$ ดังนั้นในการใช้งานจะกำหนดให้ตัวต้านทาน R_2 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อให้สามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดปรับตั้งความเร็วได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 5 V จึงได้ชุดปรับตั้งความเร็วที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังรูปที่ 5.73



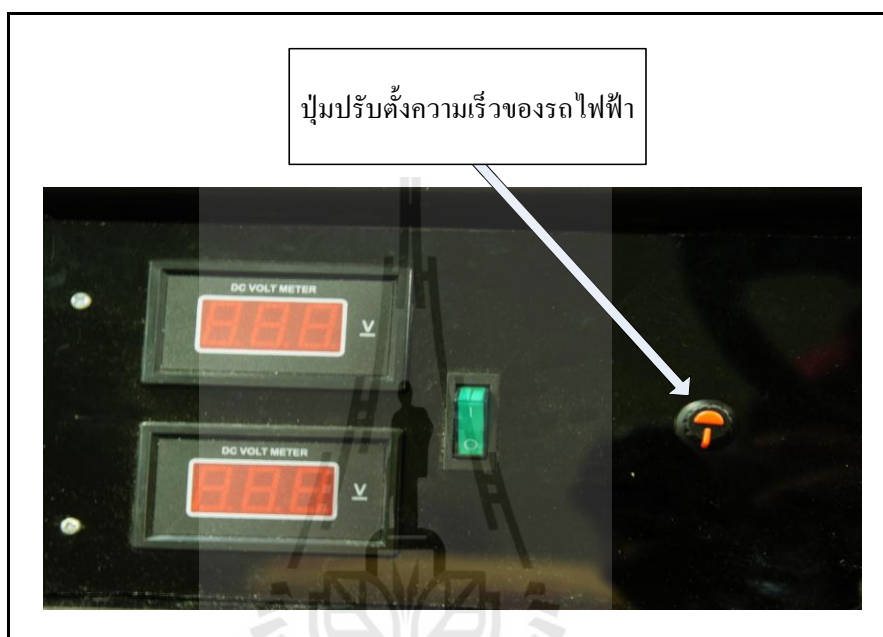
รูปที่ 5.73 ชุดปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้า

การทดสอบชุดปรับตั้งความเร็วตามรูปที่ 5.73 กำหนดให้มีความแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าเท่ากับ 6 V และต้องการให้มีความแรงดันเอาต์พุตของชุดปรับตั้งความเร็วมีค่าเท่ากับ 3 V ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5-15) พบว่าต้องปรับค่าตัวต้านทาน $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ซึ่งจะมีผลการทดสอบชุดปรับตั้งความเร็วดังรูปที่ 5.74 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ ค่าแรงดันอินพุตของชุดปรับตั้งความเร็ว และช่องสัญญาณที่ 2 คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดปรับตั้งความเร็ว



รูปที่ 5.74 ผลการทดสอบชุดปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้า

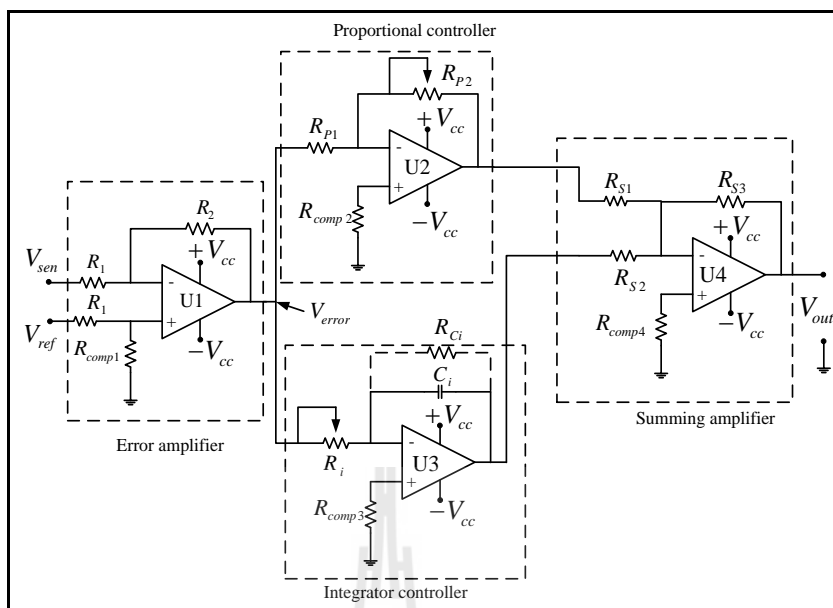
จากผลการทดสอบชุดปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้าในรูปที่ 5.74 พบว่าเมื่อต่อวงจรตามรูปที่ 5.74 และปรับค่าตัวต้านทาน $R_2 = 10k\Omega$ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตของชุดปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้าเท่ากับ 3 V ซึ่งเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ในเบื้องต้น และการติดตั้งชุดปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.75



รูปที่ 5.75 จุดติดตั้งชุดปรับตั้งความเร็ว

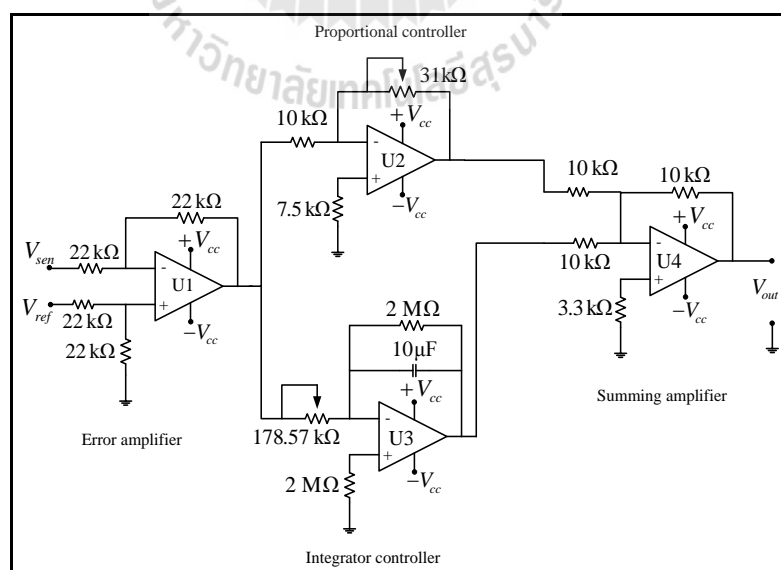
5.5.4 ตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมที่ช่วยควบคุมความเร็วรอบของรถไฟฟ้าให้คงที่ตามต้องการ ซึ่งการทำงานและการออกแบบตัวควบคุมของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้อปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักในการสร้างซึ่งอปแอมป์ที่นำมาใช้ในการสร้างวงจรตัวควบคุมพีไอ คือ ยี่ห้อ Burr-Brown Production เบอร์ OPA 277 โดยจะนำมาต่อกันแบบขนาน ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรตัวควบคุมพีไอ ดังรูปที่ 5.76

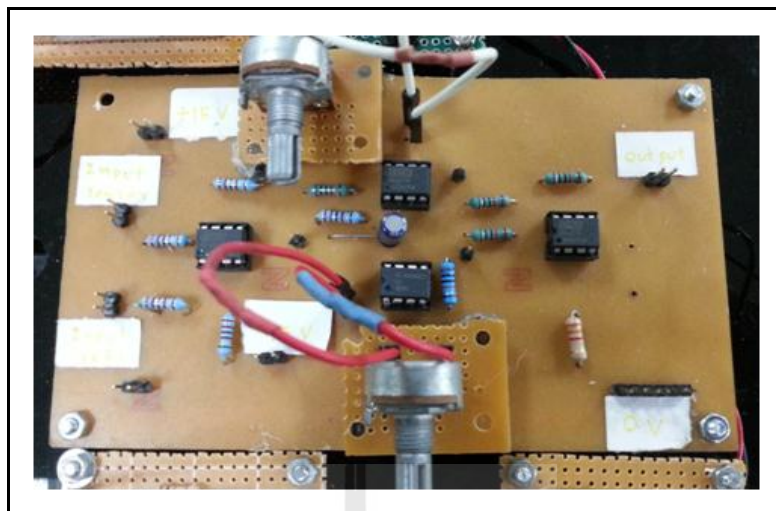


รูปที่ 5.76 วงจรตัวควบคุมพีไอ

จากวงจรตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 5.76 ได้ดำเนินการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมพีไอดังกล่าวไว้แล้วตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ซึ่งจะได้วงจรตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังรูปที่ 5.77 และวงจรตัวควบคุมพีไอที่ใช้งานจริงดังรูปที่ 5.78



รูปที่ 5.77 วงจรตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบ

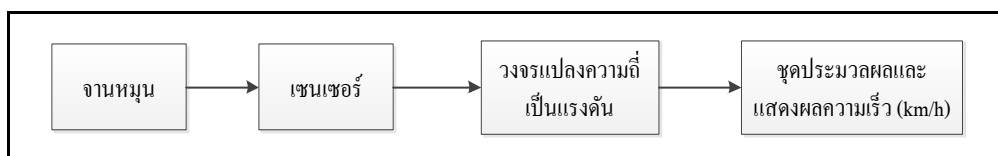


รูปที่ 5.78 วงจรตัวควบคุมพีไอที่ใช้งานจริง

การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 5.78 ได้นำเสนอผลการทดสอบการทำงานของวงจรตัวควบคุมพีไอแล้วในบทที่ 4 และการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมจะได้มีการนำเสนอการทดสอบและผลการทดสอบไว้ในบทที่ 6

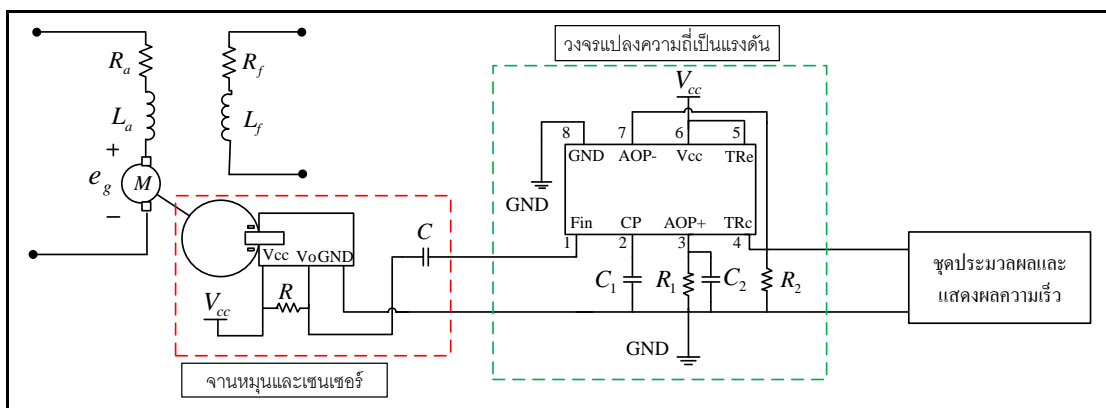
5.6 ชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า

ชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความเร็วจากการใช้งานรถไฟฟ้า และนำมาแสดงผลในหน้าจอแสดงผล ที่มีหน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) ซึ่งมีแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้าดังรูปที่ 5.79



รูปที่ 5.79 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.79 ประกอบด้วย งานหมุน เซนเซอร์ วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็ว โดยสามารถแสดงโครงสร้างของวงจรที่นำมาใช้งานได้ดังรูปที่ 5.80



