

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลด
เป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**STABILITY ANALYSIS OF AC-DC POWER SYSTEM
FEEDING A SPEED CONTROLLED
DC MOTOR CIRCUIT**

Jakkrit Pakdeeto



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอเชียเป็นดิจิทัล
เป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิตตมงคล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ทองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ทองพล อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จักรกริช ภักดีโต : การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น
วงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (STABILITY ANALYSIS OF AC-
DC POWER SYSTEM FEEDING A SPEED CONTROLLED DC MOTOR CIRCUIT)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 185 หน้า

ปัจจุบันการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและโดยส่วนมากจะต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่มีการควบคุม เพื่อให้สามารถใช้งานมอเตอร์ในระดับความเร็วรอบตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมนั้นมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าแบบคงตัว (Constant Power Load : CPL) จากพฤติกรรมของโหลดชนิดดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดมีกำลังไฟฟ้าค่าหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาปัญหาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่ได้รับการพิสูจน์จากวิธีดีคิว (DQ Method) ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalize State-Space Averaging Approach : GSSA) เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time invariant model) ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้ทฤษฎีค่าเจาะจงในการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้ประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในลำดับสุดท้ายจะพิจารณาผลกระทบจากแบนด์วิธของลูปความเร็วที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมต่อไป การยืนยันผลการเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง ผลการศึกษาพบว่าค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงรวมถึงแบนด์วิธความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

JAKKRIT PAKDEETO : STABILITY ANALYSIS OF AC-DC POWER
SYSTEM FEEDING A SPEED CONTROLLED DC MOTOR CIRCUIT.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 185 PP.

STABILITY ANALYSIS/ SPEED CONTROLLED DC MOTOR/ CONSTANT
POWER LOAD / MATHEMATICAL MODEL

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 thesis 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 cooperation between the DQ and generalized state-space averaging (GSSA) methods. The time-invariant model can be achieved in which it is suitable for stability analysis with the eigenvalue's theorem. Moreover, the system identification of the proposed system using the artificial intelligence technique is also described in the thesis. 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 of the thesis. 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.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังได้ช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทาน เพื่อแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีพร้อมทั้งข้อคิดสำหรับการดำเนินชีวิตให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ การติดต่อประสานงานและข้อคิดในการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและให้กำลังใจในการศึกษาค้นคว้าตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนในการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

จักรกริช ภัคดีโต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 ระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก.....	1
1.1.2 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เอชเป็นดีซี.....	2
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตเบื้องต้น.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบไฟฟ้า.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่.....	10
2.4 สรุป.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่มีการควบคุม	15
3.1	บทนำ	15
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่มีการควบคุม	15
3.2.1	วิธีการแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)	16
3.2.2	การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ เป็น dq	18
3.2.3	วิธีการแปลงของปาร์ก (Park's Transform)	19
3.2.4	วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	20
3.2.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า.....	38
3.4	สรุป	44
4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	45
4.1	บทนำ	45
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	45
4.2.1	การออกแบบตัวควบคุมพีโอ	48
4.2.2	การทำให้เป็นเชิงเส้น	52
4.2.3	การหาค่าในสภาวะอยู่ตัว	54
4.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	57
4.4	สรุป	70
5	การสร้างชุดทดสอบ	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 บทนำ	72
5.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	73
5.2.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ	73
5.2.2 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นตัวต้านทาน	74
5.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	76
5.3.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ	76
5.3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	76
5.3.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์	80
5.3.4 วงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	86
5.3.5 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	88
5.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่มีการควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ...	91
5.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ	91
5.4.2 การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR	92
5.4.3 การอ่านค่าความเร็วรอบจากทาโคมิเตอร์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้พอร์ต ADC	93
5.4.4 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจร แปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	95
5.5 สรุป	97
6 การระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	98
6.1 บทนำ	98
6.2 ระบบที่พิจารณา	99
6.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยเครื่องมือวัด	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4	การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วย วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	104
6.4.1	การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีคิกว	104
6.4.2	การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน จากชุดทดสอบจริง	109
6.4.3	การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว	110
6.5	การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องมือวัด	118
6.6	การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	120
6.6.1	การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก	121
6.6.2	การทดสอบวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดทดสอบจริง	125
6.7	สรุป	128
7	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุม ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	130
7.1	บทนำ	130
7.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	131
7.2.1	การออกแบบตัวควบคุม	132
7.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง	134
7.4	ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองไฟฟ้า กระแสตรง	139
7.5	ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเก็บประจุของวงจรรองไฟฟ้า กระแสตรง	142
7.6	ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากแบนด์วิธความถี่ที่ใช้ ในการออกแบบตัวควบคุม	145

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.7 สรุป.....	151
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	152
8.1 สรุป.....	152
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	154
รายการอ้างอิง	156
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บล็อกจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก(กรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม).....	160
ภาคผนวก ข. บล็อกจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก(กรณีมีตัวควบคุม).....	162
ภาคผนวก ค. โปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัว ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	164
ภาคผนวก ง. โปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งใช้งานร่วมกับแป้นพิมพ์ (Keypad) เพื่อป้อนค่าวัฏจักรหน้าที่	172
ภาคผนวก จ. บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	176
ภาคผนวก ฉ. บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก	178
ภาคผนวก ช. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	180
ประวัติผู้เขียน	185

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้า8
2.2	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่10
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดขึ้น38
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอน ของมอเตอร์50
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i52
4.3	ค่าพารามิเตอร์ของระบบ57
5.1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน89
6.1	ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ102
6.2	ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำตัวเหนี่ยวนำ103
6.3	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 6.2107
6.4	ขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด116
6.5	ผลการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงวงจรอาร์เมเจอร์119
6.6	การวัดค่า L_d โดยใช้ LCR มิเตอร์120
6.7	ผลการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงวงจรสนาม120
6.8	การวัดค่า L_f โดยใช้ LCR มิเตอร์120
6.9	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 6.3123
7.1	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอน ของมอเตอร์132
7.2	ค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i134
7.3	ค่าพารามิเตอร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ135

