



รายงานการวิจัย

ผลของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อ

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี

The Effects of DC Motor Speed Controls on Stability of

AC-DC Power Systems



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ผลของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อ

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี

The Effects of DC Motor Speed Controls on Stability of

AC-DC Power Systems

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2558

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและโดยส่วนมากจะต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่มีการควบคุม เพื่อให้สามารถใช้งานมอเตอร์ในระดับความเร็วรอบตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมนั้นมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าแบบคงตัว จากพฤติกรรมของโหลดชนิดดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดมีกำลังไฟฟ้าค่าหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาปัญหาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่ได้รับการพิสูจน์จากวิธีคิดวิเคราะห์ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งเหมาะสมที่จะใช้ทฤษฎีค่าเจาะจงในการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในงานวิจัย ในลำดับสุดท้ายจะพิจารณาผลกระทบจากแบนด์วิธของลูปลความเร็วที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมต่อไป การยืนยันผลการศึกษเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง ผลการศึกษาพบว่าค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงรวมถึงแบนด์วิธความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ

Abstract

Presently, DC motors are widely used in industry for drive systems. These machines are normally operated with power converters with controllers to regulate the speed. Unfortunately, the DC motor speed control behaves as a constant power load in which this load can affect to the system stability. Therefore, this research will study the stability analysis of AC-DC power system feeding a speed controlled DC motor circuit. The mathematical model for stability study is derived by using the co-operation between the DQ and generalized state-space averaging methods. The time-invariant model can be achieved in which it is suitable for stability analysis with the eigenvalue's theorem. Finally, the effect of speed loop bandwidth for the system stability is explained. The simulation and experimental results are used to support the instability point predicted from the proposed technique. The results show that the inductor and capacitor of DC-link filter including the bandwidth of the speed loop control can significantly affect to the system stability.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย ผลของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายจักรกริช ภัคดีโต ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ที่มีความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณพนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

กองพัน อารีรักษ์

มิถุนายน 2558



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และ หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	3
1.5 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง.....	5
2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่มีการควบคุม	8
2.1 บทนำ	8
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงที่ยังไม่มีการควบคุม	8
2.2.1 วิธีการแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)	9
2.2.2 การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ เป็น dq	11
2.2.3 วิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform).....	12
2.2.4 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับพิสูจน์แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็น วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	14
2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า.....	31
2.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจร ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	37
2.4.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอ.....	39
2.4.2	การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	43
2.4.3	การหาค่าในสภาวะอยู่ตัว.....	45
2.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า เอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	48
2.6	สรุป.....	61
3	การสร้างชุดทดสอบ.....	63
3.1	บทนำ.....	63
3.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	64
3.2.1	ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ.....	64
3.2.2	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นตัวต้านทาน.....	65
3.3	วงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	66
3.3.1	ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ.....	66
3.3.2	การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	67
3.3.3	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	71
3.3.4	วงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์.....	76
3.3.5	ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	79
3.4	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ที่มีการควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก... ..	82
3.4.1	ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ.....	82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2	การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR	83
3.4.3	การอ่านค่าความเร็วรอบจากทาคอไมเตอร์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้พอร์ต ADC	84
3.4.4	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจร แปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	86
3.5	สรุป	88
4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุม ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	89
4.1	บทนำ	89
4.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	90
4.2.1	การออกแบบตัวควบคุม	91
4.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง	93
4.4	ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองไฟฟ้า กระแสตรง	98
4.5	ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเก็บประจุของวงจรรองไฟฟ้า กระแสตรง	101
4.6	ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากแบนด์วิธความถี่ที่ใช้ ในการออกแบบตัวควบคุม	104
4.7	สรุป	110
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	111
5.1	สรุป	111
5.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	113
	รายการอ้างอิง	115

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.	บล็อกจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก(กรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม).....	119
ภาคผนวก ข.	บล็อกจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก(กรณีมีตัวควบคุม).....	121
ภาคผนวก ค.	โปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัว ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	123
ภาคผนวก ง.	โปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งใช้งานร่วมกับแป้นพิมพ์ (Keypad) เพื่อป้อนค่าวัฏจักรหน้าที่	131
ภาคผนวก จ.	บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	135
ภาคผนวก ฉ.	บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก	137
ภาคผนวก ช.	ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	139
ประวัติผู้เขียน		144

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การหาแบบจำลอง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว.....	5
2.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดขึ้น	31
2.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์	41
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i	43
2.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ.....	48
3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	80
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์	91
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i	93
4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ ...	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง9
2.2	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta 0$ 10
2.3	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq 11
2.4	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $dq0$ 12
2.5	ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง 15
2.6	วงจรมวลตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำบนแกนดีคิว 15
2.7	ตัวเก็บประจุในวงจรมวลสายส่ง 16
2.8	วงจรมวลของตัวเก็บประจุบนแกนหมุนดีคิว 16
2.9	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น 17
2.10	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส 18
2.11	วงจรมวลบนแกนดีคิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟส 20
2.12	แผนภาพแสดง r_{μ} บนแกนดีคิว 21
2.13	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงดีคิว 22
2.14	วงจรมวลของระบบไฟฟ้าบนแกนดีคิว 22
2.15	วงจรมวลบนแกนดีคิวอย่างง่าย 23
2.16	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค 24
2.17	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 25
2.18	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%) 33
2.19	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%) 34
2.20	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%) 35
2.21	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%) 36
2.22	ระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 37
2.23	ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิด40
2.25	ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.142
2.26	ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.142
2.27	สายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟส45
2.28	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 10 rad/s50
2.29	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s51
2.30	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 14 rad/s51
2.31	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s53
2.32	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s54
2.33	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 20 rad/s55
2.34	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 10 rad/s56
2.35	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s57
2.36	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 14 rad/s58
2.37	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s59
2.38	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s60
3.1	วงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน64
3.2	ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน65
3.3	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน66
3.4	วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน67
3.5	สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์68
3.6	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์69
3.7	ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์70
3.8	ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์70
3.9	บอร์ด ET-EASY Atmega128071
3.10	สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 20%75

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 50%.....	75
3.12 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 80%.....	76
3.13 วงจรร่วมระหว่างวงจรจุดชนวนเกทกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	77
3.14 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 20%	78
3.15 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50%	78
3.16 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 80%	79
3.17 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	80
3.18 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30% เป็น 50%.....	81
3.19 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 70% เป็น 50%.....	81
3.20 ทาโคมิเตอร์สำหรับชุดทดสอบ.....	85
3.21 ชุดการทดสอบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	86
3.22 ผลการทดสอบที่ 500 rpm.....	87
3.23 ผลการทดสอบที่ 1000 rpm.....	87
4.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์	90
4.2 ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1	92
4.3 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1.....	92
4.4 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$	95
4.5 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$	96
4.6 ผลการจำลองสถานะที่ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$	97
4.7 ผลการจำลองสถานะที่ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$	97
4.8 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ L_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง.....	98
4.9 ผลการจำลองสถานะการณืเมื่อ $L_{dc} = 25 \text{ mH}$	99
4.10 ผลการจำลองสถานะการณืเมื่อ $L_{dc} = 35 \text{ mH}$	100
4.11 ผลการจำลองสถานะการณืเมื่อ $L_{dc} = 45 \text{ mH}$	100
4.12 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ C_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง	101
4.13 ผลการจำลองสถานะการณืเมื่อ $C_{dc} = 500 \text{ }\mu\text{F}$	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1000 \mu\text{F}$	103
4.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1500 \mu\text{F}$	103
4.16 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ ω_n มีการเปลี่ยนแปลง.....	104
4.17 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 18\text{rad/s}$	105
4.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 20\text{rad/s}$	106
4.19 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 22\text{rad/s}$	106
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกล	107
4.21 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 18\text{rad/s}$	108
4.22 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 20\text{rad/s}$	108
4.23 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 22\text{rad/s}$	108
4.24 จุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง	109
ก.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก (กรณีไม่มีตัวควบคุม)	120
ข.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก (กรณีมีตัวควบคุม)	122
จ.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของวงจรเรียงกระแส แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	136
ฉ.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก.....	138

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบัน โหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronic loads) เช่น วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี ที่ต่อกับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้า หรือโหลดความต้านทาน ที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือ มีการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน ได้รับความนิยมนำใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น การใช้งานในระบบเครื่องบิน เรือดำน้ำ รถไฟฟ้า หรือระบบการควบคุมในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังกล่าว ให้ประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตาม โหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่ ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น ค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ (negative impedance) ต่อระบบ โดยรวม และอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบได้ (K-N Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, 2008) ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบโหลดกำลังไฟฟ้าคงที่ เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ งานวิจัยในปัจจุบันมีการวิเคราะห์และคาดเดาจุดขาดเสถียรเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงที่กันอย่างมากมาย (K-N. Areerak, S.V. Bozhko, L. de Lillo, G.M. Asher, D.W.P. Thomas, A. Watson, and T. Wu, 2009) เพื่อช่วยให้ความมั่นใจต่อวิศวกรและผู้ควบคุมระบบ ว่าการทำงานของเครื่องจักรที่มีการควบคุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า จะมีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวม แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันมักนิยมนำสมมติให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงที่เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงที่แบบอุดมคติ (ideal constant power load) ซึ่งจะไม่นำพลวัตของโหลดดังกล่าวมาทำการพิจารณาในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ที่สามารถคาดเดาได้ว่า ระบบจะขาดเสถียรภาพในกรณีใดได้บ้าง โดยจะทำการพิจารณาพลวัตของโพลไฟฟ้ากำลังคง ตัว ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาโพลไฟฟ้ากำลังคงตัวสองลักษณะด้วยกัน คือ โพลกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานทางฝั่งเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ กับ โพลกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ โครงการวิจัยนี้จะนำเสนอผลของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวม ซึ่งเป็นระบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบจะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างไร เช่น การเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการออกแบบลูปควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรถอง เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพนี้จะใช้ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรมที่น่าเชื่อถือ ประกอบกับผลการทดสอบกับระบบจริง เพื่อใช้ในการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้ ว่าสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาแบบจำลองของระบบที่มีโพลเป็นโพลกำลังไฟฟ้าคงตัว (โพลอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.3 เพื่อสร้างชุดทดสอบ สำหรับการยืนยันผลการขาดเสถียรภาพของระบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้
- 1.2.4 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการหาแบบจำลองของระบบ สำหรับใช้วิเคราะห์กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต เช่น ระบบเครื่องบิน ระบบเรือดำน้ำ หรือระบบรถไฟฟ้า เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์กับระบบที่เป็นเชิงเส้น
- 1.3.2 ระบบที่ทำการวิเคราะห์ จะผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) โดยสมมติว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการพิจารณามีจุดการทำงานที่คงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานแบบทันทีทันใด
- 1.3.3 วงจรแปลงผันกำลังในระบบ จะพิจารณาการทำงานในย่านโหมดการนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น (continuous conduction mode)
- 1.3.4 การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพของระบบ จะใช้การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimPowerSystem (SPS™) ใน SIMULINK และการสร้างชุดทดสอบจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ด้านการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันเอชบีเป็นดีซี วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประกอบไปด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
- 1.4.3 ได้ต้นแบบชุดทดสอบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันที่มีการควบคุม
- 1.4.4 ได้ทราบถึงผลของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีค่าแบนด์วิดท์ของลูปควบคุมความเร็วที่ค่าต่าง ๆ
- 1.4.5 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ
- 1.4.6 ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งระดับปริญญาตรีและปริญญาโท เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต

1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

บทที่ 1 นำเสนอภาพรวมของงานวิจัย สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นคิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า วัตถุประสงค์ที่ทำการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้นพร้อมทั้งกำหนดขอบเขตของงานวิจัย รวมทั้งประโยชน์ที่ผู้วิจัยคาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 นำเสนอการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นคิซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (กรณียังไม่มีตัวควบคุม) โดยใช้วิธีดีคิวิร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ลำดับถัดมาเป็นการพิจารณาตัวควบคุมเพื่อพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นคิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (กรณีมีตัวควบคุม) ซึ่งจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากกรณียังไม่มีตัวควบคุมมาเป็นพื้นฐานในการพิสูจน์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เป็นเชิงเส้น และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น

บทที่ 3 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบจริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งอธิบายถึงอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการต่อวงจรพร้อมการสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM) จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเป็นสัญญาณจุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นคิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นจากบทที่ 2 พร้อมทั้งยืนยันแนวโน้มการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้น

บทที่ 5 เป็นบทสรุปสำหรับงานวิจัยนี้ โดยได้นำเสนอผลลัพธ์ของงานวิจัย พร้อมทั้งปัญหาและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยขึ้นนี้

ภาคผนวกมีอยู่ 6 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (กรณีไม่มีตัวควบคุม) ภาคผนวก ข. บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (กรณีมีตัวควบคุม) ภาคผนวก ค. โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัว ภาคผนวก ง. โปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

ภาคผนวก จ บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ภาคผนวก ฉ บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ภาคผนวก ช. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้าเกี่ยวกับองค์ความรู้ที่จำเป็นจากงานวิจัยในอดีต ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การหาแบบจำลอง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ปีที่พิมพ์ (ลำดับ เอกสารอ้างอิง)	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
1976	R.D. Middlebrook	บทความนี้แนะนำเสนอถึงผลของโหลดที่มีลักษณะแบบ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกับระบบไฟฟ้าโดยรวม โหลดลักษณะดังกล่าวมีผลต่อเสถียรภาพของระบบ และ โหลดลักษณะนี้มักเรียกว่า โหลดอิมพีแดนซ์ติดลบ ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดลักษณะนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอย่างละเอียดเพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพ
1997	J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani	บทความนี้แนะนำเสนอถึงวิธีการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC distribution system) ด้วยวิธีที่เรียกว่า generalized state-space averaging (GSSA) สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

ตารางที่ 1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การหาแบบจำลอง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (ต่อ)

2004	A. Emadi	บทความนี้นำเสนอวิธี GSSA สำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (AC distribution system) สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ
2004	A. Baghrmian, and A.J. Forsyth	บทความนี้นำเสนอวิธีการ average value modeling (AVM) สำหรับวงจรเรียงกระแสในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ วิธีการ AVM สามารถนำไปหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันในระบบอื่น ๆ ได้เช่นกัน
1990	C.T. Rim, D.Y. Hu, and G.H. Cho	บทความนี้นำเสนอวิธีคิคว สำหรับหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันทั่ว ๆ ไป แต่ยังไม่มีการนำวิธีการนี้มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ
2008	K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas	บทความนี้ได้นำเสนอวิธีคิคว ในการหาแบบจำลองของระบบ สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ ในกรณีที่โหลดของระบบเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว นอกจากนี้ในบทความนี้ได้กล่าวถึงข้อดีของวิธีการนี้เทียบกับวิธีการอื่น ๆ ซึ่งสรุปได้ว่า วิธีคิคว เป็นวิธีการที่เหมาะสมมากกับการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

จากการสืบค้นงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นคิควที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาต่อเข้ากับระบบ เมื่อโหลดมีกำลังไฟฟ้าค่าหนึ่งจะทำให้ระบบเกิดการขาด

เสถียรภาพซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการนำระบบดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งาน ณ จุดการทำงานที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยนี้จะดำเนินการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ สำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าว



บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

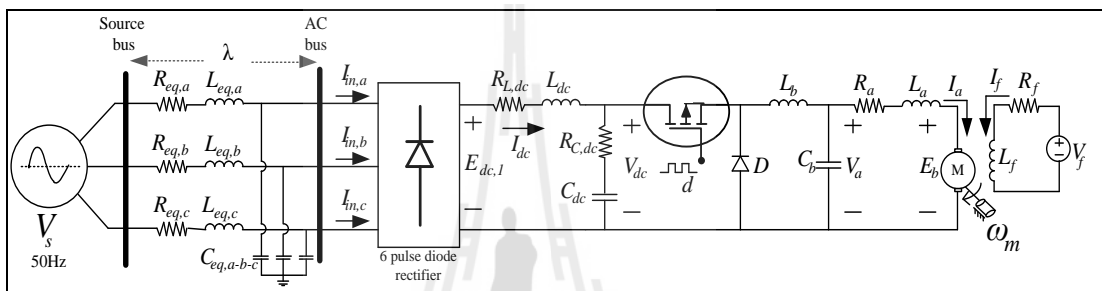
2.1 บทนำ

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก คือ พฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบไฟฟ้าซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการนำไปต่อยอดเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซี ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานการแปลงแกนดีควด้วยวิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform) ซึ่งวิธีการแปลงแกนดีควนี้มีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ลดความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมมูลได้เป็นอย่างดี ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging Approach, GSSA) ที่มีความเหมาะสมกับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรแปลงผันกำลังแบบบัทค์ นอกจากนี้ยังนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป เนื้อหาในบทที่ 2 นี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการอธิบายความเป็นมาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่จะนำเสนอในบทที่ 4

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่มีการควบคุม

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ระบบไฟฟ้างกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดีควร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการแปลงดีควสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมมูลที่มีวงจรสมมูลสายส่งผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ย

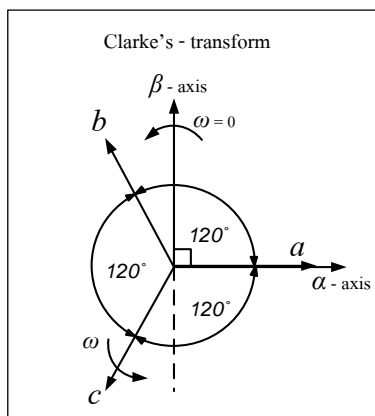
ปฏิภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2.1 จะต้องพิจารณา ออกเป็นใน 2 ส่วน คือ แหล่งจ่ายและโหลด โดยแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าประกอบด้วยแหล่งจ่าย แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุลผ่านวงจรสมมูลสายส่งซึ่งต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส แบบเต็มคลื่น ในส่วนนี้จะใช้วิธีคิดในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับวิธีค่าเฉลี่ย ปฏิภูมิสถานะทั่วไปจะใช้กับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของโหลด ซึ่ง ประกอบด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก



รูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.2.1 การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)

การแปลงของคลาร์กเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) ให้เป็น ปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ โดยวิธีการแปลงของคลาร์กแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 2.2 ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสที่มีส่วนประกอบลำดับเฟสบวก (positive sequence) ซึ่งแต่ละเฟสทำมุมห่างกัน 120° หรือ $2\pi/3$ เรเดียน และแกน $\alpha\beta$ จะต้องทำ มุมตั้งฉากกัน โดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกับเฟส a สมการการแปลงปริมาณทาง ไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ พิจารณาได้ดังสมการที่ (2-1) เมื่อ f_{abc} คือ ปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสใดๆ ซึ่งอาจแทนด้วยแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta 0$

$$[\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}] = [\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}] [\mathbf{f}_{abc}] \quad (2-1)$$

เมื่อ

$$[\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}] = \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{f}_{abc}] = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

โดยกำหนดให้ $K = \frac{2}{3}$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการแปลงค่ายอด (peak convention)

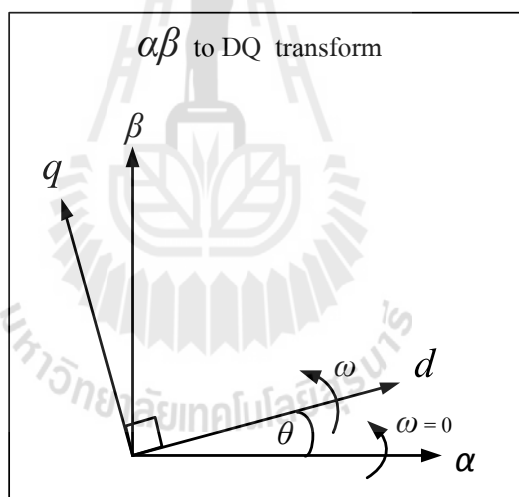
สำหรับสมการอินเวอร์สการแปลงของคลาร์กที่ใช้ในการแปลงปริมาณบนแกน $\alpha\beta 0$ มายังแกน abc แสดงได้ดังสมการที่ (2-2)

$$[\mathbf{f}_{abc}] = [\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}]^{-1} [\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}] \quad (2-2)$$

$$\text{เมื่อ } [T_{\alpha\beta 0}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.2 การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq

การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ (แกนหยุดนิ่ง) ไปอยู่บนแกน dq (แกนหมุน) จะพิจารณาโดยใช้แผนภาพเวกเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของสมการระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน dq เป็นดังสมการที่ (2-3) เมื่อ θ คือ มุมการหมุนสำหรับการแปลงคิวิซึ่งมีค่าเท่ากับ ωt



รูปที่ 2.3 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq

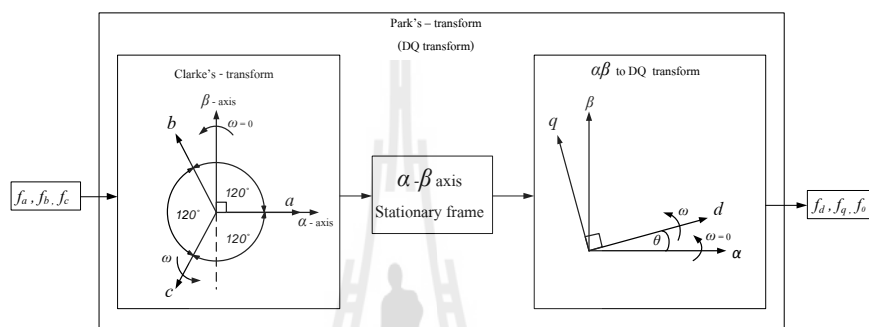
$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

สำหรับสมการอินเวอร์สการแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq แสดงได้ดังสมการที่ (2-4)

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

2.2.3 วิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform)

วิธีการแปลงของปาร์คเป็นวิธีการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $dq0$ โดยการแปลงของปาร์คแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 2.4 จากรูปอธิบายได้ว่า แกน d จะตั้งฉากกับแกน q เป็นมุม 90° หรือ $\pi/2$ เรเดียน สมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $dq0$ พิจารณาได้จากสมการที่ (2-5) และอินเวอร์สการแปลงของปาร์คแสดงดังสมการที่ (2-6)



รูปที่ 2.4 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $dq0$

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}] [f_{abc}] \quad (2-5)$$

เมื่อ

$$[T_{dq0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[f_{dq0}] = \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}, [f_{abc}] = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

โดยกำหนดให้ $K = \frac{2}{3}$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการแปลงแบบค่ายอด

$$[f_{abc}] = [T_{dq0}]^{-1} [f_{dq0}] \quad (2-6)$$

$$\text{เมื่อ } [\mathbf{T}_{dq0}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ f_{abc} คือ ปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสใดๆ ซึ่งอาจแทนด้วย แรงดันไฟฟ้าหรือ กระแสไฟฟ้า เป็นต้นและ θ คือ มุมหมุนของการแปลงดีควิซซึ่งมีค่าเท่ากับ ωt

2.2.4 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหามาจากอุปกรณ์ สวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าคิซึเป็นคิซึ จากรูปที่ 2.1 พบว่ามีอุปกรณ์สวิตช์ปรากฏอยู่ในวงจร แปลงผันแบบบักค์ ซึ่งผลของอุปกรณ์สวิตช์จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ ขึ้นอยู่กับเวลา แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลานั้นจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนที่จะนำไปใช้ในการ วิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 4 เพื่อลดความซับซ้อนจึงได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อ กำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักค์ และสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก (J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani)

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรเวลาของ อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะ โดยหลักการพื้นฐานของ อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ $f(t)$ ใดๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถ เขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (2-7)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (2-7)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$$

$\langle x \rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier coefficients)

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะอาศัย $\langle x \rangle_k(t)$ เป็นตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (2-8)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (2-8)$$

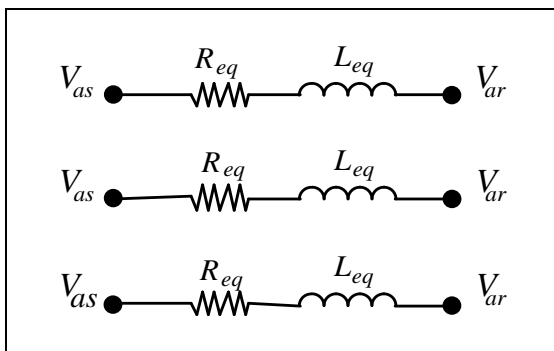
ในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาผลของฮาร์มอนิกในอันดับมากกว่าศูนย์เนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงใช้การประมาณอันดับศูนย์ (zero-order approximation) เพื่อหาเพียงสัมประสิทธิ์ที่ความถี่มูลฐาน โดยการกำหนดค่า k ของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนให้มีค่าเท่ากับศูนย์

2.2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจร

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นต้องอาศัยวงจรสมมูลบนแกนดีคิวซึ่งอยู่ภายใต้ทฤษฎีการแปลงดีคิวด้วยวิธีการแปลงของปาร์ควมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแหล่งจ่ายและโหลด สำหรับทางด้านแหล่งจ่ายจะใช้วิธีดีคิว และทางด้านโหลดจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

พิจารณาทางด้านแหล่งจ่ายจากรูปที่ 2.1 เมื่อแปลงดีคิวด้วยการแปลงของปาร์คว สำหรับอุปกรณ์ของวงจรแหล่งจ่ายได้แก่ วงจรสมมูลสายส่งที่มีตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ รวมถึงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น ในขั้นแรกพิจารณาวงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ (2-9) และสามารถแปลงให้สมการบนแกนดีคิวได้ดังสมการที่ (2-10) (K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010)

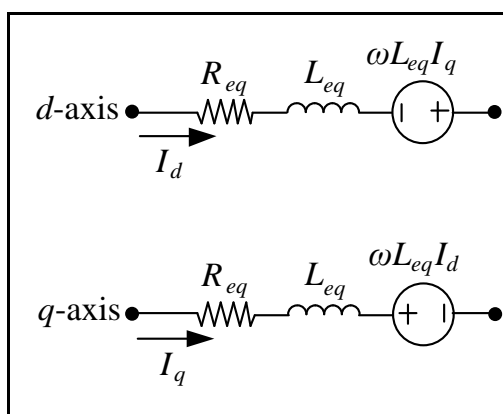


รูปที่ 2.5 ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง

$$\Delta V_{\text{drorabc}} = R_{eq} \mathbf{I}_{\text{abc}} + L_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{\text{abc}} \tag{2-9}$$

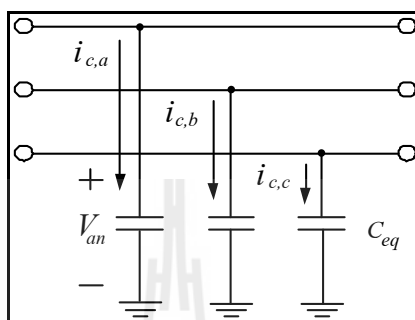
$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \\ \Delta V_0 \end{bmatrix} = R_{eq} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + L_{eq} \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + L_{eq} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} \tag{2-10}$$

จากสมการที่ (2-10) เป็นสมการที่ใช้ในการหาแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่อยู่บนแกนดีคิว ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปวงจรมูลโดยใช้การวิเคราะห์พื้นฐานทางไฟฟ้า และจากวงจรมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการแปลงตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรมูลตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำบนแกนดีคิว

ในการทำงานเดียวกันสามารถพิจารณาในส่วนของตัวเก็บประจุจากวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังกล่าวได้ดังสมการที่ (2-11) และสามารถดำเนินการแปลงเป็นสมการบนแกนดีคิวได้ดังสมการที่ (2-12) (K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010)

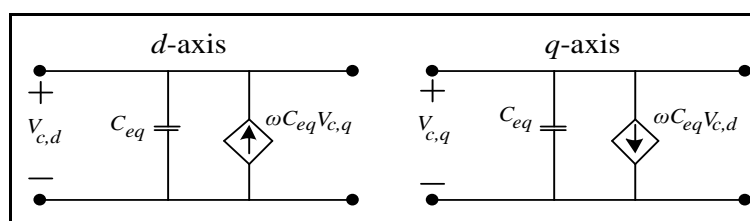


รูปที่ 2.7 ตัวเก็บประจุในวงจรสมมูลสายส่ง

$$\mathbf{I}_{c,abc} = C_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{V}_{abc} \quad (2-11)$$

$$\begin{bmatrix} I_{c,d} \\ I_{c,q} \\ I_{c,0} \end{bmatrix} = C_{eq} \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{c,d} \\ V_{c,q} \\ V_{c,0} \end{bmatrix} + C_{eq} \begin{bmatrix} \dot{V}_{c,d} \\ \dot{V}_{c,q} \\ \dot{V}_{c,0} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

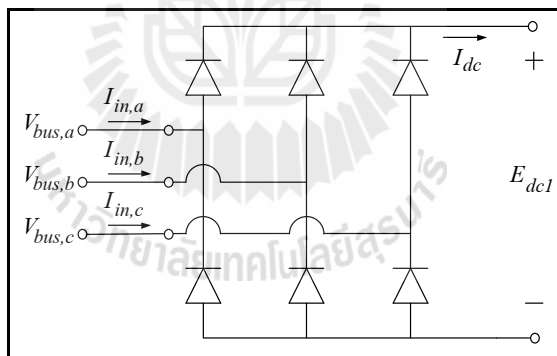
จากสมการที่ (2-12) เป็นสมการที่ใช้ในการหากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่อยู่บนแกนดีคิว ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลบนแกนดีคิวโดยใช้การวิเคราะห์พื้นฐานทางไฟฟ้า และจากวงจรสมมูลดังกล่าวสามารถใช้ในการแปลงตัวเก็บประจุของวงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุบนแกนหมุนดีคิว

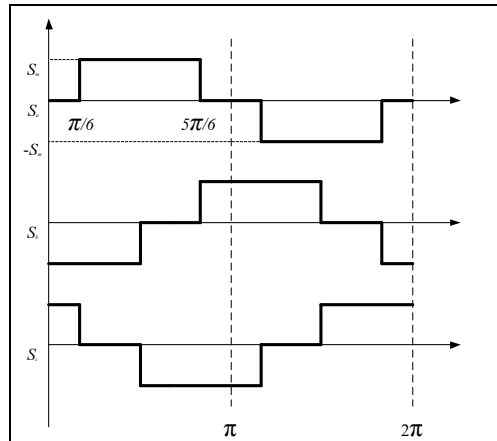
จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการพิสูจน์วงจรสมมูลบนแกนดีคิวของอุปกรณ์ในวงจรสมมูลสายส่งได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ และในลำดับถัดไปเป็นการพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นซึ่งประกอบด้วยไดโอด 6 ตัว ซึ่งสามารถแสดงส่วนประกอบวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นได้ดังรูปที่ 2.9 ในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นจะมีไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) แบบจำลองดังกล่าวไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในอนาคต ดังนั้นเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ผู้วิจัยจึงอาศัยหลักการในการแปลงดีคิวเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแส โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดและกำหนดให้การทำงานของวงจรเรียงกระแสมีสมมติฐานดังนี้

1. วงจรเรียงกระแสสามเฟสดังกล่าวทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
2. วงจรเรียงกระแสมีแหล่งจ่ายเป็นแบบสามเฟสสมดุล
3. ไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น
4. มุมเลื่อมที่เกิดจาก L_{eq} ต้องมีค่าน้อยกว่า 60 องศา



รูปที่ 2.9 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น

หากวงจรเรียงกระแสที่พิจารณามีลักษณะตรงตามสมมติฐานดังกล่าวจะสามารถใช้วิธีดีคิวในการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด โดยสามารถแสดงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งในที่นี้ยังไม่พิจารณาผลกระทบของมุมเลื่อมอันเนื่องมาจากผลของ L_{eq} ในวงจรสมมูลสายส่ง (Kongpan Areerak (M. Eng), Modelling and Stability Analysis of Aircraft Power Systems, 2009)



รูปที่ 2.10 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส

จากรูปที่ 2.10 แสดงสมการสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการที่ (2-13) (K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010) โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและไม่คำนึงถึงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ จะได้ฟังก์ชันของการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นดังนี้

$$[\mathbf{S}_{abc}] = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix}^T \quad (2-13)$$

จากรูปที่ 2.1 กำหนดให้ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสแรงดันเอซี จากการกำหนดดังกล่าวสามารถใช้สมการที่ (2-5) ในการพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดซึ่งจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสและแรงดันจากรูปที่ 2.9 ซึ่งพิจารณาได้ดังสมการที่ (2-14) และ (2-15) ตามลำดับ

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc} \quad (2-14)$$

$$\mathbf{E}_{dc,1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (2-15)$$

พิจารณาฟังก์ชันสวิตช์ของไดโอดบนแกนดีคิวได้จากสมการที่ (2-13) ซึ่งอาศัยการแปลงดีคิวจากสมการที่ (2-5) จะได้ว่า

$$\mathbf{S}_{dq} = \mathbf{T}_{dq0} \cdot \mathbf{S}_{abc}$$

$$\mathbf{S}_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S}_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ \sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (2-$$

16)

เมื่อ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสเอซี และ ϕ_1 คือ มุมของแกนหมุนดีคิว

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสสำหรับวงจรเรียงกระแสจากสมการที่ (2-14) โดยอาศัยการแปลงดีคิวจากสมการที่ (2-5) จะได้ว่า

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc}$$

$$\mathbf{T}_{dq0} \mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{T}_{dq0} \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc}$$

$$\mathbf{I}_{in,dq} = \mathbf{S}_{dq} \mathbf{I}_{dc} \quad (2-17)$$

จากสมการที่ (2-15) อาศัยอินเวอร์สการแปลงดีคิวจากสมการที่ (2-6) จะได้ว่า

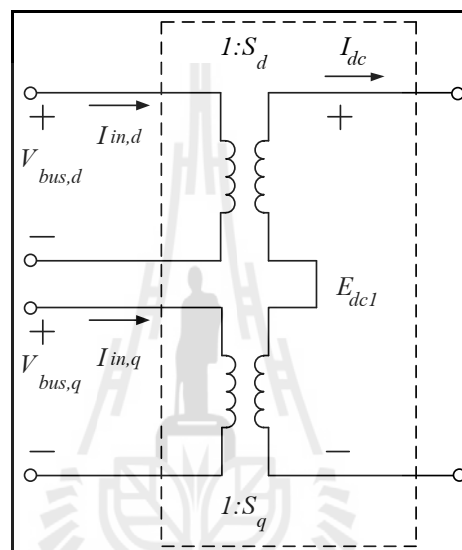
$$\mathbf{E}_{dc,1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc}$$

$$\mathbf{E}_{dc,1} = [\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{S}_{dq}] [\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq}]$$

$$\mathbf{E}_{dc,1} = [\mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{T}_{dq0}] [\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq}]$$

$$\mathbf{E}_{dc,1} = \mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{V}_{bus,dq} \quad (2-18)$$

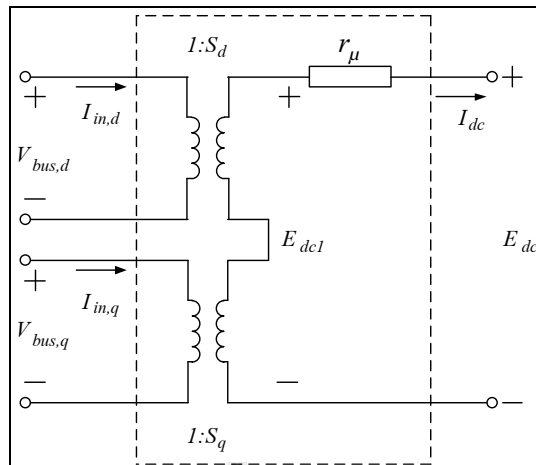
จากสมการที่ (2-17) และ (2-18) พบว่าเมื่อใช้วิธีคิกในการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสและแรงดันตามลำดับ จะได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกระแสและแรงดัน ซึ่งลักษณะอัตราส่วนดังกล่าวทำให้มีลักษณะสมการคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และเมื่อใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าสามารถอธิบายสมการที่ (2-17) และ (2-18) ด้วยวงจรสมมูลบนแกนคิกสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลบนแกนคิกของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

จากรูปที่ 2.9 พิจารณาผลกระทบเนื่องจาก L_{eq} ส่งผลให้เกิดมุมความเหลื่อม (Overlap angle) ซึ่งทำให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสมีขนาดลดลงเล็กน้อย จากผลกระทบดังกล่าวสามารถพิจารณาแทนค่าแรงดันตกด้วยตัวต้านทาน r_μ (Ned Mohan, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2003) ที่บริเวณด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามารถแสดงดังในรูปที่ 2.12 ซึ่งตัวต้านทาน r_μ คำนวณได้จากสมการที่ (2-19)

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (2-19)$$



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดง r_μ บนแกนดีคิว

ในลำดับถัดไปเป็นการพิจารณาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นแหล่งจ่ายบนแกนดีคิวโดยพิจารณาจากสมการของแหล่งจ่ายดังนี้

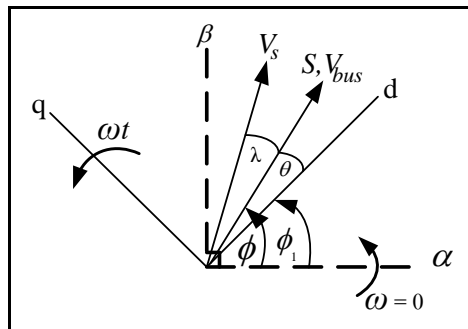
$$\begin{bmatrix} V_{s,a} \\ V_{s,b} \\ V_{s,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\omega t) \\ V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix}$$

แปลงให้เป็นแหล่งจ่ายบนแกนดีคิวโดยใช้สมการที่ (2-5) ได้ดังสมการที่ (2-20)

$$\mathbf{V}_{s,dq} = \mathbf{T}_{dq0} \mathbf{V}_{s,abc}$$

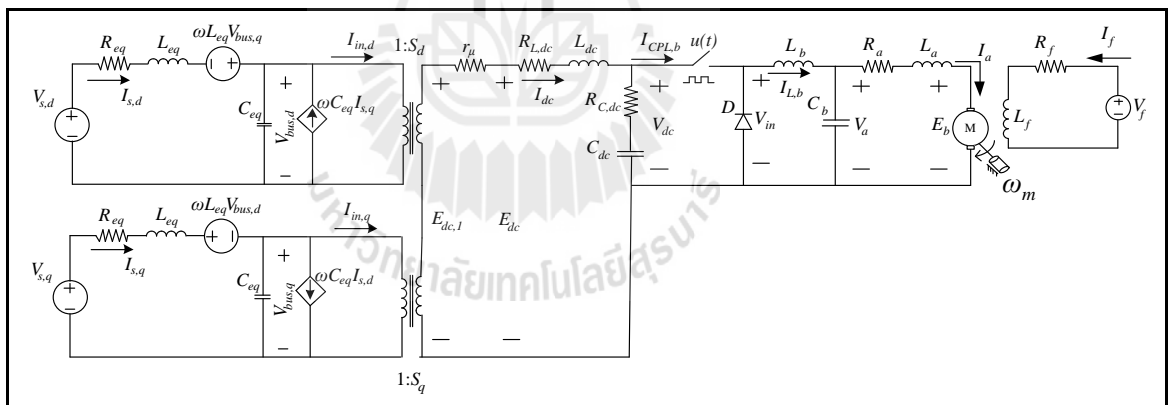
$$\begin{bmatrix} V_{s,d} \\ V_{s,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(\lambda + \phi + \phi_1) \\ V_m \sin(\lambda + \phi + \phi_1) \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