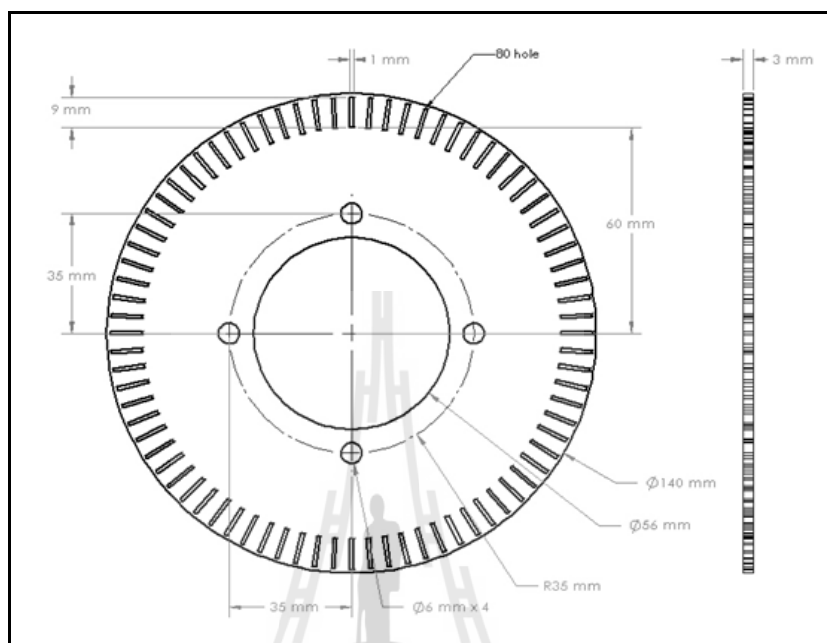
รูปที่ 5.80 โครงสร้างวงจรชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า

การทำงานของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้าในรูปที่ 5.80 เมื่อรถไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่จานหมุนที่ได้มีการติดตั้งที่ล้อของรถไฟฟ้าจะหมุนตามล้อของรถไฟฟ้า โดยจานหมุนดังกล่าวได้มีการเจาะช่องเล็ก ๆ เพื่อให้เซนเซอร์ที่นำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับความเร็วของการหมุนของจานหมุน ซึ่งเซนเซอร์ที่นำมาใช้งานจะเป็นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณในตัวเดียวกัน โดยเมื่อล้อของรถไฟฟ้าเริ่มหมุนจะทำให้จานหมุนไปตัดลำแสงของเซนเซอร์ ซึ่งเซนเซอร์จะมีการรับแสงเป็นช่วง ๆ โดยเอาต์พุตที่ได้เป็นลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วของจานหมุนหรือล้อของรถไฟฟ้านั่นเอง และเมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่มีค่าเป็นความถี่แปลงให้อยู่ในรูปของค่าแรงดันโดยใช้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน และนำค่าแรงดันเอาต์พุตดังกล่าวไปประมวลผลด้วยชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งจะได้ความเร็วของรถไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ ตามการใช้งาน ดังนั้น การออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานของชุดตรวจวัดความเร็วสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.6.1 จานหมุน

จานหมุนเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการบ่งบอกถึงความเร็วของรถไฟฟ้า เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่กับล้อของรถไฟฟ้า โดยที่ความเร็วในการหมุนของจานหมุนจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนของล้อรถไฟฟ้าและจำนวนช่องที่เจาะเพื่อให้เซนเซอร์ใช้ในการตรวจจับ ดังนั้น จานหมุนที่นำมาใช้งานจะนำมาติดตั้งแทนจานเบรกของรถไฟฟ้า โดยจะออกแบบจานหมุนให้มีขนาดเท่ากับจานเบรกของรถไฟฟ้า และช่องที่เจาะเพื่อให้เซนเซอร์ใช้ในการตรวจวัดความเร็วมีขนาดความกว้างของช่องเจาะเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดของดังกล่าวพิจารณาจาก

เอกสารข้อมูลของเซนเซอร์ที่นำมาใช้งาน ดังนั้น การออกแบบจานหมุนที่นำมาใช้ในงานวิจัย วิทยานิพนธ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.81 และจานหมุนที่นำมาใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 5.82

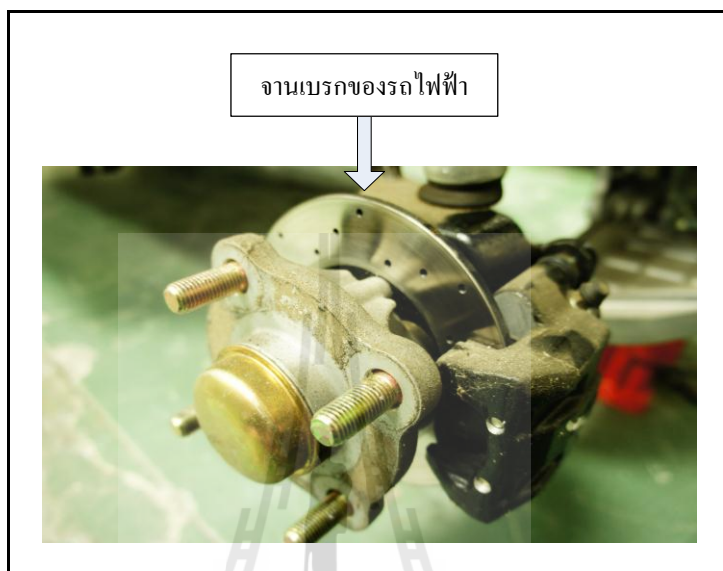


รูปที่ 5.81 การออกแบบจานหมุนที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

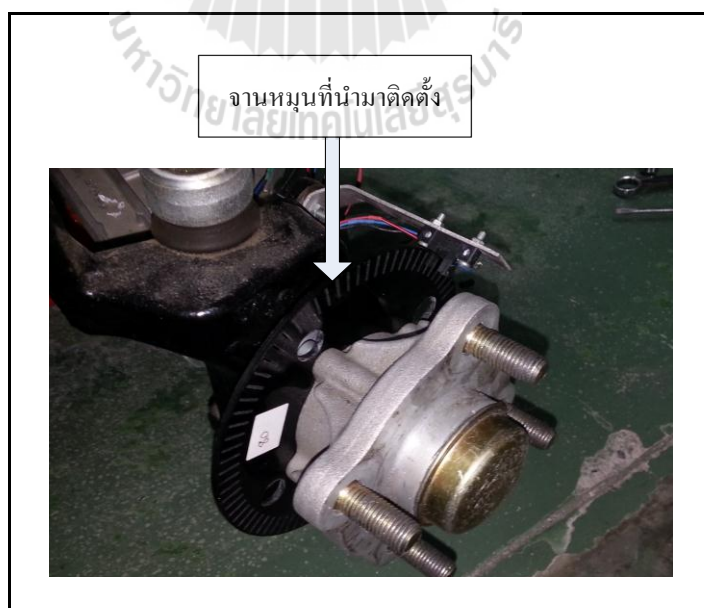


รูปที่ 5.82 จานหมุนที่นำมาใช้งานจริง

ในการติดตั้งจานหมุนที่ได้มีการอธิบายไว้ในเบื้องต้นแล้วว่า ได้นำจานหมุนมาติดตั้งแทนจานเบรกของรถไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงการติดตั้งจานหมุนที่ใช้งานได้ดังรูปที่ 5.83 และรูปที่ 5.84



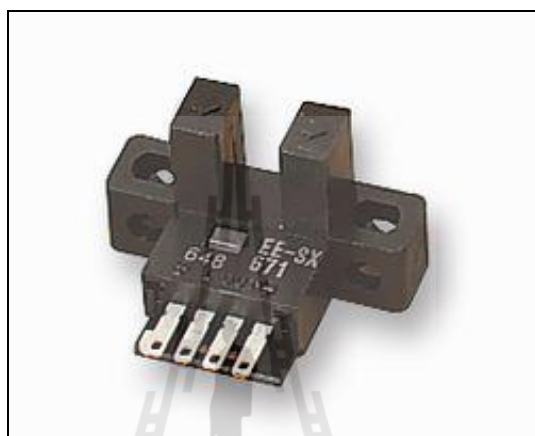
รูปที่ 5.83 จุดติดตั้งจานหมุน



รูปที่ 5.84 จานหมุนที่ติดตั้งเสร็จแล้ว

5.6.2 เซนเซอร์

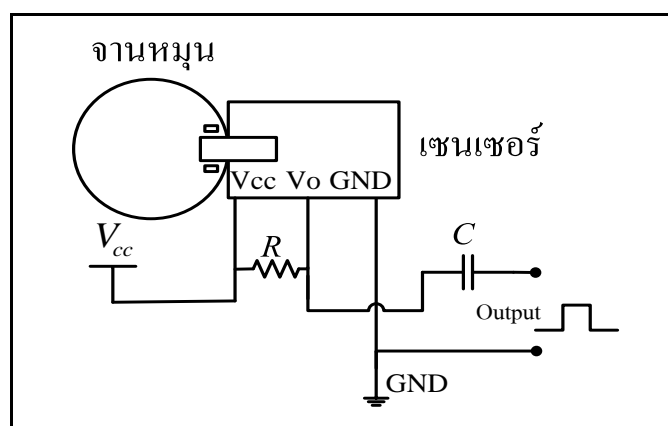
เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ได้นำมาใช้เพื่อตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณในตัวเดียวกัน โดยจะวัดสัญญาณจากช่องของจานหมุน ซึ่งเอาต์พุตของเซนเซอร์จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่ตามความเร็วในการหมุนของจานหมุน โดยเซนเซอร์ที่นำมาใช้งาน ยี่ห้อ OMRON เบอร์ EE-SX671 ดังรูปที่ 5.85



รูปที่ 5.85 เซนเซอร์ที่นำมาใช้งาน

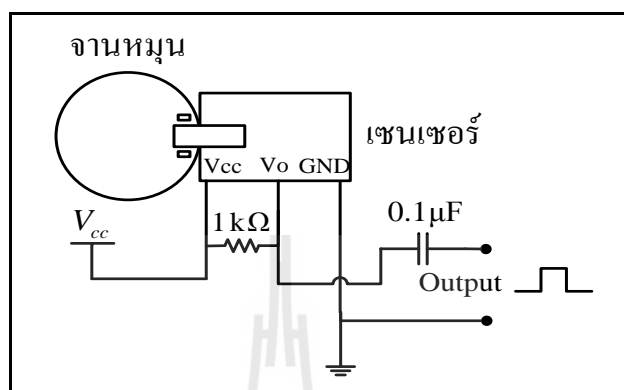
เซนเซอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะมีลักษณะการต่อวงจรใช้งาน

ดังรูปที่ 5.86

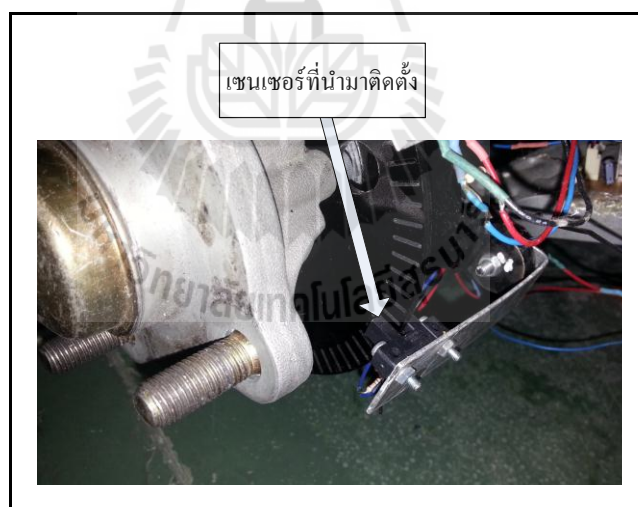


รูปที่ 5.86 เซนเซอร์

การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรดังกล่าว ได้มาจากการทดสอบการทำงานของ เซนเซอร์ ซึ่งสามารถแสดงวงจรที่นำมาใช้งานดังรูปที่ 5.87 และการนำเซนเซอร์มาติดตั้งใน รถไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 5.88

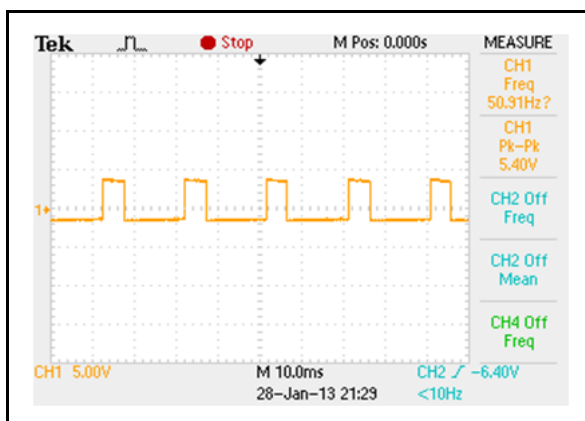


รูปที่ 5.87 วงจรของเซนเซอร์ที่ใช้งานจริง



รูปที่ 5.88 การติดตั้งเซนเซอร์

การทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ สามารถทำการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยง ให้กับเซนเซอร์เท่ากับ 5 V และต่อวงจรตามรูปที่ 5.87 โดยการทดสอบจะหมุนจานหมุนตามรูป ที่ 5.88 และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูป ที่ 5.89 ดังนี้