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรถวลความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 2
1.2	วงจรถวลความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมความเร็วรอบ 3
1.3	วงจรถวลความเร็วไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต..... 3
3.1	ระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 16
3.2	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta 0$ 17
3.3	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq 18
3.4	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $dq0$ 19
3.5	ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง..... 22
3.6	วงจรมวลตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำบนแกนดีคิว 22
3.7	ตัวเก็บประจุในวงจรมวลสายส่ง..... 23
3.8	วงจรมวลของตัวเก็บประจุบนแกนหมุนดีคิว 23
3.9	วงจรรีจกระแสดสามเฟสแบบเต็มคลื่น..... 24
3.10	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรรีจกระแส..... 25
3.11	วงจรมวลบนแกนดีคิวของวงจรรีจกระแสสามเฟส 27
3.12	แผนภาพแสดง r_{μ} บนแกนดีคิว 28
3.13	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงดีคิว 29
3.14	วงจรมวลของระบบไฟฟ้าบนแกนดีคิว 29
3.15	วงจรมวลบนแกนดีคิวอย่างง่าย 30
3.16	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรถวลแบบบัทท์..... 31
3.17	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 32
3.18	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%) 40
3.19	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%) 41
3.20	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%) 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.21	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%)	43
4.1	ระบบไฟฟ้าเอซียเป็นดิซียที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	46
4.2	ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์	46
4.3	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิด	49
4.4	ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1	51
4.5	ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1	51
4.6	สายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟส	54
4.7	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 10 rad/s	59
4.8	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s	60
4.9	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 14 rad/s	61
4.10	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s	62
4.11	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s	63
4.12	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 20 rad/s	64
4.13	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 10 rad/s	65
4.14	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s	66
4.15	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 14 rad/s	67
4.16	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s	68
4.17	การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s	69
5.1	วงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	73
5.2	ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	75
5.3	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	75
5.4	วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	76
5.5	สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	77
5.6	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	79
5.7	ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	79
5.8	ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.9	บอร์ด ET-EASY Atmega1280.....	81
5.10	สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 20%.....	84
5.11	สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 50%.....	85
5.12	สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 80%.....	85
5.13	วงจรร่วมระหว่างวงจรจุดชนวนเกทกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	86
5.14	สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 20%	87
5.15	สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50%	87
5.16	สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 80%	88
5.17	ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	89
5.18	ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30% เป็น 50%.....	90
5.19	ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 70% เป็น 50%.....	90
5.20	ทาโคมิเตอร์สำหรับชุดทดสอบ.....	94
5.21	ชุดการทดสอบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	95
5.22	ผลการทดสอบที่ 500 rpm.....	96
5.23	ผลการทดสอบที่ 1000 rpm.....	96
6.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์	99
6.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	100
6.3	วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก	101
6.4	วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง	102
6.5	LCR meter รุ่น 879 จากบริษัท BK PRECISION	103
6.6	วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดีคิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์	105
6.7	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	108
6.8	ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์	109
6.9	สูตรค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา	110
6.10	ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0	111
6.11	กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12 กำหนดค่า S_0 ใหม่.....	112
6.13 กลไกการเดินย้อนรอย	112
6.14 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	113
6.15 ผลของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแส สามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	117
6.16 ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตคิซี.....	118
6.17 วงจรทดสอบค่าพารามิเตอร์ทางฝั่งอาร์เมเจอร์.....	119
6.18 วงจรทดสอบค่าพารามิเตอร์ทางฝั่งสนาม	119
6.19 ผลการตรวจสอบความถูกต้อง	124
6.20 ชุดทดสอบวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	125
6.21 ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์	126
6.22 ผลของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง.....	127
6.23 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการ ค้นหา.....	127
7.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์	131
7.2 ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1.....	133
7.3 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1.....	133
7.4 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$	136
7.5 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$	137
7.6 ผลการจำลองสถานที่ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$	138
7.7 ผลการจำลองสถานที่ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$	138
7.8 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ L_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง.....	139
7.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 25 \text{ mH}$	140
7.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 35 \text{ mH}$	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 45$ mH.....	141
7.12 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ C_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง	142
7.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 500$ μ F.....	143
7.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1000$ μ F.....	144
7.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1500$ μ F.....	144
7.16 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ ω_n มีการเปลี่ยนแปลง.....	145
7.17 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 18$ rad/s	146
7.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 20$ rad/s	147
7.19 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 22$ rad/s	147
7.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกล	148
7.21 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 18$ rad/s	149
7.22 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 20$ rad/s	149
7.23 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 22$ rad/s	149
7.24 จุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง	150
ก.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก (กรณีไม่มีตัวควบคุม).....	161
ข.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก (กรณีมีตัวควบคุม).....	163
จ.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของวงจรเรียงกระแส แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	177
ฉ.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดกระตุ้นแยก.....	179