จากสมการที่ (2-16) และ (2-20) เป็นสมการการแปลงฟังก์ชันสวิตช์ของไดโอดและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของสมการดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงดีคิ

จากการแปลงดีคิที่กล่าวมาสามารถแปลงระบบไฟฟ้ากำลังเอซเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 2.1 เมื่อแปลงให้อยู่บนแกนดีคิจะพบว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสถูกแปลงด้วยวิธีดีคิเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอยู่บนแกนดีและแกนคว รวมไปถึงวงจรเรียงกระแสสลับสามเฟสที่ใช้ไดโอดเมื่อแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดจะได้วงจรสมมูลบนแกนดีคิเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกนดีคิ

จากสมการที่ (2-16) และ (2-20) สามารถทำให้วงจรสมมูลแบบแกนดีคิที่แสดงในรูปที่ 2.12 อยู่ในรูปวงจรง่ายด้วยการกำหนดให้ $\phi = \phi_1$ และจากการกำหนดค่าตัวแปรดังกล่าวสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2-21) ถึง (2-24)

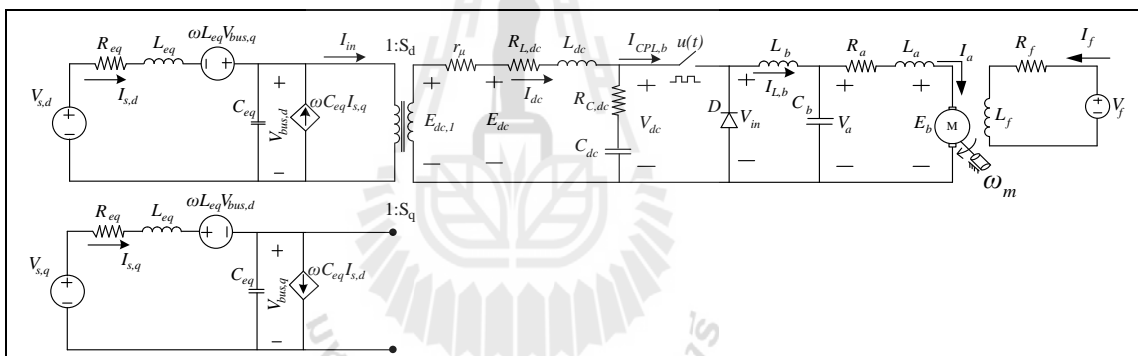
$$V_{s,d} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \tag{2-21}$$

$$V_{s,q} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \tag{2-22}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \tag{2-23}$$

$$S_q = 0 \tag{2-24}$$

จากสมการที่ (2-21) ถึง (2-24) จะเห็นว่าอัตราส่วนหม้อแปลงบนแกนคิก (S_q) มีค่าเท่ากับศูนย์ และมุมของฟังก์ชันสำหรับการแปลงแหล่งจ่ายบนแกนคิกและแกนคิกจะเหลือเพียง λ เป็นผลให้วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกนคิกที่ได้จากสมการดังกล่าวเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



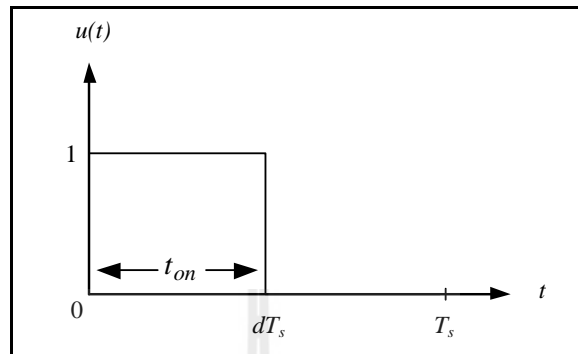
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลบนแกนคิกอย่างง่าย

จากวงจรสมมูลบนแกนคิกของระบบไฟฟ้าเอซซีเป็นคิซซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปที่ 2.15 จะไม่พิจารณาวงจรสมมูลของแกนลำดับศูนย์ (zero-sequence) เนื่องจากระบบสามเฟสที่พิจารณาเป็นแบบสามเฟสสมดุล

ในลำดับต่อไปจะพิจารณาทางฝั่งโหลดซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ต่ออยู่กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กัเวลาคึ่งเป็นผลมาจากอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ รายละเอียดของวิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.4 ที่ผ่านมา

พิจารณาจากรูปที่ 2.15 พบว่าสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักก์มีลักษณะการทำงานในโหมดการนำกระแสและหยุดนำกระแสเป็นดังรูปที่ 2.16 เมื่อ T_s

คือ คาบการสวิตช์ d คือ วัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และ t_{on} คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส ซึ่งตัวแปรทั้งสามมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2-25)



รูปที่ 2.16 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

$$d = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2-25)$$

จากรูปที่ 2.16 สามารถพิจารณาเงื่อนไขของฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ แสดงดังสมการที่ (2-26)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (2-26)$$

จากรูปที่ 2.15 พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบัคค์เมื่อสวิตช์ปิด จะทำให้ $I_{CPLb} = I_{L,B}$ และ $V_{in} = V_{dc}$ ในลำดับถัดมาเมื่อสวิตช์เปิด จะทำให้ $I_{CPLB} = 0\text{ A}$ และ $V_{in} = 0\text{ V}$ (สมมติให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมไดโอดเมื่อนำกระแส) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง I_{CPLb} กับ $I_{L,B}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง V_{in} กับ V_{dc} สามารถเขียนสมการในรูปของฟังก์ชันสวิตช์ $u(t)$ แสดงดังสมการที่ (2-27) และ (2-28) ตามลำดับ

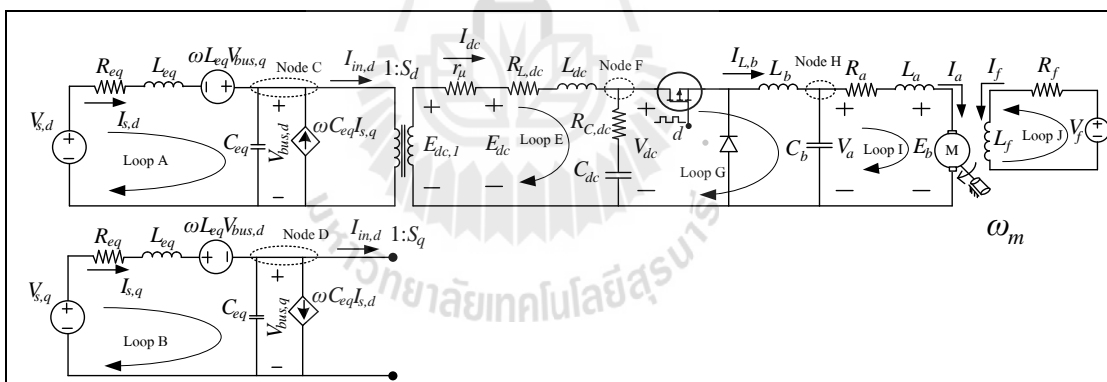
$$I_{CPLb} = u(t)I_{L,B} \quad (2-27)$$

$$V_{in} = u(t)V_{dc} \quad (2-28)$$

จากสมการที่ (2-27) และ (2-28) จะพบว่ามีฟังก์ชันการสวิตช์ปรากฏอยู่ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ $u(t)$ จะพิจารณาเพียงการประมาณอันดับศูนย์ได้ดังสมการที่ (2-29)

$$\begin{aligned} \langle u \rangle_0 &= \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} u(t) \cdot e^0 dt \\ \langle u \rangle_0 &= \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 dt \\ \langle u \rangle_0 &= d \end{aligned} \tag{2-29}$$

ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าจะอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ในการวิเคราะห์วงจร และสามารถแทนฟังก์ชันการสวิตช์ด้วยค่า d ซึ่งหมายถึงค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) มีค่าอยู่ระหว่าง 0% ถึง 100% บ่งบอกถึงสถานะการทำงานของสวิตช์ รายละเอียดการวิเคราะห์วงจรสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.17 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-30) ถึง (2-39)



รูปที่ 2.17 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- พิจารณา Loop A ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} -V_{s,d} + R_{eq} I_{s,d} + L_{eq} \dot{I}_{s,d} - \omega L_{eq} I_{s,q} + V_{bus,d} &= 0 \\ \dot{I}_{s,d} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,d} + \omega I_{s,q} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{V_{s,d}}{L_{eq}} \\ \text{เมื่อ } V_{s,d} &= \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos \lambda \end{aligned} \tag{2-30}$$

- พิจารณา Loop B ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 -V_{s,q} + R_{eq}I_{s,q} + L_{eq}\dot{I}_{s,q} + \omega L_{eq}I_{s,d} + V_{bus,q} &= 0 \\
 \dot{I}_{s,q} &= -\omega I_{s,d} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{s,q} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,q} + \frac{V_{s,q}}{L_{eq}} \\
 \text{เมื่อ } V_{s,q} &= \sqrt{\frac{3}{2}}V_m \sin \lambda
 \end{aligned} \tag{2-31}$$

- พิจารณา Node C ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 I_{s,d} + \omega C_{eq}V_{bus,q} &= C_{eq}\dot{V}_{bus,d} + I_{in,d} \\
 \text{เมื่อ } I_{in,d} &= S_d I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}}I_{s,d} + \omega V_{bus,q} - \frac{S_d}{C_{eq}}I_{dc}
 \end{aligned} \tag{2-32}$$

- พิจารณา Node D ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 I_{s,q} - \omega C_{eq}V_{bus,d} - C_{eq}\dot{V}_{bus,q} - I_{in,q} &= 0 \\
 \text{เมื่อ } I_{in,q} &= S_q I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}}I_{s,q} - \omega V_{bus,d} - \frac{S_q}{C_{eq}}I_{dc}
 \end{aligned} \tag{2-33}$$

- พิจารณา Loop E ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 -E_{dc,1} + r_\mu I_{dc} + R_{L,dc}I_{dc} + L_{dc}\dot{I}_{dc} + V_{dc} &= 0 \\
 \text{เมื่อ } E_{dc,1} &= S_d V_{bus,d} + S_q V_{bus,q} \text{ และ } V_{dc} = V_{R_{C,dc}} + V_{C_{dc}}
 \end{aligned}$$

แยกพิจารณาระหว่างโหมตการนำกระแสและโหมตหยุดนำกระแสของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 V_{R_{C,dc}} &= R_{C,dc}(I_{dc} - I_{L,b}u(t)) \\
 \dot{I}_{dc} &= \frac{S_d}{L_{dc}}V_{bus,d} + \frac{S_q}{L_{dc}}V_{bus,q} - \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}}I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}}V_{dc} + \frac{R_{C,dc}}{L_{dc}}I_{L,b}u(t)
 \end{aligned}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์ที่การประมาณค่าอันดับศูนย์ได้จากสมการที่ (2-29) ดังนี้

$$\dot{I}_{dc} = \frac{S_d}{L_{dc}} V_{bus,d} + \frac{S_q}{L_{dc}} V_{bus,q} - \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{d \cdot R_{C,dc}}{L_{dc}} I_{L,b} \quad (2-34)$$

- พิจารณา Node F ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} I_{dc} &= C_{dc} \dot{V}_{dc} + I_{L,b} u(t) \\ \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_{L,b} \end{aligned} \quad (2-35)$$

- พิจารณา Loop G ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} -V_{dc} u(t) + L_b \dot{I}_{L,b} + V_a &= 0 \\ \dot{I}_{L,b} &= \frac{d}{L_b} V_{dc} - \frac{1}{L_b} V_a \end{aligned} \quad (2-36)$$

- พิจารณา Node H ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} I_{L,b} &= C_b \dot{V}_a + I_a \\ \dot{V}_a &= \frac{1}{C_b} I_{L,b} - \frac{1}{C_b} I_a \end{aligned} \quad (2-37)$$

- พิจารณา Loop I ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} -V_a + R_a I_a + L_a \dot{I}_a + E_b &= 0 \text{ เมื่อ } E_b = K_v I_f \omega_m \\ \dot{I}_a &= \frac{1}{L_a} V_a - \frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_v I_f \omega_m}{L_a} \end{aligned} \quad (2-38)$$

- พิจารณา Loop J ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} -V_f + R_f I_f + L_f \dot{I}_f &= 0 \\ \dot{I}_f &= -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{V_f}{L_f} \end{aligned} \quad (2-39)$$

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ดังนั้นในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาจำเป็นต้องอาศัยสมการโพลตรงกลางของมอเตอร์และสมการทางกลของมอเตอร์ที่แปลงผันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล แสดงได้ดังสมการที่ (2-40) และ (2-41) ตามลำดับ

$$T_m - T_L - B\omega_m = J\dot{\omega}_m \quad (2-40)$$

$$T_m = K_t I_f I_a \quad (2-41)$$

จากการแทนค่าสมการที่ (2-41) ลงในสมการที่ (2-40) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อให้อยู่ในรูปของอัตรา การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อหนึ่งหน่วยเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (2.42)

$$\dot{\omega}_m = \frac{K_t I_f}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} \quad (2-42)$$

จากการพิสูจน์สมการทั้งหมดที่ผ่านมาสามารถวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลบนแกนดิกิวในรูปที่ 2.17 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (2-43)

$$\begin{cases}
\dot{i}_{s,d} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,d} + \omega I_{s,q} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \cos \lambda}{L_{eq}} \\
\dot{i}_{s,q} = -\omega I_{s,d} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,q} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \sin \lambda}{L_{eq}} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{s,d}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \frac{S_d}{C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{s,q}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} - \frac{S_q}{C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{i}_{dc} = \frac{S_d}{L_{dc}} V_{bus,d} + \frac{S_q}{L_{dc}} V_{bus,q} - \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} + \frac{d \cdot R_{C,dc}}{L_{dc}} I_{L,b} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{d}{C_{dc}} I_{L,b} \\
\dot{i}_{L,b} = \frac{d}{L_b} V_{dc} - \frac{V_a}{L_b} \\
\dot{V}_a = \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{I_a}{C_b} \\
\dot{i}_a = \frac{V_a}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_v I_f}{L_a} \omega_m \\
\dot{i}_f = -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{V_f}{L_f} \\
\dot{\omega}_m = \frac{K_t I_f}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J}
\end{cases} \tag{2-43}$$

จากสมการที่ (2-43) สามารถเขียนสมการเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \\
\mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u}
\end{aligned} \tag{2-44}$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ตัวแปรสถานะ: } \mathbf{x} = [I_{s,d} \quad I_{s,q} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{dc} \quad I_{L,b} \quad V_a \quad I_a \quad I_f \quad \omega_m]^T$$

$$\text{ตัวแปรอินพุต: } \mathbf{u} = [V_m \quad V_f \quad T_L]^T$$

$$\text{ตัวแปรเอาต์พุต: } \mathbf{y} = [I_{dc} \quad V_{dc} \quad V_a \quad I_a \quad \omega_m]^T$$

และรายละเอียดของเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{S_d}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & -\frac{S_q}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_d}{L_{dc}} & \frac{S_q}{L_{dc}} & \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & \frac{d \cdot R_{C,dc}}{L_{dc}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & -\frac{d}{C_{dc}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d}{L_b} & 0 & -\frac{1}{L_b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & 0 & -\frac{1}{C_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_a} & \frac{R_a}{L_a} & 0 & \frac{K_v I_f}{L_a} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_t I_f}{J} & 0 & \frac{B}{J} \end{bmatrix}_{11 \times 11}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3} \cos \lambda}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3} \sin \lambda}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}_{11 \times 3}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{5 \times 11}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบไฟฟ้าเอซี เป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการแปลงดีควและค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในสมการที่ (2-43) เป็นแบบจำลองสำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 2.1 โดยบล็อกการจำลองสถานการณ์ด้วย Simulink ที่ใช้สำหรับแสดงผลการตอบสนองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดขึ้น

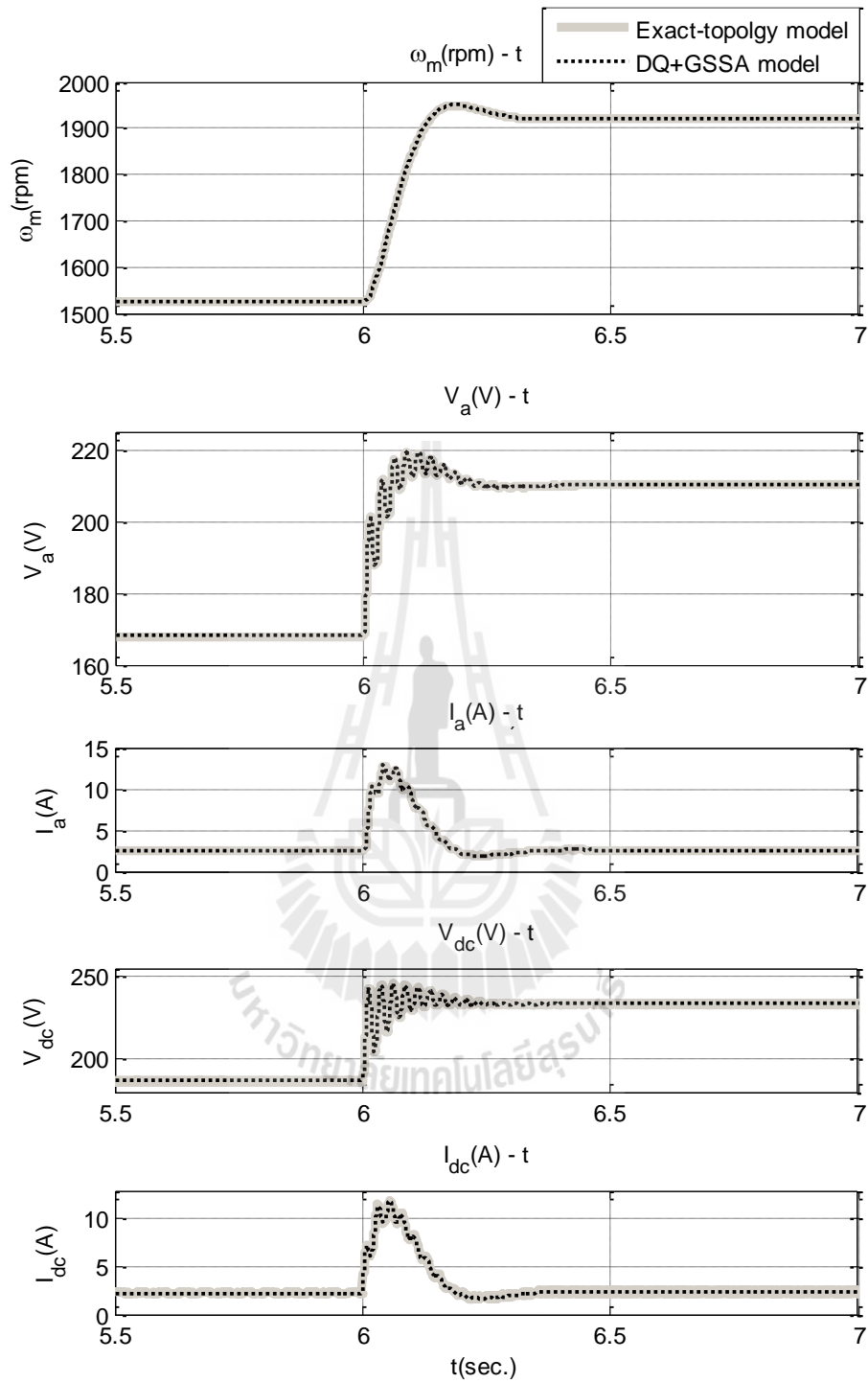
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
V_s	100 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
$R_{L,dc}$	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$R_{C,dc}$	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
L_{dc} ($\Delta I_{dc} \leq 1.5$ A)	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc} ($\Delta V_{dc} \leq 50$ V)	500 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L_b ($\Delta I_L \leq 0.5$ A)	30 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัสค์
C_b ($\Delta V_o \leq 50$ mV)	125 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัสค์
R_a	2.581 Ω	ความต้านทานวงจรอาร์เมเจอร์
L_a	0.028 H	ความเหนี่ยวนำวงจรอาร์เมเจอร์
R_f	281.3 Ω	ความต้านทานวงจรสนาม
L_f	156 H	ความเหนี่ยวนำวงจรสนาม
$K_t = K_v$	0.9483	ค่าคงที่ของมอเตอร์

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดขึ้น (ต่อ)

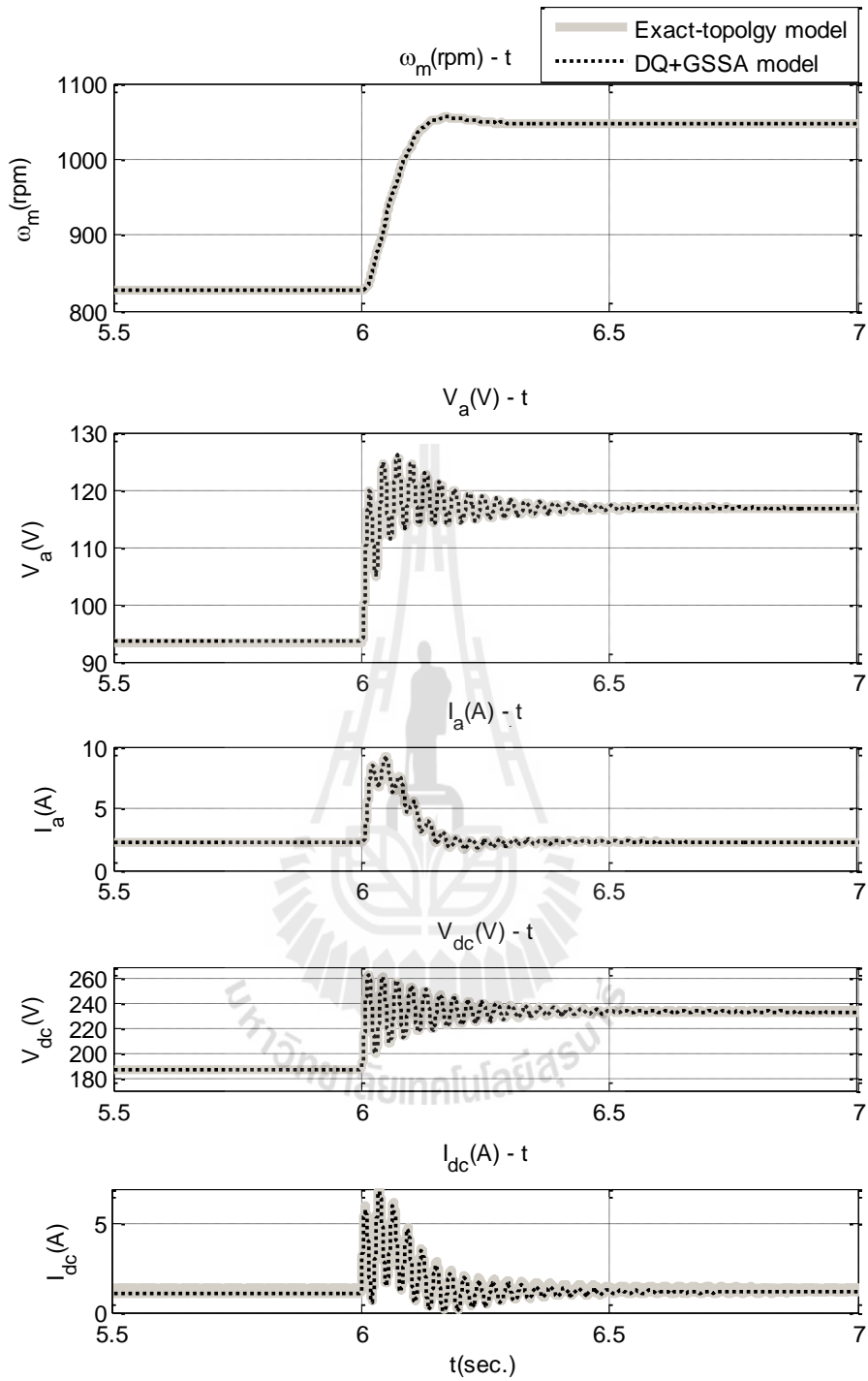
V_f	300 V	แหล่งจ่ายแรงดันสนามของมอเตอร์
J	0.02215 kg.m ²	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
B	0.002953 N.m.s	สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์

การจำลองสถานการณ์โดยการเปลี่ยนระดับแรงดัน V_m จาก $80 V_{\text{rms/phase}}$ เป็น $100 V_{\text{rms/phase}}$ ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าเป็น 90% และ 50% แสดงได้ดังรูป 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $V_f = 300 \text{ V}$ และ $T_L = 0 \text{ N.m}$ มีค่าคงที่



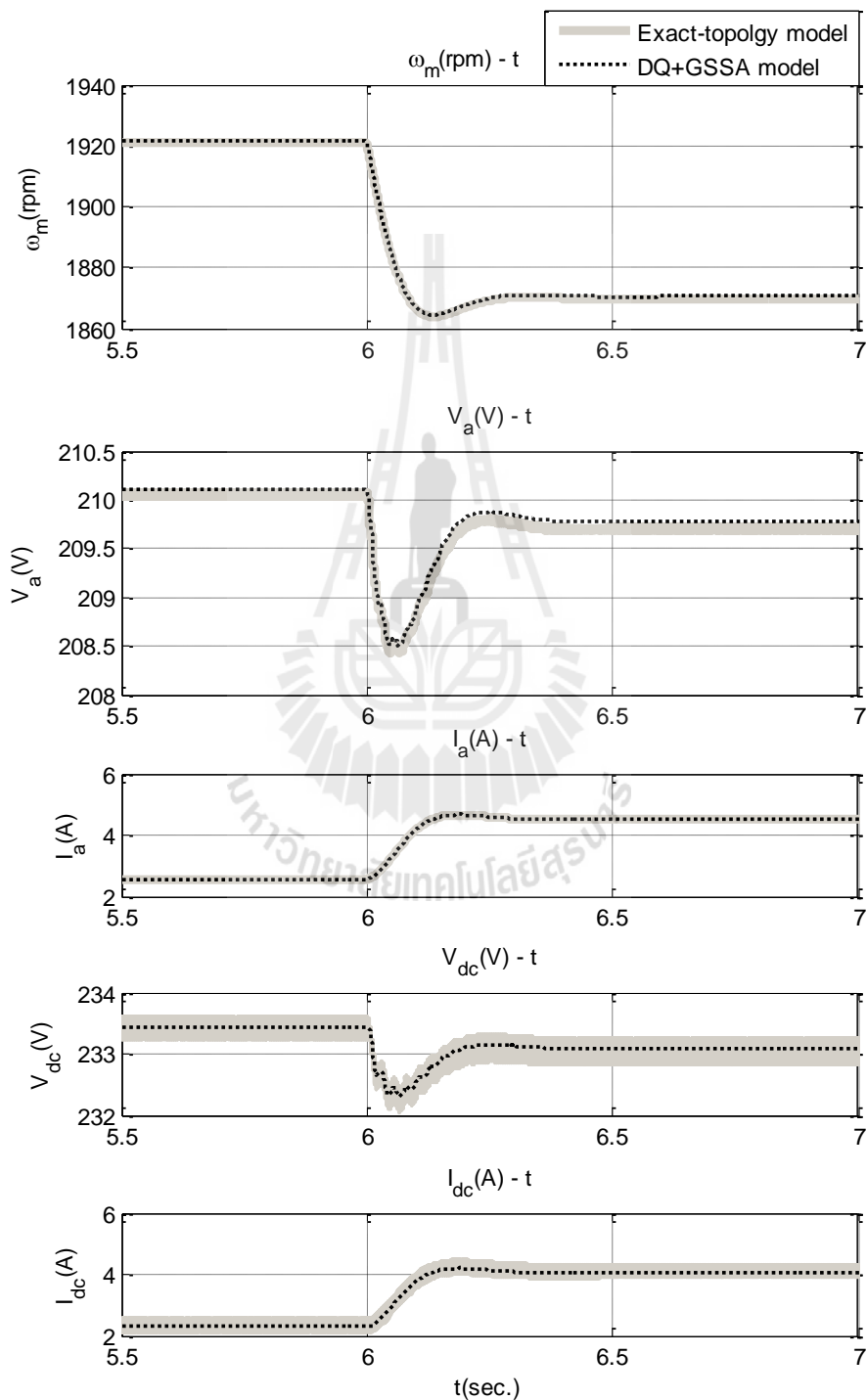


รูปที่ 2.18 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%)

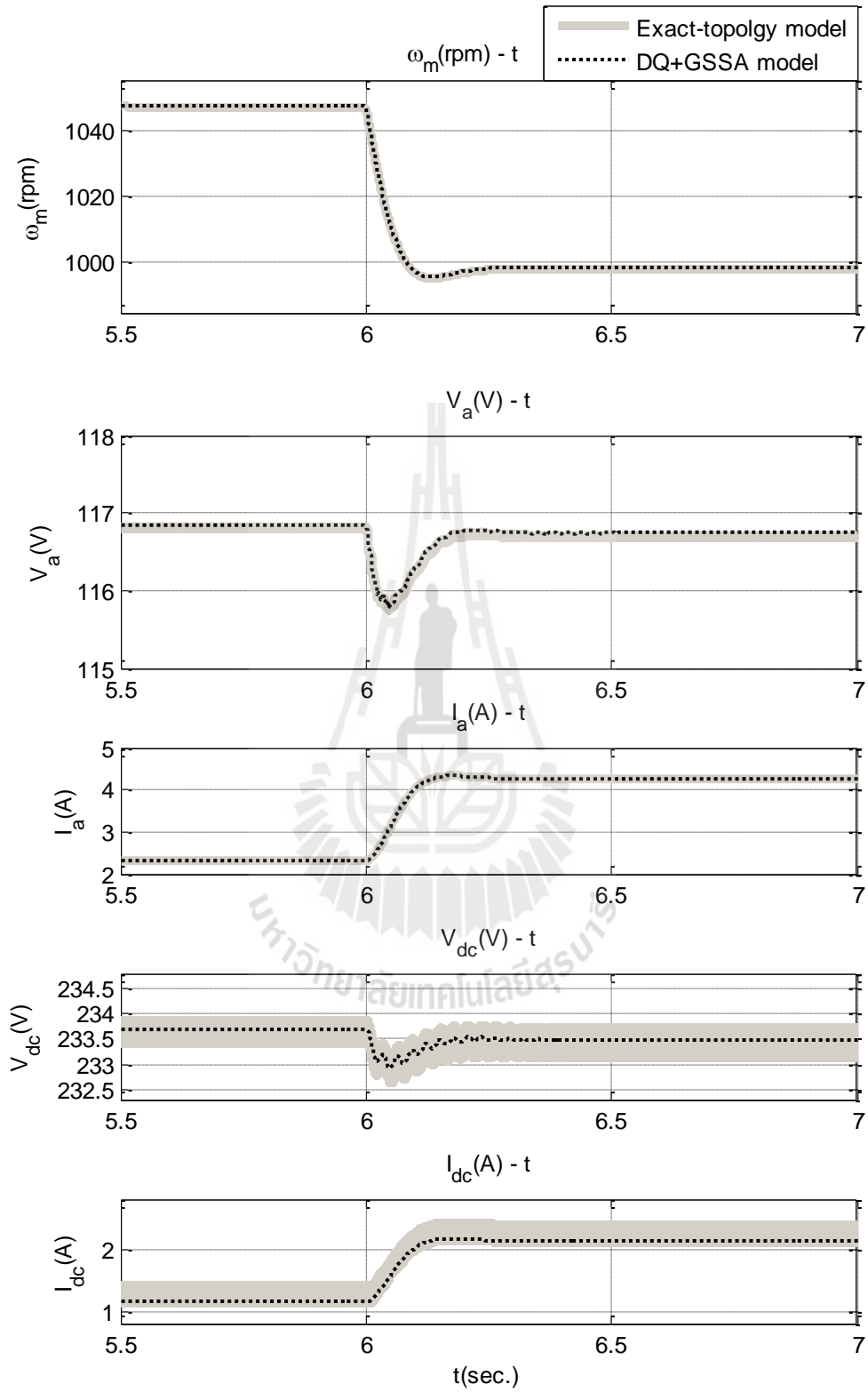


รูปที่ 2.19 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%)

การจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนโหลดทางกลของมอเตอร์ T_L จาก 2 N.m เป็น 4 N.m ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าเป็น 90% และ 50% แสดงได้ดังรูป 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $V_f = 300\text{ V}$ และ $V_m = 100\text{ V}_{\text{rms/phase}}$ มีค่าคงที่



รูปที่ 2.20 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%)



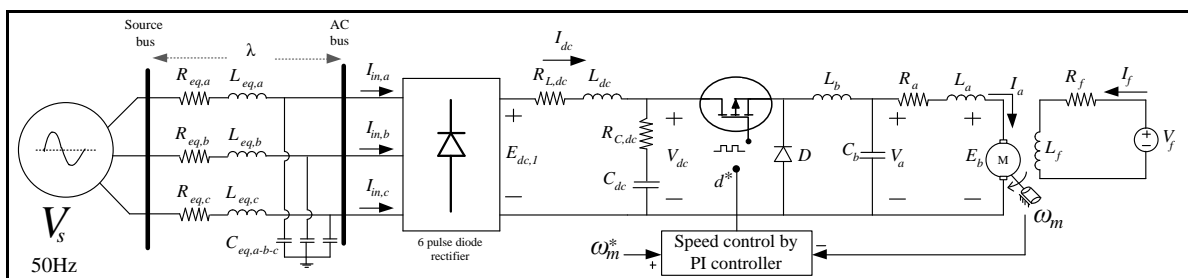
รูปที่ 2.21 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%)

จากการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นในบทนี้มีความถูกต้อง เนื่องจากการจำลองโดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้า SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงแบบดิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีผลสอดคล้องและคล้อยตามกัน ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองระบบที่พิจารณาแบบวงเปิดดังกล่าวไปพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบแบบวงปิดซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

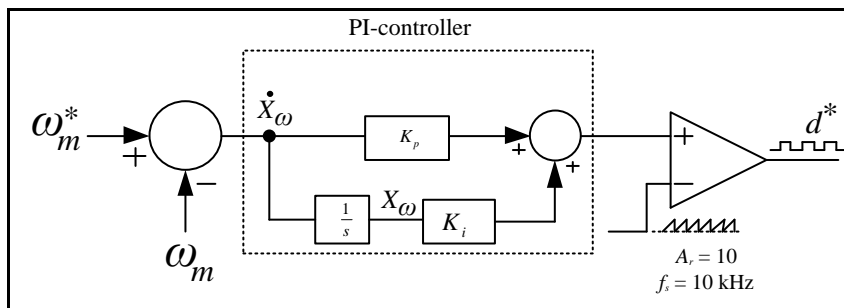
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเพิ่มในส่วนของตัวควบคุมในวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวควบคุมที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลายประเภทโดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเหมาะสมและมีความเพียงพอสำหรับควบคุมเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้จริง อีกทั้งยังมีการออกแบบตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อนซึ่งสามารถออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย นั่นคือการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามส่วนของระบบที่พิจารณากับระบบมาตรฐานอันดับสองเพื่อหาค่า K_p และ K_i

ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.22 และบล็อกตัวควบคุมพีไอแสดงดังรูปที่ 2.23 ในการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป



รูปที่ 2.22 ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.23 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์

จากรูปที่ 2.22 เป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่ผู้วิจัยใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสผ่านวงจรสมมูลสายส่งและวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมใช้สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักก์ จากรูปที่ 2.23 เป็นรูปองค์ประกอบของตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งความเร็วรอบที่ผู้ใช้ต้องการแทนด้วยตัวแปร ω_m^* และความเร็วรอบของมอเตอร์แทนด้วยตัวแปร ω_m โดยหลักการของตัวควบคุมพีไอคือ การหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างระหว่าง ω_m^* และ ω_m เพื่อปรับคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่าเป็นศูนย์ โดยสัญญาณที่ได้หลังจากการปรับคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์จะเข้าสู่ตัวเปรียบเทียบ (comparator) เพื่อให้ได้สัญญาณวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) สำหรับควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์โดยในงานวิจัยนี้จะใช้มอสเฟต (Mosfet) เป็นอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซิจิทัลที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ยังไม่มีการควบคุมที่ได้ทำการพิสูจน์ขึ้นไว้แล้ว ปรากฏพจน์ตัวแปร d ซึ่งหมายถึงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์สำหรับระบบที่ยังไม่มีการควบคุม จากรูปที่ 2.23 พบว่าปรากฏพจน์ d^* เป็นสัญญาณควบคุม (control signal) การพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบที่มีการควบคุมจะดำเนินการ โดยการแทน $d = d^*$ สำหรับสมการ d^* แสดงดังสมการที่ (2-45)

$$d^* = \frac{1}{A_r} (K_p \omega_m^* - K_p \omega_m + K_i X_\omega) \quad (2-45)$$

เมื่อแทนค่า $d = d^*$ จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการควบคุมสามารถแสดงดังสมการที่ (2-46) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ในงานวิจัยนี้ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้แบบจำลองมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) ซึ่งการทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งโดยจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 2.4.2

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{s,d} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,d} + \omega I_{s,q} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \cos \lambda}{L_{eq}} \\
 \dot{I}_{s,q} = -\omega I_{s,d} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,q} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \sin \lambda}{L_{eq}} \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{s,d}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \frac{S_d}{C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{s,q}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} - \frac{S_q}{C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{I}_{dc} = \frac{S_d}{L_{dc}} V_{bus,d} + \frac{S_q}{L_{dc}} V_{bus,q} - \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} + \frac{K_p \omega_m^* \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_{dc}} I_{L,b} - \frac{K_p \omega_m \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_{dc}} I_{L,b} + \frac{K_i X_\omega \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_{dc}} I_{L,b} \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{K_p \omega_m^* \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot C_{dc}} I_{L,b} + \frac{K_p \omega_m \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot C_{dc}} I_{L,b} - \frac{K_i X_\omega \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot C_{dc}} I_{L,b} \\
 \dot{I}_{L,b} = -\frac{K_p \omega_m^* \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_b} V_{dc} + \frac{K_p \omega_m \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_b} V_{dc} - \frac{K_i X_\omega \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_b} V_{dc} - \frac{V_a}{L_b} \\
 \dot{V}_a = \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{I_a}{C_b} \\
 \dot{I}_a = \frac{V_a}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_v I_f}{L_a} \omega_m \\
 \dot{I}_f = -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{V_f}{L_f} \\
 \dot{\omega}_m = \frac{K_t I_f}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} \\
 \dot{X}_\omega = \omega_m^* - \omega_m
 \end{cases} \quad (2-46)$$