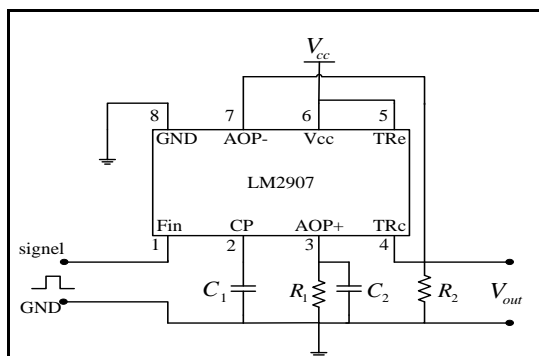


รูปที่ 5.89 สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์

จากผลการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ที่มีผลการทดสอบตามรูปที่ 5.89 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์จะเป็นสัญญาณรูปพัลส์ ที่มีค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตขึ้นอยู่กับความเร็วของจานหมุนและจำนวนช่องที่เจาะในจานหมุน

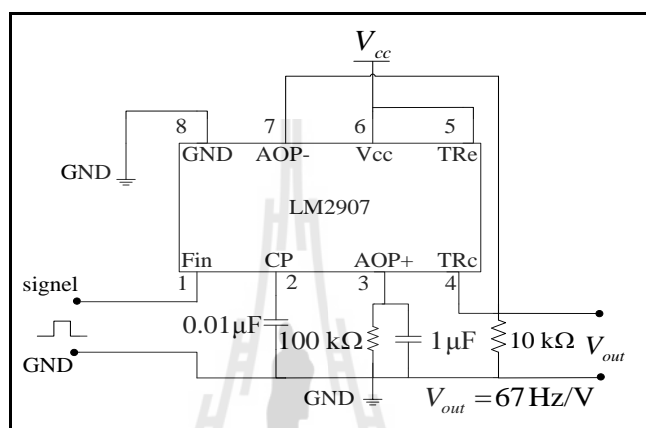
5.6.3 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันเป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงความถี่ที่ได้จากเซนเซอร์ให้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าแรงดันที่ได้จะนำไปใช้ในการประมวลผลความเร็วของรถไฟฟ้ายักษ์ที่นำมาใช้ในการสร้างวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน คือ ยี่ห้อ TEXAS INSTRUMENTS เบอร์ LM2907 โดยวงจรที่นำมาใช้งานสามารถดูได้จากเอกสารข้อมูลของไอซีดังกล่าว ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันดังรูปที่ 5.90

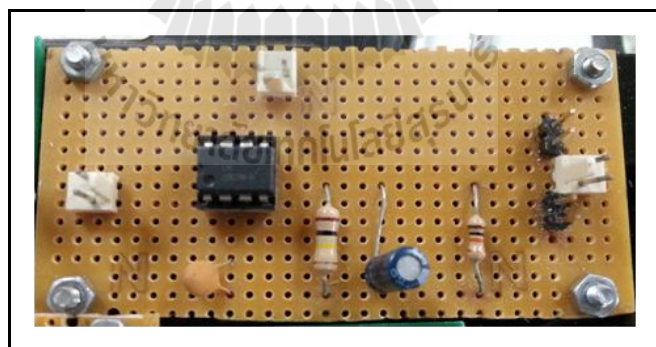


รูปที่ 5.90 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

จากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันในรูปที่ 5.90 ประกอบด้วยไอซี LM2907 ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ซึ่งการนำวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไปใช้งาน จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรตามเอกสารข้อมูลของไอซี LM2907 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.91 และมีวงจรที่ใช้งานจริงดังรูปที่ 5.92 ซึ่งการต่อวงจรที่ใช้งานในลักษณะดังกล่าว จะทำให้มีค่าอัตราส่วนของสัญญาณอินพุตต่อค่าแรงดันเอาต์พุต คือ 67 Hz ต่อ 1 V



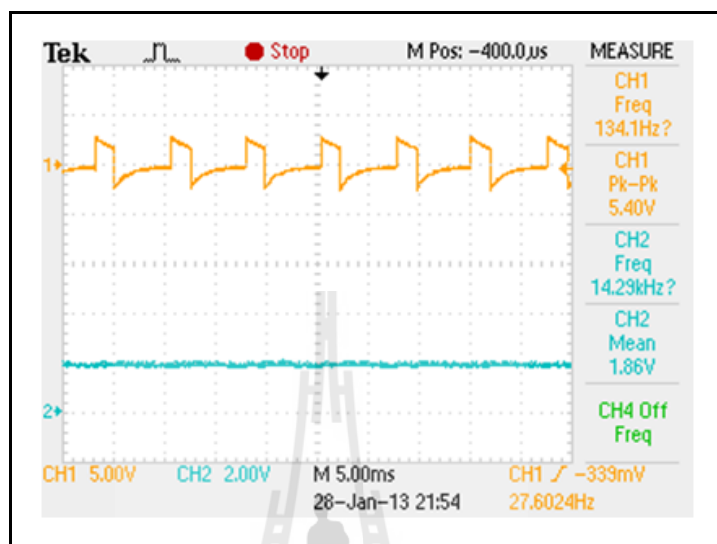
รูปที่ 5.91 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันจากการออกแบบ



รูปที่ 5.92 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันที่ใช้งานจริง

การทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน จะดำเนินการทดสอบ โดยใช้วงจรในรูปที่ 5.92 ซึ่งทำการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรเท่ากับ 15 V และจ่ายอินพุตให้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ซึ่งก็คือ สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ได้จากการหมุนของจานหมุน ซึ่งทำการทดสอบโดยการหมุนจานหมุน และทำการวัดสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลง

ความถี่ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.93 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุต และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุต

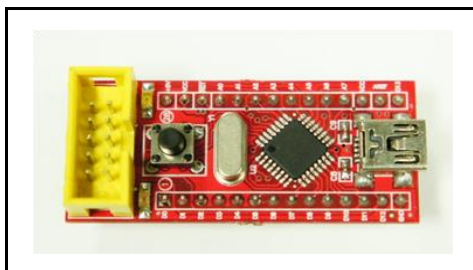


รูปที่ 5.93 ผลการทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

จากผลการทดสอบของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันในรูปที่ 5.93 พบว่ามีค่าความถี่อินพุตของวงจรเท่ากับ 134.1 Hz และมีค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรประมาณ 2 V ซึ่งเป็นไปตามการต่อวงจรที่ใช้งานที่ทำให้ได้อัตราส่วนของสัญญาณอินพุตต่อค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 67 Hz ต่อ 1 V

5.6.4 ชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็ว

ชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็วเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงค่าความเร็วของรถไฟฟ้าจากการใช้งาน โดยจะพิจารณาจากค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน และนำมาแสดงผลเป็นค่าความเร็วของรถไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นกิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) ซึ่งการประมวลผลดังกล่าวเป็นการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วและค่าความเร็วของรถไฟฟ้าที่ได้มีการทดสอบในบทที่ 6 โดยชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็วประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ และชุดแสดงผล ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.94 และรูปที่ 5.95 ตามลำดับ



รูปที่ 5.94 ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 5.95 ชุดแสดงผล

การทำงานของชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็วจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปที่ 5.94 เป็นตัวประมวลผลค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว ซึ่งเป็นค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันที่ได้จากการใช้งานรถไฟฟ้า ซึ่งค่าความเร็วที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จะถูกนำมาแสดงผลของความเร็วที่ชุดแสดงผลตามรูปที่ 5.95

5.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า ที่ประกอบไปด้วย วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ วงจรจุดชนวนเกทที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมและเมื่อมีตัวควบคุม และ โครงสร้างของชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งได้มีการอธิบายการถึงหลักการทำงาน การออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน รวมทั้งการทดสอบเพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง ส่วนผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทั้งกรณีไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุมความเร็วจะนำเสนอในบทที่ 6 ซึ่งเป็นบทถัดไป

บทที่ 6

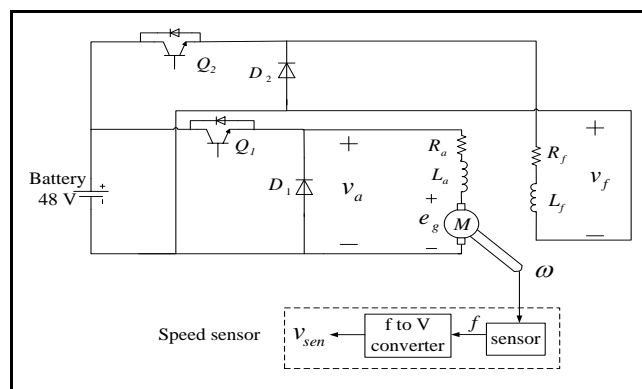
การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

6.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจากการออกแบบที่ได้ นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ประกอบด้วย การทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุม ซึ่งจะได้มีการนำเสนอวิธีการทดสอบ ผลการทดสอบ และวิธีแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งการดำเนินการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น เป็นการแสดงให้เห็นว่าระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ได้ดำเนินการออกแบบมานั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

6.2 การทดสอบหาความสัมพันธ์ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า

การทดสอบหาความสัมพันธ์ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า เป็นการทดสอบเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า โดยการทดสอบดังกล่าวมีวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 6.1



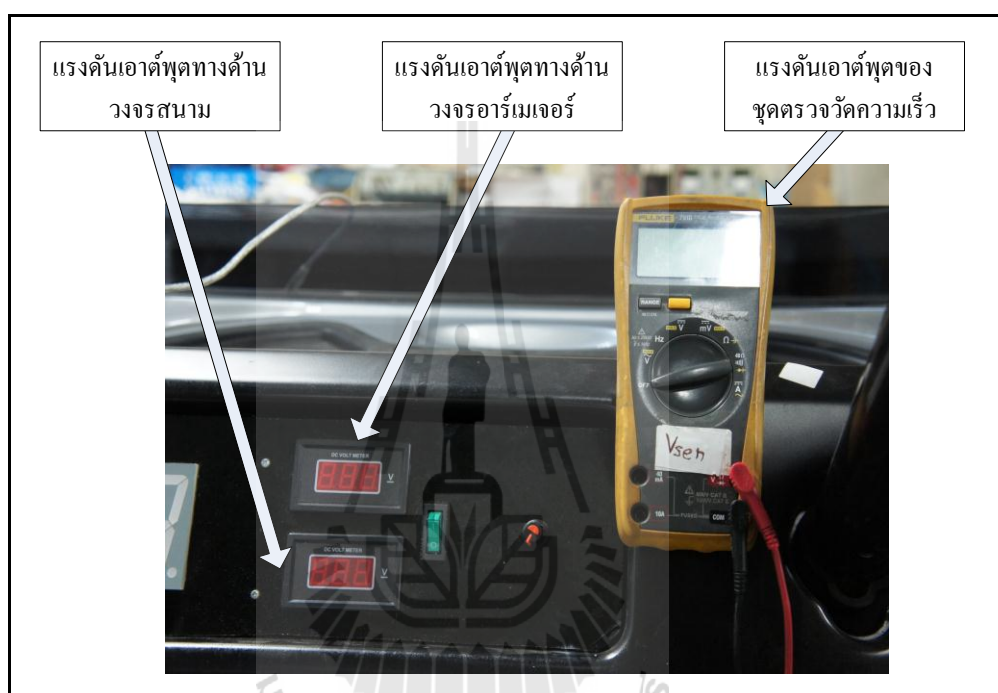
รูปที่ 6.1 วงจรทดสอบความสัมพันธ์ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า