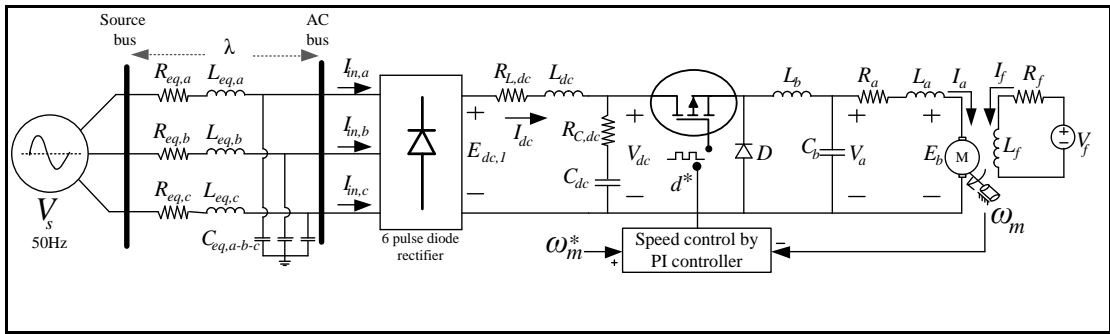
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโพลเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโพลเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพบมากในระบบรถไฟฟ้าแบบรางและโรงงานอุตสาหกรรม (Jiraphon Srisertpol, Chanyut Khajorntraidet, 2009) ซึ่งเป็นการแปลงระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำมาใช้กับรถไฟฟ้าในปัจจุบัน (F. Du, J. H. He, L. Yu, M. X. Li, Z. Q. Bo, A. Klimek, 2010) ซึ่งสามารถลดกำลังงานสูญเสียที่มาจากค่าอิมพีแดนซ์สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในระยะไกลเนื่องจากเมื่อเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่มีผลของอิมพีแดนซ์ที่มาจากความถี่ อีกทั้งยังพบว่ารถไฟฟ้าระบบรางในปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น (M.Niasati, A.Gholami, 2008) เนื่องจากมีความสะดวกในการขนส่งทางด้านการคมนาคม โครงสร้างของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโพลเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พบในปัจจุบันส่วนใหญ่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส $380 \text{ V}_{\text{rms}}$ 50 Hz เป็นแหล่งจ่ายผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่นที่มีตัวกรองเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์จะอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุม ซึ่งวงจรดังกล่าวมีหลายชนิด เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักก์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักก์-บูสต์ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถเลือกชนิดของตัวควบคุมที่มีในปัจจุบันได้อย่างหลากหลาย เช่น ตัวควบคุมพีไอ พีไอดี หรือตัวควบคุมแบบลอจิกพีซีซี เป็นต้น สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักก์เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ดังรูปที่ 1.1

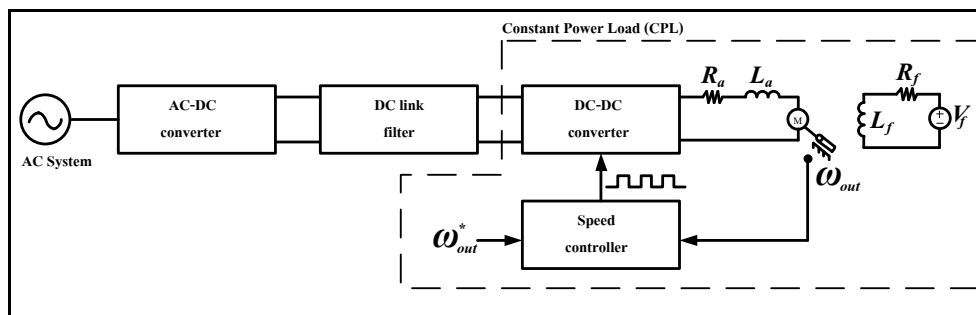


รูปที่ 1.1 ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

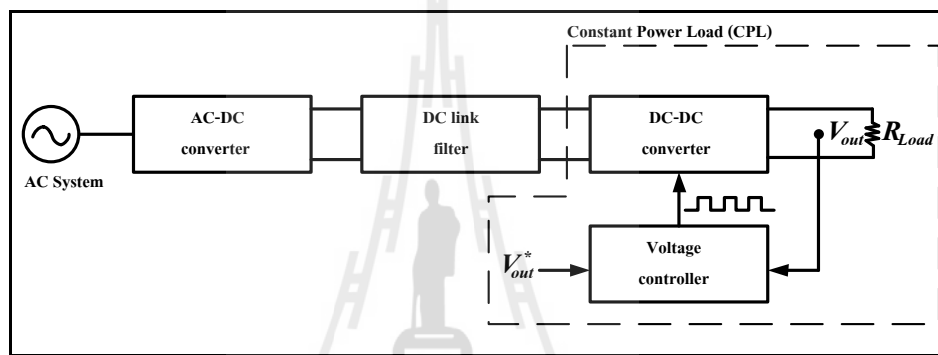
จากรูปที่ 1.1 เป็นระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยมีแหล่งจ่ายหลักเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่นที่มีตัวกรองเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ส่วนวงจรทางฝั่งขดลวดสนามจะจ่ายแรงดันไฟตรงคงที่มีค่าเท่ากับ V_f โดยทั่วไปวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load, CPL) (K-N Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, 2008) ดังนั้นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์จึงมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเช่นเดียวกับงานวิจัยในอดีต (K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010) พบว่าโหลดดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นไปที่การพิจารณาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อม $R_{c,dc}$ และ C_{dc} โดยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวดังกล่าวเมื่อมีกำลังไฟฟ้าค่าหนึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพ จะส่งผลกระทบหลายประการต่อระบบไฟฟ้าดังกล่าว เช่น เกิดความผิดพลาดในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเกิดความเสียหาย เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่ต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งานในสภาวะที่ระบบขาดเสถียรภาพ

1.1.2 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซี

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน เช่น วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมความเร็วรอบ วงจรแปลงผันไฟฟ้าดิซีเป็นดิซีที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต เป็นต้น โดยวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมความเร็วรอบ วงจรแปลงผันไฟฟ้าดิซีเป็นดิซีที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 ตามลำดับ



รูปที่ 1.2 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมความเร็วรอบ



รูปที่ 1.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต

โดยทั่วไปวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Rivetta, Williamson, and Emadi, 2005; Emadi, Khaligh, Rivetta, and Williamson, 2006) เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (K-N Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, D.W.P. Thomas, 2008) ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง หรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์จึงเป็นสิ่งจำเป็น การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำไปใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการใช้งานที่จุดเกิดการขาดเสถียรภาพ

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงเป็นสิ่งสำคัญ วงจรแปลงผันกำลังส่วนใหญ่มักจะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร เมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีการทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้เป็น

แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA) (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997; Emadi, 2004; Emadi, Ehsani, and Miller, 2004) วิธีดีคิว (DQ method) (K-N Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, 2008) วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) (Sudhoff, 1993; Sudhoff, Corzine, Hegner, and Delisle, 1996; Uan-Zo-li, Burgos, Lacaux, Wang, and Boroyevich, 2004) เป็นต้น เพื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบจริง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ทฤษฎีค่าเจาะจง
- 1.2.4 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้การสร้างชุดทดสอบจริงสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงดังรูปที่ 1
- 1.2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบจากแบนด์วิธของลูปลความเร็วที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย

- 1.3.1 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Sim Power System Block, PSB) ของโปรแกรม MATLAB
- 1.3.2 ระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 1.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

- 1.3.4 ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์เป็นตัวควบคุมพีไอ ที่ออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม
- 1.3.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้การประมาณค่าเป็นอันดับหนึ่ง
- 1.3.6 การสร้างตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในชุดทดสอบจริงจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR
- 1.3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์จากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB ในคอมพิวเตอร์
- 1.3.8 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิง ปรับตัวเพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบ
- 1.3.9 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า
- 1.3.10 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากสวิตซ์ที่ไม่เป็นอุดมคติ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกเท่านั้น
- 1.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกจะพิจารณาเฉพาะช่วงโหมดการทำงานแบบต่อเนื่องเท่านั้น (Continuous Conduction Mode : CCM)
- 1.4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีค่าเจาะจง (eigenvalue theorem)
- 1.4.4 การทำให้เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง

1.5 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้
 บทที่ 1 นำเสนอบทนำ และภาพรวมของงานวิจัย สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรง โดยกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า วัตถุประสงค์ที่ทำการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้นพร้อมทั้งกำหนดขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งประโยชน์ที่ผู้วิจัยคาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเข้ากับระบบ รวมถึงวิธีการในการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (กรณียังไม่มีตัวควบคุม) โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และการใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นเป็นเชิงเส้น พร้อมการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

บทที่ 4 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (กรณีมีตัวควบคุม) โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากบทที่ 3 มาเป็นพื้นฐานในการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบที่มีการควบคุม โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบจริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งอธิบายถึงอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการต่อวงจรพร้อมการสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM) จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเป็นสัญญาณจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

บทที่ 6 นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์โดยใช้การค้นหาค่าพารามิเตอร์จากวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบจากบทที่ 6 พร้อมทั้งยืนยันแนวโน้มการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้น

บทที่ 7 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นจากบทที่ 4 และค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบจากบทที่ 6 พร้อมทั้งยืนยันแนวโน้มการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้น

บทที่ 8 เป็นบทสรุปสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยได้นำเสนอผลลัพธ์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งปัญหาและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ขึ้นนี้

ภาคผนวกมีอยู่ 7 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. บล๊อคการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (กรณีไม่มีตัวควบคุม) ภาคผนวก ข. บล๊อคการจำลองสถานการณ์วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (กรณีมีตัวควบคุม) ภาคผนวก ค. โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัว ภาคผนวก ง. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ ภาคผนวก จ. โปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ภาคผนวก ฉ. บล๊อคจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขึ้นบันไดของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ภาคผนวก ช. บล๊อคจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขึ้นบันไดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในอดีตที่ผ่านมาผู้ทำการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมแรงดันเอาต์พุต ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเปลี่ยนโหลดจากตัวต้านทานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำมาควบคุมความเร็วรอบโดยใช้หลักการเดียวกัน ด้วยเหตุผลนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอชเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงผลกระทบของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้ากำลังในด้านต่าง ๆ รวมถึงเสถียรภาพของระบบ โดยปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1989	VladGrigore, JariHatonen , JormaKyyra, and TeuvoSuntio	นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันแบบบักซ์ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับโหมดการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในช่วงโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani, M.	นำเสนอแนวทางการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินและการแก้ไขปัญหามาแบบพื้นฐานระบบที่ศึกษาประกอบด้วยวงจรแปลงผันหลายวงจร รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมดเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันดิซีสเป็นดิซีสที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมอาศัยทฤษฎีเสถียรภาพของไลอาปูนอฟ (Lyapunov)
2004	Jusoh, A.B.	นำเสนอเกี่ยวกับการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีวงจรกรองกำลังไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อาศัยวิธีเกณฑ์ของมิดเดิลบรูก (Middlebrook criterion) นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการออกแบบวงจรพาสซีฟ เพื่อช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นอีกด้วย
2005	Rivetta, C., Williamson, G.A., and Emadi, A.	นำเสนอเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าของเรือดำน้ำและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นที่พฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันดิซีสเป็นดิซีสซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและพฤติกรรมของวงจรแปลงผันดิซีสเป็นดิซีสที่มีการควบคุมซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	นำเสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวการขาดเสถียรภาพในระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอเกี่ยวกับแนวคิดของการขาดเสถียรภาพสำหรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า รวมถึงแนวทางการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันในระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าเมื่อมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่

เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่ มีความจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่งแบบจำลองโดยทั่วไปมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทำให้มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์และสามารถอาศัยทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized state-space averaging) และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
1998	Soo-Bin Han, Nam-Sup Choi, Chun-Taik Rim, and Gyu-Hyeong Cho	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม ด้วยวิธีการแปลงดิคว และการวิเคราะห์ลักษณะพลวัต โดยวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอผลการทดลองจริงอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ
ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Emadi, A.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสซึ่งมีโหลดตัวต้านทานขนานกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยแบบจำลองของวงจรได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยวิธีค่าเจาะจง
2006	Liqiu Han, Jiabin Wang, and Howe, D.	นำเสนอเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากระแสตรง 270 โวลต์ สำหรับระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินโดยอาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear state-space models) และการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีค่าเจาะจง รวมถึงการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2007	Liqiu Han, Jiabin Wang, and Howe, D.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสแบบ 6 และ 12 พัลส์ โดยวิธีค่าเฉลี่ยสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม โดยใช้วิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับตัวต้านทาน โดยวิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ
ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายเอซีสามเฟสโดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยวิธีการแปลงดีคิวโดยระบบที่พิจารณาประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรอง รวมถึงความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และโหลดมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุมความเร็ว การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยวิธีค่าเจาะจง การแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการทดลอง
2011	Areerak, K-N., Wu, T. Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas, D.W.P.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน โดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยวิธีการแปลงดีคิวโดยระบบที่พิจารณาประกอบด้วยแหล่งจ่ายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสสามเฟสที่มีการควบคุมแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรอง รวมถึงความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และโหลดมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุมความเร็ว การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยวิธีค่าเจาะจง การแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ
ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N., Areerak, K-L.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีดีคิว ในระบบ ไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่ควบคุมได้ซึ่งมีโหลดเป็นโหลด กำลังไฟฟ้าคงตัว
2012	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., de Lillo, L., Thomas, D.W.P.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าบน เครื่องบินแบบไฮบริดโดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ อาศัยวิธีการแปลงดีคิวโดยระบบที่พิจารณาประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรอง รวมถึงความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และ โหลดมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุม ความเร็ว การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยวิธีค่า เจาะจง การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อ เสถียรภาพของระบบ การแสดงผลการจำลอง สถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการทดลอง

จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
ต่ออยู่ ยังไม่มีการนำเสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซี
เป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพนี้
จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
เนื่องจากมีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าดังกล่าวและทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น
เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งในอดีตได้มีการนำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการแปลงดีคิวอยู่
พอสมควร สำหรับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะอาศัยวิธีการคำนวณหาค่าเจาะจง เนื่องจากเป็น
ทฤษฎีพื้นฐาน มีขั้นตอนการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมากนักและมีประสิทธิภาพ สำหรับงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและแนวโน้มของเสถียรภาพที่มีผลมาจากแบนด์วิธของลูกความเร็วจึงใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ

2.4 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่ ซึ่งผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า โดยผลงานวิจัยต่าง ๆ ในอดีตที่นำเสนอในบทนี้ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ และการนำเอาความรู้ที่ได้ไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มผลกระทบจากแบนด์วิธของลูกความเร็วจึงต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งาน ณ จุดการขาดเสถียรภาพของระบบดังกล่าว



บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่มีการควบคุม

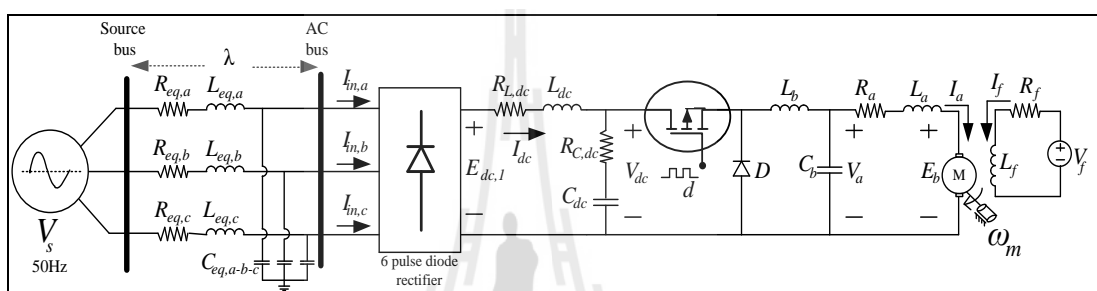
3.1 บทนำ

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก คือ พฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบไฟฟ้าซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการนำไปต่อยอดเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานการแปลงแกนดิคด้วยวิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform) ซึ่งวิธีการแปลงแกนดิคนี้มีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ลดความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมมูลได้เป็นอย่างดี ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging Approach, GSSA) ที่มีความเหมาะสมกับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ นอกจากนี้ยังนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป เนื้อหาในบทที่ 3 นี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการอธิบายความเป็นมาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะนำเสนอในบทที่ 4

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่มีการควบคุม

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ระบบไฟฟ้างกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดิคิร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการแปลงดิคิสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมมูลที่มีวงจรสมมูลสายส่งผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ย

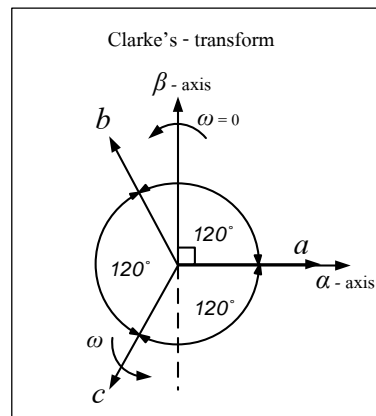
ปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 3.1 จะต้องพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ แหล่งจ่ายและโหลด โดยแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุลผ่านวงจรสมมูลสายส่งซึ่งต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ในส่วนนี้จะใช้วิธีคิวในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับวิธีค่าเฉลี่ย ปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้กับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของโหลด ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก



รูปที่ 3.1 ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3.2.1 การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)

การแปลงของคลาร์กเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ โดยวิธีการแปลงของคลาร์กแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.2 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสที่มีส่วนประกอบลำดับเฟสบวก (positive sequence) ซึ่งมีมุมห่างกัน 120° หรือ $2\pi/3$ เรเดียน และแกน $\alpha\beta$ จะต้องทำมุมตั้งฉากกัน โดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกันกับเฟส a สมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ พิจารณาได้ดังสมการที่ (3-1) เมื่อ f_{abc} คือ ปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสใดๆ ซึ่งอาจแทนด้วยแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 3.2 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta 0$

$$[\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}] = [\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}] [\mathbf{f}_{abc}] \quad (3-1)$$

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)