จากรูปที่ 2.22 เป็นระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนสำคัญลำดับถัดไปคือการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.1

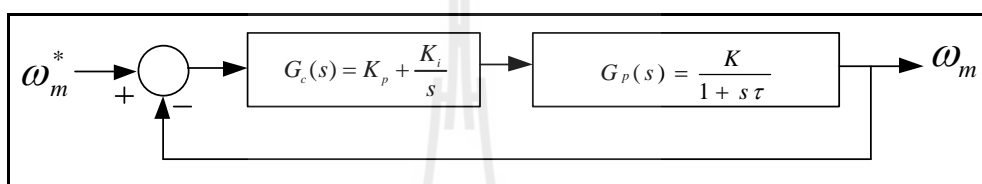
2.4.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในงานวิจัยจะอาศัยตัวควบคุมพีไอในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบตัวควบคุมพีไอจะอาศัยวิธีแบบดั้งเดิมจากการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์เทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งอาร์เมเจอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่ง สามารถแสดงดังสมการที่ (2-47) และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอแสดงดังสมการที่ (2-48)

$$G_p(s) = \frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{1 + s\tau} \quad (2-47)$$

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2-48)$$

จากสมการที่ (2-47) และ (2-48) สามารถพิจารณาเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิดซึ่งใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังรูปที่ 2.24 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ดังสมการที่ (2-49)



รูปที่ 2.24 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิด

$$TF(s) = \frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{K \cdot K_p s + K \cdot K_i}{s^2 + \frac{K \cdot K_p + 1}{\tau} s + \frac{K \cdot K_i}{\tau}} \quad (2-49)$$

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.24 สังเกตได้ว่าในส่วนของการป้อนกลับ (feedback) มีค่าอัตราขยาย (gain) เท่ากับ 1 ดังนั้น $H(s) = 1$ ทำให้พิจารณาเพียง $G_c(s) \cdot G_p(s)$ เท่านั้น ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามส่วนระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแบบวงปิดเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองมาตรฐาน ซึ่งสมการระบบอันดับสองมาตรฐานแสดงได้ดังสมการที่ (2-50) การออกแบบดำเนินการได้โดยง่ายเพียงแค่กำหนดค่า ζ และ ω_n เพื่อหาสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-50)$$

จากสมการที่ (2-49) และ (2-50) พิจารณาพหุนามส่วนเพื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมได้ดังสมการที่ (2-51) และ (2-52) ตามลำดับ

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n\tau - 1}{K} \quad (2-51)$$

$$K_i = \frac{\omega_n^2\tau}{K} \quad (2-52)$$

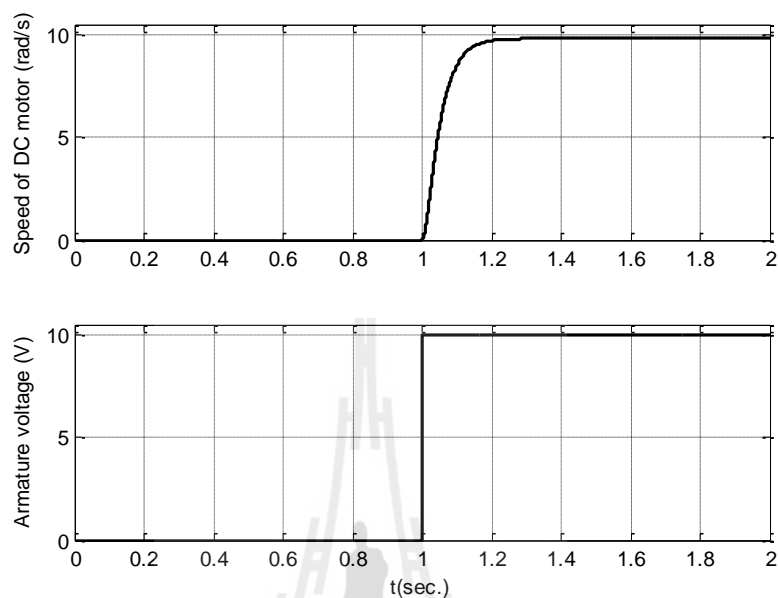
จากการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์โดยมีความเร็วรอบของมอเตอร์และแรงดันทางฟีดแบ็คเป็นเอาต์พุตและอินพุตตามลำดับ สามารถพิจารณาค่าอัตราขยาย K และค่าคงตัวทางเวลา τ ได้จากการจำลองผลการตอบสนองจากโปรแกรม MATLAB บนคอมพิวเตอร์ โดยบล็อกการจำลองสถานการณ์ด้วย Simulink ที่ใช้สำหรับแสดงผลการตอบสนองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ข การจำลองผลการตอบสนองดังกล่าวจะต้องอาศัยพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 โดยพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังตารางที่ 2.2 เพื่อเป็นตัวอย่างในการออกแบบตัวควบคุมและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 4 จะใช้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องของมอเตอร์ซึ่งได้จากการระบุค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์

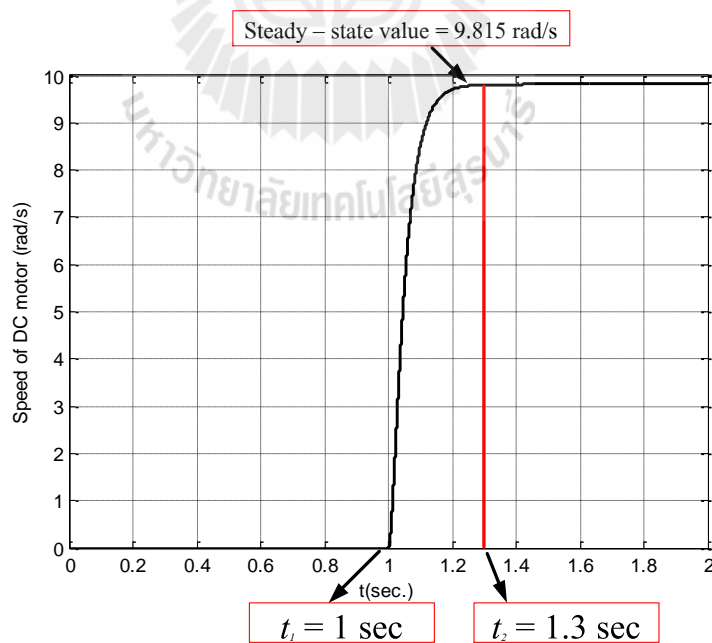
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
R_a	2.581 Ω	ความต้านทานวงจรรีอาร์เมเจอร์
L_a	0.028 H	ความเหนี่ยวนำวงจรรีอาร์เมเจอร์
R_f	281.3 Ω	ความต้านทานวงจрсนาม
L_f	156 H	ความเหนี่ยวนำวงจрсนาม
$K_t = K_v$	0.9483	ค่าคงที่ของมอเตอร์
V_f	300 V	แหล่งจ่ายแรงดันสนามของมอเตอร์
J	0.02215 kg.m ²	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
B	0.002953 N.m.s	สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์

ผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.25 โดยการหาผลการตอบสนองกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอินพุตแบบขั้นบันไดทางฟีดแบ็คของ

มอเตอร์จาก 0 V เป็น 10 V ที่เวลา 1 วินาที และรูปที่ 2.26 เป็นการนำรูปที่ 2.25 (รูปบน) มาวัดค่า K และ τ เพื่อนำไปใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม



รูปที่ 2.25 ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.26 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.2

จากรูปที่ 2.26 พบว่าสามารถหาค่าอัตราขยาย K ได้ดังสมการที่ (2-53) ซึ่งได้ค่า $K = 0.9815$ และสามารถหาค่า τ ได้ดังสมการที่ (2-54) ซึ่งได้ค่า $\tau = 0.3$

$$K = \frac{\text{อินพุต}}{\text{เอาต์พุต}} = \frac{\omega_m (\text{rad/s})}{V_a (\text{V})} \quad (2-53)$$

$$\tau = t_2 - t_1 = \text{เวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว} - \text{เวลาที่เพิ่มอินพุตแบบขั้นบันได} \quad (2-54)$$

จากค่า K และค่า τ ที่คำนวณสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอโดยใช้สมการที่ (2-51) และ (2-52) ตามลำดับ โดยกำหนดการออกแบบให้เป็นห่วงวงขาดซึ่ง $0 \leq \zeta < 1$ ดังนั้นกำหนดให้ $\zeta = 0.9$ สามารถแสดงค่า K_p และ K_i ที่ได้จากการออกแบบเมื่อเปลี่ยน ω_n ได้ดังตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะนำไปใช้ในการควบคุมโดยการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i

ω_n (rad/s)	K_p	K_i
10	4.4829	30.5654
12	5.5833	44.0143
14	6.6836	59.9083
16	7.7841	78.2476
18	8.8843	99.0321
20	9.9847	122.2618

2.4.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นจากสมการที่ (2-46) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเฉพาะที่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้น โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (2-55)

$$\begin{aligned}\dot{\delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}\end{aligned}\quad (2-55)$$

โดยกำหนดให้

ตัวแปรสถานะ:

$$\mathbf{x} = [\delta I_{s,d} \quad \delta I_{s,q} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_{L,b} \quad \delta V_a \quad \delta I_a \quad \delta I_f \quad \delta \omega_m \quad \delta X_\omega]^T$$

$$\text{ตัวแปรอินพุต: } \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta V_f \quad \delta \tau_L \quad \delta \omega_m^*]^T$$

$$\text{ตัวแปรเอาต์พุต: } \mathbf{y} = [\delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta V_a \quad \delta I_a \quad \delta \omega_m]^T$$

และรายละเอียดของแมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ แสดงไว้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{S_d}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & -\frac{S_q}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_d}{L_{dc}} & \frac{S_q}{L_{dc}} & -\frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_p R_{C,dc} I_{L,b0}}{A_r \cdot L_{dc}} & \frac{K_i R_{C,dc} I_{L,b0}}{A_r \cdot L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & 0 & 0 & 0 & \frac{K_p I_{L,b0}}{A_r \cdot C_{dc}} & -\frac{K_i I_{L,b0}}{A_r \cdot C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & 0 & -\frac{1}{L_b} & 0 & -\frac{K_p V_{dc,0}}{A_r \cdot L_b} & \frac{K_i V_{dc,0}}{A_r \cdot L_b} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & 0 & -\frac{1}{C_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & 0 & -\frac{K_v I_f}{L_a} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_i I_f}{J} & 0 & -\frac{B}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$a(5,7) = \frac{K_p R_{C,dc} \omega_{m,0}^* - K_p R_{C,dc} \omega_{m,0} + K_i R_{C,dc} X_{\omega,0}}{A_r \cdot L_{dc}}$$

$$a(6,7) = \frac{-K_p \omega_{m,0}^* + K_p \omega_{m,0} - K_i X_{\omega,0}}{A_r \cdot C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{K_p \omega_{m,0}^* - K_p \omega_{m,0} + K_i X_{\omega,0}}{A_r \cdot L_b}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos \lambda}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin \lambda}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_p R_{C,dc} I_{L,b0}}{A_r \cdot L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_p I_{L,b0}}{A_r \cdot C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_i V_{dc,0}}{A_r \cdot L_b} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{12 \times 4}$$

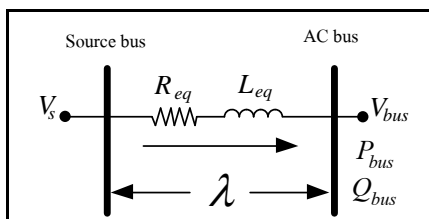
$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 12}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

จากสมการที่ (2-55) ในองค์ประกอบ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ พบพจน์ตัวแปรที่เป็นค่าในสถานะอยู่ตัว ได้แก่ $I_{LB,0}$, $V_{dc,0}$, $\omega_{m,0}^*$, $\omega_{m,0}$, $X_{\omega,0}$ ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์ด้วยสัญญาณขนาดเล็กจำเป็นต้องแก้สมการเพื่อหาค่าในสถานะอยู่ตัวโดยกำหนดให้ $\delta \dot{\mathbf{x}} = 0$ เพื่อหาค่าที่สถานะอยู่ตัวของแต่ละตัวแปร ซึ่งในการหาค่าในสถานะอยู่ตัวได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.3

2.4.3 การหาค่าตัวแปรสถานะในสถานะอยู่ตัว

การคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2-55) มีความจำเป็นต้องทราบค่า $V_{dc,0}$, λ_0 และ $\omega_{m,0}^*$ เพื่อนำไปคำนวณหาค่า $I_{LB,0}$, $\omega_{m,0}$, $X_{\omega,0}$ โดยในการคำนวณหาค่า $V_{dc,0}$ และ λ_0 จะอาศัยทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้ามาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อพิจารณาเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลซึ่งจะคำนวณจากวงจรต่อหนึ่งเฟส ดังรูปที่ 2.27 โดยจะไม่พิจารณาตัวเก็บประจุของแบบจำลองสายส่งเนื่องจากมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 2.27 สายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 2.27 แสดงแบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟสเพื่อนำไปคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการวนรอบนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนในการคำนวณได้ดังนี้ โดยโปรแกรมการคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัวที่เห็นในหัวข้อนี้สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก

$$\text{จาก} \quad \mathbf{S} = \mathbf{VI}^* = P_{bus} + jQ_{bus}$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = V_{bus} \angle 0^\circ \left[\frac{V_s \angle \lambda - V_{bus} \angle 0^\circ}{Z \angle \gamma} \right]^*$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \frac{V_s V_{bus}}{Z} \angle (\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \angle \gamma$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \left[\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) \right] + j \left[\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) \right]$$

ดังนั้นจะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2-56)

$$\begin{cases} \frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \end{cases} \quad (2-56)$$

จากสมการที่ (2-56) V_s คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสแหล่งจ่าย (Source bus) V_{bus} คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสเอชี่ λ คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง V_s และ V_{bus} และ $Z \angle \gamma$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ในส่วนของ Q_{bus} จะประมาณให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (Ned Mohan, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2003) สำหรับค่า P_{bus} สามารถคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ไหลรวมกับกำลังงานสูญเสียในส่วนต่างๆ ภายในวงจรดังสมการที่ (2-57)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{(P_{Load} + \Sigma P_{Loss})}{3} \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (2-57)$$

จากสมการที่ (2-57) สามารถหา P_{Load} และ ΣP_{Loss} ได้ดังนี้ (กองพล อารีรักษ์, สุชาติรัตน์ขวัญอ่อน, Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drives, SUT7-711-54-12-48, 2012)

$$P_{Load} = T_L \omega_m$$

เมื่อ T_L คือ โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
 ω_m คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีหน่วยเป็น rad/s

$$\Sigma P_{Loss} = P_{cu} + P_{stray} + P_{brush}$$

เมื่อ P_{cu} คือ กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก มีค่าเท่ากับ $P_{cu} = I_a^2 R_a$
 P_{stray} คือ กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน มีค่าเท่ากับ $P_{stray} = K_v I_a^2 \omega_m^2$
 P_{brush} คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแปรงถ่าน $P_{brush} = 2I_a$

จากสมการที่ (2-56) สามารถหา $Z \angle \gamma$ ได้ดังนี้

$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \gamma = \tan^{-1} \left[\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right]$$

จากสมการที่กล่าวมาสามารถนำไปเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาผลเฉลยแรงดันที่บัสเอซีในที่นี่คือ V_{bus} เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหา $V_{dc,0}$ โดยคำนวณจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเต็มคลื่นหาได้ดังสมการที่ (2-58) เมื่อได้ค่า $V_{dc,0}$ แล้วจะพบว่าสามารถแก้สมการเพื่อหาค่าในสถานะอยู่ตัวสำหรับตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (2-59) ถึง (2-62)

$$V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus,0})}{\pi} \quad (2-59)$$

$$I_{Lb,0} = I_a = \frac{T_L}{K_t I_f} \quad (2-60)$$

$$\omega_{m,0} = \omega_{m,0}^* = \text{ความเร็วรอบที่ต้องการ} \quad (2-61)$$

$$X_{\omega,0} = \frac{V_a}{V_{dc,0} \cdot K_i} = \frac{\frac{R_a T_L}{K_t I_f} + K_v I_f \omega_{m,0}}{V_{dc,0} \cdot K_i} \quad (2-62)$$

เมื่อ $K_v = K_t$ ซึ่งหมายถึงค่าคงที่ของมอเตอร์

จากสมการที่ (2-59) ถึง (2-62) ทำให้ทราบค่าในสถานะอยู่ตัวของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งจะต้องนำไปแทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นจะเป็นการพิจารณาสัญญาณขนาดเล็กเนื่องจากการทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อให้มีความถูกต้องในการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 2.5 สังเกตได้ว่าแบบจำลองในสมการที่ (2-55) จะขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของระบบในที่นี้คือ ความเร็วรอบที่ต้องการและโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าจุดการทำงานเปลี่ยนไปค่าต่าง ๆ ในองค์ประกอบ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ก็จะมีค่าเปลี่ยนไป โดยมีค่าสอดคล้องกับสมการที่ (2-59) ถึง (2-62)

2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบไฟฟ้าเอซี เป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังสมการที่ (2-55) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้นสำหรับจำลองสถานการณ์สัญญาณขนาดเล็กของระบบดังกล่าว โดยผู้วิจัยกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 2.4 การจำลองสถานการณ์จะแบ่งตามความถี่ธรรมชาติ (natural frequency, ω_n) ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อสังเกตผลการตอบสนองและพิจารณาถึงความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้น

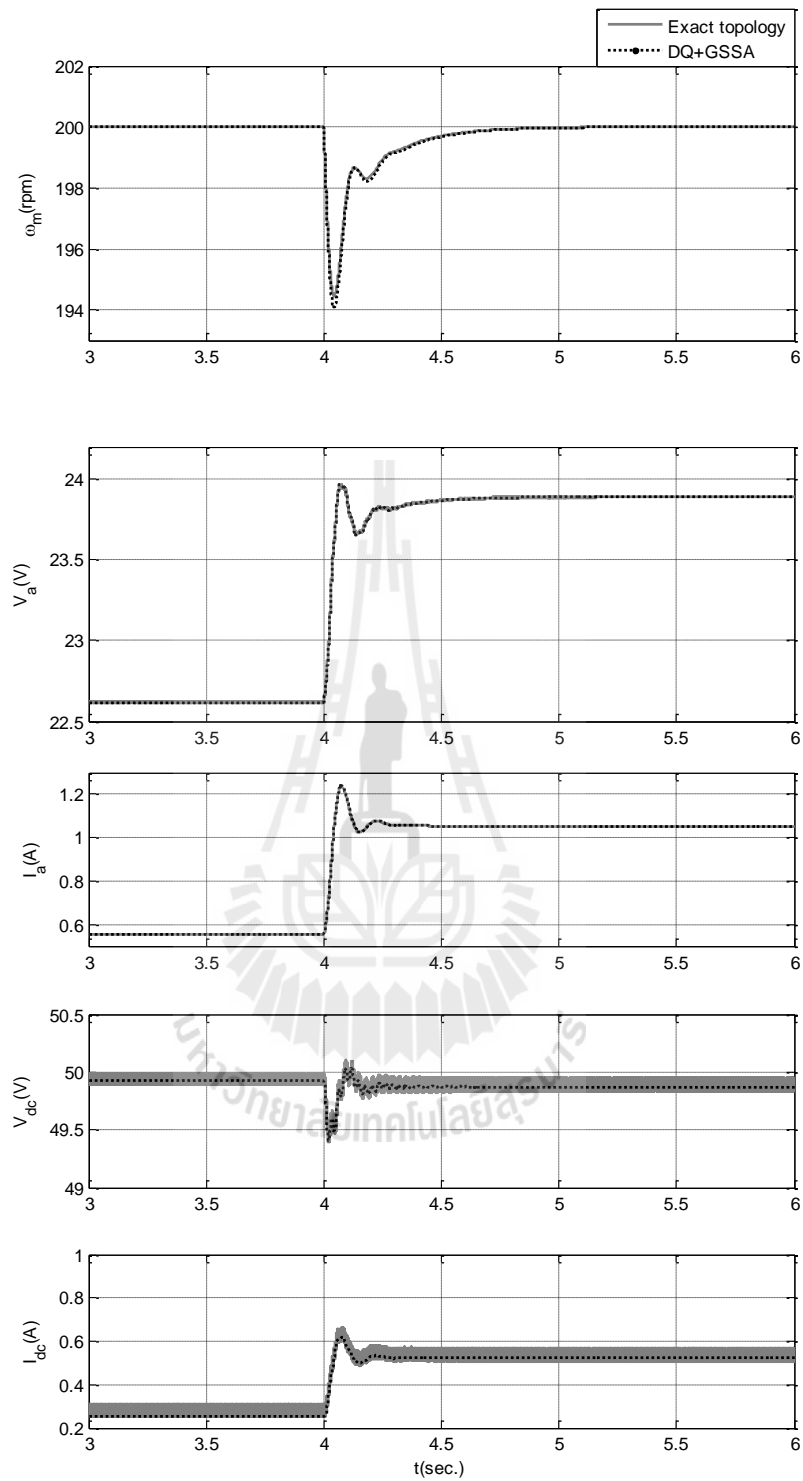
ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
V_s	30 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง

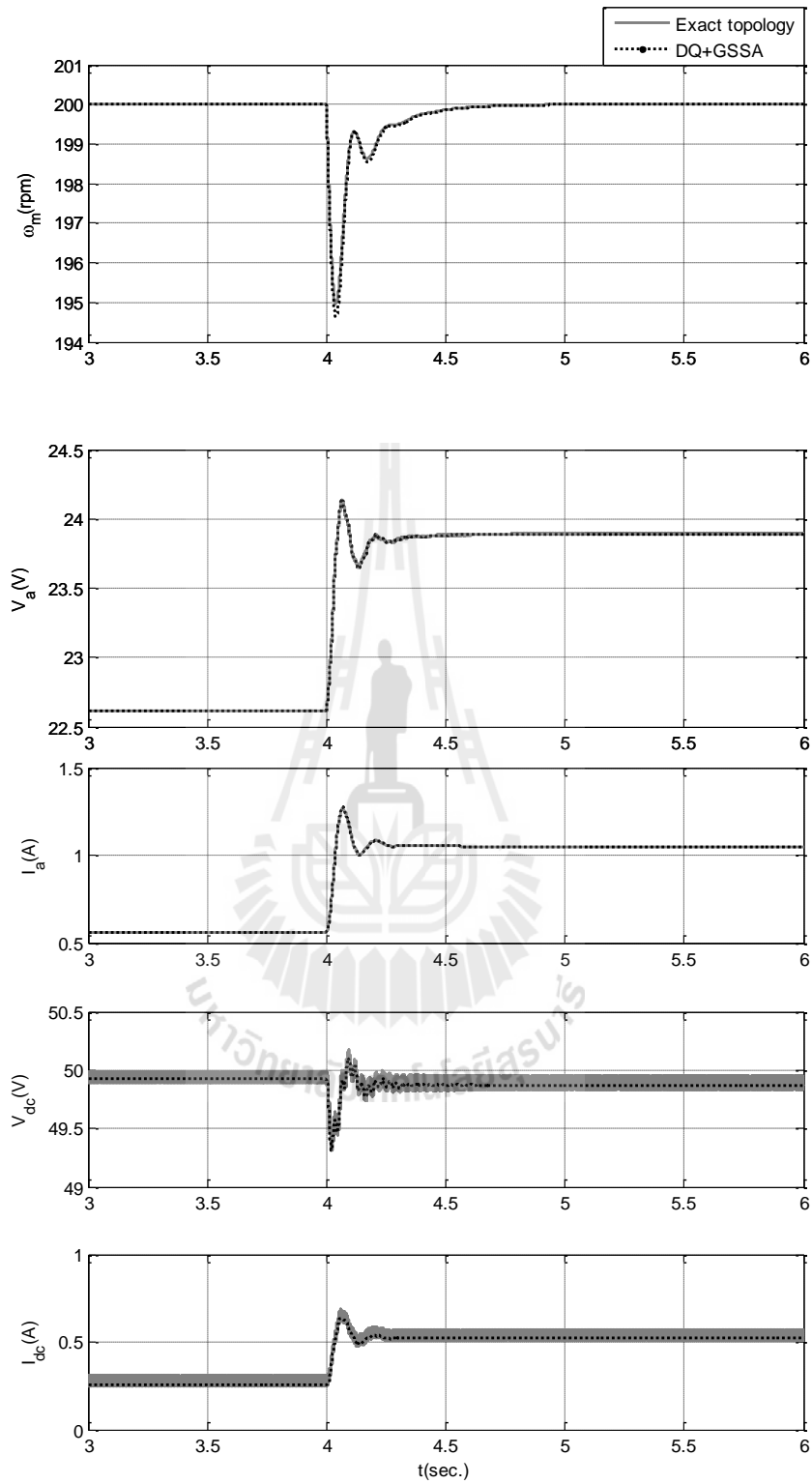
ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ (ต่อ)

L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
$R_{L,dc}$	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$R_{C,dc}$	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$L_{dc} (\Delta I_{dc} \leq 1.5 \text{ A})$	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรตรง
$C_{dc} (\Delta V_{dc} \leq 50 \text{ V})$	500 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรตรง
$L_b (\Delta I_L \leq 0.5 \text{ A})$	30 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$C_b (\Delta V_o \leq 50 \text{ mV})$	125 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์
R_a	2.581 Ω	ความต้านทานวงจรอาร์เมเจอร์
L_a	0.028 H	ความเหนี่ยวนำวงจรอาร์เมเจอร์
R_f	281.3 Ω	ความต้านทานวงจรสนาม
L_f	156 H	ความเหนี่ยวนำวงจรสนาม
$K_t = K_v$	0.9483	ค่าคงที่ของมอเตอร์
V_f	300 V	แหล่งจ่ายแรงดันสนามของมอเตอร์
J	0.02215 kg.m ²	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
B	0.002953 N.m.s	สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์

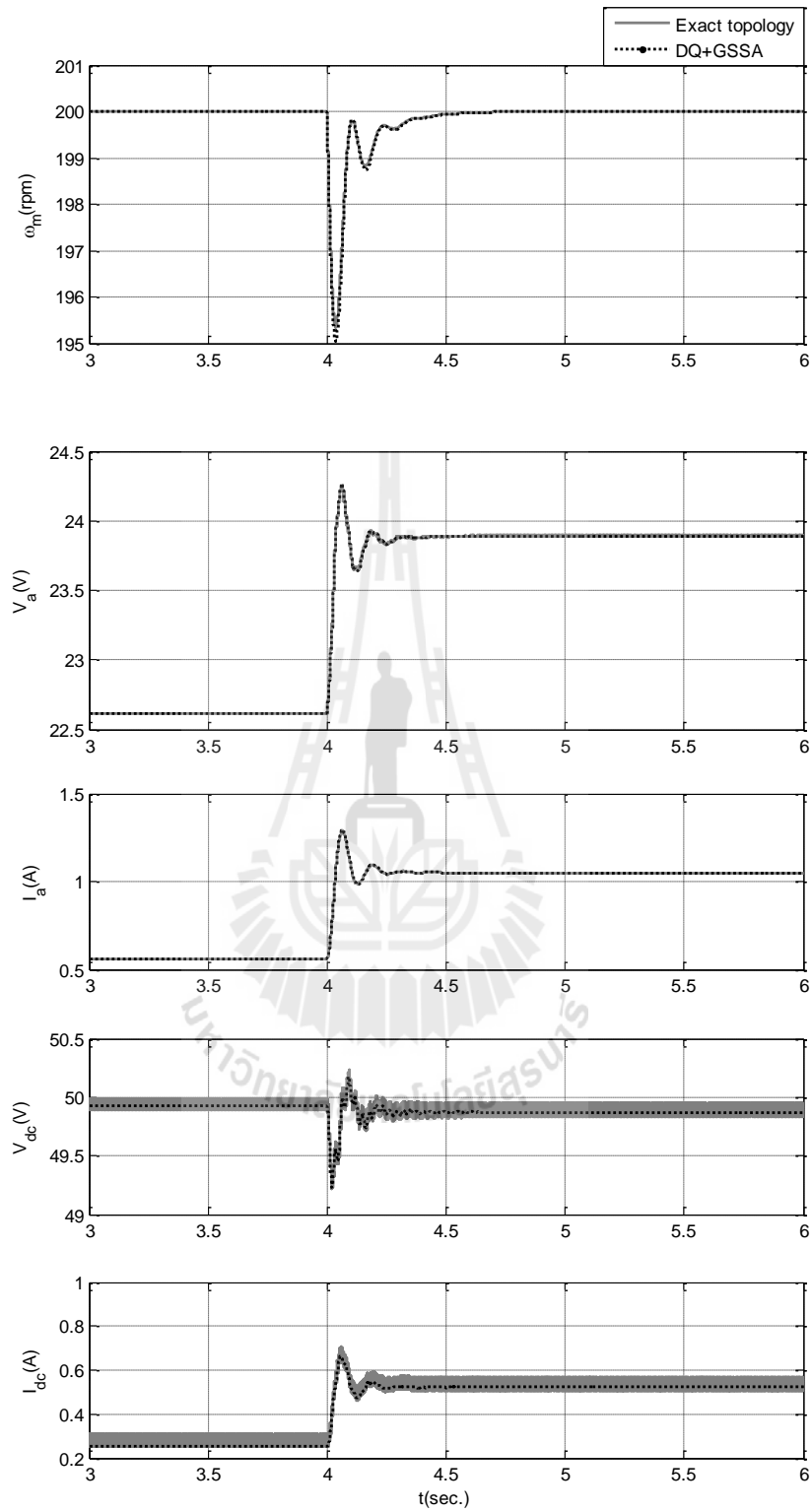
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.22 สำหรับจำลองสถานการณ์ โดยแบ่งการจำลองสถานการณ์ตามความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบดังตารางที่ 2.3 การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องจะดำเนินการโดยทำการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลจาก 0.5 N.m เป็น 1 N.m ที่เวลา 4 วินาที และให้มีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 200 rpm ผลการจำลองสถานการณ์ที่ค่าความถี่ธรรมชาติ 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 rad/s แสดงได้ดังรูปที่ 2.28 ถึง 2.33 ตามลำดับ



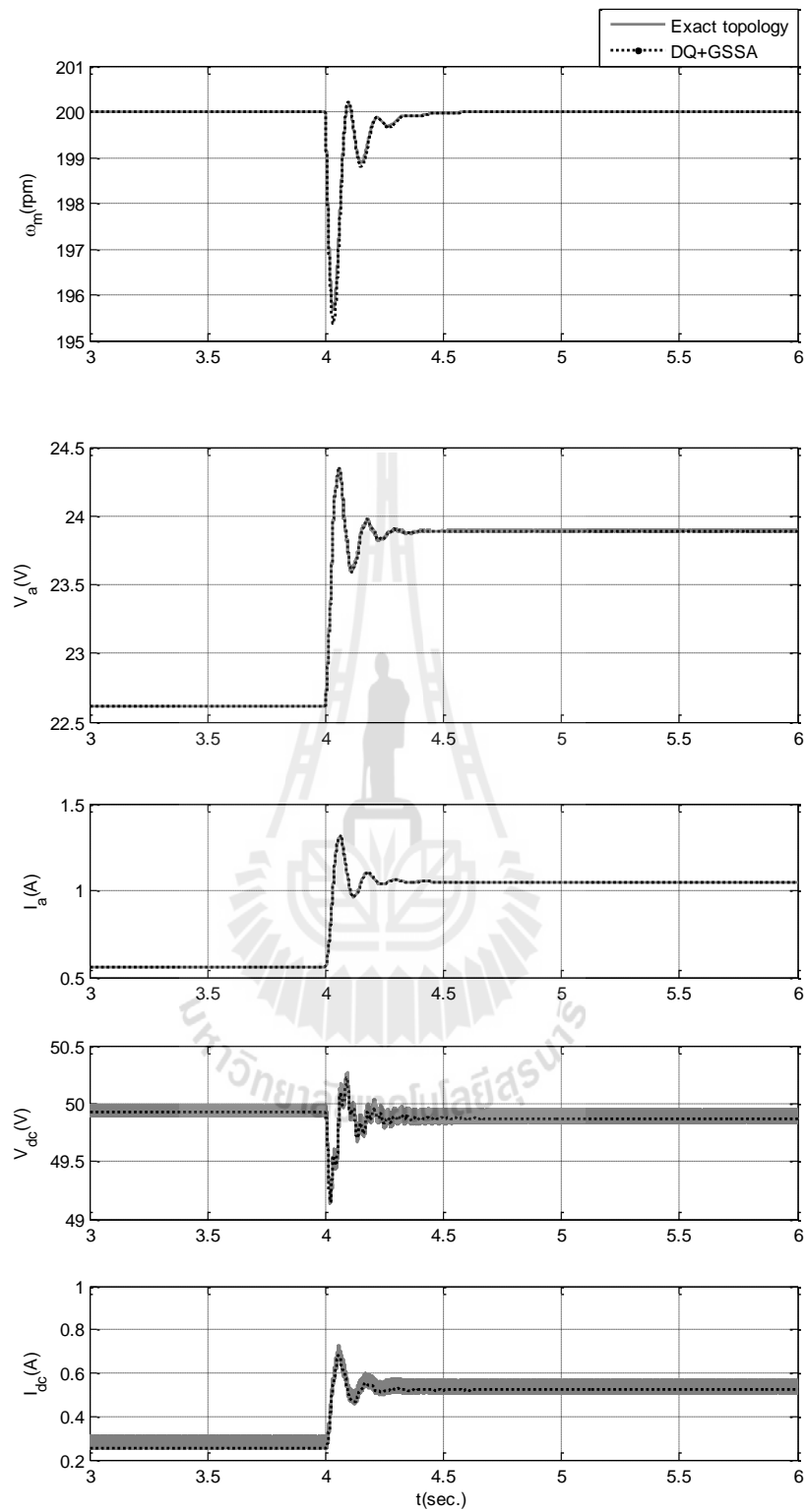
รูปที่ 2.28 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 10 rad/s



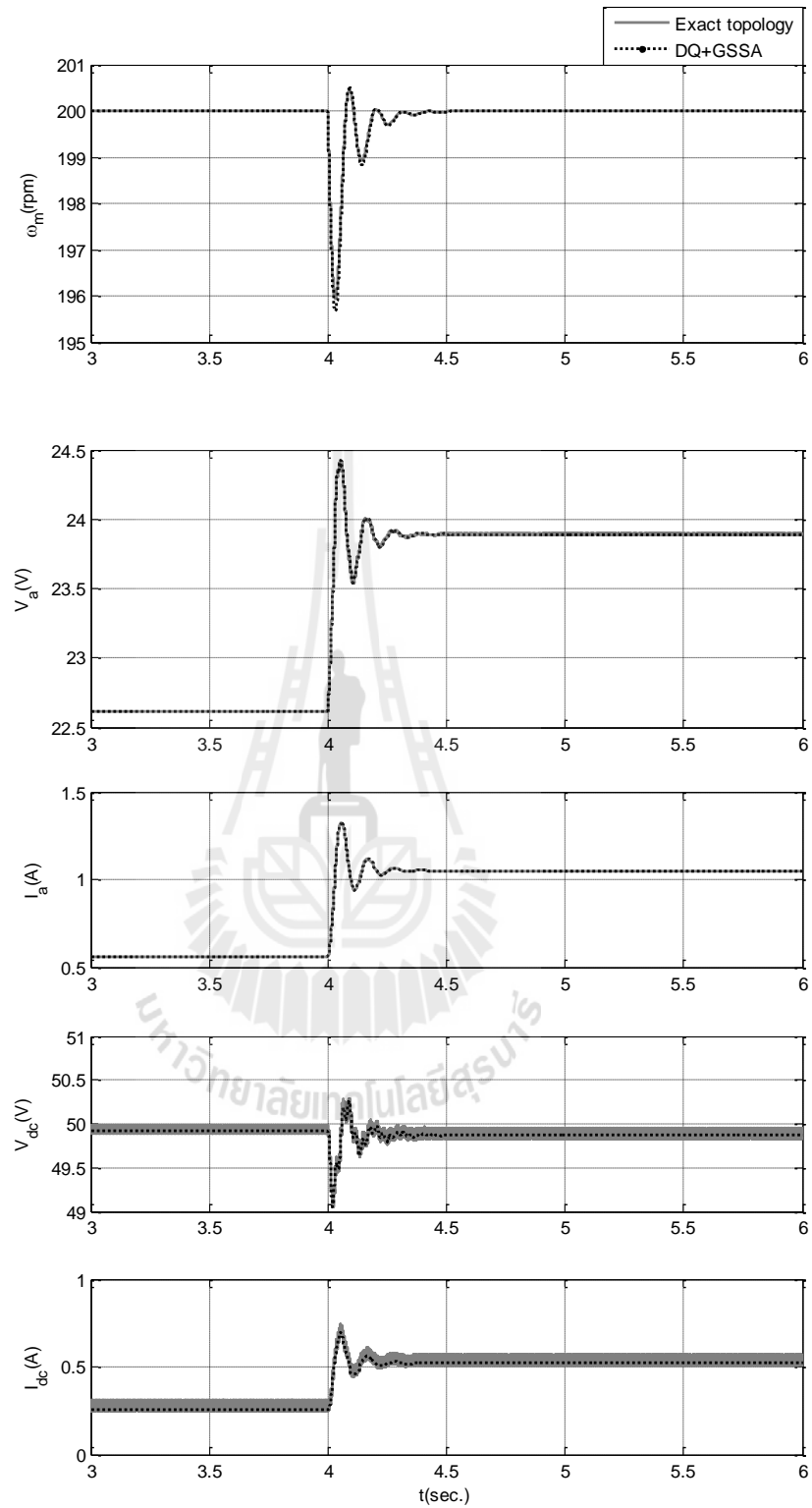
รูปที่ 2.29 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s