การทดสอบตามรูปที่ 6.1 เป็นการทดสอบเพื่อที่จะนำสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ในการประมวลผลความเร็วของรถไฟฟ้าในชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็วที่ได้มีการอธิบายไว้ในบทที่ 5 และนอกจากนำไปใช้ในการประมวลผลความเร็วของรถไฟฟ้าแล้ว สมการดังกล่าวยังใช้เป็นตัวกำหนดค่าความเร็วของรถไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมด้วยเช่นกัน ซึ่งการทดสอบในรูปที่ 6.1 ประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ 2 วงจร ที่ต่อทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และชุดตรวจวัดความเร็ว (Speed sensor) โดยที่ชุดตรวจวัดความเร็ว จะทำหน้าที่วัดความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งมีการทดสอบโดยใช้ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมโดยใช้คันเร่งในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้าและนำไปเทียบกับความเร็วของรถจักรยานยนต์ตามที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 6.2 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าด้วยวิธีการดังกล่าว มีความง่ายและลดความซับซ้อนเนื่องจากวิธีการคำนวณที่มีความยุ่งยากอีกทั้งข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณหาความเร็วของรถไฟฟ้ามีไม่เพียงพอ ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราทดของชุดเฟืองท้ายของรถไฟฟ้า ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตรถไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชุดอัตราทดดังกล่าวมา ดังนั้น ผู้ดำเนินงานวิจัยจึงได้สร้างชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้าที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 และทำการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า



รูปที่ 6.2 การทดสอบปรับความเร็วของรถไฟฟ้าจากคันเร่งเทียบกับความเร็วของรถจักรยานยนต์

การทดสอบในรูปที่ 6.2 ได้ทำการทดสอบโดยการปรับความเร็วของรถไฟฟ้ด้วยคันเร่งที่ค่าความเร็วค่าหนึ่งเพื่อนำไปเทียบกับความเร็วของรถจักรยานยนต์ที่ใช้งานด้วยความเร็วที่เท่ากัน และบันทึกผลความเร็วในขณะนั้นของรถจักรยานยนต์ (speed) กับค่าแรงดันทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ (v_a) และค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว (v_{sen}) จากเครื่องมือวัดดังรูปที่ 6.3



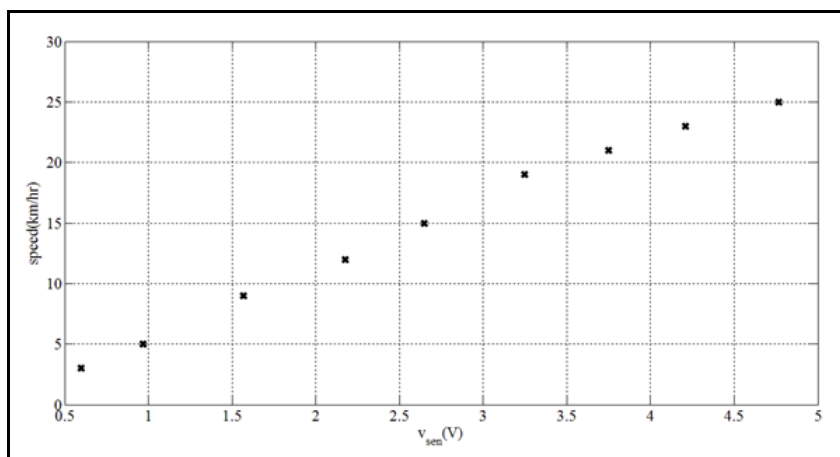
รูปที่ 6.3 เครื่องมือวัดค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

ซึ่งได้มีดำเนินการทดสอบดังนี้ ทำการปรับค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์ (v_a) ด้วยคันเร่งให้มีค่าแรงดันเพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 5 V จนถึงค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์ประมาณ 45 V และทำการวัดค่าความเร็วรถจักรยานยนต์ ค่าแรงดันทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ค่าแรงดันทางด้านวงจรสนาม และค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วขณะที่ขับเทียบกันมาด้วยความเร็วที่เท่ากัน ในแต่ละครั้งของการปรับค่าแรงดันอินพุตของวงจรอาร์เมเจอร์ ซึ่งการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้ดังกล่าวจะกำหนดให้มีค่าแรงดันอินพุตของวงจรสนาม (v_f) เท่ากับ 4 V ตลอดการทดสอบ และผลการทดสอบการหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบความเร็วของรถไฟฟ้า

แรงดัน อาร์เมเจอร์ (V)	แรงดัน สนาม (V)	ความเร็ว ของรถไฟฟ้า (km/h)	แรงดันเอาต์พุตของ ชุดตรวจวัดความเร็ว (V)
5	4	3	0.6
10.1	4	5	0.97
15.5	4	9	1.57
20.8	4	12	2.18
25.3	4	15	2.65
30.5	4	19	3.25
35.5	4	21	3.75
39.8	4	23	4.21
44.7	4	25	4.77

จากตารางบันทึกผลการทดสอบในตารางที่ 6.1 ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับความเร็วของรถไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 แต่วิธีการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก ดังนั้น ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้หาความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression : LR) ซึ่งเป็นการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลของผลการทดสอบในตารางที่ 6.1 ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว
กับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับความเร็วของ
รถไฟฟ้าด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นมีสมการความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6-1) ดังนี้

$$v_{sen} = a_1 speed + a_0 \quad (6-1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ a_1 และ a_0 สามารถหาได้จากสมการที่ (6-2) และ (6-3) ตามลำดับ

$$a_1 = \frac{n \sum [speed \times v_{sen}] - \sum speed \sum v_{sen}}{n \sum speed^2 - (\sum speed)^2} \quad (6-2)$$

$$a_0 = \overline{v_{sen}} - a_1 \overline{speed} \quad (6-3)$$

โดยที่ v_{sen} คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว (V)

$speed$ คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h)

n คือ จำนวนชุดข้อมูล

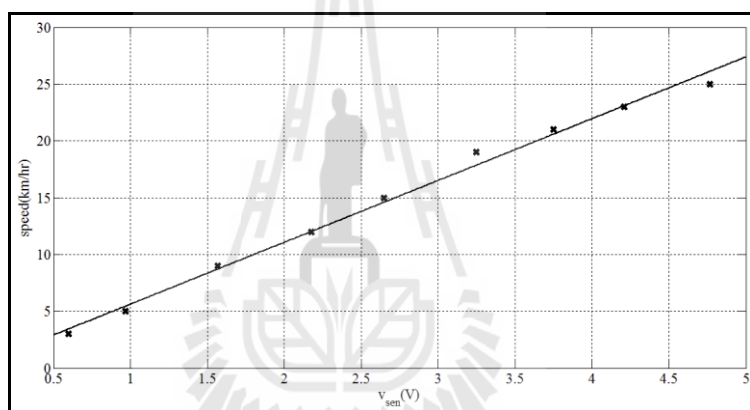
$\overline{v_{sen}}$ คือ แรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วเฉลี่ย (V)

\overline{speed} คือ ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้า (km/h)

เมื่อแทนค่าข้อมูลของตารางที่ 6.1 ในสมการที่ (6-2) และ (6-3) จะได้สมการแทนความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า ด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ (6-4)

$$v_{sen} = (0.1825 \times speed) - 0.0156 \quad (6-4)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6-4) เมื่อแทนค่าความเร็วของรถไฟฟ้าลงในสมการ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วที่ค่าความเร็วต่าง ๆ และเมื่อนำค่าไปพล็อตกราฟเทียบกับรูปที่ 6.4 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6.5

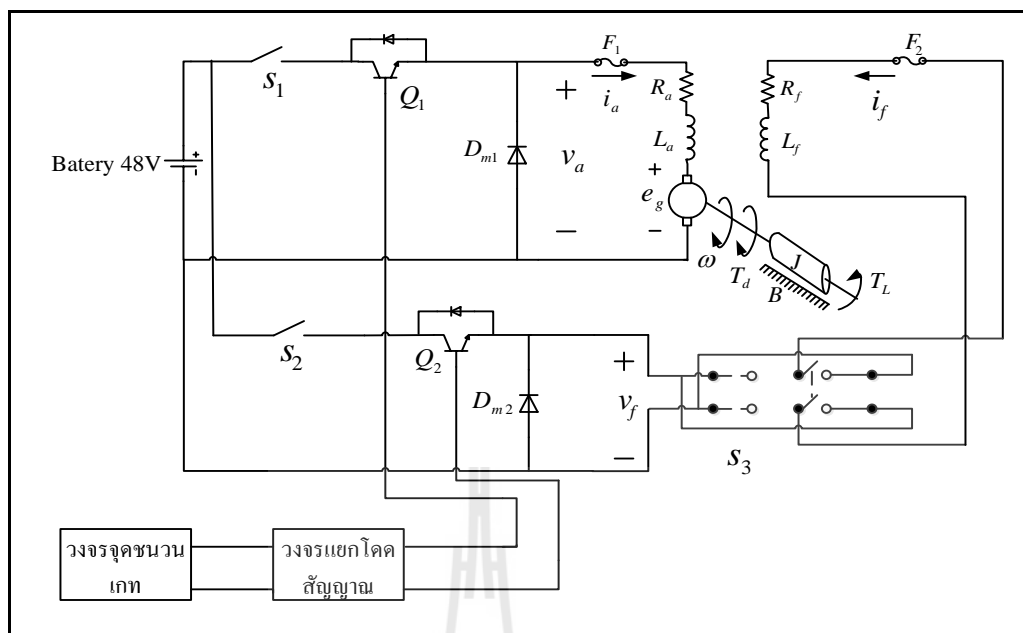


รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น จะนำไปใช้ในการประมาณค่าความเร็วของรถไฟฟ้าในชุดประมวลผลและแสดงผลความเร็วของรถไฟฟ้า และใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวในการกำหนดความเร็วของรถไฟฟ้าในการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม

6.3 การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม

การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เป็นการทดสอบปรับความเร็วในการใช้งานของรถไฟฟ้าจากชุดคันเร่ง ซึ่งจะมีโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมในรูปที่ 6.6 จะดำเนินการทดสอบโดยการนำรถไฟฟ้าไปทดสอบที่ถนนดังรูปที่ 6.7 และทำการปรับค่าความเร็วของรถไฟฟ้าด้วยคันเร่งให้ความเร็วของรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยจะทำการปรับความเร็วของรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 5 km/h ซึ่งสามารถดูค่าความเร็วของรถไฟฟ้าได้จากจอแสดงผลผลความเร็วของรถไฟฟ้าดังรูปที่ 6.8 และทำการบันทึกผลการทดสอบในแต่ละค่าความเร็วของรถไฟฟ้าที่ปรับขึ้นจากเครื่องมือวัดในรูปที่ 6.8 ที่ประกอบด้วย ออสซิโลสโคป สายวัดสัญญาณ อุปกรณ์คล็องวัดกระแส (อัตราส่วน 1mV/A) จอแสดงผลผลความเร็วของรถไฟฟ้า ดิจิตอลมิเตอร์ที่วัดแรงดันทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ ดิจิตอลมิเตอร์ที่วัดแรงดันทางด้านวงจรสนาม ซึ่งการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมจะกำหนดให้มีค่าแรงดันอินพุตของวงจรสนาม (v_f) เท่ากับ 4 V ตลอดการทดสอบ ดังนั้น ผลการทดสอบของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมสามารถแสดงได้ตารางที่ 6.2 และรูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลคทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 ถึงรูปที่ 6.13 โดยช่องสัญญาณที่ 1 ของรูปสัญญาณดังกล่าว คือ รูปสัญญาณแรงดันที่ไหลคทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ และช่องสัญญาณที่ 2 คือ รูปสัญญาณกระแสที่ไหลคทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์



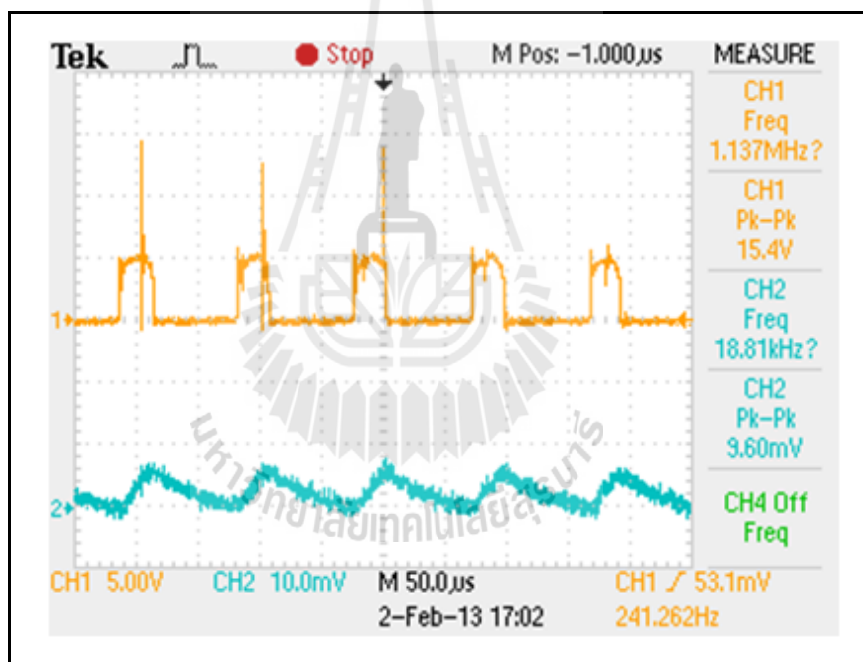
รูปที่ 6.7 การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม



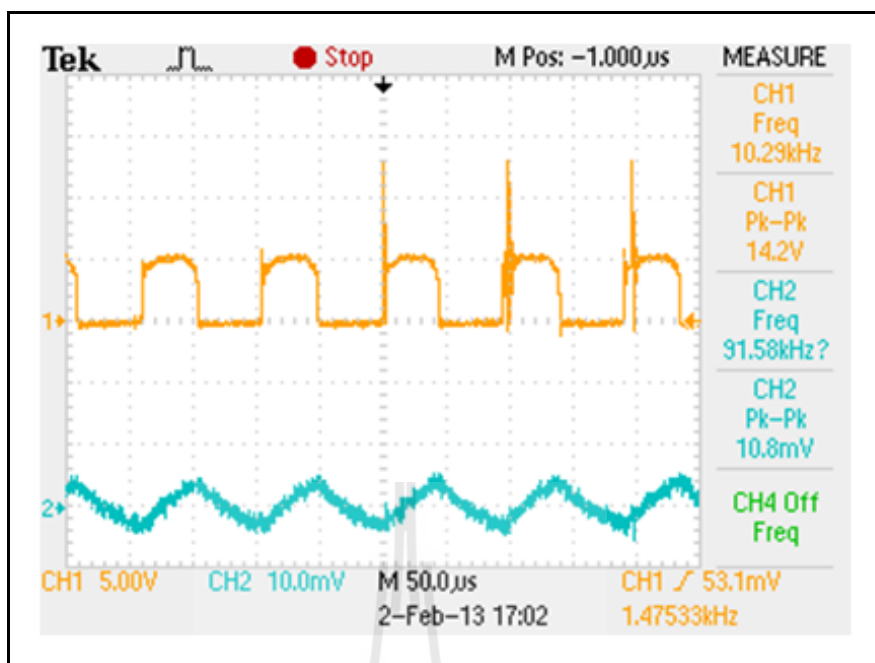
รูปที่ 6.8 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม

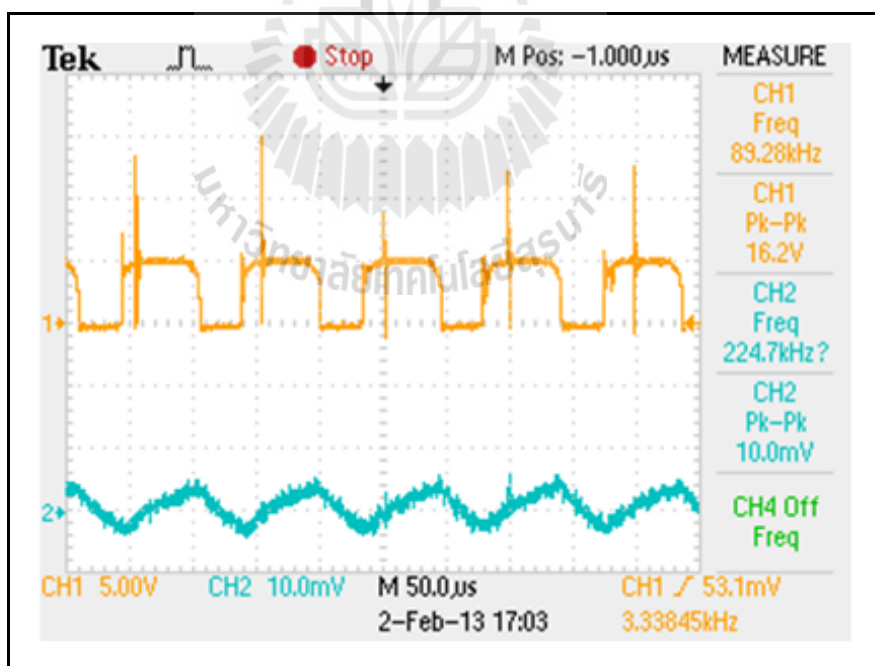
แรงดัน อาร์มเจอร์ (V)	แรงดัน สนาม (V)	ความเร็ว รถไฟฟ้า (km/h)	กระแส อาร์มเจอร์ (A)
10.1	4	5	6
19.2	4	10	8
29.4	4	15	8
35.5	4	20	6
44	4	24	4



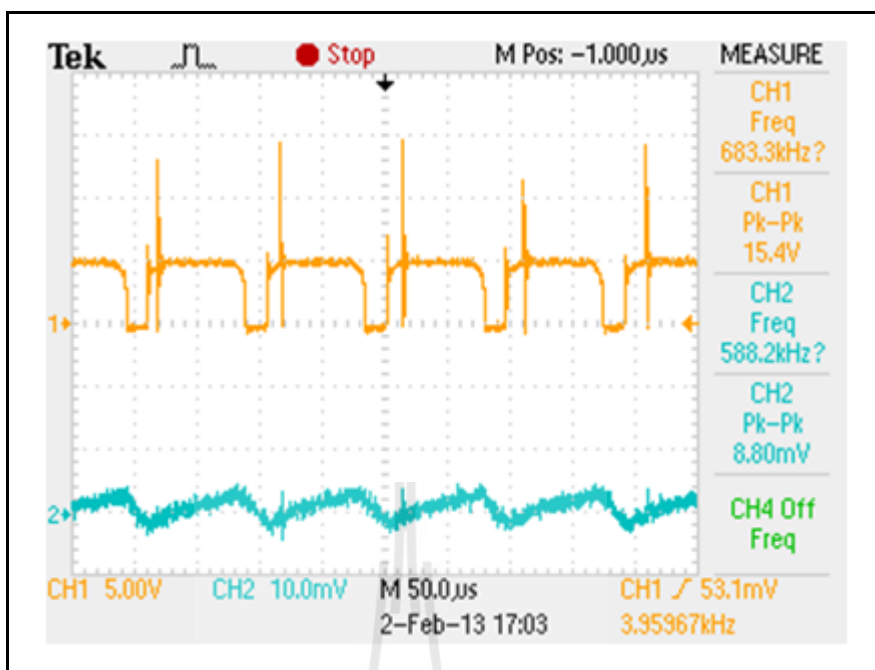
รูปที่ 6.9 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรรอาร์มเจอร์ที่ความเร็ว 5 km/h



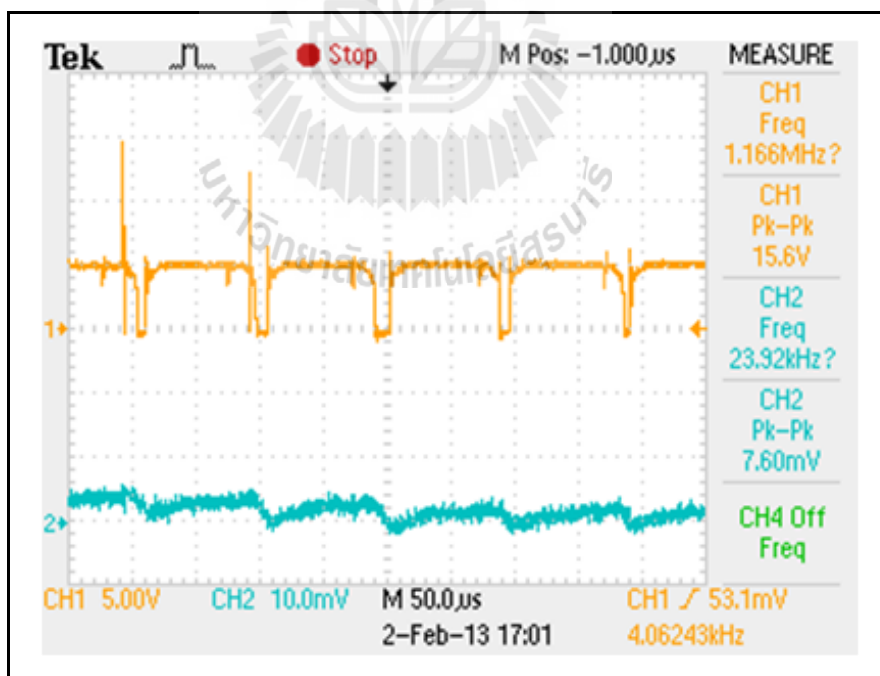
รูปที่ 6.10 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรรีโมเตอร์ที่ความเร็ว 10 km/h



รูปที่ 6.11 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรรีโมเตอร์ที่ความเร็ว 15 km/h



รูปที่ 6.12 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรรีโมเตอร์ที่ความเร็ว 20 km/h

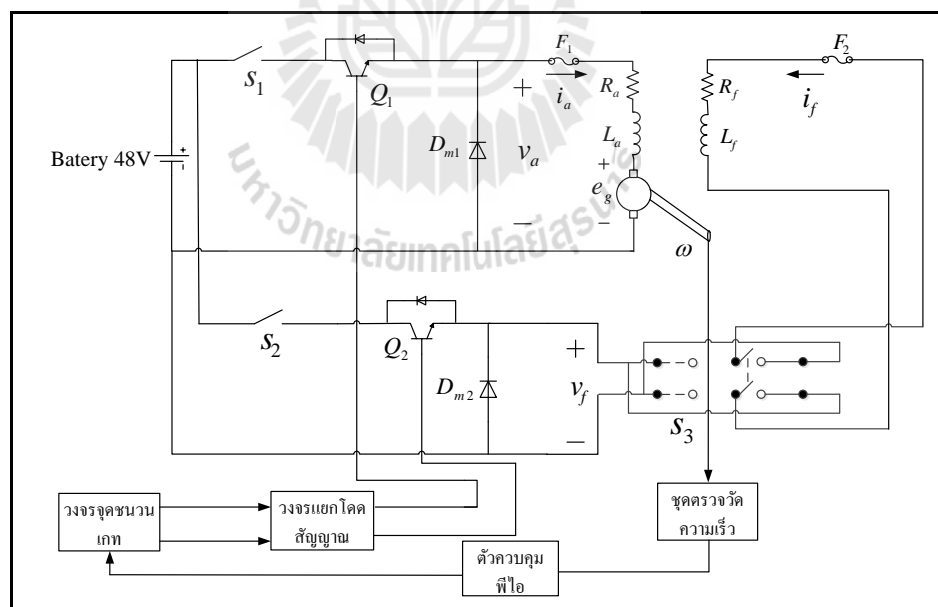


รูปที่ 6.13 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่โหลดทางด้านวงจรรีโมเตอร์ที่ความเร็ว 25 km/h

จากผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมในรูปที่ 6.9 ถึงรูปที่ 6.13 พบว่าเมื่อปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์จากชุดคันเร่งให้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจรรีเลย์มีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความเร็วของรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปด้วยตามการใช้งานของชุดคันเร่งซึ่งได้มีการอธิบายการทำงานของระบบขับเคลื่อนดังกล่าวแล้วในบทที่ 5 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมจากการออกแบบสามารถนำมาใช้งานได้จริง