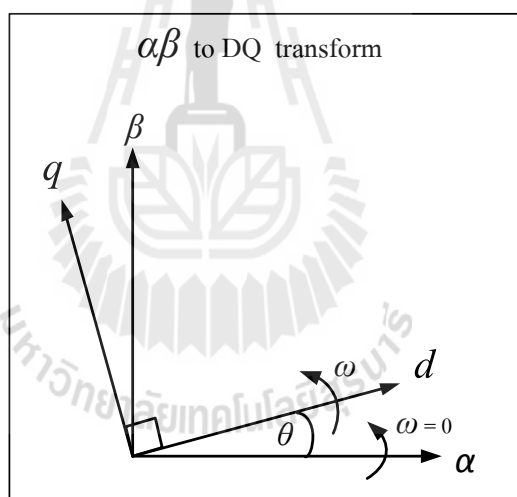
สำหรับสมการอินเวอร์สการแปลงของคลาร์กที่ใช้ในการแปลงปริมาณบนแกน $\alpha\beta 0$ มายังแกน abc แสดงได้ดังสมการที่ (3-2)

$$[\mathbf{f}_{abc}] = [\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}]^{-1} [\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}] \quad (3-2)$$

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

3.2.2 การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq

การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ (แกนหยุดนิ่ง) ไปอยู่บนแกน dq (แกนหมุน) จะพิจารณาโดยใช้แผนภาพเวกเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของสมการระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน dq เป็นดังสมการที่ (3-3) เมื่อ θ คือ มุมการหมุนสำหรับการแปลงดีคิวซึ่งมีค่าเท่ากับ ωt



รูปที่ 3.3 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq

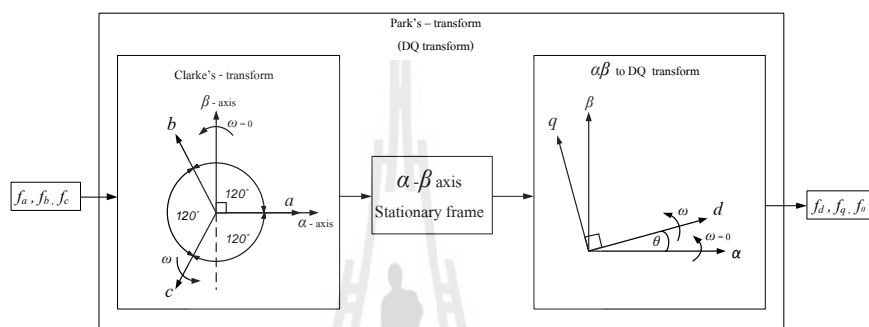
$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

สำหรับสมการอินเวอร์สการแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq แสดงได้ดังสมการที่ (3-4)

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

3.2.3 วิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform)

วิธีการแปลงของปาร์คเป็นวิธีการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $dq0$ โดยการแปลงของปาร์คแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.4 จากรูปอธิบายได้ว่า แกน d จะตั้งฉากกับแกน q เป็นมุม 90° หรือ $\pi/2$ เรเดียน สมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $dq0$ พิจารณาได้จากสมการที่ (3-5) และอินเวอร์สการแปลงของปาร์คแสดงดังสมการที่ (3-6)



รูปที่ 3.4 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $dq0$

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}] [f_{abc}] \quad (3-5)$$

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

$$[f_{abc}] = [T_{dq0}]^{-1} [f_{dq0}] \quad (3-6)$$

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

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

3.2.4 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหามาจากอุปกรณ์ สวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าคิซเป็นคิซ จากรูปที่ 3.1 พบว่ามีอุปกรณ์สวิตช์ปรากฏอยู่ในวงจร แปลงผันแบบบัก์ ซึ่งผลของอุปกรณ์สวิตช์จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ ขึ้นอยู่กับเวลา แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลานั้นจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนที่จะนำไปใช้ในการ วิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 7 เพื่อลดความซับซ้อนจึงได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อ กำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัก์ และสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก (J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani)

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรเวลาของ อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะ โดยหลักการพื้นฐานของ อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถ เขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (3-7)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (3-7)$$

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

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

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะอาศัย $\langle x \rangle_k(t)$ เป็นตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (3-8)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-8)$$

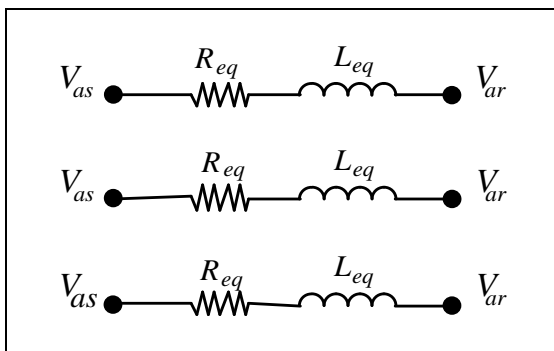
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาผลของฮาร์มอนิกในอันดับมากกว่าศูนย์ เนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงใช้การประมาณอันดับศูนย์ (zero-order approximation) เพื่อหาเพียงสัมประสิทธิ์ที่ความถี่มูลฐาน โดยการกำหนดค่า k ของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนให้มีค่าเท่ากับศูนย์

3.2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจร

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นต้องอาศัยวงจรสมมูลบนแกนดีคว์ซึ่งอยู่ภายใต้ทฤษฎีการแปลงดีคว์ด้วยวิธีการแปลงของปาร์คร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแหล่งจ่ายและโหลด สำหรับทางด้านแหล่งจ่ายจะใช้วิธีดีคว์ และทางด้านโหลดจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

พิจารณาทางด้านแหล่งจ่ายจากรูปที่ 3.1 เมื่อแปลงดีคว์ด้วยการแปลงของปาร์คสำหรับอุปกรณ์ของวงจรแหล่งจ่ายได้แก่ วงจรสมมูลสายส่งที่มีตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ รวมถึงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น ในขั้นแรกพิจารณาวงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 3.5 สามารถคำนวณแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ (3-9) และสามารถแปลงให้สมการบนแกนดีคว์ได้ดังสมการที่ (3-10) (K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010)