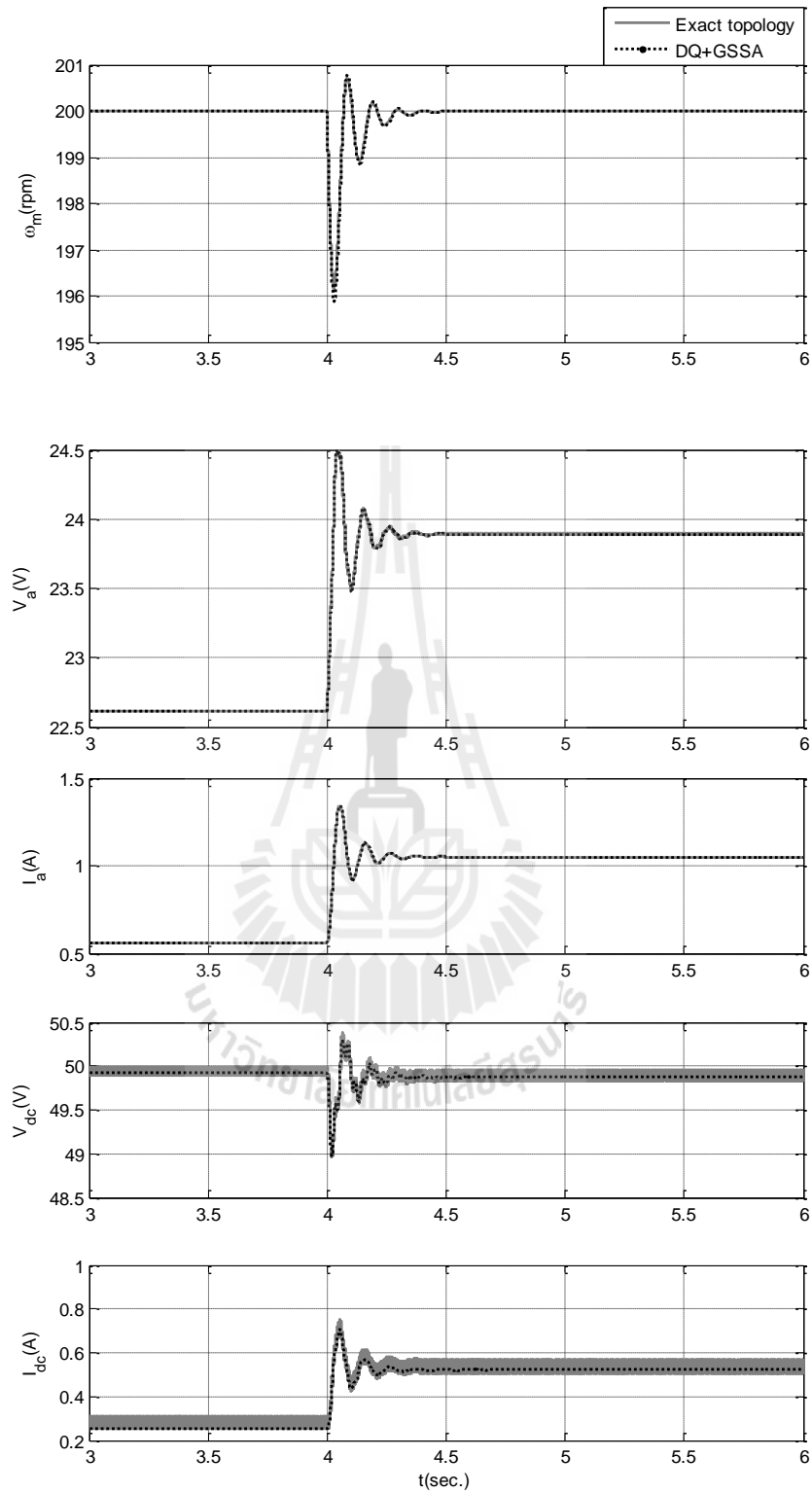
รูปที่ 2.30 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 14 rad/s



รูปที่ 2.31 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s

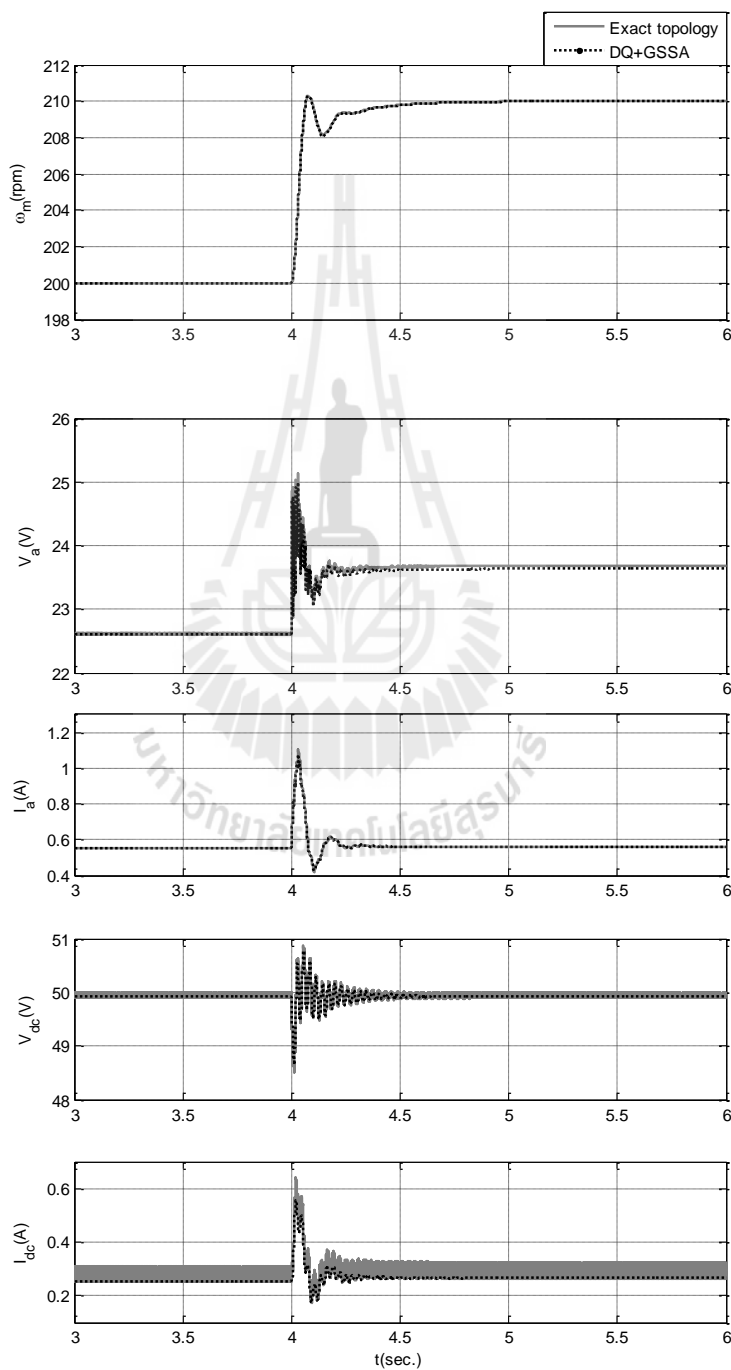


รูปที่ 2.32 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s

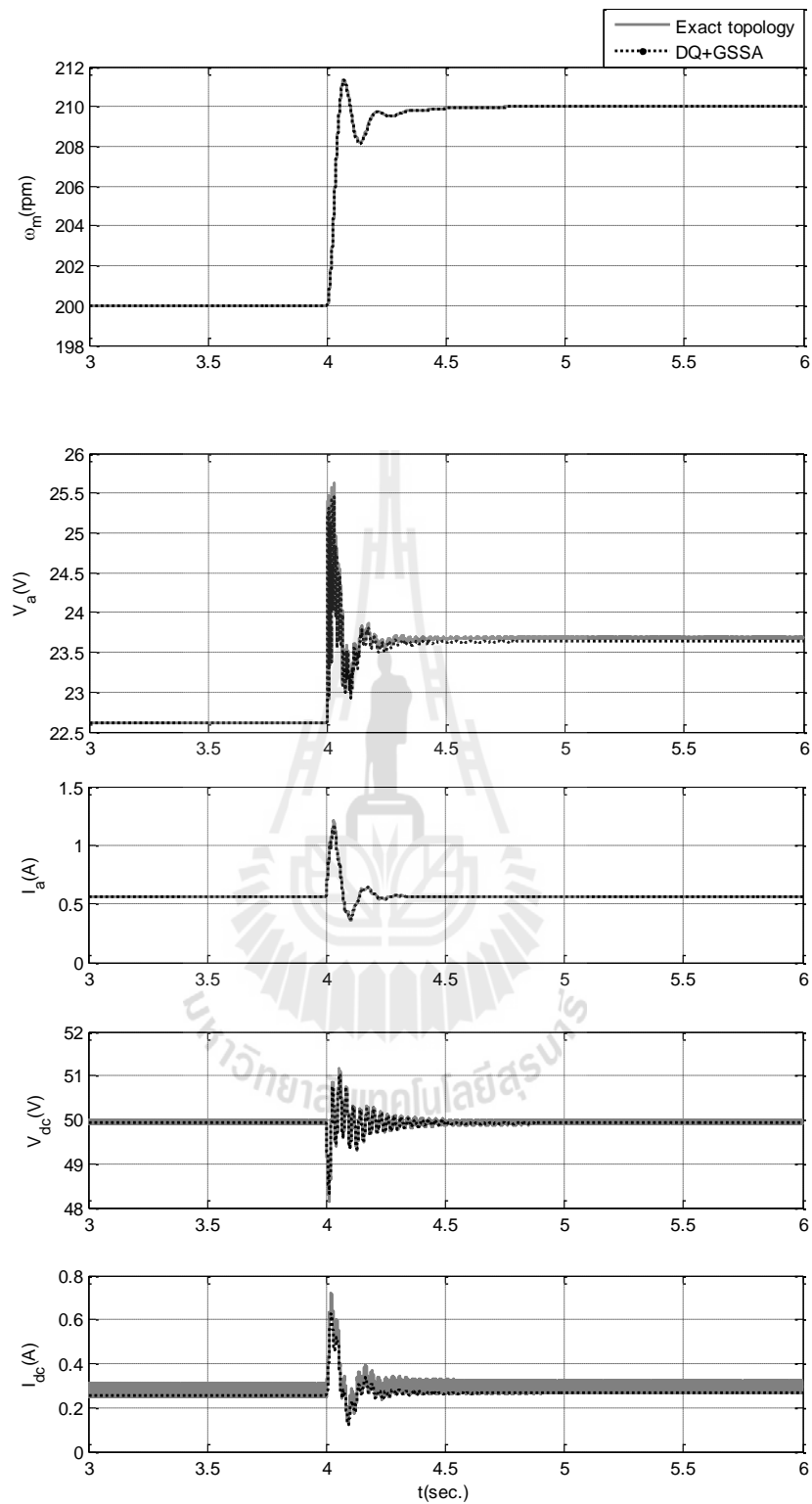


รูปที่ 2.33 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 20 rad/s

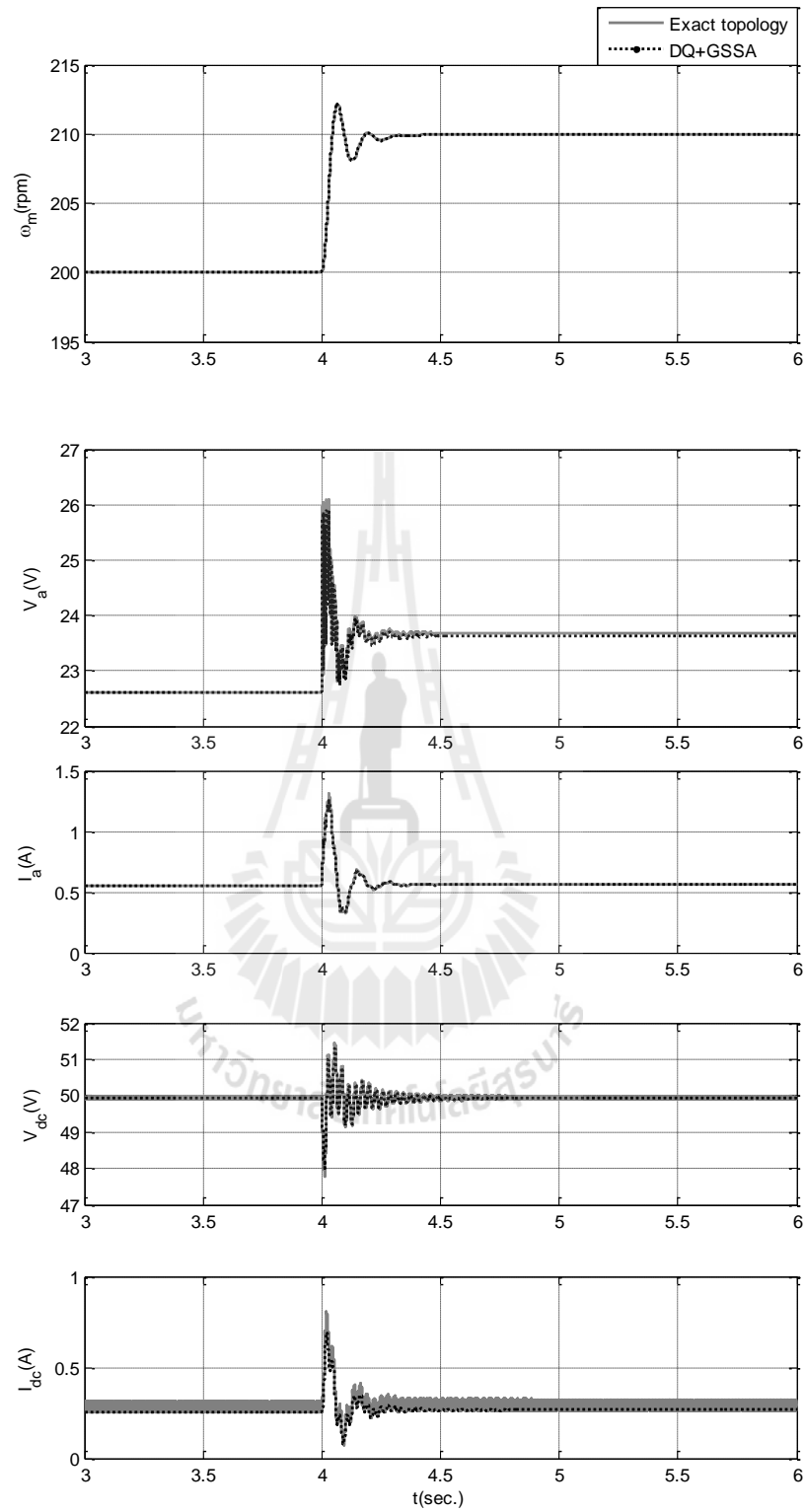
การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจาก 200 rpm เป็น 210 rpm ที่เวลา 4 วินาทีและให้มีโหลดทางกลคงที่เท่ากับ 0.5 N.m จะดำเนินการเช่นเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ที่ผ่านมาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 2.4 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.34 ถึง 2.38 ตามลำดับ



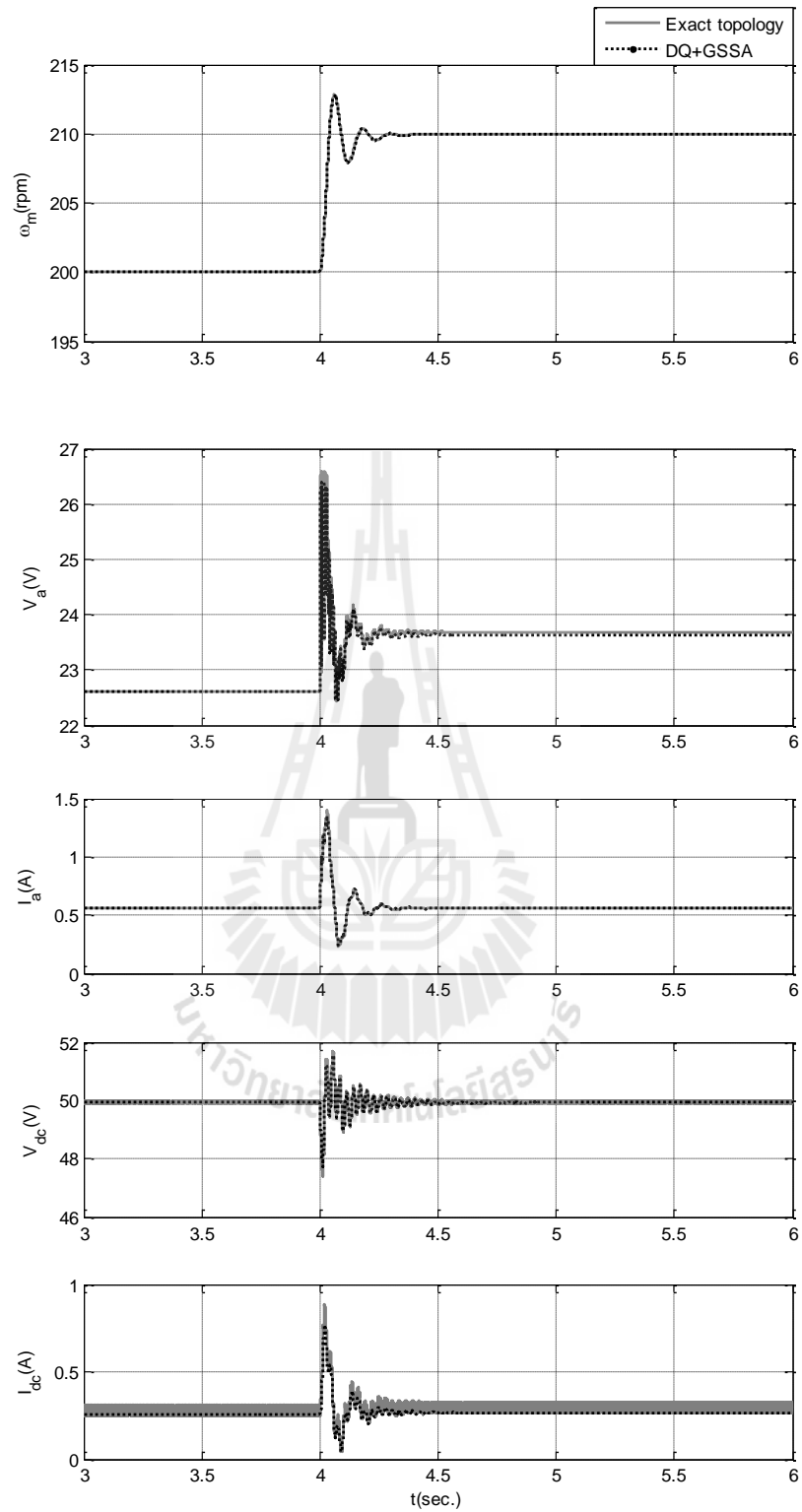
รูปที่ 2.34 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 10 rad/s



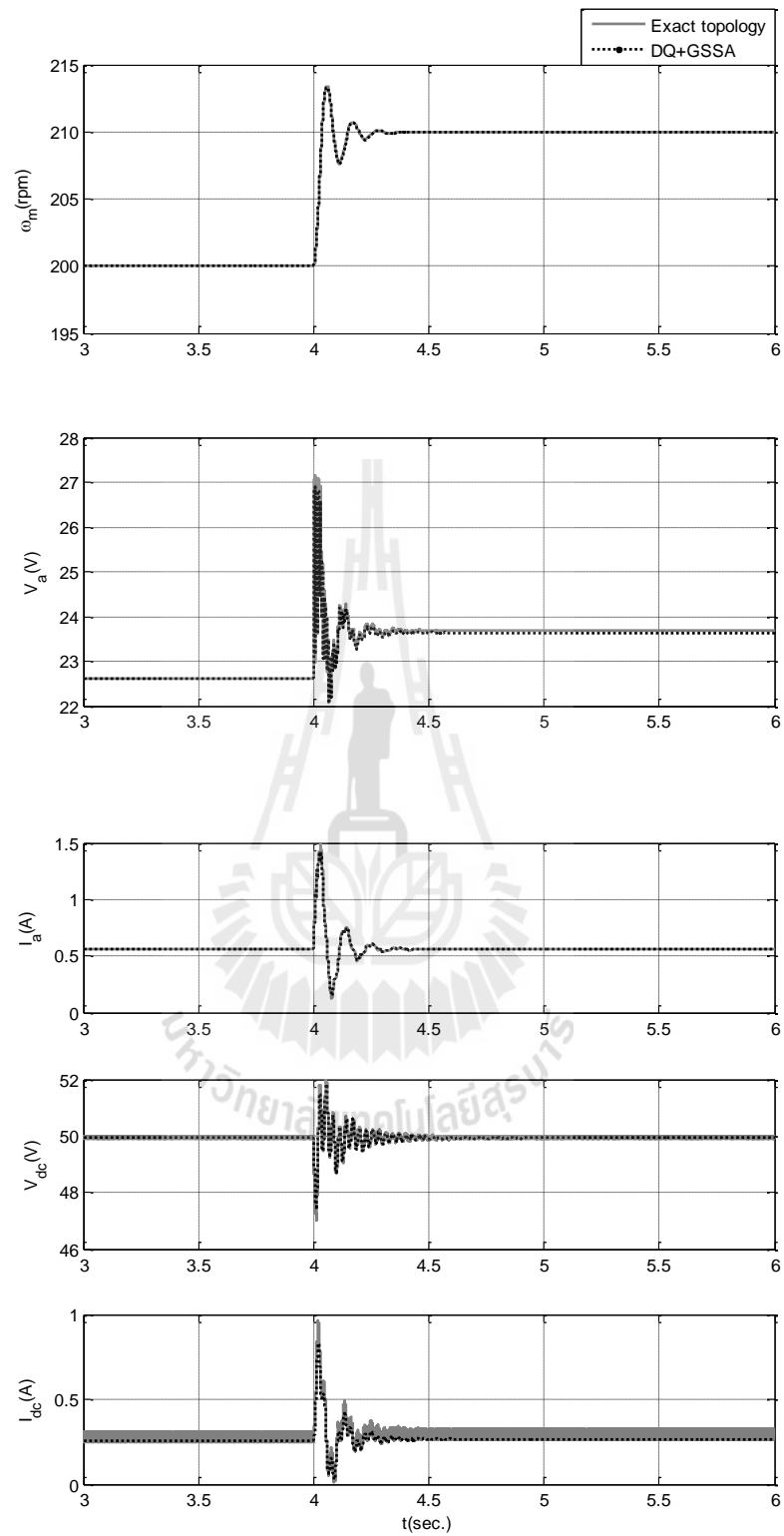
รูปที่ 2.35 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s



รูปที่ 2.36 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่รบกวน 14 rad/s



รูปที่ 2.37 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s



รูปที่ 2.38 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s

การจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 2.34 ถึง 2.38 พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบจะทำให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็วขึ้น แต่มีข้อจำกัดทำให้ไม่สามารถใช้ค่า K_p และ K_i ที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 20 rad/s ได้เนื่องจากจะทำให้การจำลองสถานการณ์อยู่ในโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode, DCM) ซึ่งไม่อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในบทที่ 1

จากการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นในบทนี้มีความถูกต้อง เนื่องจากการจำลองโดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงแบบดิคิ๋วร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่สอดคล้องและคล้อยตามกันแต่อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย เนื่องจากพฤติกรรมของผลตอบสนองทางพลวัตของระบบปกติเป็นแบบไม่เชิงเส้น แต่เพื่อให้สามารถนำแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจึงอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อทำให้แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นแบบจำลองระบบที่มีการควบคุมดังกล่าวจึงสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงในบทที่ 4 โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 4 นั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของอุปกรณ์ชุดทดสอบที่ได้จากการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

2.6 สรุป

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก อาศัยความรู้เบื้องต้นที่ใช้อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดิคิ๋วด้วยวิธีการแปลงของปาร์ค รวมถึงพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมากในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการแปลงของคลาร์กซึ่งเป็นการแปลงปริมาณไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ หลังจากนั้นจึงทำการแปลงปริมาณไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ เป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกน $dq 0$ สำหรับวิธีการแปลงของปาร์คเป็นการแปลงปริมาณไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกน $dq 0$ วิธีการแปลงของปาร์คจึงมีความสำคัญและนิยมใช้มากกว่าวิธีการแปลงของคลาร์ก อีกทั้งยังมีวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่มีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดิซซีเป็นดิซซี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรแปลงผันแบบบดัก จากนั้นจึงได้นำมาพัฒนาต่อโดยการพิจารณาตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองสำหรับระบบที่มีการควบคุมแล้ว แต่แบบจำลองของระบบที่มีการควบคุมดังกล่าวเป็น

แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงได้อาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อทำให้แบบจำลองที่พิสจูจน์ขึ้นเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสจูจน์ขึ้นมีความน่าเชื่อถือสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จึงต้องทำการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง อีกทั้งในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีการดั้งเดิมซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะส่งผลต่อการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกินของระบบ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีคิดิกร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจึงมีประโยชน์อย่างมากสามารถนำไปจำลองสถานการณ์เพื่อดูผลการตอบสนองของการออกแบบตัวควบคุม หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 4

สำหรับงานวิจัยในบทที่ 2 นี้ได้ตีพิมพ์บทความทางวิชาการในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37 ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

จักรกริช ภัคดีโต กองพันธ์ อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น, vol.1, 521 - 524

บทที่ 3

การสร้างชุดทดสอบ

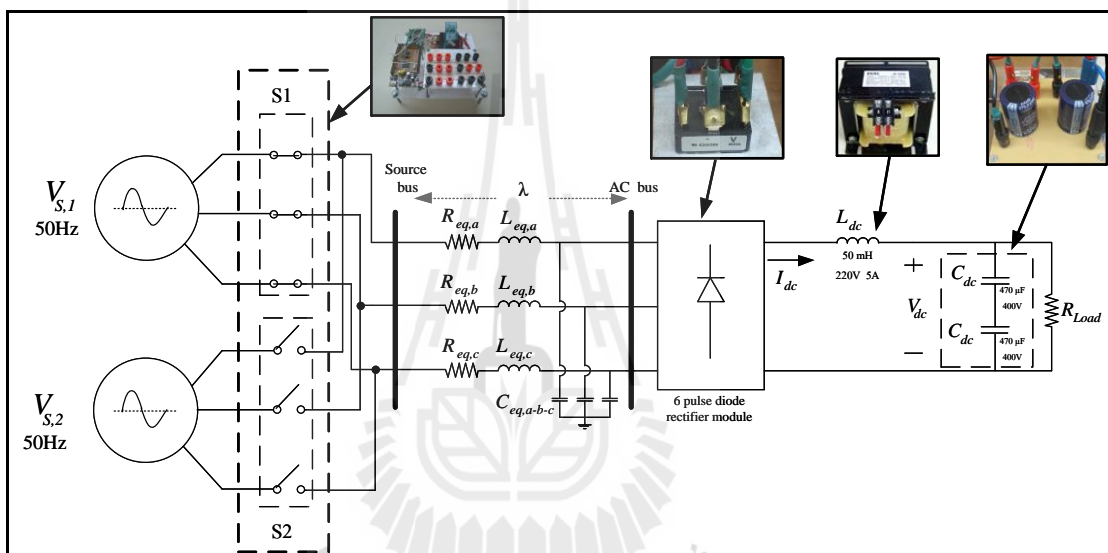
3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นจากบทที่ 2 โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้นได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งคำนวณค่าเจาะจงได้จากแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงอาจไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความจำเป็นในการสร้างชุดทดสอบ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าว ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สำหรับเนื้อหาในบทนี้จึงได้กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ทางฝั่งแหล่งจ่าย และทางฝั่งโหลด โดยทางฝั่งแหล่งจ่ายจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าฟ้ากระแสตรง สำหรับทางฝั่งโหลดจะประกอบด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมซึ่งใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 เป็นตัวควบคุมสัญญาณพัลส์หรือค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในบทนี้ได้นำเสนอเนื้อหาส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การสร้างสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแยกโคดสัญญาณสำหรับสั่งการสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ การสร้างตัวควบคุมแบบพีไอจากไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมทั้งบทนี้ยังได้นำเสนอการตรวจวัดความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยทาโคมิเตอร์ (tachometer) และผลการทดสอบจากวงจรที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น

3.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

3.2.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้จำนวน 2 ชุด โดยมีรีเลย์ (relay) สำหรับการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โมดูลไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองทางฝั่งไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และโหลดของวงจรในที่นี่คือ ตัวต้านทาน



รูปที่ 3.1 วงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 3.1 พบว่ามีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสจำนวน 2 ค่า เนื่องจากในการทดสอบนี้ต้องการหาผลการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงขึ้นบันไดเพื่อประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ สำหรับการเลือกพิกัดของโมดูลวงจรเรียงกระแสผู้วิจัยได้พิจารณาจากโหลดมอเตอร์ที่จะทำการควบคุมความเร็วรอบซึ่งมีพิกัดอยู่ที่ 1 kW 220 V 6.2 A ดังนั้นชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยผู้วิจัยจึงได้เลือกพิกัดของโมดูลวงจรเรียงกระแสที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 500 V พิกัดกระแส 10 A สำหรับการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-1)

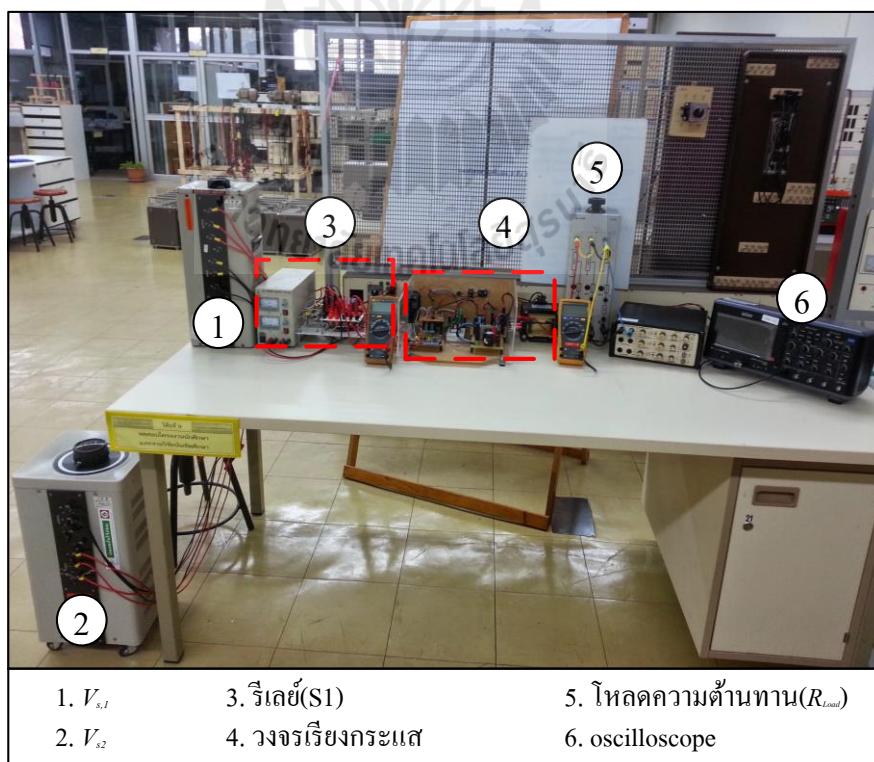
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (3-1)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ V_m คือ แรงดันค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับ

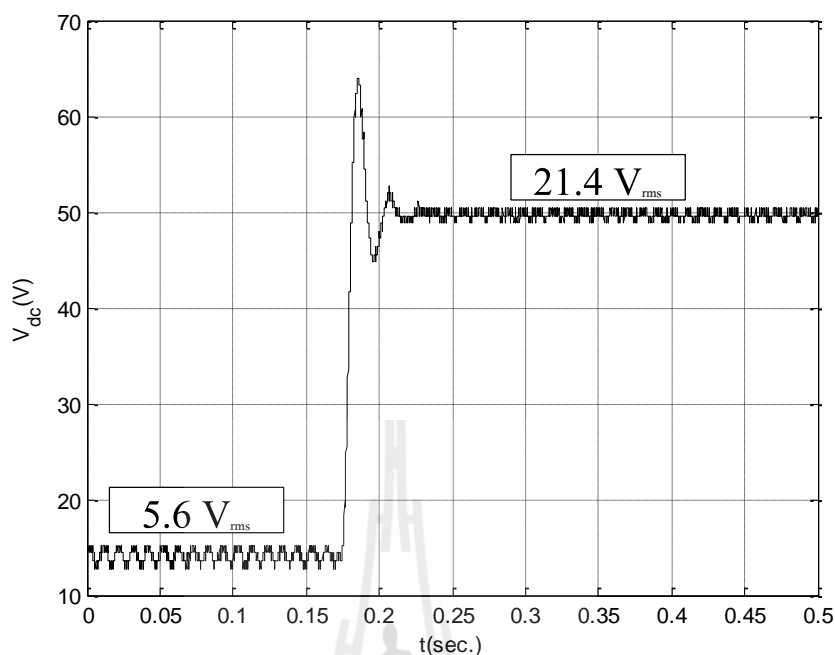
3.2.2 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้จะดำเนินการ โดยการเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แบบขึ้นบันไดเพื่อดูผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยจากสมการที่ (3-1) สามารถคำนวณผลของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะอยู่ตัวเพื่อนำมาตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบจริง

การทดสอบกำหนดให้ $V_{s,1}$ มีค่าเท่ากับ 5.6 V_{rms} ซึ่งจากสมการที่ (3-1) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ $\frac{3\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \times 5.6}{\pi} = 13.09 \text{ V}$ และ $V_{s,2}$ มีค่าเท่ากับ 21.4 V_{rms} จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ $\frac{3\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \times 21.4}{\pi} = 50.06 \text{ V}$ เมื่อกำหนดให้ $R_{Load} = 40 \Omega$ และทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันที่เวลา 0.175 วินาที โดยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตตามค่าดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน



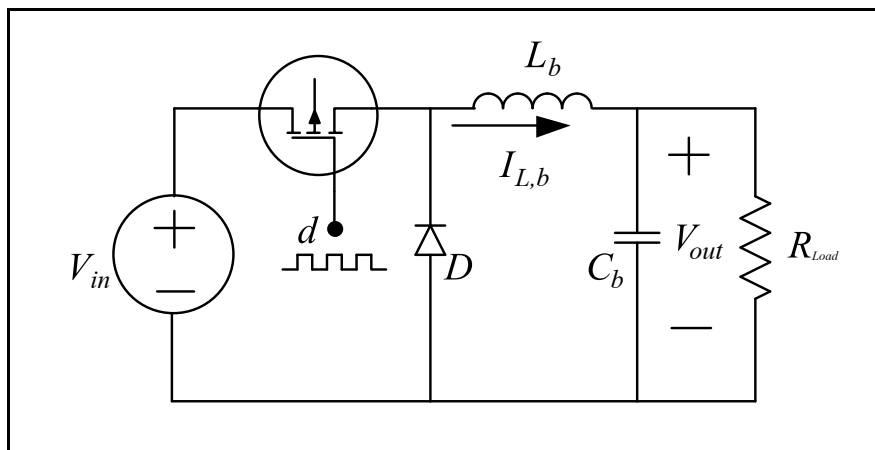
รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 3.3 พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ก่อน 0.175 วินาที มีค่าระดับแรงดันโดยประมาณเท่ากับ 13 V และหลัง 0.175 วินาที มีค่าระดับแรงดันโดยประมาณเท่ากับ 50 V ซึ่งจากการทดสอบดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานที่ได้สร้างขึ้น สามารถนำไปสร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยโดยการปลด R_{Load} เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ และจะแสดงผลการทดสอบเป็นลำดับถัดไป

3.3 วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

3.3.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ชุดสร้างสัญญาณพัลส์หรือค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ชุดวงจรแปลงผันแบบบักก์ และ โหลดความต้านทาน โดยวงจรแปลงผันแบบบักก์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

3.3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

วงจรแปลงผันแบบบัคค์หรือวงจรลดระดับแรงดัน เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต เพื่อให้แรงดันและกระแสทางฝั่งเอาต์พุตมีการกระเพื่อมของสัญญาณให้น้อยที่สุด ซึ่งจะนิยมใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะมีอัตราการลดระดับแรงดันไม่เกิน 100% จากแรงดันอินพุต ตามสมการค่าวัฏจักรหน้าที่ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 2

จากวงจรในรูปที่ 3.4 พบว่าสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ V_{out} (Muhammad H. Rashid) ได้ดังนี้

$$V_{out} = d \cdot V_{in}$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

d คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

การออกแบบอุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์โดยในส่วนแรกจะทำการออกแบบสวิตช์ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้สวิตช์เป็นมอสเฟตเบอร์ W45NM60 แสดงรูปสวิตช์ได้ดังรูปที่ 3.5 โดยมีพิกัดของการทนกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 45A และทนแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 650V เนื่องจากพิกัดแรงดันและกระแสทางฝั่งอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ที่ใช้งานในงานวิจัยนี้มีค่า

เท่ากับ 220V 6.2 A ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้สวิทช์เบอร์ดังกล่าวเพื่อป้องกันกระแส
 กระชากในช่วงการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.5 สวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ในส่วนของคุณค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
 จะต้องทำการออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมการออกแบบความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ ต้อง
 คำนึงถึงริบเบิลของแรงดันหรือแรงดันพลิว ΔV_c (ripple voltage) โดยพิจารณาจากแรงดันที่ตก
 คร่อมโหลด และในทำนองเดียวกันค่าริบเบิลของกระแสหรือกระแสพลิว ΔI_L (ripple current) ซึ่ง
 จะพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด (R_{Load}) โดยสมการที่ใช้ออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ
 และค่าของตัวเก็บประจุ (MUHAMMAD H. RASHID) แสดงได้ดังสมการที่ (3-2) และ (3-3)
 ตามลำดับ

$$L_b = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{\Delta I_{L,b} f V_{in}} \quad (3-2)$$

$$C_b = \frac{\Delta I_{L,b}}{8 f \Delta V_c} \quad (3-3)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุต , V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุต,

f คือ ความถี่ของสวิทช์วงจรแปลงผันแบบบัคค์

ΔI_L คือ ค่ากระแสพลิว , L_b คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

ΔV_c คือ ค่าแรงดันพลิว , C_b คือ ค่าตัวเก็บประจุ

สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ กำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตในการออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก์นี้จะมีค่าเท่ากับ 200 V และแรงดันเอาต์พุตมีค่าตั้งแต่ 20 V ถึง 185 V โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบดังนี้

$$V_{in} = 200 \text{ V}, \Delta V_c \leq 7 \text{ mV}$$

$$V_{out} = 20 \text{ V} - 185 \text{ V}, \Delta I_L \leq 0.1 \text{ A}$$

$$f = 10 \text{ kHz}$$

สำหรับการออกแบบนี้จะพิจารณาที่แรงดันเอาต์พุตพิกัดที่ได้กำหนดไว้เพื่อที่จะได้คำนวณค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุที่สามารถรองรับค่าพิกัดได้การออกแบบแสดงได้ดังนี้

$$L_b = \frac{185(200 - 185)}{0.1 \times 10 \times 10^3 \times 200} = 0.013875 \text{ H}$$

$$C_b = \frac{0.1}{8 \times 10 \times 10^3 \times 7 \times 10^{-3}} = 178.57 \text{ } \mu\text{F}$$

จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ค่าความเหนี่ยวนำคือ 15 mH และค่าตัวเก็บประจุคือ 180 μF นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาค่ากระแสพิกัดของโหลดตัวต้านทาน R_{Load} ของวงจรแปลงผันแบบบัก์สามารถทนกระแสพิกัดได้สูงสุด 3 A ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต้องไม่เกิน 3 A ส่วนแรงดันพิกัดสำหรับค่าตัวเก็บประจุต้องไม่เกินแรงดันเอาต์พุตที่ออกมาคือ 185 V สำหรับค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะแสดงรายละเอียดดังนี้

- $L_b = 15 \text{ mH}$ พิกัดกระแส 5 A แรงดันไฟฟ้า 220 V แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



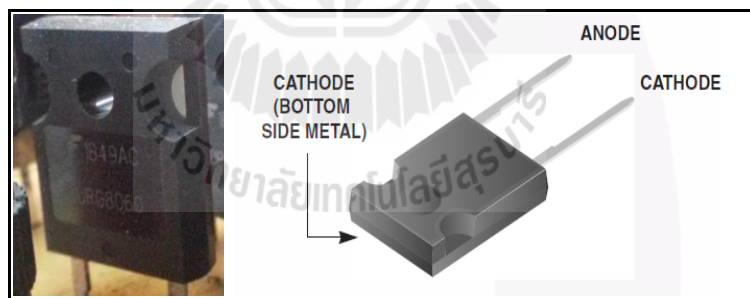
รูปที่ 3.6 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก์

- $C_b = 180 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 400 V แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์

ในส่วนต่อไปจะพิจารณาไดโอด D ของวงจรแปลงผันแบบบักก์แสดงในรูปที่ 3.8 ค่าพิกัดแรงดันเอาต์พุตต้องไม่เกินกว่าแรงดันอินพุตคือ 200 V เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ RURG8060 สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ 80 A และทนแรงดันไฟฟ้าได้ 600 V ซึ่งเพียงพอสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ในงานวิจัย

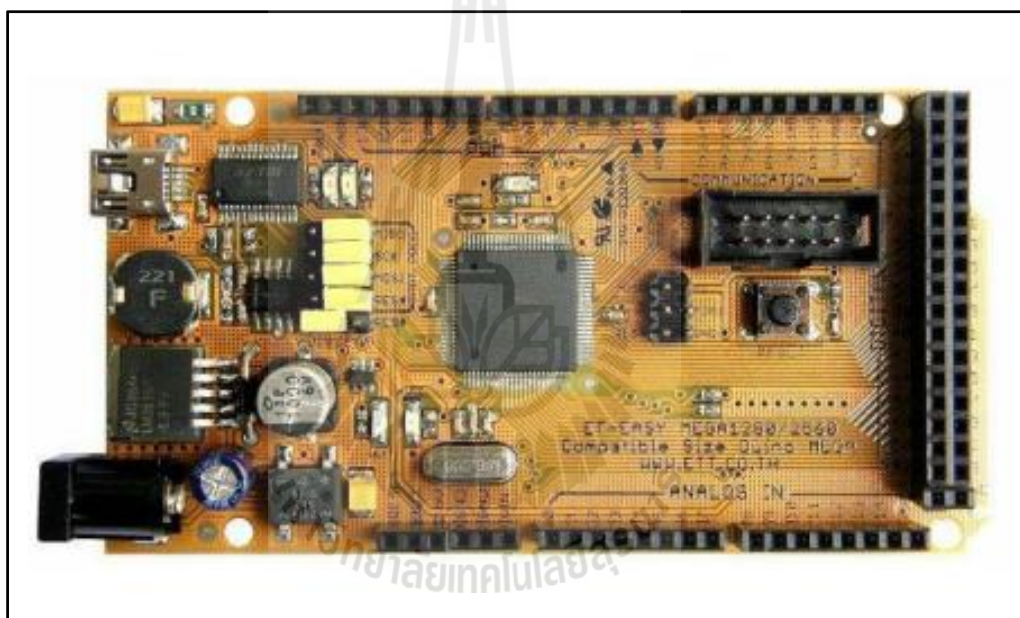


รูปที่ 3.8 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบักก์

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการออกแบบอุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ ได้แก่ สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด โดยในการควบคุม สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์นั้นจะอาศัยสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อ 3.3.3

3.3.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET - EASY MEGA1280 (DUINO MEGA) ของบริษัททีทีที ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega1280 ที่เป็นชิพตระกูล AVR ของบริษัท Atmel รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งาน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาให้ Arduino สามารถรองรับการใช้งานขนาดใหญ่ขึ้นโดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้ชิพ AVR รุ่นใหญ่ขึ้น เพื่อให้จำนวนพอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต, พอร์ตดิจิตอล, พอร์ตอนาล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM และพอร์ตสื่อสารอนุกรม และขนาดความจำที่เพิ่มมากกว่าเดิม ทางทีทีทีจึงได้นำ ATmega1280 มาพัฒนาเป็นบอร์ดโดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA1280 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 บอร์ด ET-EASY Atmega1280

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับบอร์ด ET-EASY MEGA1280

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
- สถาปัตยกรรมแบบ RISC
 - มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผล คำสั่ง
 - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว

- ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 เมกะเฮิร်ซ (MHz)
- หน่วยความจำ
 - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโหนดโปรแกรมขนาด 128 กิโลไบต์เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแบบ EEPROM ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียนลบได้ 100,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแรมชนิดเอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
 - เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปีที่อุณหภูมิ 85°C และกว่า 100 ปีที่อุณหภูมิ 25°C
- มีระบบโปรแกรมตัวเองอยู่ในตัวชิพ
- สามารถทำการอ่านขณะเขียนได้จริง สามารถถือการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
- มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std.1149.1 compliant)
- คุณสมบัติเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานจากกัน ได้ 2 โหมดคือ Prescaler และ Capture
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่แยกโหมดการทำงานได้ 3 โหมด คือ Prescaler, Compare และ Capture
 - มีตัวนับเวลาจริง (Real Time Counter) ที่แยกวงจรกำหนดความถี่ได้
 - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณ ที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
 - มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
 - มีตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
 - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ 4 พอร์ต
 - เชื่อมประสานอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งการเป็นมาสเตอร์และสเลฟ (Master/Slave)
 - มีการเชื่อมต่อประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้นแบบส่งข้อมูลแบบเรียงไบต์ (Byte Oriented)
 - มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
 - มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกอยู่ในตัว
 - มีการรองรับการขัดจังหวะและการเวก-อัพ (Wake - up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับขาชิพ

- คุณสมบัติพิเศษ
 - มีระบบเริ่มเมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับการเกิด บราวน์เอาต์ (Brown - out) ที่สามารถกำหนดการทำงานได้
 - มีตัวตรวจหาความถี่โดยตรงของออสซิลเลเตอร์ในตัว (Internal Calibrated Oscillator)
 - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายนอกและภายใน (External and Internal Interrupt Source)
 - มีโหมดการทำงานสลีป 6 แบบ คือ Idle, ADC Noise Redution, Power - save, Power-down, Standby, และ Extended Standby
- อินพุต/เอาต์พุต และตัวถัง
 - มีขาของอินพุต/เอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 ขา
 - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
- ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40°C ถึง 85°C
- การใช้พลังงาน
 - โหมดการทำงาน : ที่ 1 MHz ต้องการแรงดัน 1.8 V กระแส 500 μA
 - โหมดเพาเวอร์ดาวน์ (Power - down) ต้องการกระแสเพียง 0.1 μA ที่แรงดัน 1.8 V

การใช้งานพอร์ตสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

สำหรับในพอร์ตนี้มีความสำคัญในการรับค่าจากชุดทดสอบโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR พอร์ตแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (Analog to digital converter) ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5 V ซึ่งหมายถึงเมื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลและจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีพอร์ต ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณคือ ADC0-ADC15 สำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้เพียง 1 ช่องสัญญาณคือ ADC0 ผลการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล คำนวณได้จากสมการที่ (3-4)

$$ADC = \frac{V_{tachometer} \cdot 1024}{V_{ref}} \quad (3-4)$$

โดยที่ $V_{tachometer}$ คือ แรงดันจากทาโคมิเตอร์(เซนเซอร์วัดความเร็วรอบ)

V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

การสร้างสัญญาณ PWM กับไทมเมอร์/เคาเตอร์ 1

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จะใช้โหมดการทำงาน ได้แก่ Phase and Frequency Correct PWM การสร้างสัญญาณ Phase and Frequency Correct Pulse Width Modulation เป็นการสร้างเฟสและความถี่ของสัญญาณ PWM ความละเอียดสูง โดยความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-5)

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk}}{2 \cdot N \cdot TOP} \quad (3-5)$$

โดยที่ N คือ ค่าปริสเกลเลอร์ซึ่งมีค่า 1, 8, 64, 256, 1024 โดยในที่นี้จะใช้ $N = 1$

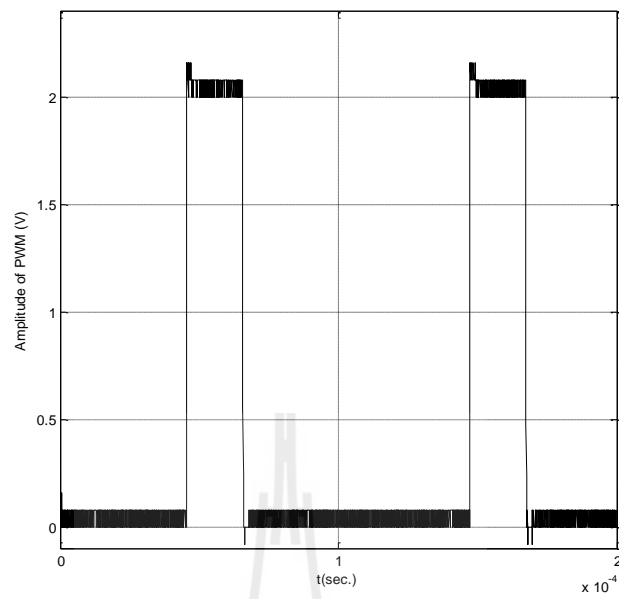
TOP คือ ค่าที่กำหนดให้รีจิสเตอร์ IRC1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

f_{clk} คือ ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่ต้องใช้ในที่นี้ใช้ 16 MHz

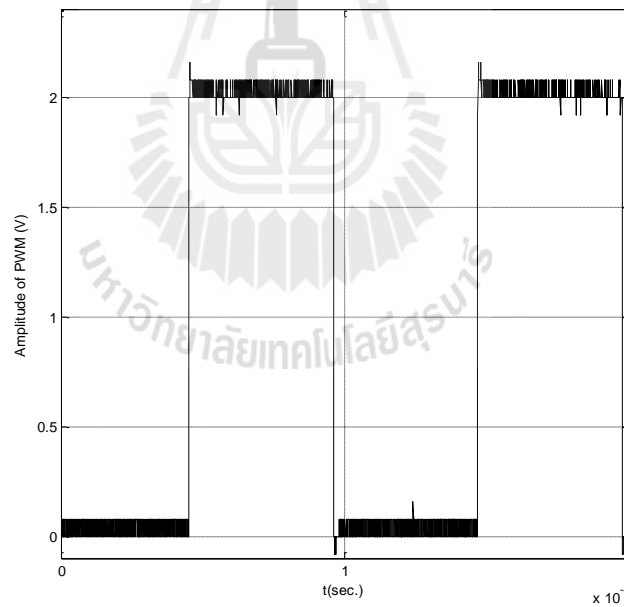
สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ความถี่ของสวิทซ์เท่ากับ 10 kHz โดยจะสามารถคำนวณค่า TOP หรือค่า IRC1 ได้จากสมการที่ (3-6)

$$TOP = \frac{16 \times 10^6}{2 \times 1 \times 10 \times 10^3} = 800 \quad (3-6)$$

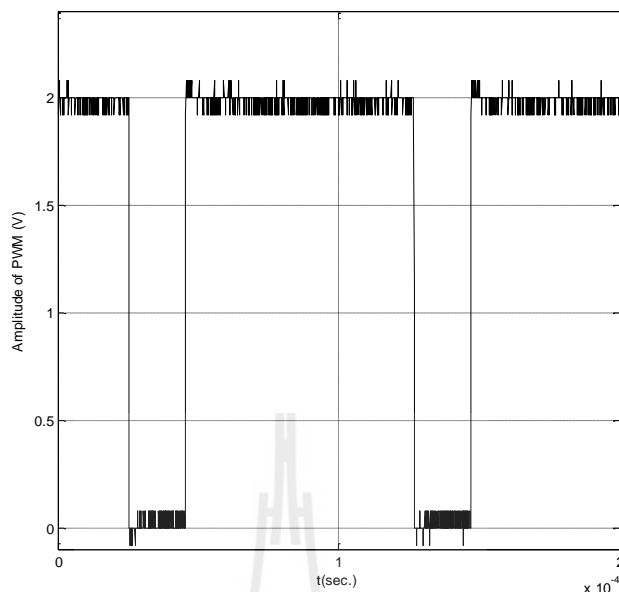
จากการออกแบบได้ค่า TOP หรือค่า IRC1 เท่ากับ 800 ซึ่งจะให้ความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 10 kHz ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 30% , 50% และ 80% ผู้วิจัยได้ใช้ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) เพื่อตรวจสอบสัญญาณซึ่งแสดงในรูปที่ 3.10 ถึง 3.12 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 20%



รูปที่ 3.11 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 50%



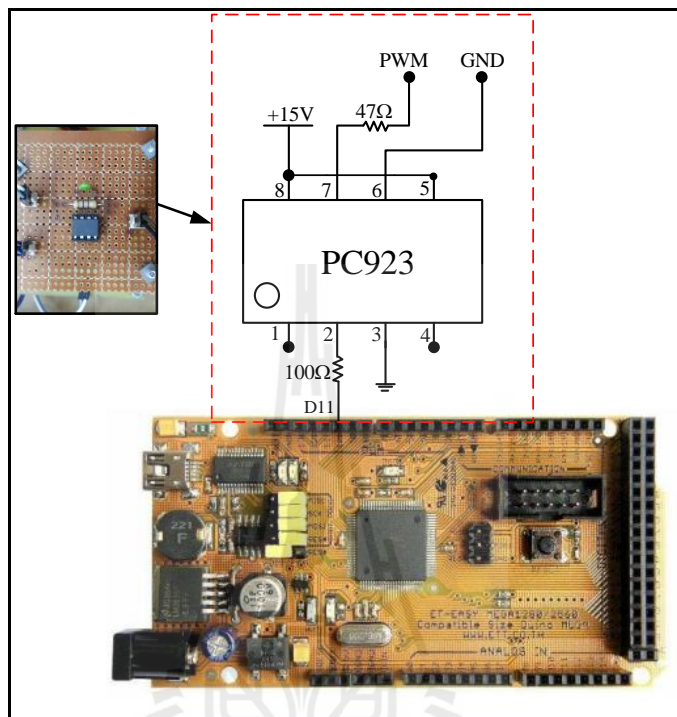
รูปที่ 3.12 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 80%

จากรูปที่ 3.10 ถึง 3.12 สังเกตได้ว่าลักษณะสัญญาณพัลส์ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีลักษณะตรงตามทีออกแบบไว้ นั่นคือ ที่ 10 kHz และมีความกว้างของสัญญาณตรงตามที่ได้ระบุไว้ สำหรับรายละเอียดโปรแกรมในการสร้างสัญญาณพัลส์สามารถศึกษาได้ในภาคผนวก ง ดังนั้นในลำดับถัดไปคือ การนำสัญญาณพัลส์ที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสั่งการสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ แต่เนื่องจากมอสเฟตเบอร์ W45NM60 ต้องใช้แรงดันที่มีค่าอย่างต่ำ 12 V ขึ้นไปสวิทช์จึงจะทำงาน อีกทั้งวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงจรไฟฟ้าแรงต่ำจึงต้องมีการแยกกราวด์ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้งานวงจรจุดชนวนสวิทช์ด้วยไอซีเบอร์ PC923 ของบริษัทซาร์ฟ ไอซีเบอร์ดังกล่าวจะทำหน้าที่ขยายแรงดันของสัญญาณพัลส์ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และสามารถแยกกราวด์ระหว่างวงจรไฟฟ้าแรงต่ำและวงจรไฟฟ้าแรงสูงได้ในตัวเดียวกัน โดยจะอธิบายการต่อวงจรในหัวข้อถัดไป

3.3.4 วงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

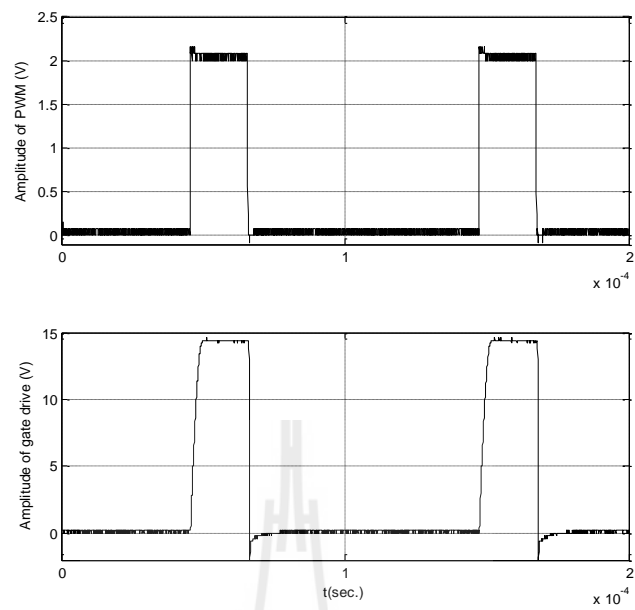
สำหรับในงานวิจัยนี้การสร้างวงจรจุดชนวนสวิทช์เพื่อทำการควบคุมสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และทำการแยกกราวด์ในส่วนของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำในที่นี้คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ออกจากวงจรไฟฟ้าแรงสูงที่นี้คือ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อที่จะไม่ให้กราวด์ของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำและกราวด์ของวงจรไฟฟ้าแรงสูงเชื่อมกัน ถ้าหากเกิดการใช้กราวด์

ร่วมกันจะทำให้เกิดอันตรายต่อส่วนของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำได้ สำหรับวงจรจุดชนวนสวิทช์จะใช้ ไอซีเบอร์ PC923 ซึ่งได้แสดงการต่อวงจรร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 ดังนี้

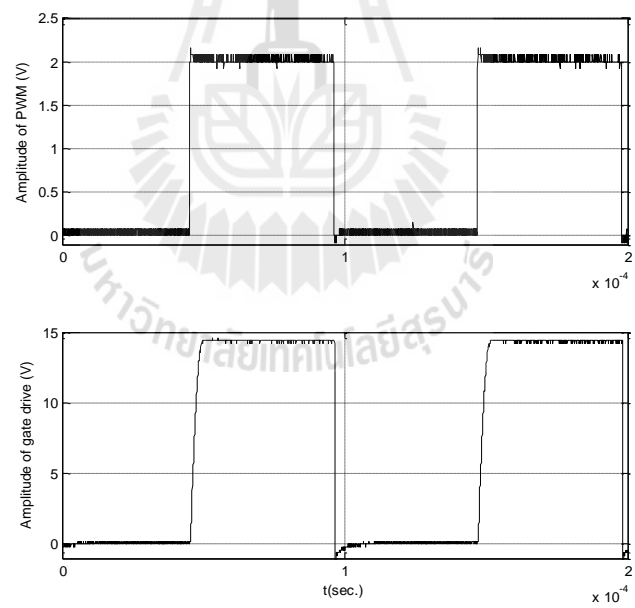


รูปที่ 3.13 วงจรร่วมระหว่างวงจรจุดชนวนเท่ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

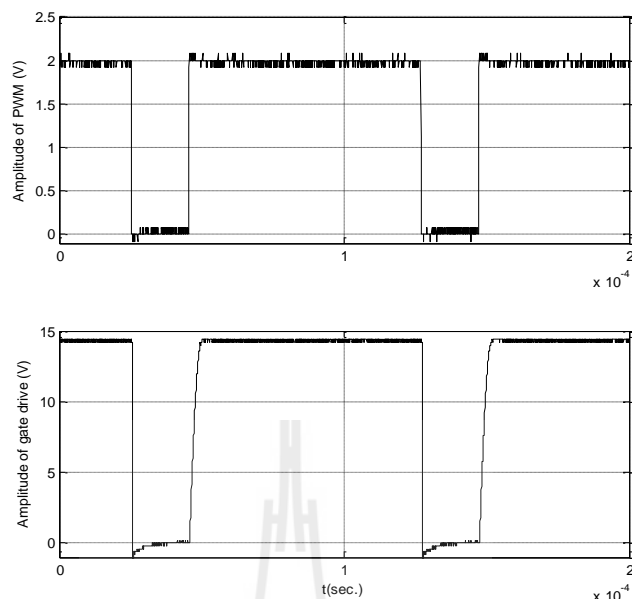
จากการต่อวงจรในรูปที่ 3.13 เพื่อเป็นการยืนยันขนาดแรงดันที่ได้จากวงจรจุดชนวนสวิทช์และลักษณะรูปสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรถัดไป โดยกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าเท่ากับ 20% , 50% และ 80% ซึ่งจะได้ผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ถึง 3.16 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 20%



รูปที่ 3.15 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50%

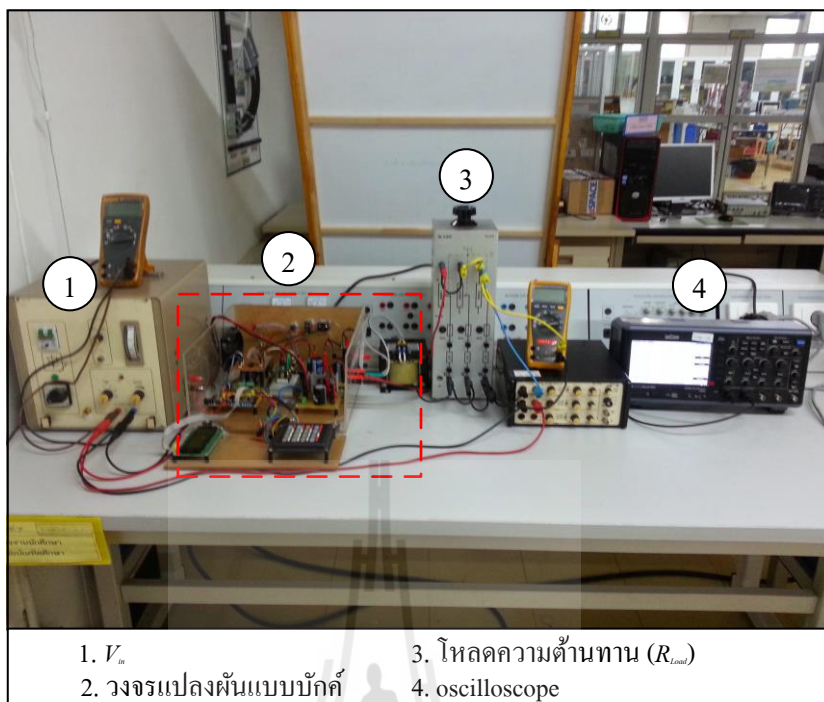


รูปที่ 3.16 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 80%

ผลการทดสอบวงจรจุดชนวนสวิทช์จากรูปที่ 3.14 ถึง 3.16 พบว่าให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่มีค่าตรงกับค่าวัฏจักรหน้าที่จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และมีความถี่ 10 kHz เท่ากัน ดังนั้นสัญญาณจากวงจรจุดชนวนสวิทช์ดังกล่าวสามารถนำไปสั่งการสวิทช์วงจรแปลงผันแบบบักค์ เนื่องจากด้วยค่าแรงดันที่ออกจากวงจรจุดชนวนมีค่าโดยประมาณ 15 V ซึ่งเพียงพอที่จะสั่งงานสวิทช์ให้ทำงานได้

3.3.5 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

สำหรับหัวข้อที่ 3.3 เป็นการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานซึ่งได้นำเสนอถึงการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ และได้ยังคงกล่าวถึงการสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งการสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ เพื่อให้เห็นถึงผลการตอบสนองของวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักค์โดยชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

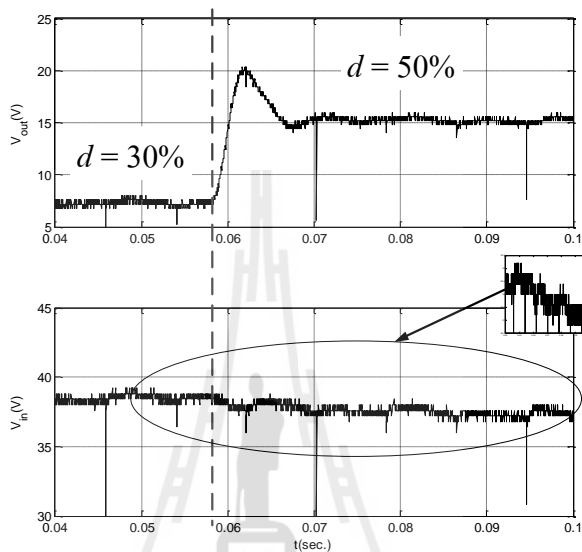
จากรูปที่ 3.17 หมายเลข 1 คือ V_{in} ซึ่งเป็นแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ หมายเลข 2 คือ วงจรแปลงผันแบบบักก์ หมายเลข 3 คือ โหลดความต้านทาน และ หมายเลข 4 คือ ออสซิลโลสโคปใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณแรงดันเพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลการตอบสนองซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูล (flash drive) โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจรแปลงผันแบบบักก์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
V_{in}	40 V	แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$L_b (\Delta I_L \leq 0.1A)$	15 mH	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$C_b (\Delta V_c \leq 7mV)$	180 μF	ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์
R_{Load}	100 Ω	โหลดตัวต้านทาน

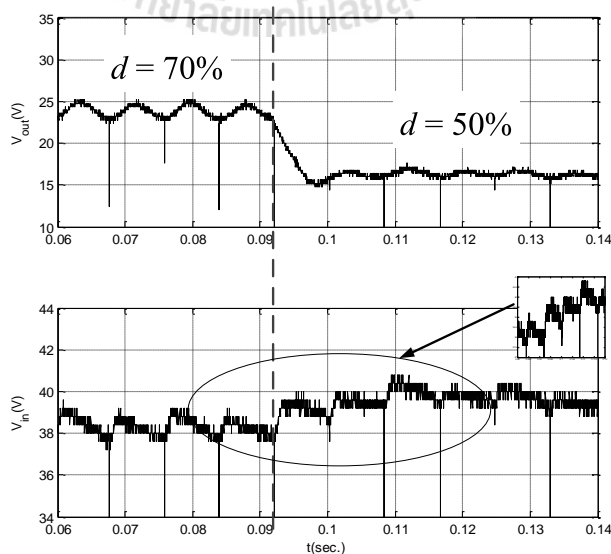
สำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่แบบขั้นบันไดเพื่อดูผลการตอบสนองและการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุต โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

1. ค่าวัฏจักรหน้าที่เปลี่ยนแปลงจาก 30% เป็น 50%



รูปที่ 3.18 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30% เป็น 50%

2. ค่าวัฏจักรหน้าที่เปลี่ยนแปลงจาก 70% เป็น 50%



รูปที่ 3.19 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 70% เป็น 50%

ผลการตอบสนองจากวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งในรูปที่ 3.18 และ 3.19 จะเห็นได้ว่า วงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่สร้างขึ้น สามารถทำงานได้ตรงตามค่าวัฏจักรหน้าที่ที่กำหนด โดยจากรูปที่ 3.18 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30% เป็น 50% หากคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตจากแรงดันอินพุตที่มีค่าเท่ากับ 40 V จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 12 V และ 20 V ตามลำดับ และจากรูปที่ 3.19 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 70% เป็น 50% หากคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตจะได้ 28 V และ 20 V ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเนื่องจากการสร้างชุดอุปกรณ์ในทางปฏิบัติอาจมีการผิดเพี้ยนจากแรงดันที่ตกรวมอุปกรณ์ตัวต่าง ๆ ไม่เหมือนในอุดมคติ ดังนั้นวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีโพลเป็นตัวด้านทานจึงสามารถนำไปสร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ได้ในอนาคตโดยลดโพลตัวด้านทานออกเพื่อนำวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุม ซึ่งจะนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะได้กล่าวเป็นลำดับถัดไปในหัวข้อที่ 3.4

3.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุมใช้สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

3.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกดังแสดงรูปวงจรในบทที่ 2 มีส่วนประกอบ 2 ส่วนหลักคือ แหล่งจ่ายและโพล ส่วนประกอบทางด้านแหล่งจ่ายคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านวงจรสมมูลสายส่งเพื่อเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และส่วนประกอบทางด้านโพลคือ วงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุมซึ่งใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอโดยมีคำสั่งโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อ 3.4.2 และส่วนสำคัญอีกประการหนึ่งในการสร้างชุดทดสอบสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือ การรับค่าหรืออ่านค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งจะเข้าสู่กระบวนการของตัวควบคุมพีไอต่อไป สำหรับการอ่านค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.4.3 เป็นลำดับถัดไป

3.4.2 การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

สำหรับการสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในงานวิจัยนี้อาศัยพื้นฐานการนำตัวควบคุมทั้ง 2 แบบมารวมกันคือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional controller) และตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) มารวมกันซึ่งจะมีข้อดีคือ สามารถปรับปรุงค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลดน้อยลงจนหมดไป โดยเมื่อมีตัวควบคุมต้องไม่ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง ตัวควบคุมพีไอสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (3-7)

$$\omega_m = K_p \omega_{m,error} + K_i \int \omega_{m,error} dt \quad (3-7)$$

โดยที่ ω_m คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ
 K_p คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนในตัวควบคุมพีไอ
 K_i คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในตัวควบคุมพีไอ
 $\omega_{m,error}$ คือ สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมพีไอ

จากสมการที่ (3-7) เป็นสมการที่ต่อเนื่องทางเวลาซึ่งไม่สามารถเขียนในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เนื่องจากการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีลักษณะเป็นแบบสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) ดังนั้นจำเป็นต้องสร้างสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาเพื่อให้สามารถเขียนเป็นโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการหาสมการเวลาที่ไม่ต่อเนื่องแสดงได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาสมการตัวควบคุมแบบพีไอในช่วงเวลาที่ต่อเนื่องจากสมการที่ (3-7)

ขั้นตอนที่ 2 แก่หาอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (3-7) แสดงได้ดังสมการที่ (3-8)

$$\frac{d}{dt} \omega_m = K_p \frac{d}{dt} \omega_{m,error} + K_i \omega_{m,error} \quad (3-8)$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้ $dt = T_i$ เมื่อ T_i คือ ค่าสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และอนุพันธ์ของความเร็วจึงและอนุพันธ์ของความเร็วจึงผิดพลาดเพื่อประมาณค่าให้อยู่ในรูปแบบผลต่างแสดงได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\frac{\Delta \omega_m}{T_i} = K_p \frac{\Delta \omega_{m,error}}{T_i} + K_i \omega_{m,error} \quad (3-9)$$

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้ผลต่างของความเร็วรอบเอาต์พุต ($\Delta\omega_m$) มีค่าเท่ากับ $\omega_{m(i)} - \omega_{m(i-1)}$ และผลต่างของค่าความเร็วผิดพลาด ($\Delta\omega_{m,error}$) มีค่าเท่ากับ $\omega_{m,error(i)} - \omega_{m,error(i-1)}$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-10)

$$\frac{\omega_{m(i)} - \omega_{m(i-1)}}{T_i} = K_p \frac{\omega_{m,error(i)} - \omega_{m,error(i-1)}}{T_i} + K_i \omega_{m,error(i)} \quad (3-10)$$

โดยที่ $\omega_{m(i)}$	คือ ค่าความเร็วรอบเอาต์พุตในรอบปัจจุบัน
$\omega_{m(i-1)}$	คือ ค่าความเร็วรอบเอาต์พุตในรอบก่อนหน้า (อดีต)
$\omega_{m,error(i)}$	คือ ค่าความเร็วรอบผิดพลาดในรอบปัจจุบัน
$\omega_{m,error(i-1)}$	คือ ค่าความเร็วรอบผิดพลาดในรอบก่อนหน้า (อดีต)

ขั้นตอนที่ 5 จากสมการที่ (3-10) สามารถนำ T_i คูณทั้งสองข้างของสมการ ดังนั้นจะสามารถหาสมการตัวควบคุมพีไอที่เวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (3-11) ดังนี้

$$\omega_{m(i)} = \omega_{m(i-1)} + K_p \omega_{m,error(i)} - K_p \omega_{m,error(i-1)} + K_i \omega_{m,error(i)} T_i \quad (3-11)$$

จากสมการที่ (3-11) สามารถนำไปเขียนโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งในการเขียนโปรแกรม การควบคุมแบบวงปิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมวงจรอื่น ๆ ได้เช่นกัน

3.4.3 การอ่านค่าความเร็วจากทาคอไมเตอร์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้พอร์ต ADC

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงส่วนสำคัญจุดหนึ่งคือ การวัดความเร็วรอบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ผู้ใช้งานต้องการ หากเครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการบอกความเร็วรอบของมอเตอร์มีความผิดพลาดจะทำให้ความเร็วรอบที่ผู้ใช้งานต้องการมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นไป สำหรับงานวิจัยนี้อาศัยทาคอไมเตอร์ โดยทาคอไมเตอร์ที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ทาโคมิเตอร์สำหรับชุดทดสอบ

จากรูปที่ 3.20 ทาโคมิเตอร์ชนิดดังกล่าวมีหลักการทำงานเป็นดังเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็ก เมื่อแกนมอเตอร์หมุนผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นค่าหนึ่งโดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแปรผันตามความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทาโคมิเตอร์ที่ใช้งานจริงสำหรับชุดทดสอบเลือกใช้อัตราระดับแรงดันต่อความเร็วรอบเป็นดังเช่นสมการที่ (3-12) เนื่องจากหากเลือกใช้อีกอัตราส่วนที่เหลืออาจสร้างความเสียหายต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เนื่องจาก 1000rpm สร้างแรงดันขนาด 20V จะเห็นว่าเกินขนาดที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถอ่านได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระดับอัตราส่วนดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

$$V_{tachometer} = \frac{\omega_m \text{ (rpm)}}{1000} \quad (3-12)$$

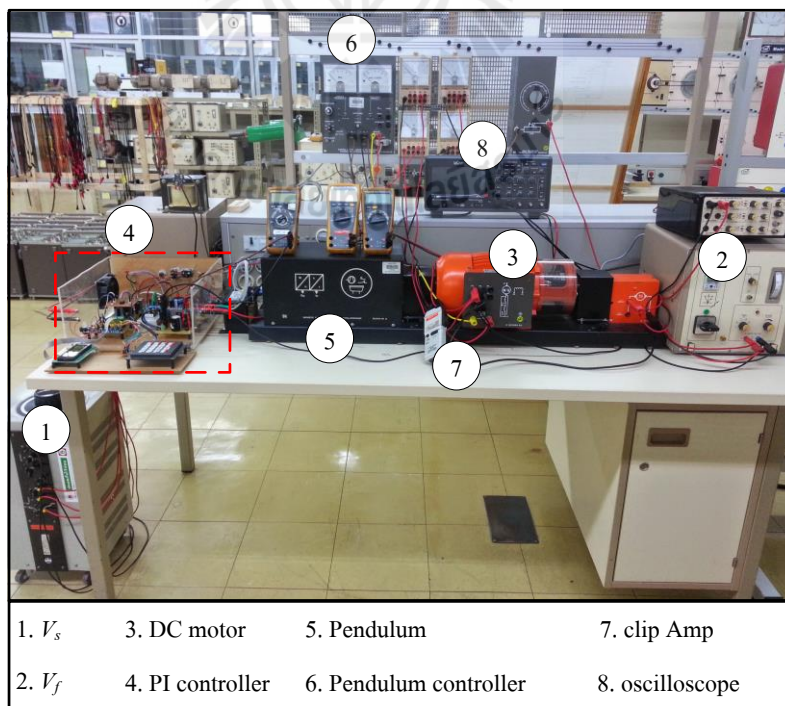
จากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับทดสอบมีพิสัยความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบเท่ากับ 2100 rpm เมื่อคำนวณตามสมการที่ (3-12) แล้วพบว่ามิชขนาดแรงดันไม่เกิน 2.1 V ซึ่ง

จากพอร์ตสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3.3 มีความสามารถในการรับค่าแรงดันขนาดดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม และเพื่อให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับรู้ระดับแรงดันอินพุตของสัญญาณอนาลอกจะใช้สมการที่ (3-4) ในการแปลงค่าระดับแรงดันเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

3.4.4 ผลการทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

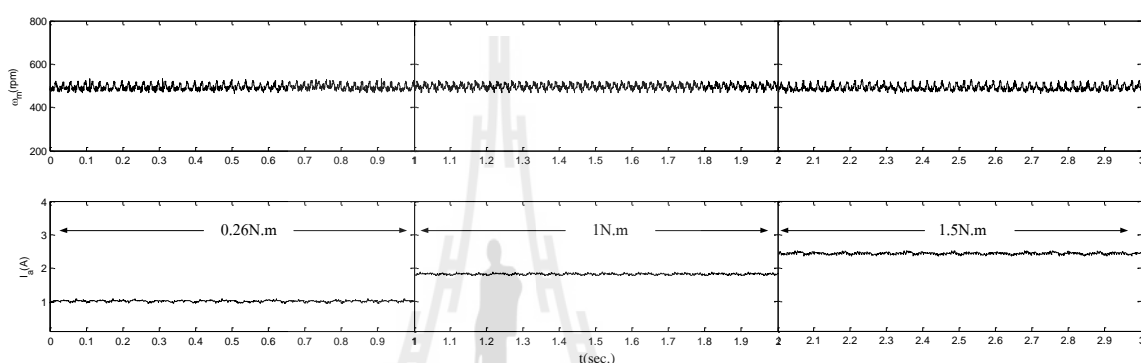
ในการทดสอบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับหัวข้อนี้ได้นำเสนอการคงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วทำการเปลี่ยนโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่เนื่องจากอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถปรับเปลี่ยนโหลดทางกลแบบขึ้นบันได ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปลี่ยนโหลดแบบเพิ่มโหลดทางกลทีละน้อยเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงระดับกระแสอาร์เมเจอร์ซึ่งจะสื่อถึงการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลเช่นกัน

การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงรูปชุดทดสอบได้ดังรูปที่ 3.21

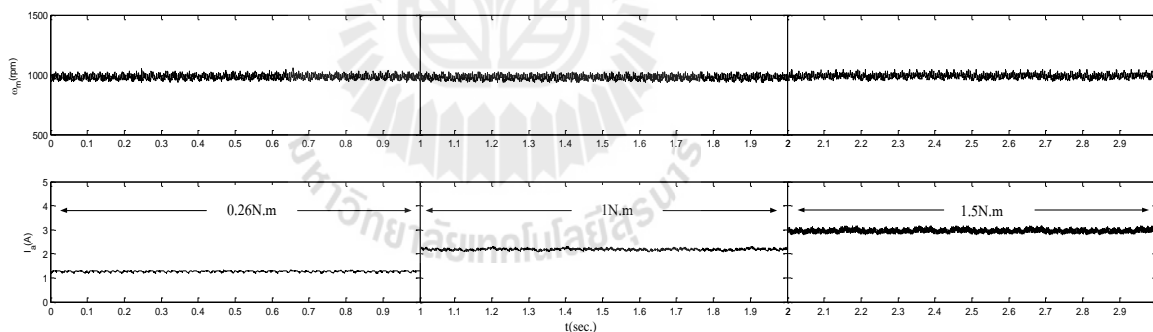


รูปที่ 3.21 ชุดการทดสอบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 3.21 สำหรับในการทดสอบกำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ 95 Vrms/phase แรงดันสนาม 200 V ปรับกระแสสนามให้มีค่าเท่ากับ 0.24 A และกำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 500 rpm มีโหลดทางกลเปลี่ยนแปลงจาก 0.26 N.m เป็น 1 N.m และเป็น 1.5 N.m ตามลำดับ แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 3.22 และกำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 1000 rpm มีโหลดทางกลเปลี่ยนแปลงจาก 0.26 N.m เป็น 1 N.m และเป็น 1.5 N.m ตามลำดับ ผลการทดสอบจากชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 ผลการทดสอบที่ 500 rpm



รูปที่ 3.23 ผลการทดสอบที่ 1000 rpm

จากรูปที่ 3.22 และ 3.23 พบว่าระดับความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าคงที่ตามที่ได้กำหนดไว้แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลโดยดูได้จากกระแสอาร์มเจอร์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นชุดทดสอบที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ในอนาคตซึ่งจะได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกโดยใช้วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งผู้วิจัยจะได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแหล่งจ่ายนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.2 และในส่วนของโหลดนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3 และในส่วนสุดท้ายเป็นการนำชุดทดสอบทางฝั่งแหล่งจ่ายและโหลดมาต่อเข้าด้วยกันพร้อมทั้งใส่ ตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้มีค่าเหมาะสมรวมทั้งการเลือกอุปกรณ์ให้เพียงพอต่อความปลอดภัย และเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อวงจรที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับการควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ผู้วิจัยได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA 1280 ซึ่งได้อธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ไว้แล้วข้างต้น และสำหรับการ สร้างวงจรจุดชนวนเกทสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ผู้วิจัยได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ PC923 เป็นตัว ขยายสัญญาณที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ให้ ทำงาน ข้อดีของไอซีเบอร์ PC923 คือ มีวงจรแยกกราวด์ภายในตัวทำหน้าที่แยกกราวด์แรงสูงและ กราวด์แรงต่ำออกจากกัน ในส่วนท้ายของบทที่ 3 เป็นการสร้างชุดทดสอบที่รวมทั้ง 2 ส่วนเข้า ด้วยกันคือ แหล่งจ่ายและโหลด เมื่อทำการทดสอบวงจรดังกล่าวพบว่าให้ผลการตอบสนองที่ได้ ตรงตามวัตถุประสงค์ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตอีกด้วย ส่วนสำคัญที่จะ นำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตนั่นคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวซึ่งจะกล่าวไว้ใน บทที่ 4 และเพื่อให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้อง ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบจะต้อง เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง ซึ่งค้นหาได้จากด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

บทที่ 4

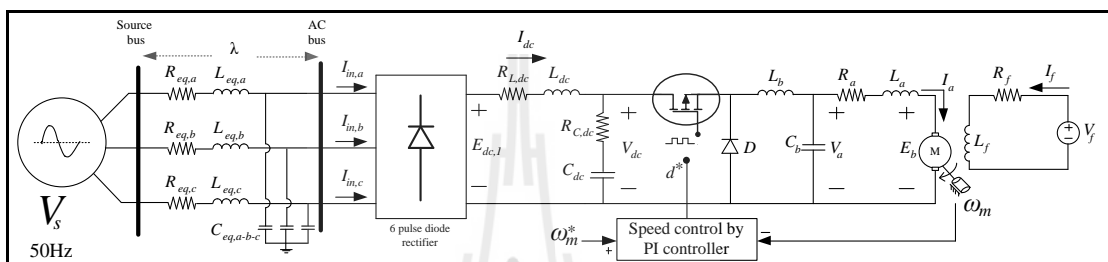
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซียเป็นดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.1 บทนำ

การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในโรงงานอุตสาหกรรมปัจจุบันพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถรับโหลดทางกลได้สูงในช่วงเริ่มต้นการใช้งาน (start motor) สำหรับการ
ใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะมีตัวควบคุมความเร็วรอบเพื่อให้ใช้งานได้ในระดับ
ความเร็วรอบที่ผู้ใช้งานต้องการ เมื่อมอเตอร์มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ จะทำให้มีลักษณะ
เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จากงานวิจัยในอดีตพบว่า โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะส่งผลกระทบต่อ
เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งจะเป็อันตรายต่ออุปกรณ์ที่
ใช้งานรวมถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของ
ระบบไฟฟ้างดังกล่าว ในบทนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซียเป็นดี
ซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่าน
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าว เนื้อหาในบทนี้ยังได้กล่าวถึงแนวโน้มผลกระทบต่อ
เสถียรภาพที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองไฟฟ้าดีซี ตัวเก็บประจุของวงจรรองกำลังไฟฟ้าดี
ซี และแบนด์วิดท์สำหรับการใช้ในการออกแบบตัวควบคุม อีกทั้งยังมีการตรวจสอบความถูกต้องของผล
การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB แต่อาจยังไม่เพียงพอ
สำหรับความน่าเชื่อถือ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบ
จริงซึ่งจะต้องให้ผลการขาดเสถียรภาพที่มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพทาง
ทฤษฎี

4.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ระบบดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 มีส่วนประกอบคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส วงจรสมมูลสายส่ง วงจรเรียงกระแสสลับแบบบริดจ์ วงจรกรองกำลังไฟฟ้าทางฝั่งดิซี วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุมใช้สำหรับควบคุมความเร็วรบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย

จากรูปที่ 4.1 เป็นระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังไฟฟ้าดิซี หากเพิ่มกำลังไฟฟ้าทางฝั่งโหลดมากเกินไปจะทำให้ระบบดังกล่าวขาดเสถียรภาพได้ หากเกิดการขาดเสถียรภาพจะทำให้แรงดันไฟฟ้าทางฝั่งดิซีมีการกระเพื่อมที่มากขึ้น จากกรณีดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และความไม่ปลอดภัยของผู้ใช้งานอุปกรณ์นั้น ๆ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานที่จุดเกิดการขาดเสถียรภาพจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อศึกษาแนวโน้มขีดความสามารถในการรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของระบบกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีวงจรกรอง

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงในการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอาศัยวิธีการแปลงดิคิ๋วร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ สำหรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าสมมติที่ใช้ในบทที่ 2 จึงทำให้ค่า K และ τ ในฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง การพิจารณาค่า K และ τ จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ค่าที่ได้จะนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คที่ใช้สำหรับชุดทดสอบจริง

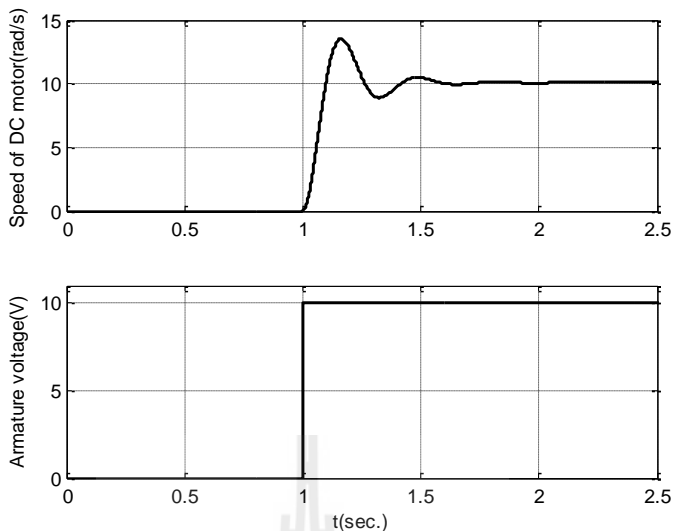
4.2.1 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงได้นำเสนอวิธีการไว้แล้วในบทที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม คือ ค่า K และ τ ของฟังก์ชันถ่ายโอนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับการหาค่า K และ τ จะใช้วิธีเดียวกันกับวิธีที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์แสดงดังตารางที่ 4.1

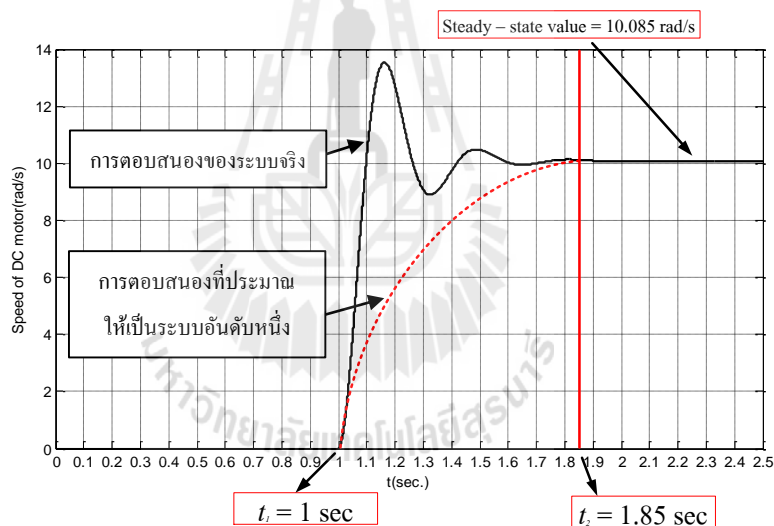
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
R_a	2.7828 Ω	ความต้านทานวงจรรอาร์เมเจอร์
L_a	0.11203 H	ความเหนี่ยวนำวงจรรอาร์เมเจอร์
R_f	591.7139 Ω	ความต้านทานวงจрсนาม
L_f	156 H	ความเหนี่ยวนำวงจрсนาม
$K_t = K_v$	4.1	ค่าคงที่ของมอเตอร์
V_f	200 V	แหล่งจ่ายแรงดันสนามของมอเตอร์
J	0.0109 kg.m ²	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
B	0.0027 N.m.s	สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์

ผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยการหาผลตอบสนองจะกำหนดให้มีอินพุตขั้นบันไดทางฝั่งอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าจาก 0 V เป็น 10 V ที่เวลา 1 วินาที และรูปที่ 4.3 เป็นการนำรูปที่ 4.2 (รูปบน) มาวัดค่า K และ τ เพื่อนำไปใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม การพิจารณาค่า K และ τ จะใช้วิธีเดียวกันกับบทที่ 2 ซึ่งจะได้อ่า $K = 1.0085$ และค่า $\tau = 0.85$ สังเกตได้ว่าค่า K และ τ มีค่าไม่เท่าเดิมซึ่งจะเป็นสาเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอเปลี่ยนไปเช่นกัน



รูปที่ 4.2 ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะส่งผลให้ผลการตอบสนองมีการแกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 0.85 วินาที และมีค่าอัตราขยายอยู่ที่ 1.0085 เท่าเทียบจากอินพุต ซึ่งจะส่งผลให้ผลการตอบสนองมีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในบทที่ 2 ดังนั้นเพื่อให้ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมมอเตอร์ที่ใช้งานจริง จึงต้องมีการออกแบบตัวควบคุมใหม่ โดยใช้ค่า K และ τ จากการทดสอบข้างต้น สำหรับการออกแบบค่า K_p และ K_i จะดำเนินการเช่นเดียวกันในบทที่ 2 โดยจะได้ค่า K_p และ K_i เมื่อ ω_n มีค่าเปลี่ยนแปลงและ $\zeta = 0.9$ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i

ω_n (rad/s)	ζ	K_p	K_i
16	0.9	23.2821	215.766
18		26.31631	273.0788
20		29.35052	337.1344
22		32.38473	407.9326
24		35.41894	485.4735

ค่า K_p และ K_i ในตารางที่ 4.2 เป็นค่าที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบซึ่งได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เมื่อความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบเพิ่มขึ้นสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกย่านความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 16 – 24 rad/s ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในย่านที่สามารถทดสอบได้จริง สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.3

4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับงานวิจัยนี้จะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในการคาดการณ์จุดขาดเสถียรผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นและไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงสามารถดำเนินการได้โดยง่ายผ่านทางทฤษฎีบทค่าเจาะจงโดยไม่ต้องใช้วิธีการที่ยุ่งยาก ในการวิเคราะห์เสถียรภาพกระบวนการวิเคราะห์นี้จะเริ่มจากเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้กับระบบไฟฟ้าจะทำให้ค่าเจาะจงของระบบเลื่อนจากทางฝั่งซ้ายไปทางฝั่งขวาของระนาบเอส ทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะใช้เมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) มาใช้ในการคำนวณหาค่าเจาะจงตามสมการที่ (4-1) ซึ่งเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้พิสูจน์ไว้แล้วในบทที่ 2

$$\det[\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (4-1)$$

จากสมการที่ (4-1) ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ

$$\text{real } \lambda_i < 0$$

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

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 เมื่อความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเป็นดังตารางที่ 4.2 ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วย $\lambda_1 - \lambda_{12}$ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะ λ_9 และ λ_{10} เนื่องจากเป็นค่าเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้างกล่าวจะใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.3

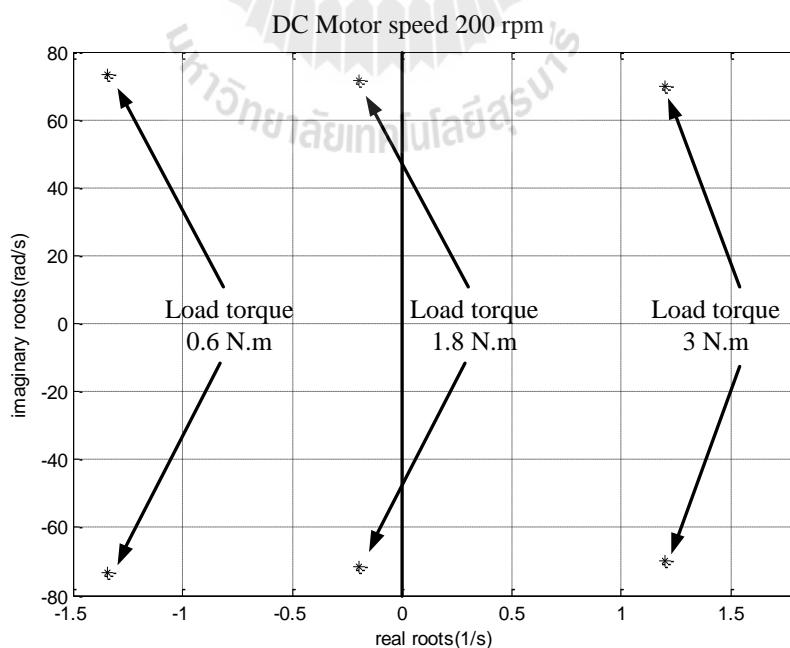
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
V_s	30 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	96.465 $\mu\Omega$	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	0.50531 μH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
$R_{C,dc}$	0.4937 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$R_{L,dc}$	2.1754 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
L_{dc} ($\Delta I_{dc} \leq 1.5$ A)	39.053 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc} ($\Delta V_{dc} \leq 50$ V)	220.46 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L_b ($\Delta I_L \leq 0.5$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์
C_b ($\Delta V_o \leq 50$ mV)	180 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์
R_a	2.7828 Ω	ความต้านทานวงจรอาร์เมเจอร์
L_a	215.5 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรอาร์เมเจอร์
R_f	591.7139 Ω	ความต้านทานวงจรสนาม

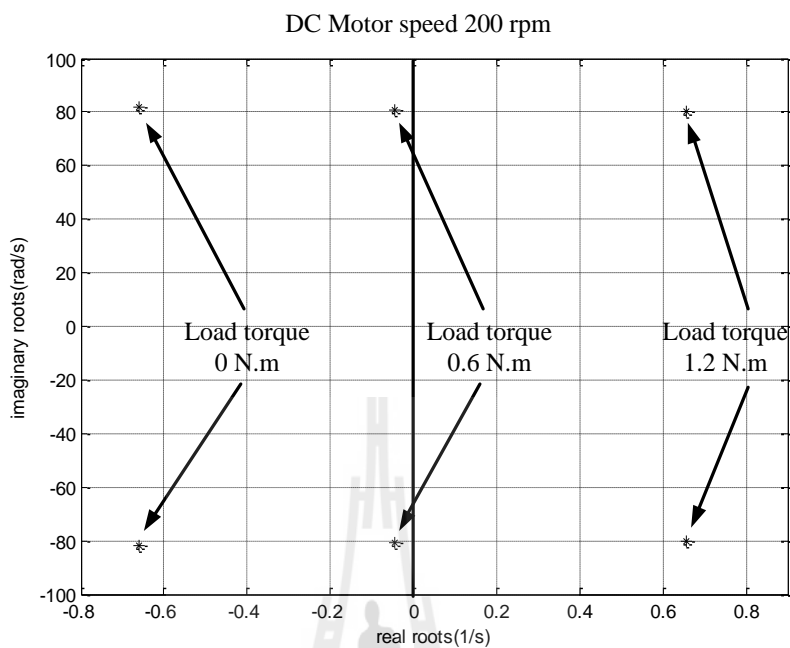
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันชั้นผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ (ต่อ)

L_f	136.4 H	ความเหนี่ยวนำวงจรสนาม
$K_t = K_v$	4.1	ค่าคงที่ของมอเตอร์
V_f	200 V	แหล่งจ่ายแรงดันสนามของมอเตอร์
J	0.0109 kg.m ²	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
B	0.0027 N.m.s	สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์

การหาค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 จะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 200 rpm จากนั้นทำการเพิ่ม โหลดทางกลให้กับมอเตอร์ ซึ่งทำให้ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าบนระนาบเอสเลื่อนจากซ้ายไปขวา ในการหาค่าเจาะจงของระบบจะใช้ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 18 rad/s เมื่อ โหลดทางกลของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 3 N.m จะทำให้ค่าเจาะจงอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส นั่นคือ ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 22 rad/s ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่ โหลดทางกลของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1.2 N.m ซึ่งค่าเจาะจงที่ได้จากการคำนวณเมทริกซ์จาโคเบียนของระบบที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 18 rad/s และ 22 rad/s แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

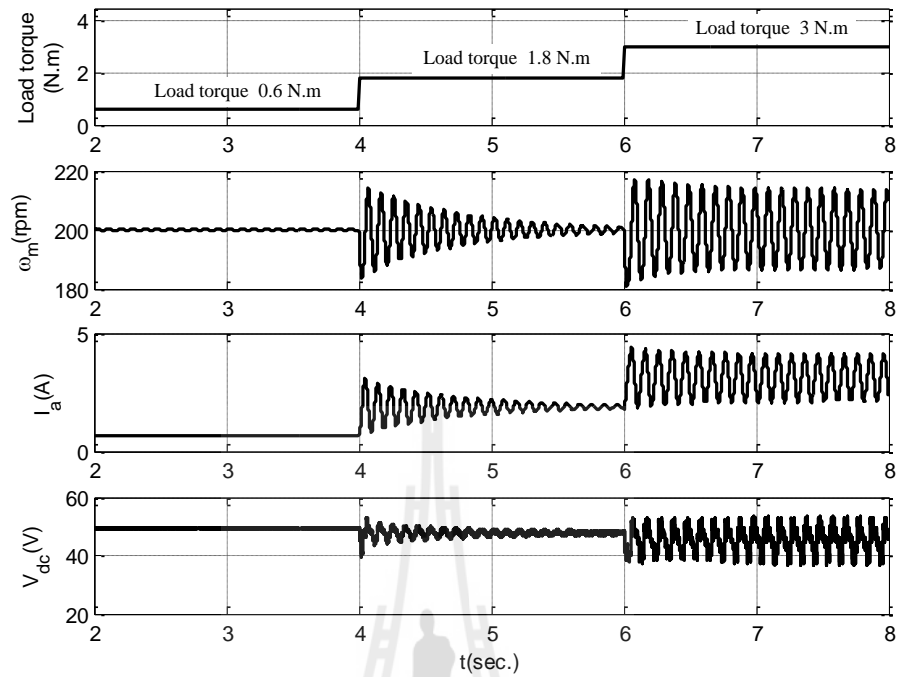


รูปที่ 4.4 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 18$ rad/s

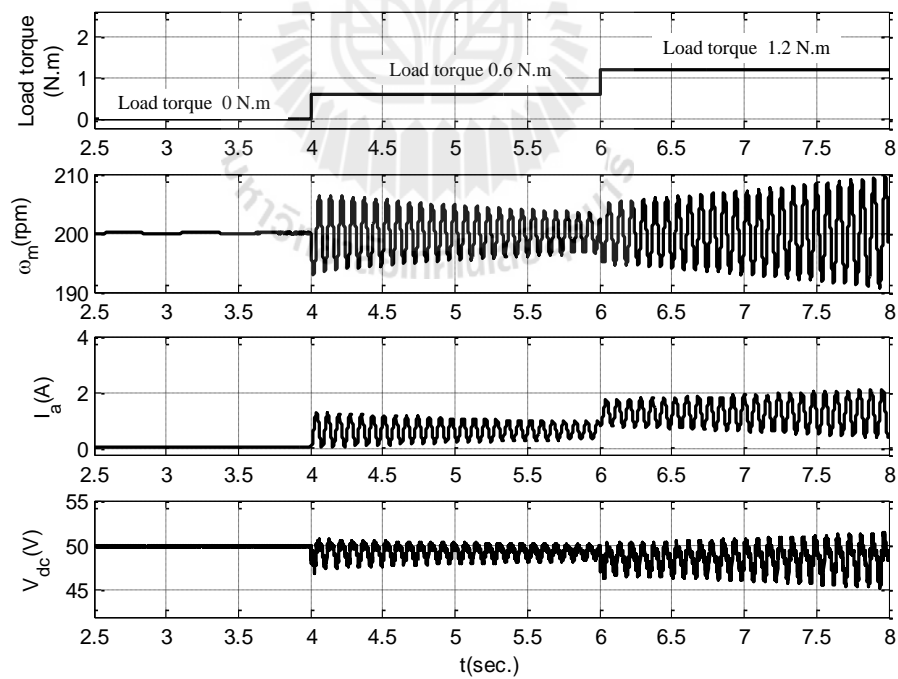


รูปที่ 4.5 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$

ค่าเจาะจงที่แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 สามารถตรวจสอบความถูกต้องได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับที่ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$ ระบบจะขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลมีค่าเท่ากับ 3 N.m และที่ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$ ระบบจะขาดเสถียรภาพที่ 1.2 N.m ผลการจำลองสถานการณ์การเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$ และ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองสถานะที่ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$

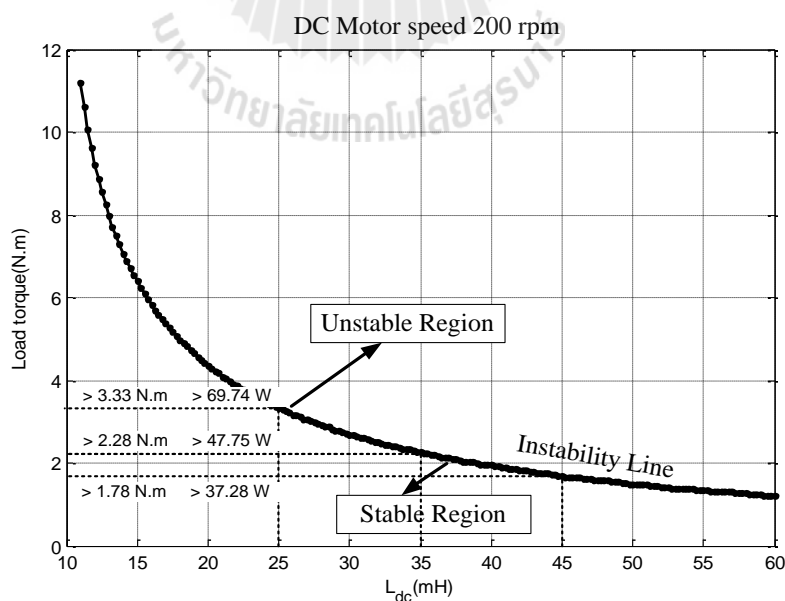


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานะที่ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาเสถียรภาพด้วยการคำนวณค่าเจาะจงของระบบมีความถูกต้อง และมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้

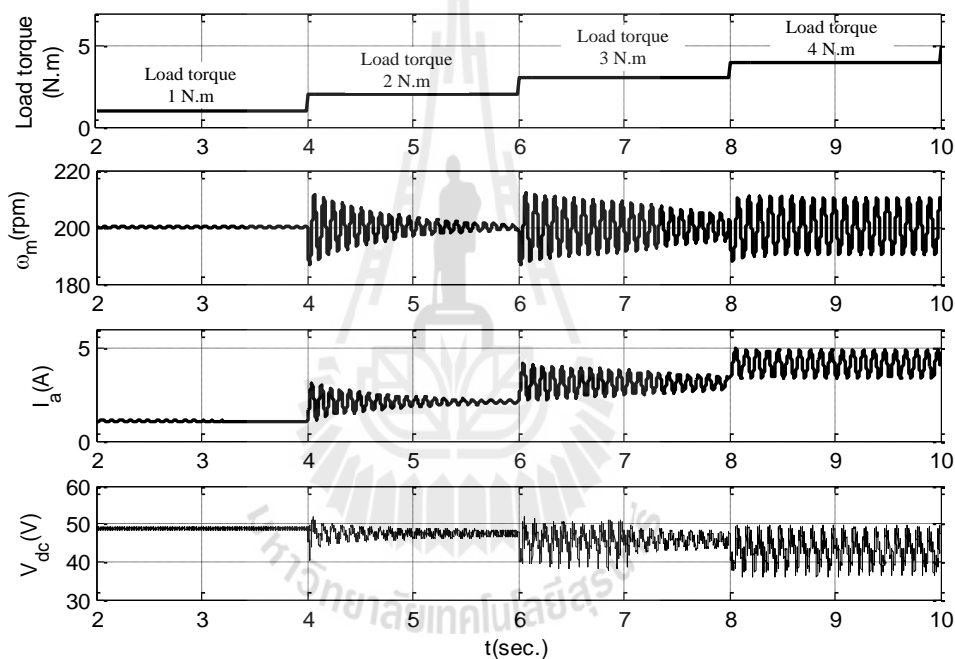
4.4 ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดขึ้นจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าได้ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับผลกระทบที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ของระบบที่สามารถออกแบบได้โดยวิศวกร ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงเป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งสามารถออกแบบได้ ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรกรองจึงเป็นที่น่าสนใจ การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์และแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมมีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และ 18 rad/s ตามลำดับ ผลกระทบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า L_{dc} จาก 11 mH ถึง 60 mH แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบไฟฟ้าได้แสดงไว้แล้วดังตารางที่ 4.3

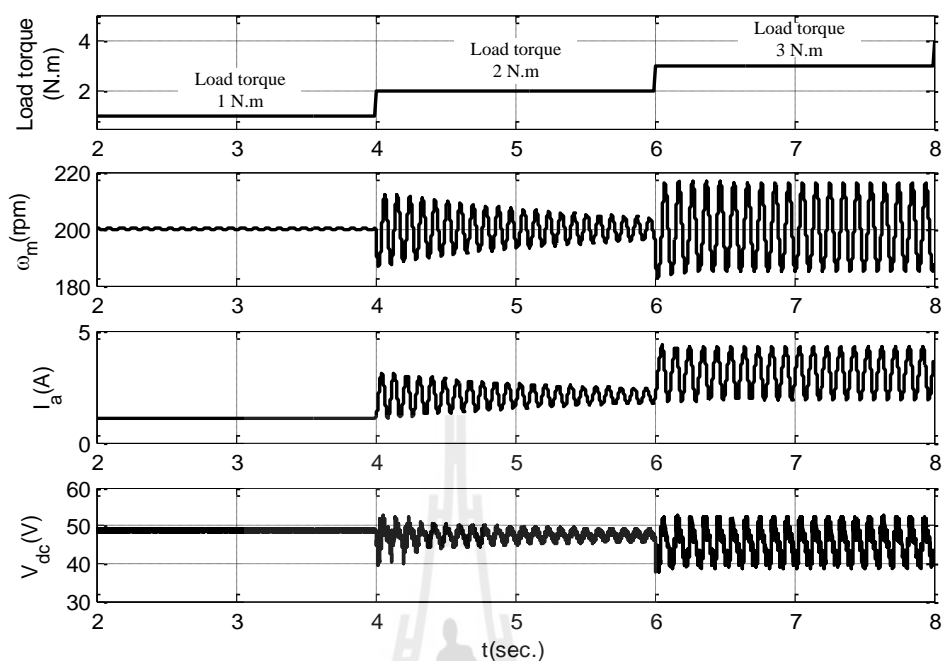


รูปที่ 4.8 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ L_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง

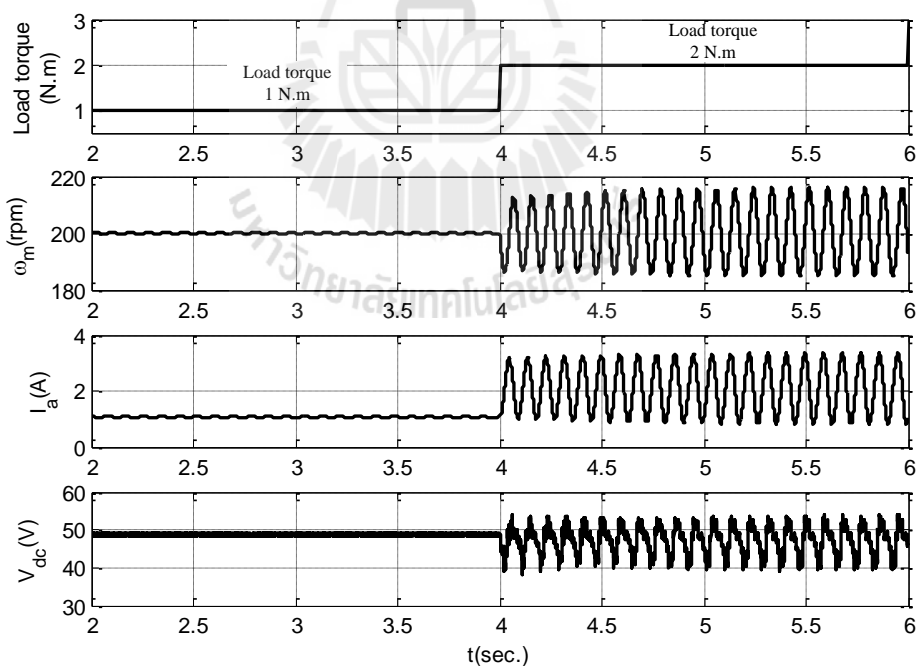
การวิเคราะห์ผลกระทบในรูปที่ 4.8 พบว่าหากทำการเพิ่มค่า L_{dc} ให้มากขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือจึงทำการคัดเลือกจุดการทำงาน 3 จุด มาใช้ในการยืนยันผลกระทบจากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า โดยกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามี่ค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และที่ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรกรองมีค่าเท่ากับ 25 mH , 35 mH และ 45 mH ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 4 N.m , 3 N.m และ 2 N.m ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.11



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 25$ mH



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 35$ mH



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 45$ mH

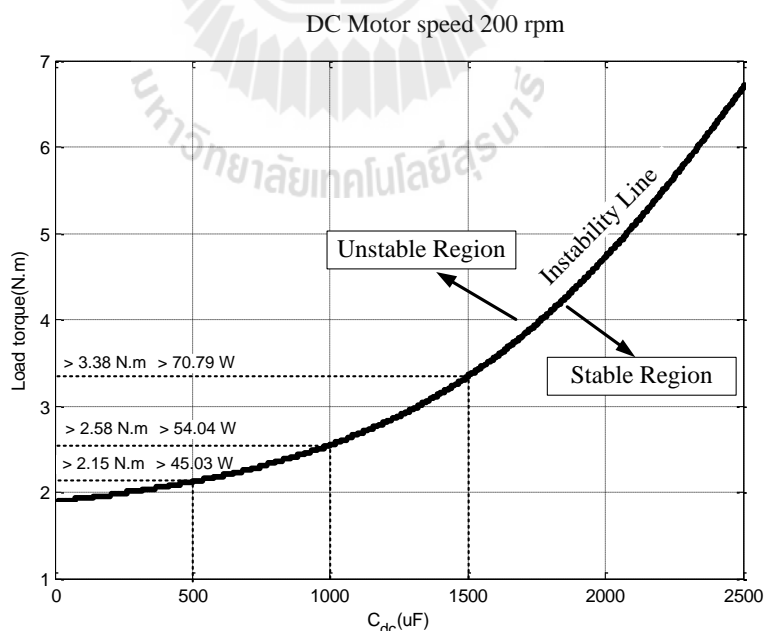
ผลการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 สามารถยืนยันได้ชัดเจนว่าเมื่อค่า L_{dc} เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแย่ลง ซึ่งเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพจะมีการ

กระเพื่อมของสัญญาณต่าง ๆ ที่มากขึ้นอีกทั้งลักษณะของสัญญาณจะไม่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้างดังกล่าวอาจเกิดความเสียหายหรือเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบอีกตัวหนึ่งคือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง โดยผลกระทบของค่าความจุไฟฟ้าจะได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.5

4.5 ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเก็บประจุของวงจรกรองไฟฟ้า

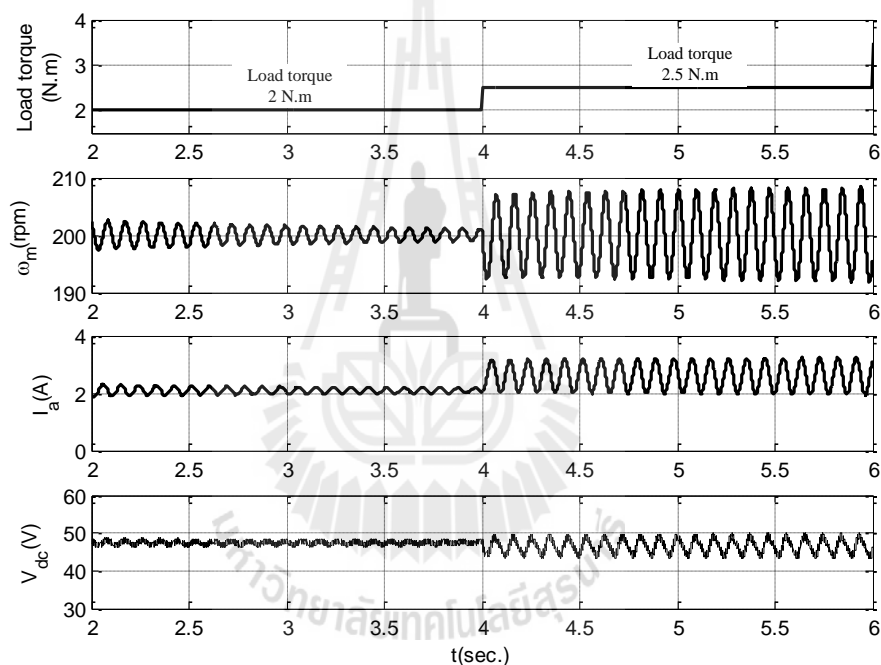
กระแสตรง

ผลกระทบที่น่าสนใจอีกส่วนหนึ่งของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือ การพิจารณาผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่สามารถออกแบบได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการออกแบบในจุดการทำงานที่ขาดเสถียรภาพจึงต้องมีการศึกษาผลกระทบเมื่อค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์และแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมมีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และ 18 rad/s ตามลำดับ ผลกระทบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า C_{dc} จาก 1 μF ถึง 2500 μF แสดงดังรูปที่ 4.12 สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่นของระบบไฟฟ้าได้แสดงไว้แล้วดังตารางที่ 4.3

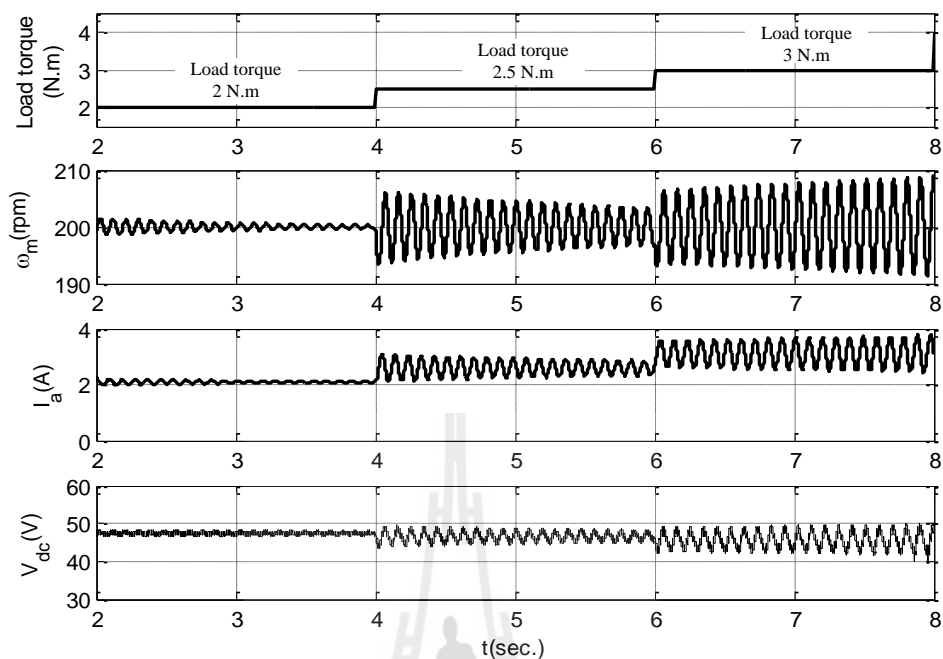


รูปที่ 4.12 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ C_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง