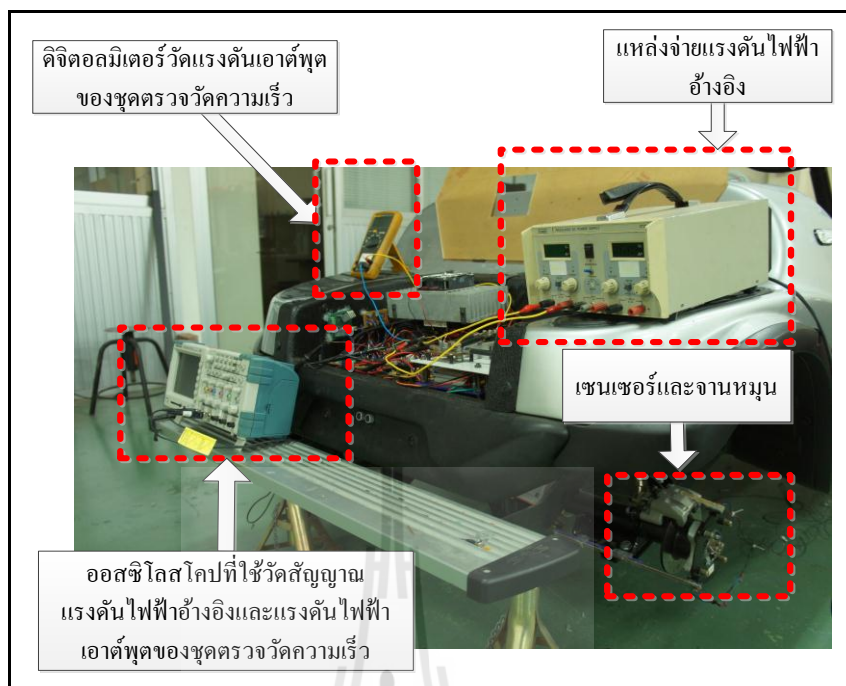
6.4 การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม

การทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม เป็นการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยใช้ชุดปรับตั้งความเร็วเป็นตัวปรับความเร็วของรถไฟฟ้า โดยเมื่อทำการปรับความเร็วจากชุดปรับตั้งความเร็วจะทำให้รถไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนตามความเร็วที่ได้มีการปรับตั้งไว้แบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้คันเร่งในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมจะมีโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 6.14

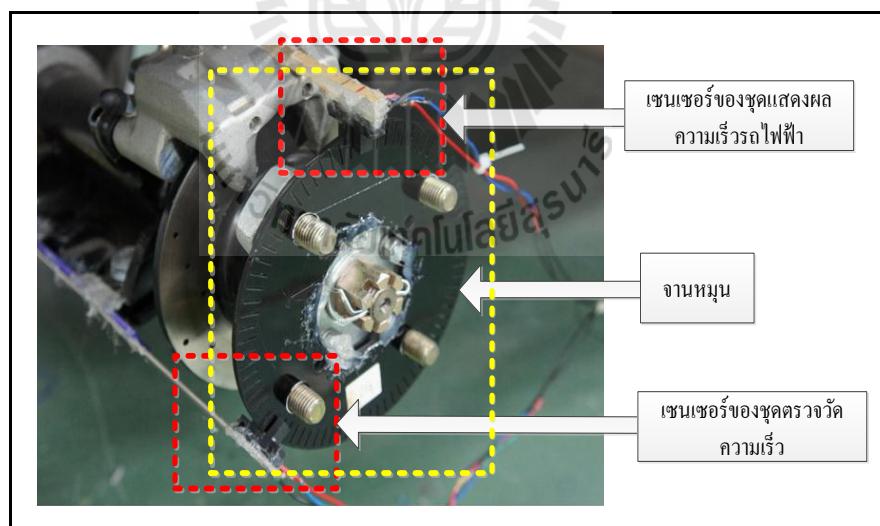


รูปที่ 6.14 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ

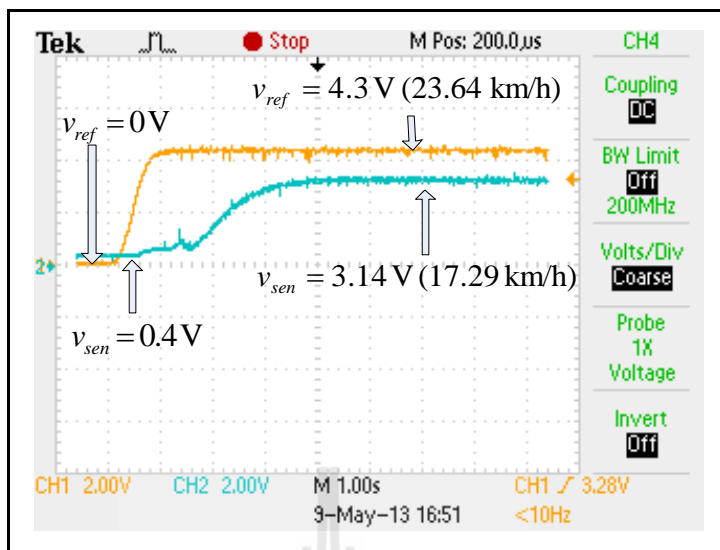
การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมตามรูปที่ 6.14 มีการอธิบายการทำงาน of ระบบขับเคลื่อนเมื่อมีตัวควบคุมไว้ในบทที่ 5 ดังนั้นในการทดสอบระบบดังกล่าวจะดำเนินการทดสอบโดยการยกล้อของรถไฟฟ้าให้ลอยขึ้นเหนือพื้นโดยใช้ขาตั้งดังรูปที่ 6.15 และการติดตั้งชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 6.16 ซึ่งการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมด้วยวิธีการยกล้อ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทำการทดสอบและง่ายต่อการบันทึกผลของรูปสัญญาณในช่วงการเปลี่ยนแปลงย่านการทำงาน และเพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อนเมื่อมีตัวควบคุมก่อนนำไปใช้งานจริงบนถนน และเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเนื่องมาจากการทดสอบดังกล่าว ดังนั้นในการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม ได้ทำการทดสอบดังรูปที่ 6.15 และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอได้กำหนดให้มีค่าตามที่ได้มีการออกแบบไว้ในบทที่ 4 ซึ่งมีค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีและไอเท่ากับ 3.10 และ 0.56 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการทดสอบโดยการปรับตั้งค่าความเร็วของรถไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งได้ทำการทดสอบปรับค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 0 V เป็น 4.3 V (23.64 km/h) และกรณีที่ 2 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 4.3 V เป็น 0 V และสามารถดูผลตอบสนองของการทำงานได้จากออสซิลอโคปที่ใช้ในการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงกับค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว โดยที่ช่องสัญญาณที่ 1 คือ แรงดันอ้างอิง (v_{ref}) และช่องสัญญาณที่ 2 คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็ว (v_{sen}) โดยมีผลการทดสอบของระบบขับเคลื่อนเมื่อมีตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบดังรูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.18 ดังนี้



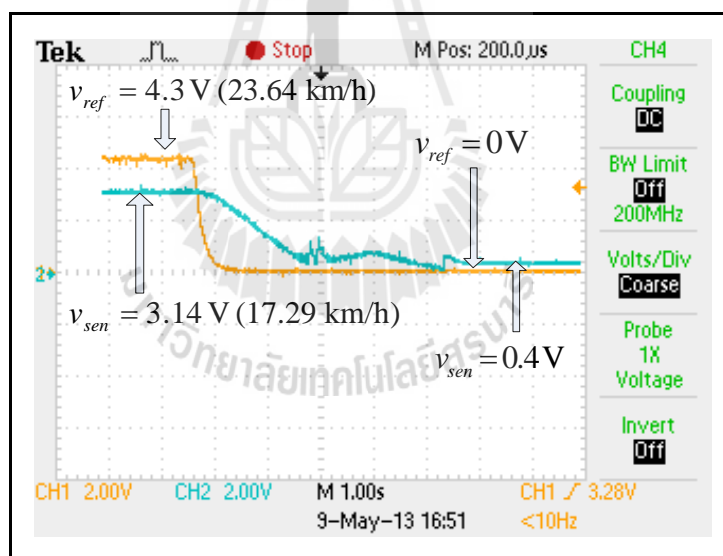
รูปที่ 6.15 เครื่องมือวัดในการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม



รูปที่ 6.16 การติดตั้งจานหมุนและเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ



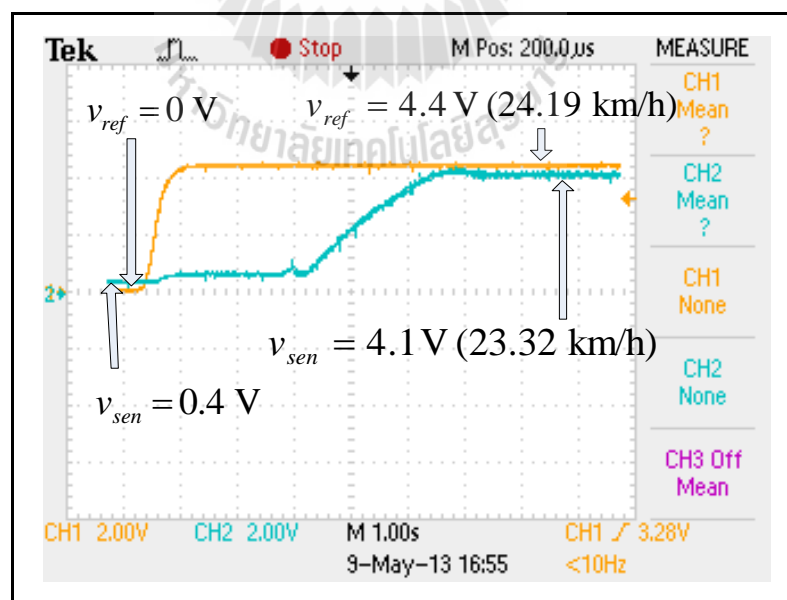
รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบกรณีที่ 1



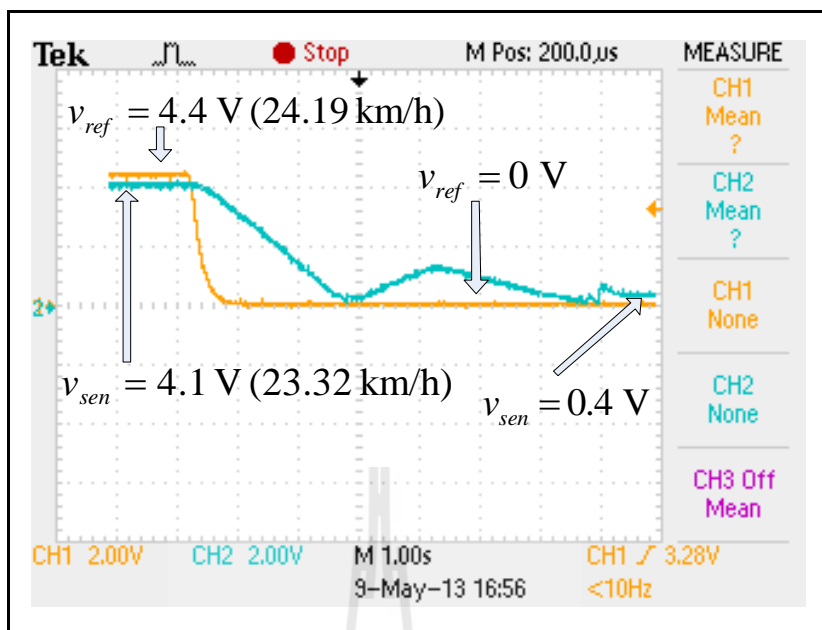
รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบกรณีที่ 2

จากผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมในรูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.18 ซึ่งเป็นผลการทดสอบของระบบขับเคลื่อนที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบที่มีการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 พบว่า มีค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วอยู่มาก อาจเนื่องมาจาก