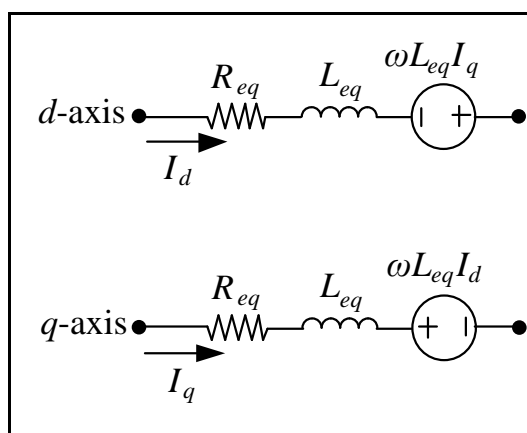


รูปที่ 3.5 ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง

$$\Delta \mathbf{V}_{\text{dror,abc}} = R_{eq} \mathbf{I}_{\text{abc}} + L_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{\text{abc}} \quad (3-9)$$

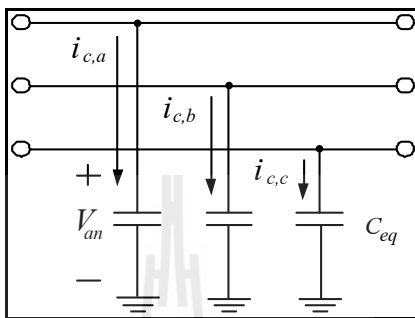
$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \\ \Delta V_0 \end{bmatrix} = R_{eq} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + L_{eq} \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + L_{eq} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

จากสมการที่ (3-10) เป็นสมการที่ใช้ในการหาแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่อยู่บนแกนดีคิว ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปวงจรมุมโดยใช้การวิเคราะห์พื้นฐานทางไฟฟ้า และจากวงจรมุมดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการแปลงตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่อยู่บนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรมุมตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำบนแกนดีคิว

ในทำนองเดียวกันสามารถพิจารณาในส่วนของตัวเก็บประจุจากวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังกล่าวได้ดังสมการที่ (3-11) และสามารถดำเนินการแปลงเป็นสมการบนแกนดิกิวได้ดังสมการที่ (3-12) (K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010)

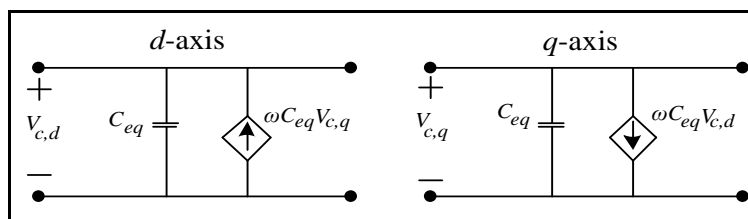


รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุในวงจรสมมูลสายส่ง

$$\mathbf{I}_{c,abc} = C_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{V}_{abc} \tag{3-11}$$

$$\begin{bmatrix} I_{c,d} \\ I_{c,q} \\ I_{c,0} \end{bmatrix} = C_{eq} \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{c,d} \\ V_{c,q} \\ V_{c,0} \end{bmatrix} + C_{eq} \begin{bmatrix} \dot{V}_{c,d} \\ \dot{V}_{c,q} \\ \dot{V}_{c,0} \end{bmatrix} \tag{3-12}$$

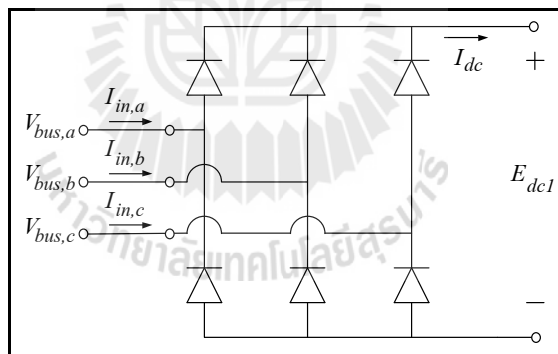
จากสมการที่ (3-12) เป็นสมการที่ใช้ในการหากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่อยู่บนแกนดิกิว ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลบนแกนดิกิวโดยใช้การวิเคราะห์พื้นฐานทางไฟฟ้า และจากวงจรสมมูลดังกล่าวสามารถใช้ในการแปลงตัวเก็บประจุของวงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนดิกิวได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุบนแกนหมุนดิกิว

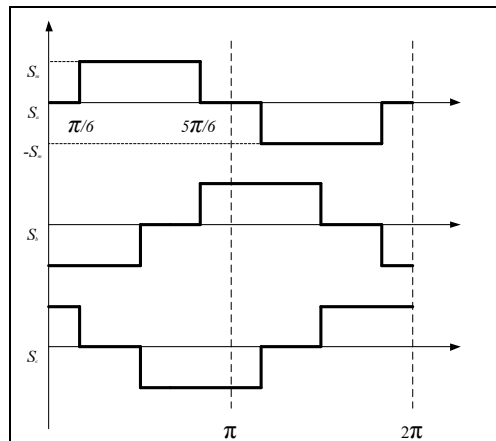
จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการพิสูจน์วงจรสมมูลบนแกนดีคิวของอุปกรณ์ในวงจรสมมูลสายส่งได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ และในลำดับถัดไปเป็นการพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นซึ่งประกอบด้วยไดโอด 6 ตัว ซึ่งสามารถแสดงส่วนประกอบวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นได้ดังรูปที่ 3.9 ในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นจะมีไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) แบบจำลองดังกล่าวไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในอนาคต ดังนั้นเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ผู้วิจัยจึงอาศัยหลักการในการแปลงดีคิวเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแส โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดและกำหนดให้การทำงานของวงจรเรียงกระแสมีสมมติฐานดังนี้