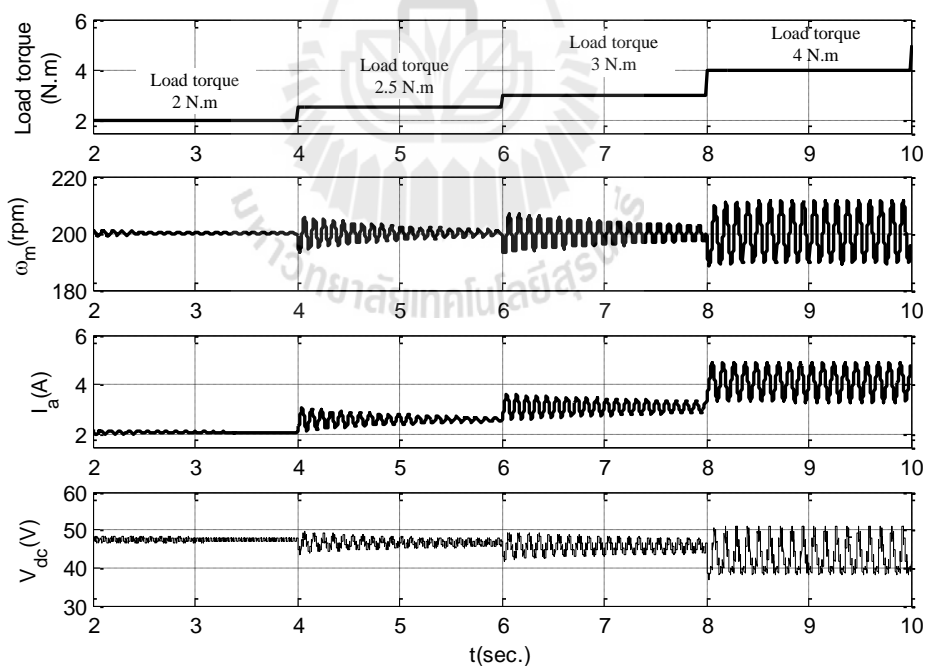
การวิเคราะห์ผลกระทบในรูปที่ 4.12 พบว่าหากทำการเพิ่มค่า C_{dc} ให้มากขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือจึงทำการคัดเลือกจุดการทำงาน 3 จุด มาใช้สำหรับการยืนยันผลกระทบจากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และที่ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับ 500 μF , 1000 μF และ 1500 μF ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2.5 N.m, 3 N.m และ 4 N.m ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 500 \mu\text{F}$



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1000 \mu\text{F}$



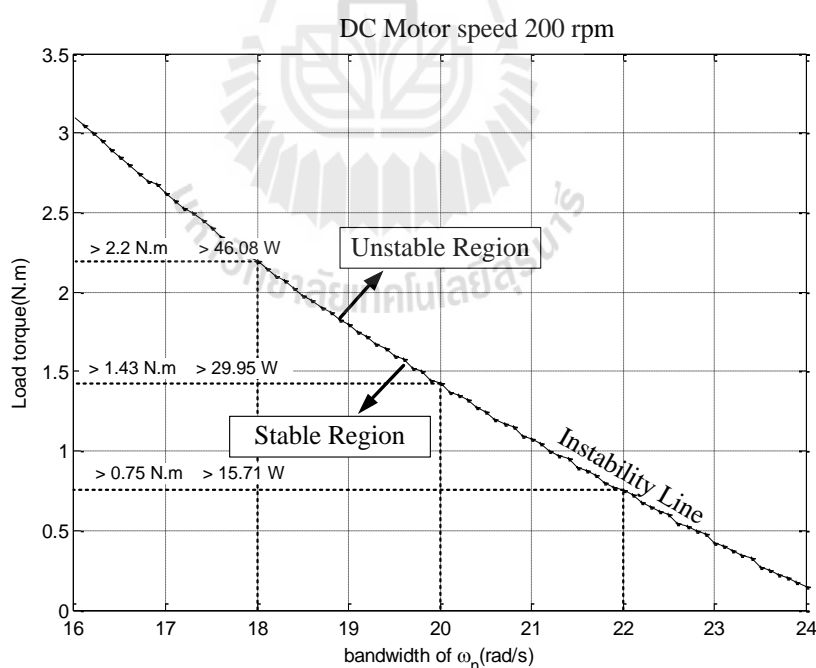
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1500 \mu\text{F}$

ผลการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 สามารถยืนยันได้ชัดเจนว่าเมื่อค่า C_{dc} เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพจะมี

ลักษณะการกระเพื่อมของสัญญาณต่าง ๆ ที่มากขึ้น ผลกระทบที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ในลำดับถัดไปจะพิจารณาผลกระทบอันเนื่องมาจากแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมซึ่งจะได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.6

4.6 ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากแบนด์วิธความถี่ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

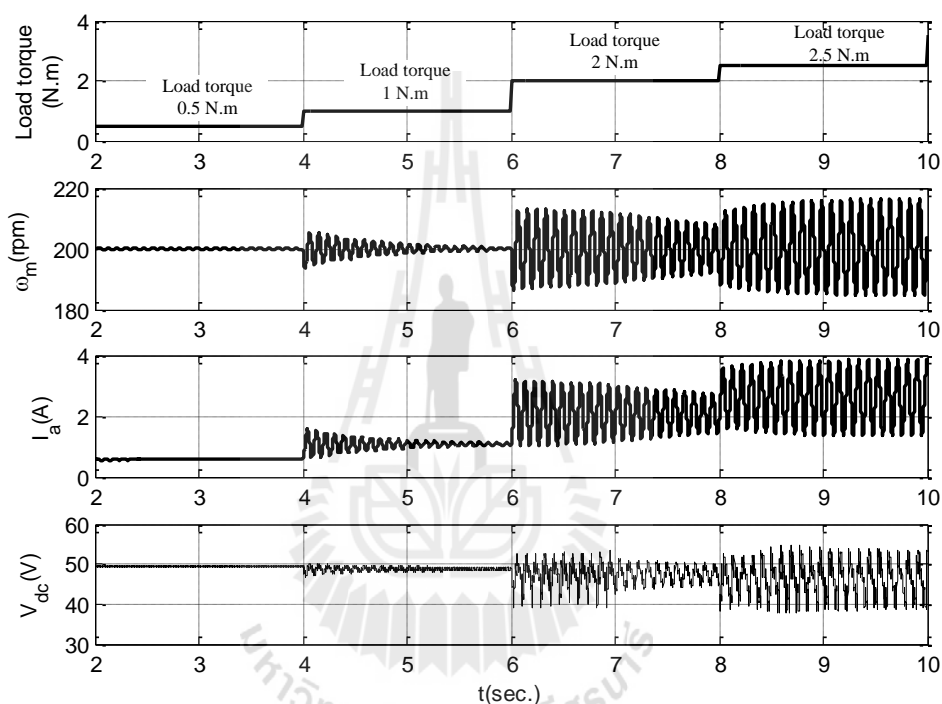
งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญอย่างยิ่งกับผลกระทบอันเนื่องมาจากแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ออกแบบระบบควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ซึ่งหากไม่ทำการศึกษาผลกระทบดังกล่าวอาจส่งผลให้นักออกแบบใช้ค่าความถี่ธรรมชาติในการออกแบบที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm ผลกระทบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า ω_n จาก 16 rad/s ถึง 24 rad/s แสดงดังรูปที่ 4.16 สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แสดงไว้แล้วดังตารางที่ 4.3



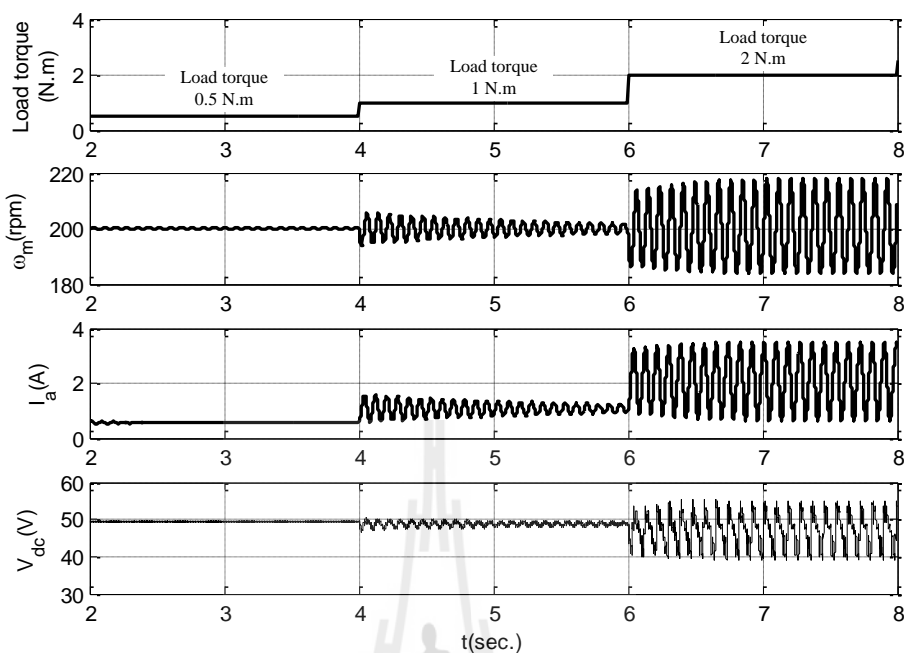
รูปที่ 4.16 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ ω_n มีการเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ผลกระทบในรูปที่ 4.16 พบว่าหากทำการเพิ่มค่า ω_n ให้มากขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือจึงทำการคัดเลือกจุดการทำงาน

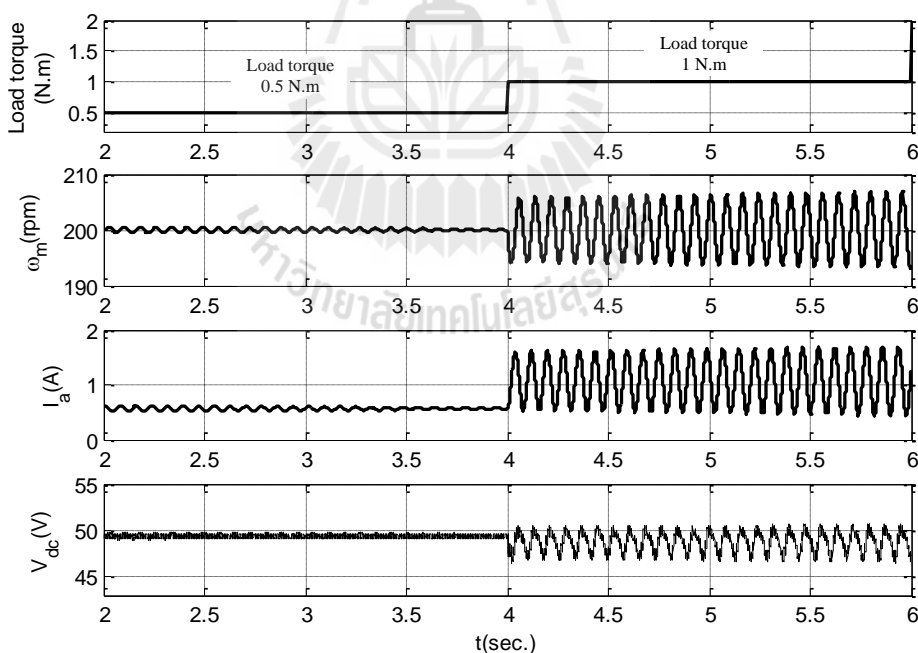
3 จุด มาใช้สำหรับการยืนยันผลกระทบบจากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และที่ ω_n มีค่าเท่ากับ 18 rad/s , 20 rad/s และ 22 rad/s ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2.5 N.m , 2 N.m และ 1 N.m ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.19



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 18$ rad/s



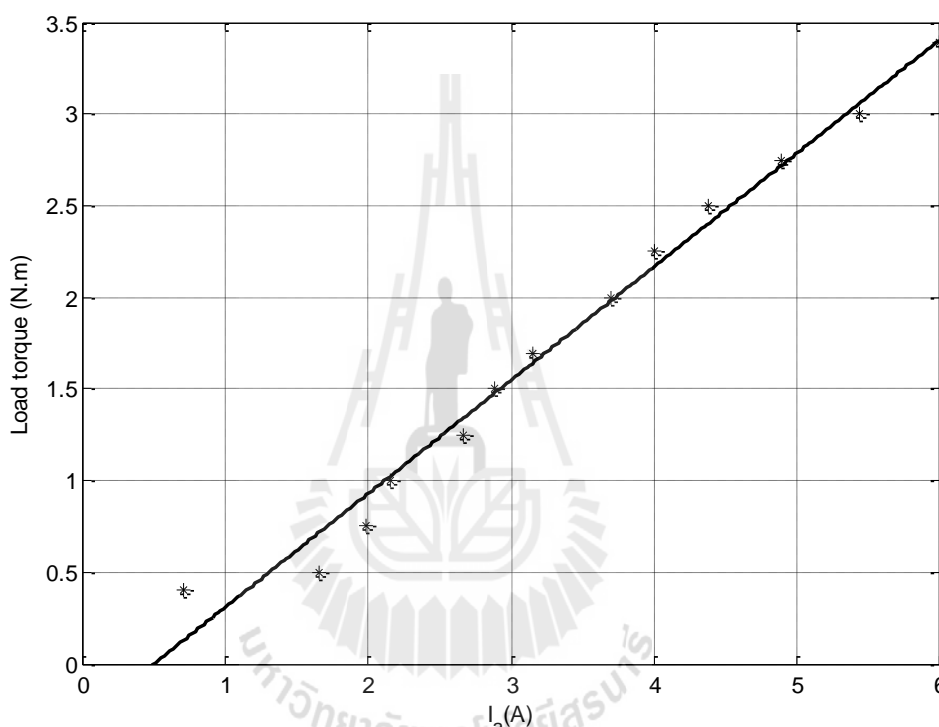
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 20$ rad/s



รูปที่ 4.19 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 22$ rad/s

ผลการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 สามารถยืนยันได้ชัดเจนว่าเมื่อค่า ω_n เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพน้อยลง ดังนั้นเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นการยืนยัน

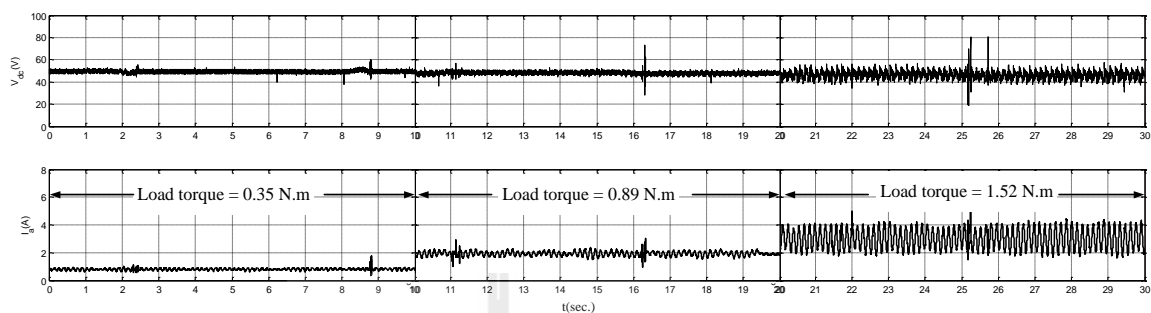
ผลกระทบจากโปรแกรม MATLAB อาจไม่เพียงพอ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการทดสอบผลกระทบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น แต่เนื่องจากชุดทดสอบจริงไม่สามารถวัดโหลดทางกลของมอเตอร์ได้อย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงได้อาศัยการประมาณค่าเปรียบเทียบระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ต่อโหลดทางกลที่ได้จากการทดสอบจริง การทดสอบระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกลของมอเตอร์จะคงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าไว้ที่ 200 rpm ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.20



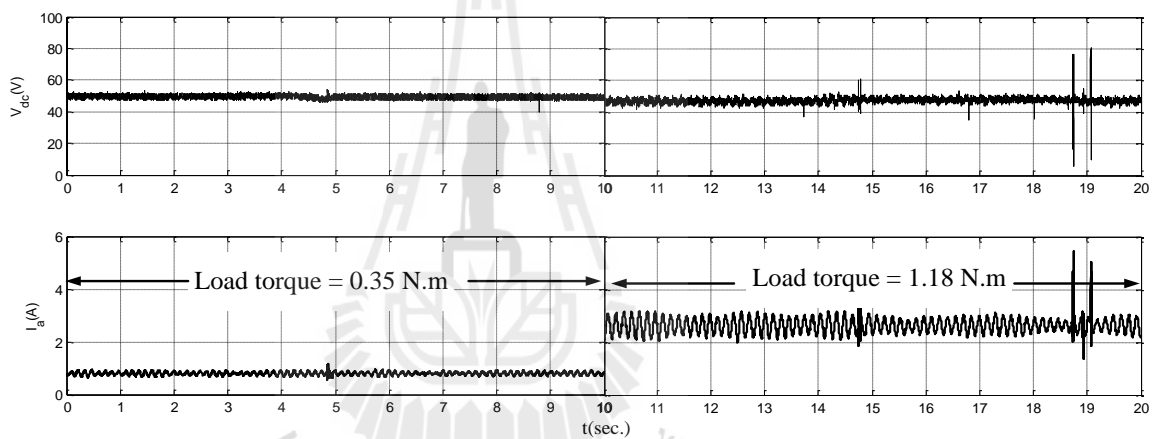
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกลในรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อโหลดทางกลของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นการระบุโหลดทางกลของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการนำกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการทดสอบสภาวะการขาดเสถียรภาพมาเทียบจากกราฟ การทดสอบการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบจะกำหนดให้มอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 200 rpm จากนั้นทำการเพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์จนเกิดการขาดเสถียรภาพที่ความถี่ธรรมชาติในการออกแบบตัวควบคุมค่าต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการทดสอบที่ค่าความถี่ธรรมชาติในการออกแบบเท่ากับ 18

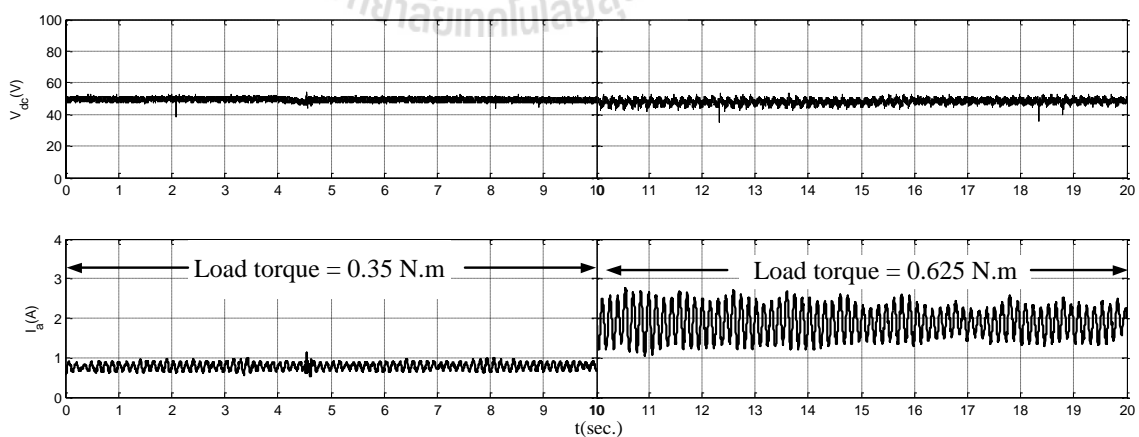
rad/s , 20 rad/s และ 22 rad/s ผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.23



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 18$ rad/s

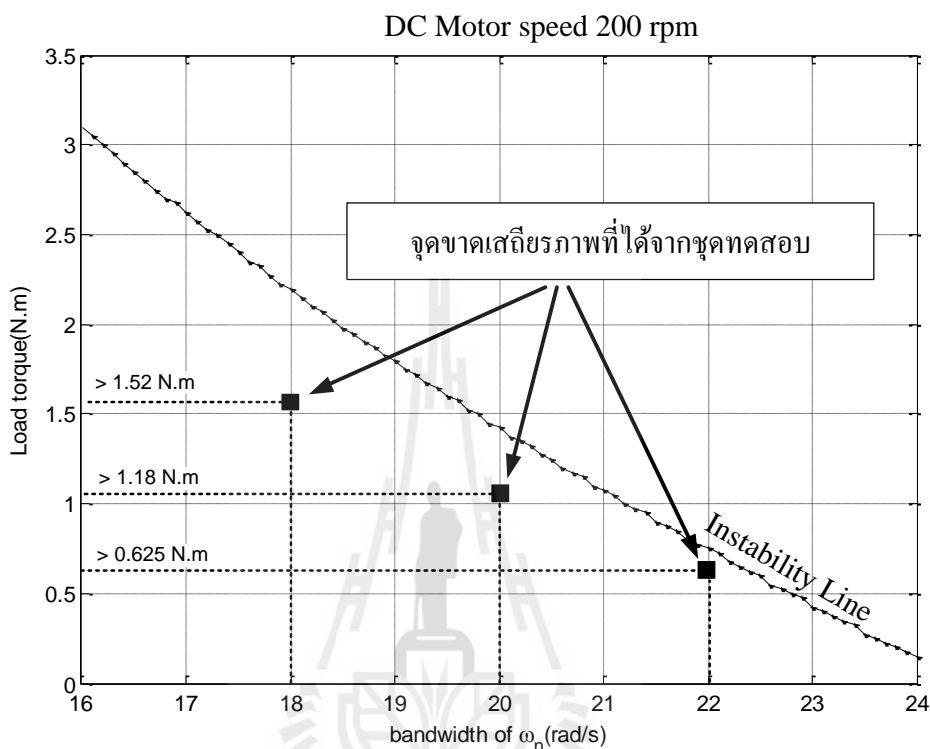


รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 20$ rad/s



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 22$ rad/s

จากการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.21 ถึง 4.22 พบว่าจุดการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ซึ่งจากการทดสอบสามารถสรุปจุดการขาดเสถียรภาพได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 จุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง

จุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงในรูปที่ 4.24 พบว่าจุดขาดเสถียรภาพที่ได้จากชุดทดสอบมีการขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคาดการณ์ทางทฤษฎี ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าที่แท้จริงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถระบุค่าได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์เป็นเพียงการระบุค่าที่จุดการทำงานของระบบจุดใดจุดหนึ่งเท่านั้น หรืออาจมีสาเหตุมาจากการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่งเพื่อสะดวกในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม เหตุผลดังกล่าวอาจทำให้การทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเล็กน้อย แต่จากลักษณะแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่คล้ายคลึงกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้ สามารถสรุปได้ว่าการที่ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแฉ่งเมื่อเพิ่มความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นเป็นจริง

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งถูกทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง แต่การคำนวณหาค่าเจาะจงเพียงอย่างเดียวเพื่อบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอาจยังไม่เพียงพอจึงต้องมีการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ของระบบจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังนำเสนอแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{dc} , L_{dc} และ ω_n ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบได้จึงต้องศึกษาเพื่อหลีกเลี่ยงการออกแบบ ณ จุดที่ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ สำหรับค่าพารามิเตอร์ ω_n เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายสำหรับชุดทดสอบ เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงนำกรณีที่ ω_n มีการเปลี่ยนแปลงมาทำการทดสอบด้วยชุดทดสอบจริง จากผลการทดสอบพบว่าจุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลกระทบที่ได้วิเคราะห์ไว้ งานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ให้กับวิศวกรหรือผู้ออกแบบตัวควบคุม หากในการออกแบบใช้แบนด์วิธความถี่สำหรับการออกแบบสูงเกินไปอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เกิดความเสียหายหรืออาจเกิดเหตุอันตรายต่อผู้ใช้งาน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดังกล่าวมีความจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องซึ่งจากการค้นคว้าพบว่าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป วิธีการแปลงดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดังกล่าวได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่ได้กล่าวมานี้ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 1

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเริ่มพิจารณาจากระบบแบบวงเปิด (กรณียังไม่มีตัวควบคุม) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบวงเปิดก่อน หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบพีไอเข้าไปในระบบแล้วทำการพิสูจน์แบบจำลองเพิ่มเติมเฉพาะส่วนของตัวควบคุมที่ใส่เข้าไป ซึ่งการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 2 พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์จุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

การศึกษาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอแบบลูปเดียว สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์เทียบกับแรงดันอาร์เมเจอร์จะอยู่ในรูปของระบบอันดับสอง เมื่อมีตัวควบคุมแบบพีไอรวมเข้ามจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดเป็นระบบอันดับสาม ส่งผลให้ไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ค่าพารามิเตอร์จากระบบทั่วไปอันดับสองได้ ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่งซึ่งเมื่อรวมกับตัวควบคุมพีไอแล้วจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดสอดคล้องระบบทั่วไปอันดับสอง โดยการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนได้กล่าวไว้อย่างละเอียดแล้วในบทที่ 2

งานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่มุ่งเน้นการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎีเท่านั้น ยังได้ทำการสร้างชุดทดสอบขึ้นเพื่อใช้สำหรับยืนยันผลการขาดเสถียรภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสำหรับรายละเอียดในการสร้างชุดทดสอบแต่ละส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รวมทั้งการทดสอบวงจรต่าง ๆ ได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 3 จากการสร้างชุดทดสอบดังกล่าวส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์จริงของชุดทดสอบกับค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นไม่ตรงกันซึ่งจะให้ผลการตอบสนองทั้งในสถานะชั่วครู่และในสถานะอยู่ตัวที่แตกต่างกันส่งผลให้การคาดเดาจุดเกิดการขาดเสถียรภาพผิดพลาด ดังนั้นจึงต้องมีการระบุเอกลักษณ์ระบบไฟฟ้าของชุดทดสอบจริง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4

การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยนี้ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ค่าเจาะจงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าสามารถคาดการณ์จุดเกิดการขาดเสถียรภาพได้เมื่อมีการเพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถตรวจสอบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้จากการจำลองสถานการณ์จากชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบว่าจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรเป็นจุดเดียวกัน จากการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าดังกล่าวพบว่าจุดเกิดการขาดเสถียรภาพตรงกัน อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์แนวโน้มการขาดเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{dc} , C_{dc} และ ω_n พบว่าเมื่อ L_{dc} มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่เร็วขึ้น และเมื่อ C_{dc} มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ช้าลง ในลำดับสุดท้ายเมื่อ ω_n มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ามียุคเปลี่ยนคล้ายกับการเพิ่ม L_{dc} นั่นคือจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่เร็วขึ้น ผลจากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 3 กรณีให้ผลการขาดเสถียรภาพที่ตรงกับการ

วิเคราะห์ แต่การจำลองสถานการณ์อาจยังไม่เพียงพอผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบการขาดเสถียรภาพ จากชุดทดสอบจริง สำหรับการปรับเพิ่มค่า L_{dc} และ C_{dc} นั้นในทางปฏิบัติมีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากจะต้องเปลี่ยนชุดอุปกรณ์และทำการระบุเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ใหม่เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการทดสอบเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่า ω_n ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติที่ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบส่งผลให้ค่า K_p และ K_i ของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลง ผลทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบจริง พบว่ามีลักษณะแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ รวมทั้งการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าและการทดสอบจากชุดทดสอบจริงได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ เป็นการพิจารณาภายใต้เงื่อนไขการทำงานของโหมดการนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น ในอนาคตควรมีการพัฒนาให้สามารถพิจารณาในโหมดการนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode : DCM)
2. ตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอลูบเดียว ในอนาคตควรมีการปรับปรุงให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอสองลูบนั่นคือลูปลความเร็วรอบและลูปลกระแสอาร์เมเจอร์ ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะทำให้ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์มีการกระเพื่อมที่น้อยลงหรือลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เร็วขึ้น และยังสามารถนำมาเปรียบเทียบผลการขาดเสถียรภาพหรือแนวโน้มที่เกิดจากแบนด์วิธความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
3. การออกแบบตัวควบคุมในงานวิจัยนี้อาศัยการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่ง ในอนาคตควรมีพัฒนาให้สามารถออกแบบได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนที่แท้จริงของมอเตอร์ซึ่งเป็นระบบอันดับสอง ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะได้ผลการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น
4. การระบุเอกลักษณ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ควรมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่สามารถสวิตช์แรงดันเพื่อปรับเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ เพื่อให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งการระบุเอกลักษณ์สำหรับหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควรมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแส

- ตรงที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้แบบขั้นบันได เพื่อให้ผลการตอบสนองมีค่าสอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์จากการระบุค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น
5. สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยนี้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งมีข้อจำกัดคือต้องวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้มีความถูกต้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
 6. การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์นั้นสามารถใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ได้เช่นเดียวกันกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้นกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม
 7. ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่ใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงนั้น หากมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาต่อเข้ากับระบบจะให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพดังที่วิเคราะห์ไว้เพื่อให้เกิดการพัฒนาควรมีการเปลี่ยนโหลดกำลังไฟฟ้าแบบคงตัวเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อสังเกตผลการขาดเสถียรภาพ

รายการอ้างอิง

- 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.** : 19-24.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). DQ-transformation approach for modelling and stability analysis of AC-DC power system with controlled PWM rectifier and constant power loads. **Power Electronics and Motion Control Conference.** : 2049-2054.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T. (2009). The stability analysis of AC-DC systems including actuator dynamics for aircraft power systems. **13th European Conference on Power Electronics and Applications.** : 1-10.
- Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2011). Aircraft Power System Stability Study Including Effect of Voltage Control and Actuators Dynamic. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.** vol. 47, no. 4, October 2011.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., de Lillo, L., and Thomas, D.W.P. (2012). Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.** vol. 48, no. 1, January 2012.
- Areerak, K-N., Modelling and Stability Analysis of Aircraft Power Systems, **(M. Eng)**, 2009
- Areerak K-N., and Sujitjorn S., Performance Comparison between Genetic Algorithm and Tabu Search Methods, **Suranaree J. Sci. Technol.**, vol. 9, 2002, : 61-68.
- Avery, C.R., Burrow, S.G., and Mellor, P.H. (2007). Electric Generation and Distribution for the more Electric Aircraft. in Proc. **42nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2007).** University of Brighton , Brighton, UK, 4-6 September 2007:1007-1012.

- Chaijarunudomrung K., Areerak K-N., and Areerak K-L., Modeling of Three-phase Controlled Rectifier using a DQ method, **International**, 2010
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2011). Modeling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled Rectifier and constant power loads. **WSEAS Transactions on Power Systems**. vol. 6, Issue 8, April 2011.
- Mahdavi J., Emadi A., Bellar M. D., and Ehsani M., Analysis of power electronic converters using the generalized state space averaging approach, **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications**, vol. 44, no. 8, Aug. 1997. : 767-770.
- Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani, M. (1999). On the concept of negative impedance instability in the more electric aircraft power systems with constant power loads. **Society of Automotive Engineering Journal**. : 689-699.
- Emadi, A. (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** : 992-1000.
- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. **IEEE Trans. on Vehicular Tech.** : 1112 -1125.
- Du F., He J. H., Yu L., Li M. X., Bo Z. Q., Klimek A., Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains, **Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**, Chengdu, March 2010, : 1 – 4
- Glover F., combination optimization tabu search: TS, **Kluwer Academic Publishers**, 1989
- Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H.. Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ, **Power Electronics, IEEE Transactions on**, 1998
- Srisertpol J., Khajorntraidet C., Estimation of DC motor variable torque using adaptive compensation, **21st annual international conference on Chinese Control and Decision Conference IEEE Press Piscataway, NJ, USA**, : 767-772

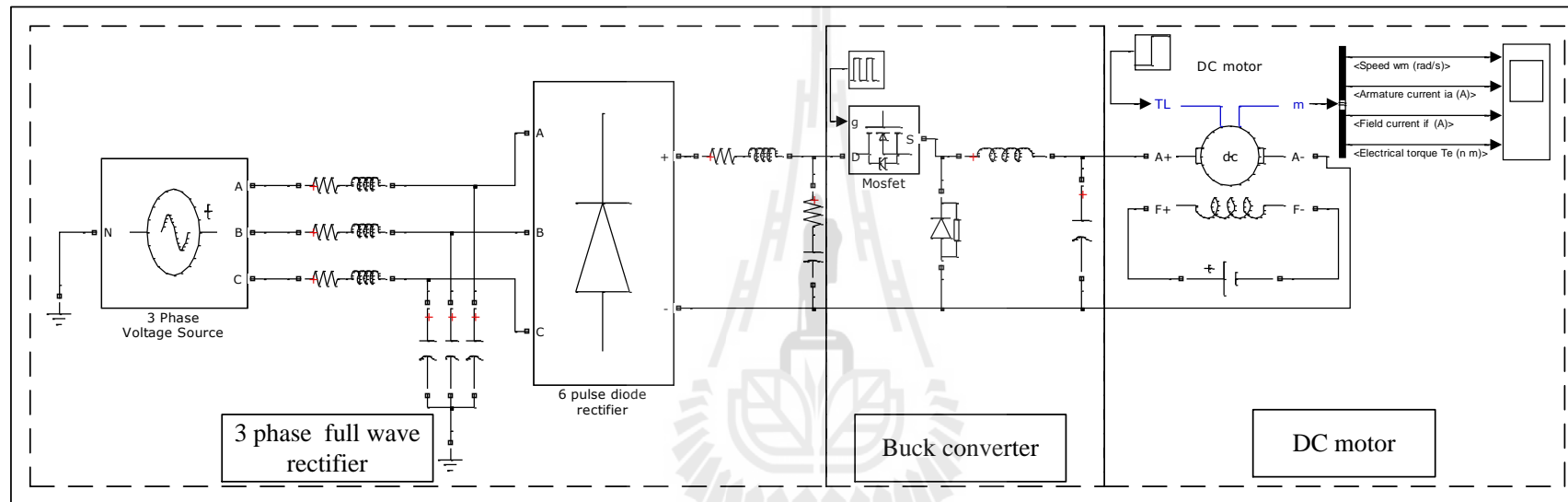
- Jusoh, A.B., The instability effect of constant power loads, **Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National**, Nov. 2004, : 175 - 179
- Krause, P.C, Wasynczuk, O., and Sudhoff, S.D.. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. **2nd ed.Nework :Wiley-IEEE Press**. 2002
- Han L., Wang J., Howe, D., State-space average modelling of 6 and 12-pulse diode rectifiers, **Power Electronics and Applications, European Conference on**, Sept. 2007, : 1 - 10
- M.Niasati, A.Gholami, Evaluation of rail potential control devices performance for control of rail potential of DC electrified railway systems, **Railway Engineering-Challenges for Railway Transportation in Information Age, 2008. ICRE 2008. International Conference on**, 2008
- 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.** : 767-770.
- Mohan, N., Underland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). **Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Son, USA**, 2003.
- Ong, C-M.. Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB/Simulink. **Prentice Hall**, 1998.
- Rim, C.T., Hu, D.Y., and Cho, G.H. (1990). Transformers as Equivalent Circuits for Switches: General Proofs and D-Q Transformation-Based Analyses. **IEEE Trans. on Indus. Appl.** : 777-785.
- Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., and Cho, G.H. (1994). Complete DC and AC Analysis of Three Phase Controlled-Current PWM Rectifier Using Circuit D-Q Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics.** : 390-396.
- Rivetta, C., Williamson, G.A., and Emadi, A. (2005). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution. **IEEE Electric Ship Tech. Symposium.** : 313-320.
- Sakui, M., Fujita, H., and Shioya, M. (1989). A Method for Calculating Harmonic Currents of a Three- Phase Bridge Uncontrolled Rectifier with DC Filter. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** : 434-440.