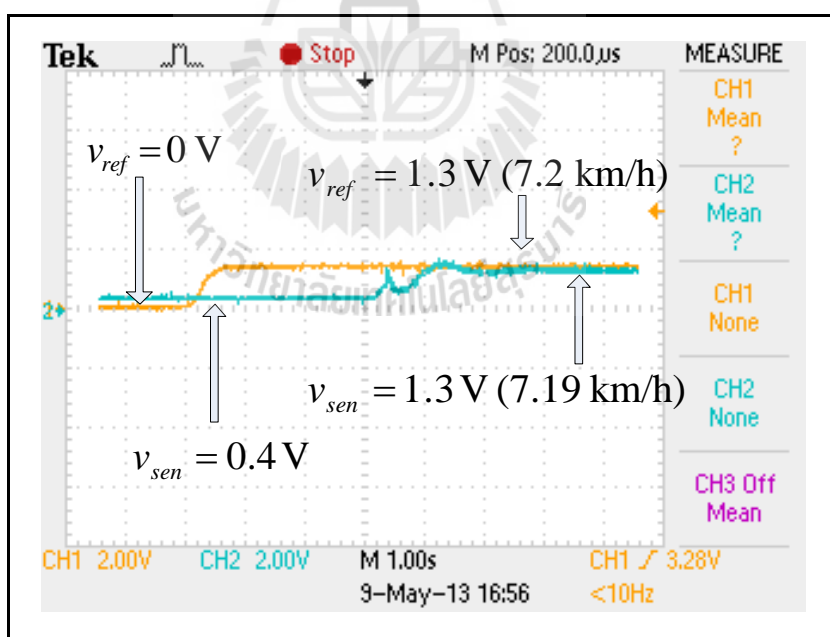
พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่นำมาใช้ในการออกแบบมีค่าไม่ตรงกับการใช้งานจริง ซึ่งได้มีการอธิบายไว้แล้วในการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในบทที่ 2 ดังนั้นผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้แก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยใช้วิธีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจากการทดสอบเพื่อให้การทำงานมีสมรรถนะในการควบคุมมากขึ้น โดยค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวระหว่างแรงดันอินพุตอ้างอิงกับค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วต้องมีค่าน้อยลงนั่นเอง ดังนั้น ผู้ดำเนินงานวิจัยจึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจากการทดสอบ พบว่าที่ค่าตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 20.36 และตัวควบคุมไอเท่ากับ 2.89 ให้ผลการตอบสนองของระบบที่ดีและมีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงกับค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งการทดสอบจะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงออกเป็น 6 กรณี โดยกรณีที่ 1 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 0 V เป็น 4.4 V (24.19 km/h) กรณีที่ 2 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 4.4 V เป็น 0 V กรณีที่ 3 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 0 V เป็น 1.3 V (7.2 km/h) กรณีที่ 4 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 1.3 V (7.2 km/h) เป็น 2.9 V (15.97 km/h) กรณีที่ 5 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 2.9 V (15.97 km/h) เป็น 5 V (27.48 km/h) และกรณีที่ 6 ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 5 V (27.48 km/h) เป็น 0 V ซึ่งมีผลของการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดังรูปที่ 6.19 ถึงรูปที่ 6.24 ดังนี้



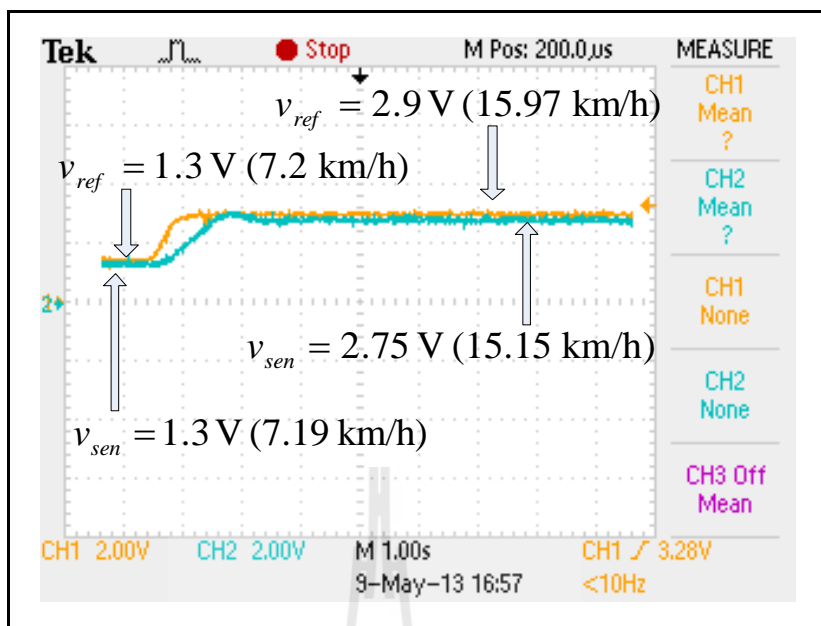
รูปที่ 6.19 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอกรณีที่ 1



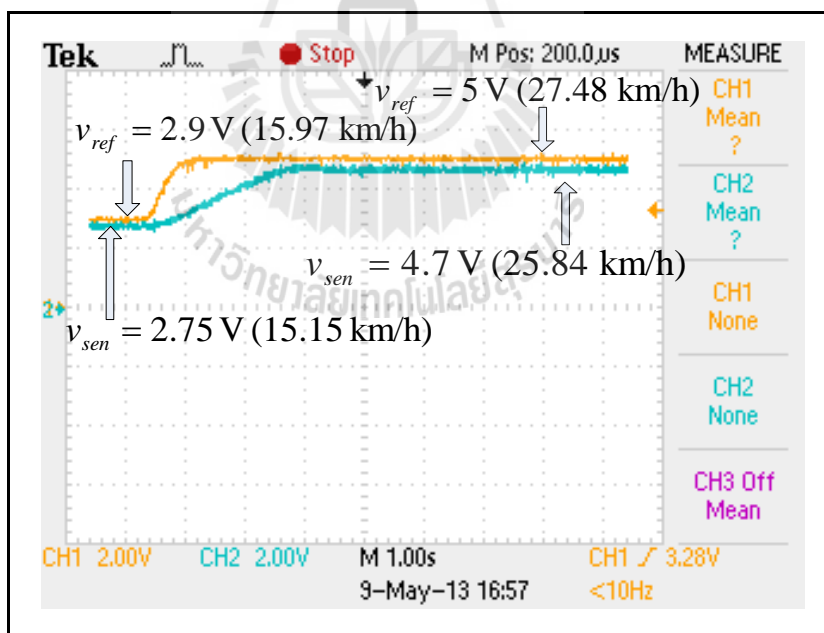
รูปที่ 6.20 ผลผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอกรณีที่ 2



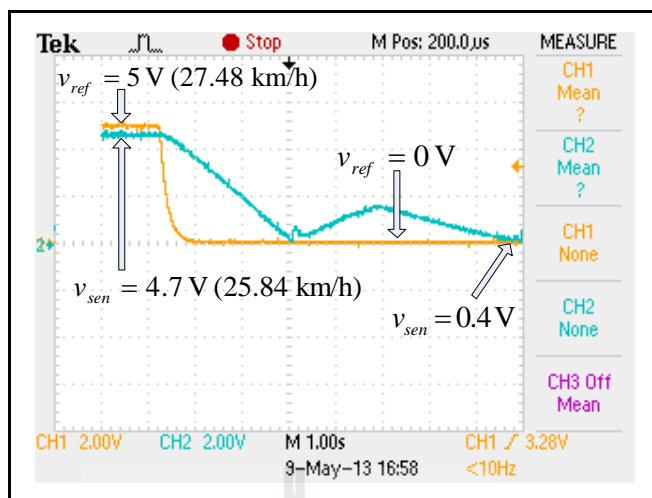
รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอกรณีที่ 3



รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอกรณีที่ 4

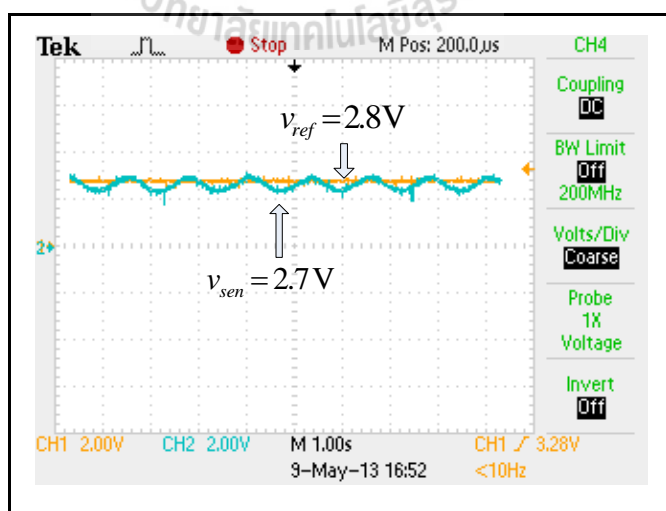


รูปที่ 6.23 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอกรณีที่ 5



รูปที่ 6.24 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าจากการปรับตัวควบคุมพีไอกรณีที่ 6

จากผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 6.19 ถึงรูปที่ 6.24 พบว่ามีผลตอบของของระบบดีขึ้น โดยค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงกับค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วมีค่าน้อยลงนั่นเอง และถ้าทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอเพื่อต้องการให้มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ จะทำให้การทำงานของตัวควบคุมพีไอเกิดการแกว่งของสัญญาณแรงดันทางค่านเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 ผลการทดสอบปรับค่าตัวควบคุมพีไอเพื่อให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์

จากผลการทดสอบในรูปที่ 6.25 ที่มีการปรับค่าตัวควบคุมพีเท่ากับ 24.5 และปรับค่าตัวควบคุมไอเท่ากับ 10 พบว่า สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วเกิดการแกว่งขึ้น ทำให้ความเร็วของรถไฟฟ้าที่การทำงานดังกล่าวเกิดการแกว่ง ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้น การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมในเบื้องต้น สามารถแสดงผลการทดสอบได้ตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบ				
ตัวควบคุมพี (k_p)	ตัวควบคุมไอ (k_I)	ความเร็วอ้างอิง (km/h)	ความเร็วจริง (km/h)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
3.10	0.56	23.64	17.29	26.86
ตัวควบคุมที่ได้จากการปรับจูน				
20.36	2.89	24.19	23.32	3.59
		7.2	7.19	0.14
		15.97	15.15	5.13
		27.48	25.84	5.96

จากตารางผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมในตารางที่ 6.3 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วอ้างอิงกับความเร็วจริงในกรณีที่มีการปรับจูนค่าตัวควบคุมพีไอมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการออกแบบตัวควบคุมพีไโอที่ได้มีการออกแบบไว้ในบทที่ 4 อยู่มาก ดังนั้น ผู้ดำเนินงานวิจัยจึงได้ใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไโอจากการปรับจูนที่มีค่าตัวควบคุมพีเท่ากับ 20.36 และตัวควบคุมไอเท่ากับ 2.89 มาใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งจะได้นำระบบขับเคลื่อนดังกล่าวไปทดสอบที่ถนนและบันทึกผลการทดสอบเป็นภาพเคลื่อนไหวเพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานในสถานการณ์จริงของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมต่อไป

6.5 สรุป

จากการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่มีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า ที่นำไปใช้ในการประมวลผลและแสดงผล ซึ่งวิธีการดังกล่าวที่ใช้ในการทดสอบเป็นการแก้ปัญหาเรื่องการคำนวณเนื่องจากข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณไม่เพียงพอ การทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุมพบว่าสามารถใช้คันเร่งในการปรับความเร็วรถไฟฟ้าได้ และการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม พบว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4 มีสมรรถนะต่ำ ดังนั้น ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจากการทดสอบเพื่อให้การทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุมมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วอ้างอิงกับความเร็วจริงมีค่าน้อยลงกว่ากรณีการออกแบบตัวควบคุมพีไอในบทที่ 4 อยู่มาก ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ ตามที่ได้นำเสนอในตารางที่ 6.3 และจากผลการทดสอบดังกล่าวให้ผลเป็นที่น่าพอใจและเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ ในกรณีที่มีและในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็ว จะใช้คันเร่งเป็นอุปกรณ์ในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้า แต่ในกรณีที่มีตัวควบคุม สามารถปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้าได้จากชุดปรับตั้งความเร็ว ซึ่งตัวควบคุมที่นำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า คือ ตัวควบคุมพีไอ เมื่อนำระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังกล่าวไปทดสอบ พบว่าสามารถใช้งานได้จริงตามวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ผู้ดำเนินงานวิทยานิพนธ์ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ได้จากการหาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB และ Simulink เพื่อเป็นการพิจารณาลักษณะการทำงานในเบื้องต้นของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า และยังได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ดำเนินการทำงานต่าง ๆ ด้วยทฤษฎีค่าเฉลี่ย และมีการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ พบว่า ระบบมีเสถียรภาพทุกช่วงการทำงานถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก็ก็ตาม ซึ่งการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จลุล่วงเป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหาในการสร้างชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า นอกจากนี้การวิเคราะห์การทำงานของชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เพื่อเป็นการยืนยันเสถียรภาพการทำงาน โดยพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า การออกแบบตัวควบคุมพีไอ และการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความจำเป็นที่ต้องทราบถึง สมการพื้นฐานของมอเตอร์ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และการหาบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบัก 2 วงจร ที่ต่อทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่จุดการทำงานต่าง ๆ รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในกรณีที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ พบว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพในทุกย่านการทำงาน

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่มีการออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองทางความถี่ อีกทั้งได้อธิบายถึงรายละเอียดการสร้างตัวควบคุมพีไอที่ใช้เทคโนโลยีแบบแอนะล็อกโดยใช้อปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก และทำการทดสอบตัวควบคุมพีไอเพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานก่อนนำไปใช้งาน พบว่าผลของการทดสอบตัวควบคุมพีไอเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ในข้างต้น

บทที่ 5 ได้นำเสนอโครงสร้างวงจร การทำงาน และการออกแบบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ วงจรแปลงผันแบบชอปเปอร์ โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีตัวควบคุม โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม และโครงสร้างของชุดตรวจวัดความเร็วของรถไฟฟ้า นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบวงจรที่ได้ออกแบบเพื่อตรวจสอบการทำงานก่อนนำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า โดยผลจากการทดสอบเป็นไปตามที่ได้มีการออกแบบไว้ตามการใช้งานในเบื้องต้น

บทที่ 6 นำเสนอผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ที่มีการทดสอบหาความสัมพันธ์ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดตรวจวัดความเร็วกับค่าความเร็วของรถไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลความเร็วของรถไฟฟ้า และเพื่อใช้ในการกำหนดความเร็วของรถไฟฟ้าในกรณีการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเมื่อมีตัวควบคุม และได้ทำการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่มีการใช้งานของระบบขับเคลื่อนเมื่อไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุม ซึ่งผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบพบว่า สามารถนำมาใช้งานได้จริงและสามารถควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้าได้ โดยความคลาดเคลื่อนในการควบคุมความเร็วอยู่ในย่านไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทุกประการ

7.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมที่นำมาใช้กับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยมีจุดประสงค์หลักในการลดค่าผิดพลาดในสถานะะอยู่ตัวให้น้อยลง โดยต้องคำนึงถึงการทำงานของรถไฟฟ้าต้องเป็นไปอย่างราบเรียบ ไม่มีการกระชากในขณะออกตัวและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการใช้งาน

- ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสร้างตัวควบคุมที่นำมาใช้กับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเป็นการสร้างตัวควบคุมด้วยเทคโนโลยีแบบดิจิทัล หรือการสร้างตัวควบคุมแบบดิจิทัลร่วมกับแบบแอนะล็อก เพื่อให้การทำงานและการปรับตั้งการทำงานต่าง ๆ มีสมรรถนะดีขึ้น

- ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสร้างวงจรถูกชนวนเกทของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีแบบดิจิทัล เพื่อลดการใช้อุปกรณ์และลดพื้นที่ในการจัดวางอุปกรณ์ดังกล่าวในรถไฟฟ้า

- ควรปรับปรุงวงจรถูกเลือกโหมดการทำงานให้สามารถเลือกโหมดได้ในขณะที่รถไฟฟ้าวิ่ง



รายการอ้างอิง

- ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. เอ็มเทค สวทช. (2550). จับมือเอกชนร่วมพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าต้นแบบเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหวังลดวิกฤตมลภาวะเพื่อรับมือปัญหาโลกร้อน. แหล่งที่มา <http://www2.mtec.or.th/newdetail.asp?newsid=208>.
- เอกชัย รัตนะสิทธิ์. (2554). เรียนรู้สร้างจักรยานไฟฟ้า. (ออนไลน์). แหล่งที่มา <http://www.ebikethaikit.com/page/เรียนรู้การสร้างจักรยานไฟฟ้า-980.html>. พฤษภาคม 2554
- Chapman, S. J. (1999). **ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS**. Boston : McGraw-Hill.
- Protogeropoulos, C., Marshall, R. H., and Brinkworth, B. J. (1994). Battery state of voltage Modeling and algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system. **Solar Energy**. 53(6) : 517-527.
- Rashid, M.H. (2004). **Power electronics circuit, devices, and application**. USA: Pearson
- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. on Circuit and Systems**. vol.44 767-770.
- Kuhn, B., Komperda S., and M. Leuschke. (2010). Micro Urban Electric Vehicle Phase II – Modeling. Bradley University.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)**. 19-24.
- Phillips, C.L. and Harbor., R.D. (2000). **Feedback Control Systems**. Prentice Hall. 351-387.
- Gopal, M. (1997). **Control Systems, Principles, and Design**. McGraw-Hill. 598-600.
- SURYA, (2011), Sawtooth Wave Generator.
Available : <http://gsuryalss.wordpress.com/2011/05/02/sawtooth-wave-generator/>.
- Floyd., T.L. and Buchla., D. (1999). **Basic Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits**. Prentice Hall.



การใช้งานรถไฟฟ้ามีการใช้งาน 2 แบบ ตามที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 5 ประกอบไปด้วย การใช้งานรถไฟฟ้าโดยใช้คันเร่ง และการใช้งานรถไฟฟ้าแบบมีตัวควบคุม ซึ่งมีวิธีการใช้งานในแต่ละแบบดังต่อไปนี้

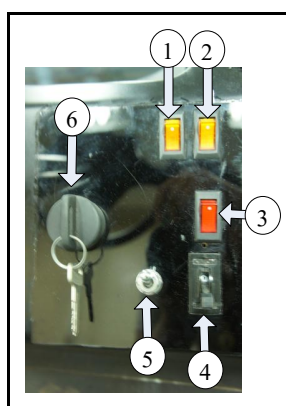
ขั้นตอนการใช้งานรถไฟฟ้าโดยใช้คันเร่ง

ขั้นตอนที่ 1 กดเลือกโหมดการทำงานให้มีการใช้งานรถไฟฟ้าด้วยคันเร่ง ซึ่งสามารถเลือกได้จากวงจรเลือกโหมดการทำงานดังรูปที่ ก.1 และกดสวิตซ์ให้อยู่ในลักษณะตามรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 สวิตซ์ที่ใช้เลือกโหมดใช้งานคันเร่ง

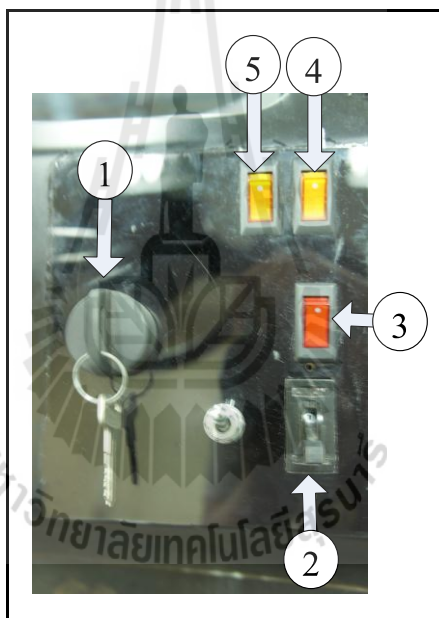
ขั้นตอนที่ 2 การใช้งานรถไฟฟ้าด้วยคันเร่งให้กดสวิตซ์แผงควบคุมตามลำดับหมายเลขที่ได้แสดงตามรูปที่ ก.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.2 ลำดับการกดสวิตซ์ในกรณีใช้งานรถไฟฟ้า

โดยสวิตซ์ลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 คือ สวิตซ์แหล่งจ่ายของวงจรจุดชนวนเกท สวิตซ์ลำดับที่ 3 คือ สวิตซ์เปิดการใช้งานชุดตรวจวัดและแสดงผลความเร็วรถไฟฟ้า สวิตซ์ลำดับที่ 4 คือ สวิตซ์ตัดต่อทางด้านวงจรสนาม สวิตซ์ลำดับที่ 5 คือ สวิตซ์ที่ใช้ในการเลือกการใช้งานรถไฟฟ้าแบบเดินหน้าหรือถอยหลัง สวิตซ์ลำดับที่ 6 คือ สวิตซ์ตัดต่อทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ และเมื่อดำเนินการกดสวิตซ์ใช้งานรถไฟฟ้าตามลำดับดังกล่าว ก็สามารถใช้งานชุดคันเร่งในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้าดังกล่าวได้

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดใช้งานรถไฟฟ้าสามารถดำเนินการได้โดยการกดสวิตซ์ตามลำดับหมายเลขดังรูปที่ ก.3 ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.3 ลำดับการกดสวิตซ์ในกรณีหยุดใช้งานรถไฟฟ้า

ขั้นตอนการใช้งานรถไฟฟ้าแบบมีตัวควบคุม

ขั้นตอนที่ 1 กดเลือกโหมดการทำงานให้มีการใช้งานแบบมีตัวควบคุม ซึ่งสามารถเลือกได้จากวงจรเลือกโหมดการทำงานดังรูปที่ ก.4 และกดสวิตซ์ให้อยู่ในลักษณะตามรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 สวิตช์ที่ใช้เลือกโหมดการใช้งานแบบมีตัวควบคุม

ขั้นตอนที่ 2 การใช้งานรถไฟฟ้าด้วยคันเร่งให้กดสวิตซ์แผงควบคุมตามลำดับหมายเลขที่ได้แสดงตามรูปที่ ก.5 ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.5 ลำดับการกดสวิตซ์ในกรณีใช้งานรถไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 3 การปรับความเร็วของรถไฟฟ้าในการใช้งานแบบมีตัวควบคุมสามารถปรับตั้งค่าความเร็วได้จากชุดปรับตั้งความเร็วดังรูปที่ ก.6 ดังนี้



รูปที่ ก.6 ปุ่มปรับตั้งความเร็วของรถไฟฟ้า

การหยุดใช้งานรถไฟฟ้าในกรณีที่มีการใช้งานแบบมีตัวควบคุม สามารถดำเนินการหยุดการทำงานของรถไฟฟ้าได้โดยใช้วิธีเช่นเดียวกันกับการใช้งานโดยคันเร่ง



ภาคผนวก ข

วิธีชาร์จแบตเตอรี่ของระบบรถไฟฟ้า

การชาร์จแบตเตอรี่ของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าประกอบด้วย การชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง และการชาร์จแบตเตอรี่ของวงจรจุดชนวนเกท ซึ่งมีวิธีการชาร์จแบตเตอรี่ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง

ขั้นตอนที่ 1 อุปกรณ์ในการชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูงมีลักษณะดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง

ขั้นตอนที่ 2 ตำแหน่งที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง แสดงได้ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 ตำแหน่งสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง

ขั้นตอนที่ 3 ลักษณะในการชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านกระแสสูงแสดงได้ดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 ลักษณะการชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านพิกัดกระแสสูง

ในการชาร์จแบตเตอรี่ของรถไฟฟ้าทางด้านกระแสสูง จะดำเนินการชาร์จแบตเตอรี่เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ขั้นตอนการชาร์จแบตเตอรี่ของวงจรจุดชนวนเกท

ขั้นตอนที่ 1 แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรจุดชนวนเกทมีลักษณะดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายของวงจรจุดชนวนเกท

ขั้นตอนที่ 2 อุปกรณ์ในการชาร์จแบตเตอรี่ของวงจรจุดชนวนเกณฑ์มีลักษณะดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ทางด้านฟักัดกระแสสูง

ขั้นตอนที่ 3 ลักษณะในการชาร์จแบตเตอรี่ของวงจรจุดชนวนเกณฑ์แสดงได้ดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 ลักษณะการชาร์จแบตเตอรี่ของวงจรจุดชนวนเกณฑ์

ในการชาร์จแบตเตอรี่ของวงจรจุดชนวนเกณฑ์ ใช้เวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ดังกล่าวเป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Ngamkong, P., Kochcha, P., Areerak, K-N., Sujitjorn, S., and Areerak, K-L. (2012).

Application of the Generalized State-Space Averaging Method to Modelling of DC-DC Power Converters. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 18(3) : 243-260. (สงวนลิขสิทธิ์) (JIF2011 : 0.406)



ประวัติผู้เขียน

นายภูริชฎ์ งามคง เกิดวันที่ 9 มกราคม 2529 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ จบการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนชุมชนบ้านนาโพธิ์ จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุดมอักษรพิทยาคม จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ระหว่างการศึกษาปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 2 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 โดยมีความสนใจทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เครื่องจักรกลไฟฟ้า การควบคุมอัตโนมัติ และปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ทำให้มีผลงานตีพิมพ์ปรากฏถึงภาคผนวก ก. จำนวน 1 ฉบับ