- Sudhoff, S.D., and Wasynczuk, O. (1993). Analysis and Average-Value Modeling of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion.** : 92-99.
- Sudhoff, S.D (1993). Waveform Reconstruction from the Average-Value Model of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion.** : 404-410.
- Sudhoff, S.D., Corzine, K.A., Hegner, H.J., and Delisle, D.E. (1996). Transient and Dynamic Average- Value Modeling of Synchronous Machine Fed Load-Commutated Converters. **IEEE Trans. on Energy Conversion.** : 508-514.
- Tsang, K.M., and Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck converter. **IEE Proc.-Electr. Power** **152(4)** : 827-831.
- Uan-Zo-li, A., Burgos, R.P., Lacaux, F., Wang, F., and Boroyevich, D. (2004). Assessment of Multi-Pulse Converter Average Models for Stability Studies Using a Quasi-Stationary Small-Signal Technique. **Power Electronics and Motion Control Conference 2004.** : 1654-1658.
- Grigore V., Hatonen J., Kyyra J., and Suntio T. Dynamics of a buck converter with a constant power load, **Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE**, Volume: 1
- Ying-xi, L., Xin-hua, M., Hong-juan, G., and Hua, J. (2005). Stability Study Simulation analysis on Aircraft transformer rectifier unit (TRU) with constant power load (CPL). **ICEMS 2005.** : 2018-2022.
- กองพล อารีรักษ์, สุदारัตน์ขวัญอ่อน, Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drives, **SUT7-711-54-12-48**, 2012

ภาคผนวก ก

บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ชนิดกระตุ้นแยก (กรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม)
ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (กรณีไม่มีตัวควบคุม)

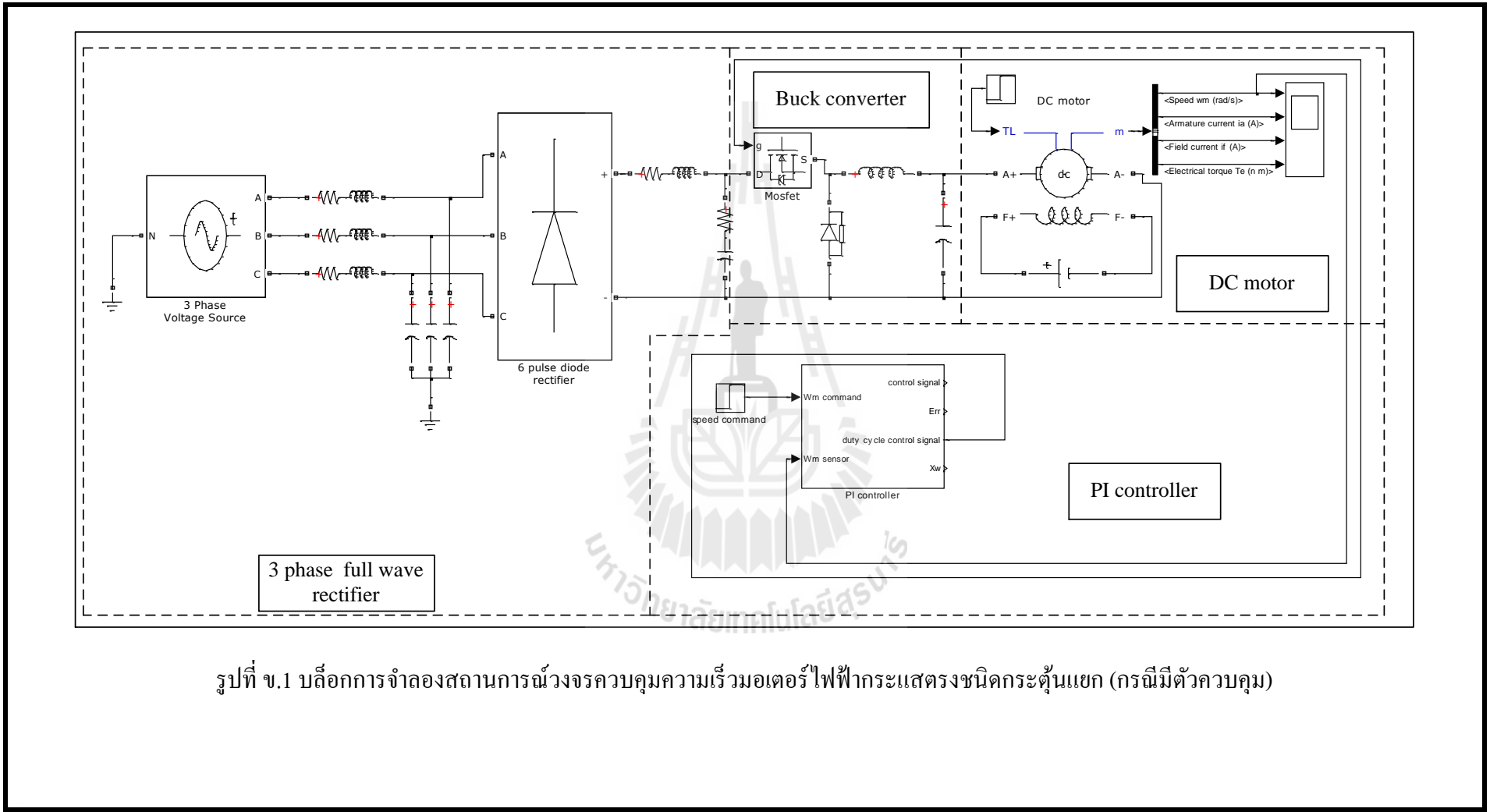
ภาคผนวก ข

บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ชนิดกระตุ้นแยก (กรณีมีตัวควบคุม)

ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (กรณีมีตัวควบคุม)

ภาคผนวก ค

โปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
และการคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัวสำหรับวงจรควบคุม
ความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

%ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจร

Req=9.6465e-5;	%ค่าความต้านทานวงจรสมมูลสายส่ง
Leq=5.0531e-7;	%ค่าความเหนี่ยวนำวงจรสมมูลสายส่ง
Ceq=2e-9;	%ค่าความจุไฟฟ้าวงจรสมมูลสายส่ง
ru=3*w*Leq/pi;	%ค่า r_{μ}
Rdc=2.1754;	%ค่าความต้านทานในตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองไฟฟ้า กระแสตรง
Ldc=39.053e-3;	%ค่าความเหนี่ยวนำวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรง
RCdc=0.4937;	%ค่าความต้านทานในตัวเก็บประจุวงจรกรองไฟฟ้า กระแสตรง
Cdc=220.46e-6;	%ค่าความจุไฟฟ้าวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรง
Lb=15e-3;	%ค่าความเหนี่ยวนำวงจรแปลงผันแบบบัก์
Cb=180e-6;	%ค่าความจุไฟฟ้าวงจรแปลงผันแบบบัก์
Ra=2.7828;	%ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์
La=0.2155;	%ค่าความเหนี่ยวนำวงจรอาร์เมเจอร์
Rf=200/0.24;	%ค่าความต้านทานสนาม
Lf=136.5;	%ค่าความเหนี่ยวนำวงจรสนาม
If=0.24;	%ค่าพิสัยกระแสสนาม
K=4.1000;	%ค่าคงที่ของมอเตอร์
Kt=K;	%กำหนดให้ค่า Kt มีค่าเท่ากับค่าคงที่ของมอเตอร์
Kv=K;	%กำหนดให้ค่า Kv มีค่าเท่ากับค่าคงที่ของมอเตอร์
J=0.0109;	%ค่าความเฉื่อยของมอเตอร์
B=0.0027;	%ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์

```

*****
การคำนวณค่าสำหรับการทำงานของระบบในช่วงที่ 1
*****
Vf_1=200; %ค่าแรงดันสนามกำหนดให้เป็น 200 V สำหรับช่วงที่ 1
Tl_1=0.94; %ค่าโหลดทางกลของมอเตอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 1
WmCommand_1=200; %ค่าคำสั่งความเร็วรอบของมอเตอร์ช่วงที่ 1
If_1=Vf_1/Rf; %ค่ากระแสสนามของมอเตอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 1
Wm_1=WmCommand_1; %ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 1
Ia_1=(Tl_1+(B*Wm_1*2*pi/60))/(Kt*If_1); %ค่ากระแสอาร์เมเจอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 1
Va_1=(Ra*Ia_1)+(Kv*If_1*Wm_1*2*pi/60); %ค่าแรงดันอาร์เมเจอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 1
ILB_1=Ia_1; %ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
แบบบ็คัก
*****
การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับการทำงานของระบบในช่วงที่ 1
*****
r=atand(w*Leq/Req);
Z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2);
Vs=50*pi/(3*sqrt(3));
Vm=Vs;
Vm_1=Vm;
Vout_rms=1.6554*Vs;
P_Total_1=(Tl_1*Wm_1*2*pi/60)+(Ia_1^2*Ra)+(Kv*If_1*(Wm_1*2*pi/60)^2*Ia_1^2)+2*Ia_1;
Q_Total_1=0 ;
eaVbus=1000;
ealampda=1000;
es=1e-10;
k=0;

```

```

while eaVbus>=es & ealampda>=es
    if k~=0
        du= Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv= Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;

        U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z - P_Total_1/3;
        V= Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*sind(r)/Z - Q_Total_1;
        Vbus(k+1)= Vbus(k)- (U*Dv-V*DU)/(du*Dv-DU*dv);
        lampda(k+1)= lampda(k)- (V*du-U*dv)/(du*Dv-DU*dv);

        eaVbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
        ealampda=abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;

        V_bus1=Vbus(k+1);
        Ldegree=lampda(k+1);
    else
        Vbus(k+1)=220*pi/(3*sqrt(3));
        lampda(k+1)=0.0001;
    end

    k=k+1;
end

lampda_1=Ldegree; %คำตอบมุม  $\lambda$  ที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
Vdc_1=V_bus1*3*sqrt(3)/pi; %คำตอบ  $V_{dc}$  ที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
ช่วงที่ 1

*****
จบการทำงานสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในช่วงที่ 1
*****

```

```

d=Va_1/Vdc_1; %ค่าวัฏจักรหน้าที่ในสภาวะอยู่ตัวสำหรับช่วงที่ 1
Idc_1 = d*ILB_1; %ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองไฟฟ้า
%กระแสตรง
Xw_1 = d/Ki; %ค่า  $X_{\omega}$ 
Sd=(sqrt(3/2))*(2*sqrt(3))/pi; %ค่า  $S_d$ 
Sq=0*(sqrt(3/2))*(2*sqrt(3))/pi; %ค่า  $S_q$ 
Vbusd_1=(Vdc_1-(d*RCdc*ILB_1)+(ru*Rdc*RCdc*Idc_1))/Sd; %ค่าแรงดันที่บัสบนแกนดี
Isq_1=(w*Vbusd_1+Sq*Idc_1/Ceq)*Ceq; %ค่ากระแสที่ไหลออกจาก
%แหล่งจ่ายบนแกนคิก
Isd_1=((Vbusd_1/Leq)-(w*Isq_1)-(sqrt(3/2)*Vm/Leq*cosd(lampda_1)))*(-Leq/Req);
%ค่ากระแสที่ไหลออกจาก
%แหล่งจ่ายบนแกนคิก
Vbusq_1=Leq*(-w*Isd_1-Req*Isq_1/Leq+sqrt(3/2)*Vm/Leq*sind(lampda_1));
%ค่าแรงดันที่บัสบนแกนคิก

*****
จบการทำงานสำหรับการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัวสำหรับช่วงที่ 1
*****

*****
การคำนวณค่าสำหรับการทำงานของระบบในช่วงที่ 2
*****

Vf_2=200; %ค่าแรงดันสนามกำหนดให้เป็น 200 V สำหรับช่วงที่ 2
Tl_2=1.5; %ค่าโหลดทางกลของมอเตอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 2
WmCommand_2=200; %ค่าคำสั่งความเร็วรอบของมอเตอร์ช่วงที่ 2
If_2=Vf_2/Rf; %ค่ากระแสสนามของมอเตอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 2
Wm_2=WmCommand_2; %ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 2
Ia_2=(Tl_2+(B*Wm_2*2*pi/60))/(Kt*If_2); %ค่ากระแสอาร์เมเจอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 2
Va_2=(Ra*Ia_2)+(Kv*If_2*Wm_2*2*pi/60); %ค่าแรงดันอาร์เมเจอร์สำหรับการทำงานช่วงที่ 2

```

```

ILB_2=Ia_2;                                     %ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
                                                แบบบักคี่
*****
การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับการทำงานของระบบในช่วงที่ 2
*****
r=atand(w*Leq/Req);
Z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2);
Vs=50*pi/(3*sqrt(3));
Vm=Vs;
Vm_2=Vm;
Vout_rms=1.6554*Vs;
P_Total_2=(Tl_2*Wm_2*2*pi/60)+(Ia_2^2*Ra)+(Kv*If_2*(Wm_2*2*pi/60)^2*Ia_2^2)+2*Ia_2;
Q_Total_2=0 ;
eaVbus=1000;
ealampda=1000;
es=1e-10;
k=0;
while eaVbus>=es & ealampda>=es
    if k~=0
        du= Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv= Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;

        U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z - P_Total_1/3;
        V= Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*sind(r)/Z - Q_Total_1;
        Vbus(k+1)= Vbus(k)- (U*Dv-V*Du)/(du*Dv-Du*dv);
        lampda(k+1)= lampda(k)- (V*du-U*dv)/(du*Dv-Du*dv);
    end
end

```

```

eaVbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
ealampda=abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;

V_bus1=Vbus(k+1);
Ldegree=lampda(k+1);
else
Vbus(k+1)=220*pi/(3*sqrt(3));
lampda(k+1)=0.0001;
end
k=k+1;
end
lampda_2=Ldegree; %ค่าตอบมุม  $\lambda$  ที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
Vdc_2=V_bus2*3*sqrt(3)/pi; %ค่าตอบ  $V_{dc}$  ที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
ช่วงที่ 2
*****
จบการทำงานสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในช่วงที่ 2
*****
d=Va_2/Vdc_2; %ค่าวัฏจักรหน้าที่ในสถานะอยู่ตัวสำหรับช่วงที่ 2
Idc_2 = d*ILB_2; %ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองไฟฟ้า
กระแสตรง
Xw_2 = d/Ki; %ค่า  $X_\omega$ 
Sd=(sqrt(3/2))*(2*sqrt(3))/pi; %ค่า  $S_d$ 
Sq=0*(sqrt(3/2))*(2*sqrt(3))/pi; %ค่า  $S_q$ 
Vbusd_2=(Vdc_2-(d*RCdc*ILB_2)+(ru*Rdc*RCdc*Idc_2))/Sd; %ค่าแรงดันที่บัสบนแกนดี
Isq_2=(w*Vbusd_2+Sq*Idc_2/Ceq)*Ceq; %ค่ากระแสที่ไหลออกจาก
แหล่งจ่ายบนแกนคิว

```

```

Isd_2=((Vbusd_2/Leq)-(w*Isq_2)-(sqrt(3/2)*Vm/Leq*cosd(lampda_2)))*(-Leq/Req);
                                     %ค่ากระแสที่ไหลออกจาก
                                     แหล่งจ่ายบนแกนดี

Vbusq_2=Leq*(-w*Isd_2-Req*Isq_2/Leq+sqrt(3/2)*Vm/Leq*sind(lampda_2));
                                     %ค่าแรงดันที่บัสบนแกนคิว

```

จบการทำงานสำหรับการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัวสำหรับช่วงที่ 2



%ค่าในสภาวะอยู่ตัวที่คำนวณได้จะถูกรวบรวมไปใช้สำหรับกรอกค่าลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาคผนวก ง

โปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR
ซึ่งใช้งานร่วมกับแป้นพิมพ์ (Keypad) เพื่อป้อนค่าวัฏจักรหน้าที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

#include <Keypad.h>           //นำเข้าไลบรารีของแป้นพิมพ์
#include<avr/io.h>           //นำเข้าไลบรารีของอินพุต
int EN = 11;                 //กำหนดตัวแปร EN=11 เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม
float duty_cycle = 0;       //กำหนดตัวแปร duty_cycle=0 เป็นตัวเลขทศนิยม
//*****

//กำหนดตัวเลขจากแป้นพิมพ์เพื่อให้บอร์ดเข้าใจว่ากดหมายเลขอะไร
//*****

char keys [ROWS] [COLS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'X', '0', '!', '='}}
};
//*****

//คำสั่งติดต่อระหว่างบอร์ดและแป้นพิมพ์แบบแถว
//*****

byte rowPins[ROWS] = {39,41,43,45};
//*****

//คำสั่งติดต่อระหว่างบอร์ดและแป้นพิมพ์แบบหลัก
//*****

byte colPins[COLS] = {47,49,51,53};
//*****

//สร้างคำสั่งแป้นพิมพ์
//*****

Keypad myKeypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );

//*****

```

```

//การประกาศตัวแปร
//*****

boolean valOnePresent = false;      //กำหนดให้ valOnePresent มีพีชคณิตบูลีนเป็นผิด
boolean next = false;              //กำหนดให้ next มีพีชคณิตบูลีนเป็นผิด
boolean final = false;            //กำหนดให้ final มีพีชคณิตบูลีนเป็นผิด
String num1, num2;                //กำหนดให้ num1, num2 เป็นแปรสตริง
float n1,n2,Vset;                 //กำหนดให้ n1,n2,Vset เป็นเลขทศนิยม
float ans;                        //กำหนดให้ ans เป็นเลขทศนิยม
char op;                          //กำหนดให้ op เป็นตัวอักษร
float Vw = 0;                     //กำหนดให้ Vw = 0 เป็นเลขทศนิยม
//*****

//เข้าสู่ฟังก์ชันตั้งค่าของบอร์ด arduino [void setup()] เพื่อกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่
//*****

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16,3);
  pinMode(EN,OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT0 = 0;
}

```

```

//*****
//เข้าสู่ฟังก์ชันวนรอบของบอร์ด arduino [void loop()]เพื่อวนรอบส่งค่าวัฏจักรหน้าที่ตามที่ตั้งไว้ใน
ฟังก์ชันการตั้งค่า
//*****

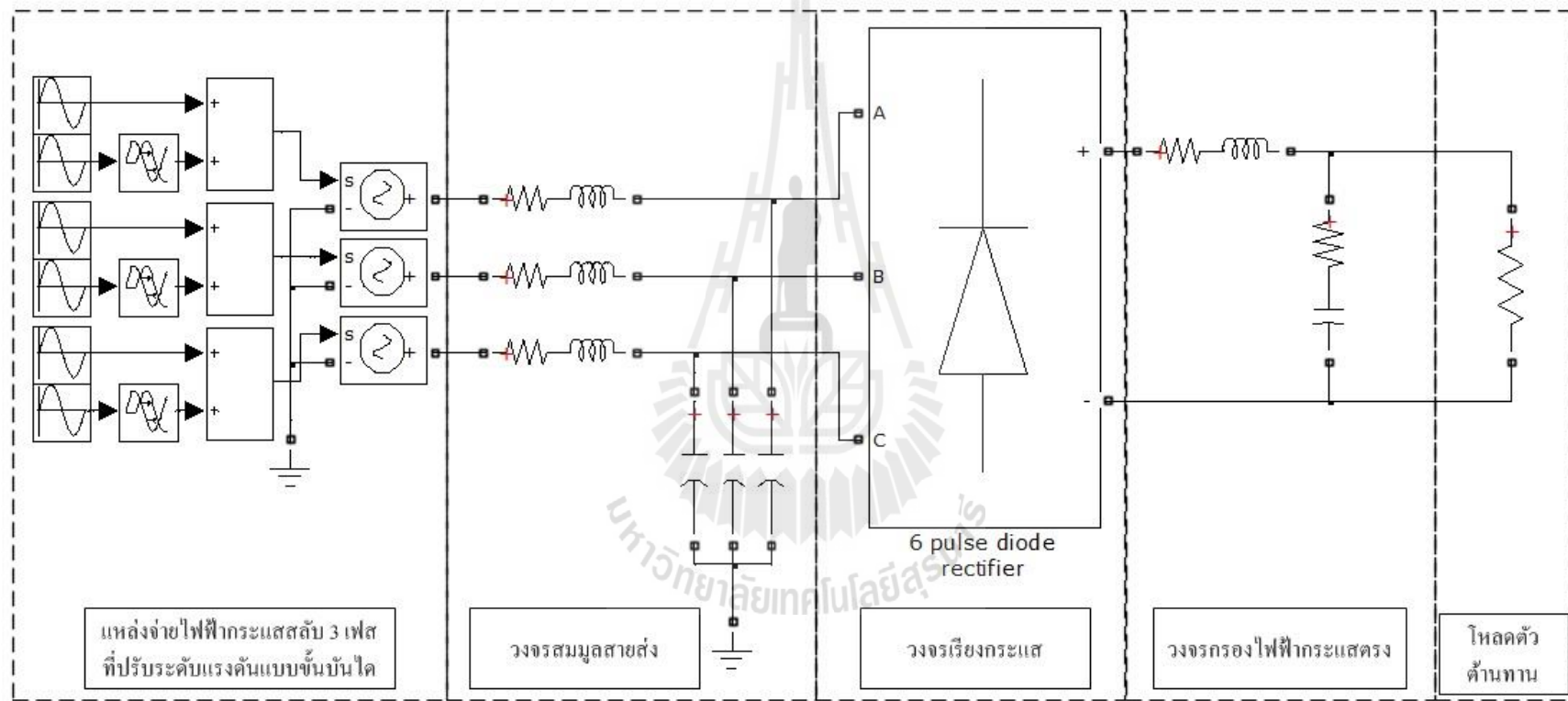
void loop(){
  char key = myKeypad.getKey();
  if (key != NO_KEY &&
(key=='1' || key=='2' || key=='3' || key=='4' || key=='5' || key=='6' || key=='7' || key=='8' || key=='9' || key=='0' || key
=='.'))){
    if (valOnePresent != true){
      num1 = num1 + key;
      int numLength = num1.length();
    } }
else if (valOnePresent == false && key != NO_KEY && ( key == '=' )){
  if (valOnePresent == false){
    valOnePresent = true;
    char charBuf[50];
    num1.toCharArray(charBuf, 50) ;
    Vw = atof(charBuf);
  }
}
else if (key != NO_KEY && key == 'X'){
  valOnePresent = false;
  final = false;
  num1 = "";
}
Vset = constrain(Vw,0,100);
duty_cycle = Vset;
OCR1A = duty_cycle*8;}

```

ภาคผนวก จ

บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันได
ของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

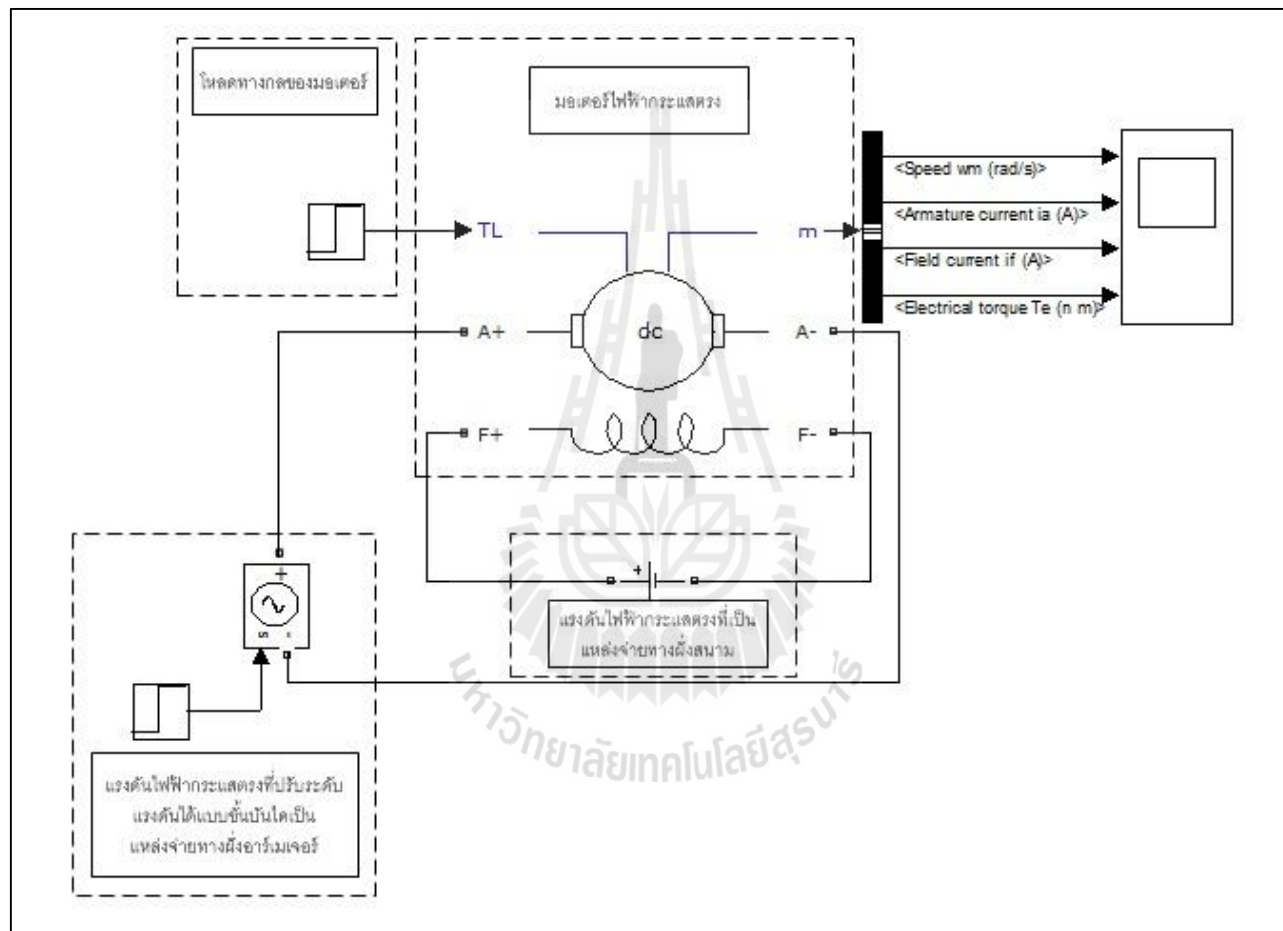


รูปที่ จ.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ภาคผนวก ฉ

บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันได
ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ๑.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ภาคผนวก ข

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นคิซีที่มีโหลดเป็นวงจรรวมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง Mathematical Model of AC-DC Power System Feeding a DC Motor Speed Control Circuit

จักรกริช กักสิทธิ์ กองพัน อารีรัมย์* และกองพล อารีรัมย์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *email : kongpan@sut.ac.th

PE040

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลา อันเนื่องมาจากอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพหรือออกแบบระบบควบคุม จะมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีคิซีและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีระบบควบคุมพื้นฐาน การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีคิซี วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป วงจรรวมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

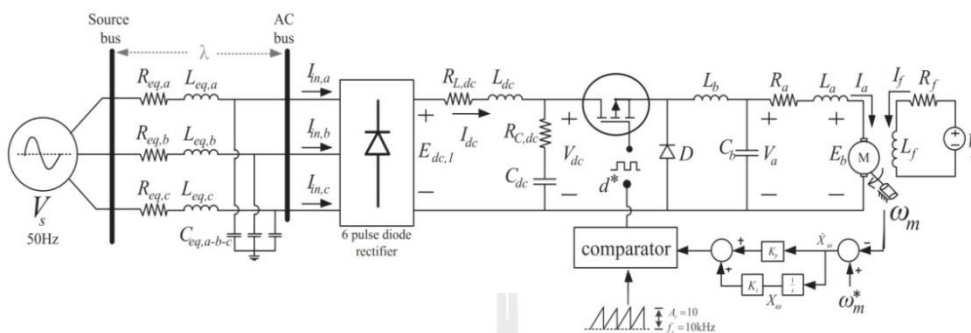
Abstract

Generally, the mathematical model of power converters is time-varying due to the switching action. The time-varying model is very complicated for the system analysis and design. Therefore, this paper presents how to derive the time-invariant model using the combination between the DQ method and the generalized state-space averaging method. The resulting model is suitable and easy for the stability analysis and design via the classical control theory. The proposed model is validated by the intensive time-domain simulation in MATLAB. The results show that the proposed model can provide the correct responses in both transient and steady-state.

Keywords: Mathematical model, DQ method, Generalized state-space averaging method, DC motor speed control circuit

1. บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบระบบควบคุม เมื่อพิจารณาถึงระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังพบว่า แบบจำลองของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลา เนื่องมาจากอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง [1]-[2] ในปัจจุบันมีงานวิจัยได้นำเสนอวิธีการหลายวิธี [3]-[4] ที่นำมาใช้จัดการของสวิตช์ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา จากนั้นทฤษฎีระบบควบคุมพื้นฐานสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบระบบควบคุมได้อย่างง่ายดาย ในบทความนี้จะทำการพิจารณาแบบจำลองสามเฟสเอซีเป็นคิซีที่มีวงจรรวมกระแสจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรรวมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังอยู่สองส่วน คือ วงจรรวมกระแสสามเฟส และวงจรแปลงผันแบบบักซึ่งอยู่ในวงจรรวมความเร็วมอเตอร์ ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองของระบบจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลา ซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์ระบบบทความนี้จะนำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบดังกล่าวด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีคิซี (DQ method) [5] และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) [6] การตรวจสอบความถูกต้องจะอาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้ กับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทความนี้ ให้แบบจำลองที่มีความถูกต้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว [7] สำหรับงานวิจัยในอนาคตได้โดยไม่ต้องซับซ้อน บทความนี้จะประกอบไปด้วย 5 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 อธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีคิซีและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้รับการนำเสนอในส่วนที่ 4 และส่วนที่ 5 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

บทความนี้ได้พิจารณาในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลผ่านสายส่งต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงผันแบบบิกค์ที่มีการควบคุมสำหรับใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งตัวควบคุมในระบบดังกล่าวเป็นตัวควบคุมชนิดพีโอ การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาส่วนอนิกที่เกดขึ้น ซึ่งระบบไฟฟ้างดังกล่าวสามารถพบได้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้จริงในปัจจุบัน สำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3 จะใช้วิธีคิดเพื่อแปลงแหล่งจ่ายสามเฟสสมดุลผ่านสายส่งต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนดิกซ์เพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตซ์ทางด้านแหล่งจ่ายและใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปทางด้านโพลของระบบไฟฟ้าเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์ที่มีการควบคุม เมื่อใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตซ์ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ทฤษฎีระบบควบคุมพื้นฐานต่อไป

3. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบทความนี้จะอาศัยวิธีคิดเพื่อแปลงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านสายส่งและวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนดิกซ์ โดยเมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่เข้าโศกพบว่าผลกระทบที่เกิดจาก L_{eq} ในรูปที่ 1 จะทำให้เกิดมุมเลื่อนเป็นผลให้เกิดแรงดันตกทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งแทนค่าแรงดันตกดังกล่าวด้วย r_μ [8] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \tag{1}$$

เมื่อพิจารณาถึงฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยวิธีคิดเพื่อเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตซ์ของไดโอด จะได้ดังสมการที่ (2) ซึ่งพบว่าสมการดังกล่าวไม่มีตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา

$$S_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi) - \phi \\ \sin(\phi) - \phi \end{bmatrix} \tag{2}$$

โดยที่ ϕ_c คือ มุมเฟสของแกนหมุนดิกซ์ และ ϕ คือ มุมเฟสของบัสแรงดันเอชซี

สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านสายส่งสามารถแปลงให้อยู่บนแกนดิกซ์ [9] ซึ่งจะได้เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นสามารถนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลบนแกนดิกซ์สำหรับการแปลงดิกซ์ทางด้านแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 2 โดยเราสามารถกำหนดให้มุมเฟสของแกนหมุนดิกซ์มีค่าเท่ากับมุมเฟสของบัสแรงดันเอชซี ($\phi_c = \phi$) เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง [3],[9]

จากรูปที่ 2 พบว่าทางฝั่งแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อใช้วิธีคิดจะทำให้ได้วงจรสมมูลบนแกนดิกซ์ที่เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน รวมไปถึงการกำจัดฟังก์ชันการสวิตซ์ซึ่งจะทำให้เมื่อวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตซ์

ลำดับต่อไปจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปพิจารณาทางด้านโพลของระบบไฟฟ้าเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์ โดยฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์แสดงดังสมการที่ (3)

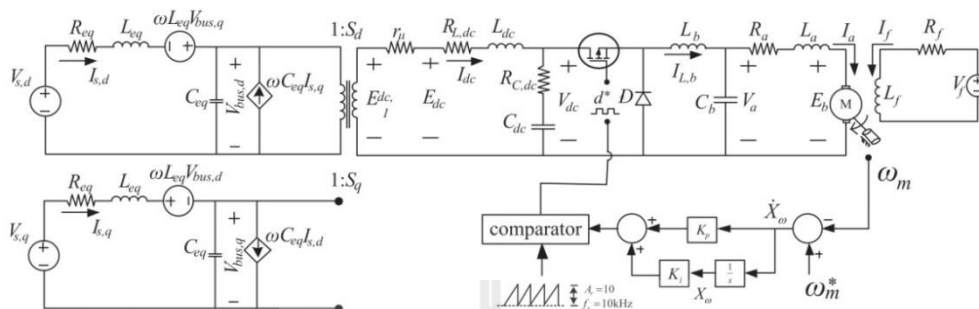
$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T \end{cases} \tag{3}$$

เมื่อ T_s และ d คือ คาบการสวิตซ์และค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์ ตามลำดับ

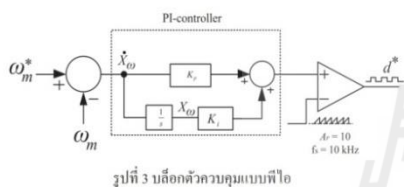
พิจารณาเฉพาะที่ความถี่มูลฐานและ โหมดกระแสต่อเนื่องด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยฟังก์ชันการสวิตซ์แสดงดังสมการที่ (4)

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \tag{4}$$

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแบบแกนคircuit



รูปที่ 3 บล็อกตัวควบคุมแบบพีไอ

$$d^* = \frac{1}{A_r} (K_p \omega_m^* - K_p \omega_m + K_i X_\omega) \quad (5)$$

การวิเคราะห์ห้วงจร โดยที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุมที่ไอหรือเรียกว่าระบบแบบวงเปิด จะกำหนดให้ค่า d เป็นตัวแปรตัวหนึ่งในแบบจำลอง เมื่อพิจารณาตัวควบคุมแบบที่ไอในรูปที่ 3 จะได้สมการเชื่อมโยงระหว่างระบบแบบวงเปิดและระบบแบบวงปิดคือ ค่า d^* ในสมการที่ (5) โดยนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในตัวแปร d จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงดังสมการที่ (6)

4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมการที่ (6) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถทำให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง เมื่อทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว จะได้ดังสมการที่มีรูปแบบดังสมการที่ (7) ซึ่งค่าต่าง ๆ ในเมตริกซ์ **A** **B** **C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติการของระบบ โดยทั่วไปแบบจำลองในสมการที่ (7) มีชื่อเรียกว่า แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (small signal model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจง [9]

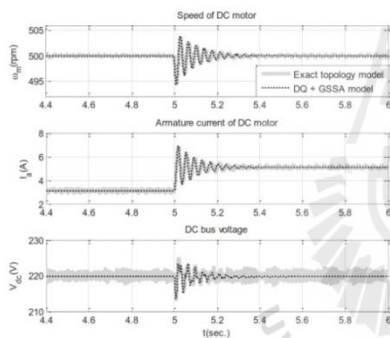
$$\begin{cases} \dot{\delta x} = \mathbf{A}(x_0, u_0) \delta x + \mathbf{B}(x_0, u_0) \delta u \\ \delta y = \mathbf{C}(x_0, u_0) \delta x + \mathbf{D}(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \quad (7)$$

การตรวจสอบความถูกต้องจะพิจารณาเป็นสัญญาณขนาดเล็กโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นมีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

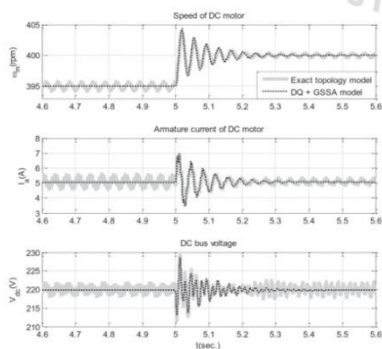
$$\begin{cases} \dot{i}_{r,d} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{r,d} + \omega i_{r,q} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \cos \lambda}{L_{eq}} \\ \dot{i}_{r,q} = -\omega i_{r,d} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{r,q} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \sin \lambda}{L_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{r,d}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \frac{S_d I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{r,q}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} - \frac{S_q I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{i}_{dc} = \frac{S_d V_{bus,d}}{L_{dc}} + \frac{S_q V_{bus,q}}{L_{dc}} - \frac{(r_p + R_{L,dc} + R_{C,dc}) I_{dc}}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} + \frac{K_f \omega_m^* R_{C,dc} I_{L,b}}{A_r L_{dc}} \\ \quad - \frac{K_f \omega_m^* R_{C,dc} I_{L,b}}{A_r L_{dc}} + \frac{K_f X_\omega R_{C,dc} I_{L,b}}{A_r L_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{K_f \omega_m^* R_{C,dc} I_{L,b}}{A_r C_{dc}} + \frac{K_f \omega_m^* R_{C,dc} I_{L,b}}{A_r C_{dc}} - \frac{K_f X_\omega R_{C,dc} I_{L,b}}{A_r C_{dc}} \\ \dot{i}_{L,b} = -\frac{K_f \omega_m^* R_{C,dc} V_{dc}}{A_r L_b} + \frac{K_f \omega_m^* R_{C,dc} V_{dc}}{A_r L_b} - \frac{K_f X_\omega R_{C,dc} V_{dc}}{A_r L_b} - \frac{V_{dc}}{L_b} \\ \dot{V}_c = \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{I_a}{C_b} \\ \dot{i}_a = \frac{V_c}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K_f I_f}{L_a} \omega_m \\ \dot{i}_f = -\frac{R_f}{L_f} i_f + \frac{V_f}{L_f} \\ \dot{\omega}_m = \frac{K_f I_f}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} \\ \dot{X}_\omega = \omega_m^* - \omega_m \end{cases} \quad (6)$$

ในอนาคต โดยในการตรวจสอบความถูกต้องจะกำหนดให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณาไว้ค่าดังนี้
 $R_{eq} = 0.1 \Omega$, $L_{eq} = 24 \text{ mH}$, $C_{eq} = 2 \text{ nF}$, $R_{L,dc} = 0.01 \Omega$
 $R_{C,dc} = 0.01 \Omega$, $L_{dc} = 30 \text{ mH}$, $C_{dc} = 230 \mu\text{F}$, $L_b = 30 \text{ mH}$
 $C_b = 125 \mu\text{F}$, $R_a = 2.581 \Omega$, $L_a = 28 \text{ mH}$, $R_f = 281.3 \Omega$
 $K_r = K_v = 0.9483$, $J = 0.02215 \text{ kg.m}^2$, $B = 0.002953$
 $K_p = 1.2575$, $K_i = 35.7579$

เงื่อนไขการตรวจสอบความถูกต้อง จะดำเนินการอยู่ 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่หนึ่งกำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังกล่าวมีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 500 rpm แล้วทำการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดจาก 3 N.m เป็น 5 N.m โดยพารามิเตอร์อื่น ๆ กำหนดให้มีค่าคงที่ ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลแสดงได้ดังรูปที่ 6 สำหรับส่วนที่สองกำหนดให้ระบบระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังกล่าวมีโหลดทางกลคงที่เท่ากับ 5 N.m แล้วทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์แบบขั้นบันไดจาก 395 rpm เป็น 400 rpm ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ผลการจำลองสถานการณ์โดยการเปลี่ยนโหลดทางกลจาก 3 N.m เป็น 5 N.m



รูปที่ 7 ผลการจำลองสถานการณ์โดยการเปลี่ยนความเร็วรอบจาก 395 rpm เป็น 400 rpm

5. สรุป

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีคิดวิเคราะห์ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เมื่อนำมาใช้ในการพิสูจน์แบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถให้แบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากบทความนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุมได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach", *IEEE Trans. on Circuit and Systems.*, Vol. 44, August 1997, pp.767-770.
- [2] A. Emadi, "Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic System Using the Generalized State-Space Averaging Method", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol 51 No.3, June 2004, pp. 661-668
- [3] T. Sopapim, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Mathematical of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter", *International Review on Modeling and Simulations*, August 2011, pp. 1426-1439
- [4] A. Emadi, "Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method", *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, Vol. 51, n. 5, October 2004, pp. 992-1000.
- [5] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "Stability Analysis and Modeling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, 29 June-2 July 2008, pp. 19-24.
- [6] L. Dong, H. Ma, F. Xu, "Modeling and Analysis of PWM Converters with a New GSSA Method", *Industrial Electronics 2008 (IECON 2008)*, Orlando USA, 10-13 Nov. 2008, pp. 821-826
- [7] P. Liutanakul, A-B Awan, S. Pierfederici, "Linear Stabilization of a DC Bus Supplying a Constant Power Load", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol 25 No.2, February 2010, pp. 475-488
- [8] N. Mohan, "Power Electronics: Converters", Applications, and Design, 2002
- [9] K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "The Stability Study of AC-DC Power System with Controlled Rectifier Including Effect of Voltage Control", *European Journal of Scientific Research*, October 2011, pp. 463-480.