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



รูปที่ 3.9 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น

หากวงจรเรียงกระแสที่พิจารณามีลักษณะตรงตามสมมติฐานดังกล่าวจะสามารถใช้วิธีดีคิวในการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด โดยสามารถแสดงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นได้ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งในที่นี้ยังไม่พิจารณาผลกระทบของมุมเลื่อมอันเนื่องมาจากผลของ L_{eq} ในวงจรสมมูลสายส่ง (Kongpan Areerak (M. Eng), Modelling and Stability Analysis of Aircraft Power Systems, 2009)



รูปที่ 3.10 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส

จากรูปที่ 3.10 แสดงสมการสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการที่ (3-13) (K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010) โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและไม่คำนึงถึงฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ จะได้ฟังก์ชันของการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นดังนี้

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

จากรูปที่ 3.1 กำหนดให้ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสแรงดันเอซี จากการกำหนดดังกล่าวสามารถใช้สมการที่ (3-5) ในการพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสและแรงดันจากรูปที่ 3.9 ซึ่งพิจารณาได้ดังสมการที่ (3-14) และ (3-15) ตามลำดับ

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc} \quad (3-14)$$

$$\mathbf{E}_{dc,1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (3-15)$$

พิจารณาฟังก์ชันสวิตช์ของไดโอดบนแกนดีคิวได้จากสมการที่ (3-13) ซึ่งอาศัยการแปลงดีคิวจากสมการที่ (3-5) จะได้ว่า

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

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

$$\mathbf{S}_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ \sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

เมื่อ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสเอช และ ϕ_1 คือ มุมของแกนหมุนดีคิว

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสสำหรับวงจรเรียงกระแสจากสมการที่ (3-14) โดยอาศัยการแปลงดีคิวจากสมการที่ (3-5) จะได้ว่า

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

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

$$\mathbf{I}_{in,dq} = \mathbf{S}_{dq} I_{dc} \quad (3-17)$$

จากสมการที่ (3-15) อาศัยอินเวอร์สการแปลงดีคิวจากสมการที่ (3-6) จะได้ว่า

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

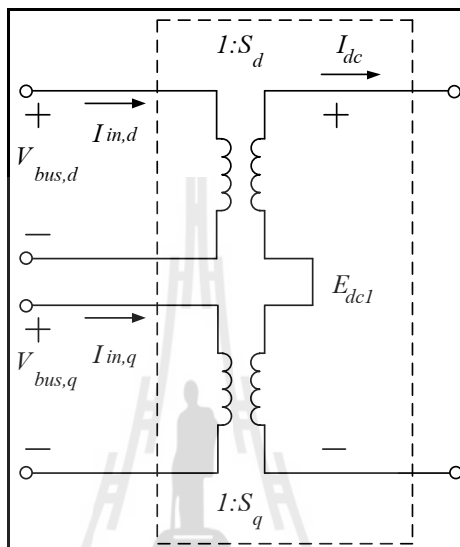
$$E_{dc,1} = [\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{S}_{dq}] [\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq}]$$

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

$$E_{dc,1} = \mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{V}_{bus,dq} \quad (3-18)$$

จากสมการที่ (3-17) และ (3-18) พบว่าเมื่อใช้วิธีดีคิวในการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสและ

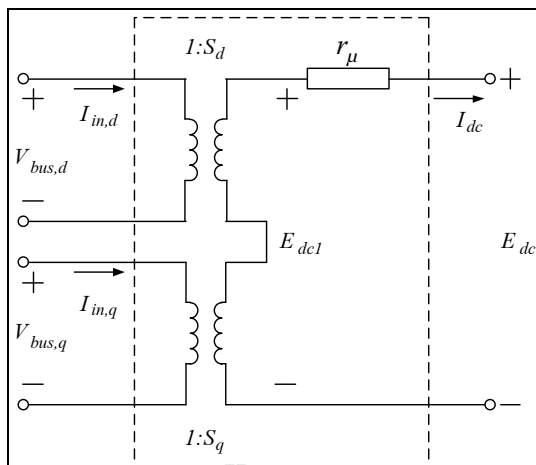
แรงดันตามลำดับ จะได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกระแสและแรงดัน ซึ่งลักษณะอัตราส่วนดังกล่าวทำให้มีลักษณะสมการคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และเมื่อใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าสามารถอธิบายสมการที่ (3-17) และ (3-18) ด้วยวงจรสมมูลบนแกนคิกิวสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลบนแกนคิกิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

จากรูปที่ 3.9 พิจารณาผลกระทบเนื่องจาก L_{eq} ส่งผลให้เกิดมุมความเหลื่อม (Overlap angle) ซึ่งทำให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสมีขนาดลดลงเล็กน้อย จากผลกระทบดังกล่าวสามารถพิจารณาแทนค่าแรงดันตกด้วยตัวต้านทาน r_μ (Ned Mohan, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2003) ที่บริเวณด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามารถแสดงดังในรูปที่ 3.12 ซึ่งตัวต้านทาน r_μ คำนวณได้จากสมการที่ (3-19)

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



รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดง r_μ บนแกนดีคิว

ในลำดับถัดไปเป็นการพิจารณาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นแหล่งจ่ายบนแกนดีคิวโดยพิจารณาจากสมการของแหล่งจ่ายดังนี้

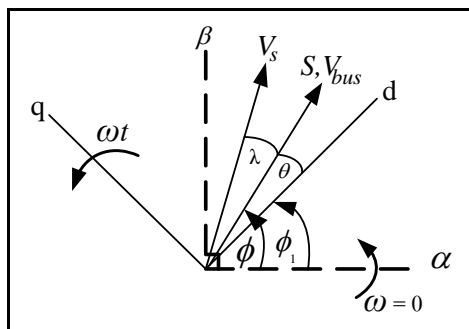
$$\begin{bmatrix} V_{s,a} \\ V_{s,b} \\ V_{s,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\omega t) \\ V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix}$$

แปลงให้เป็นแหล่งจ่ายบนแกนดีคิวโดยใช้สมการที่ (3-5) ได้ดังสมการที่ (3-20)

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

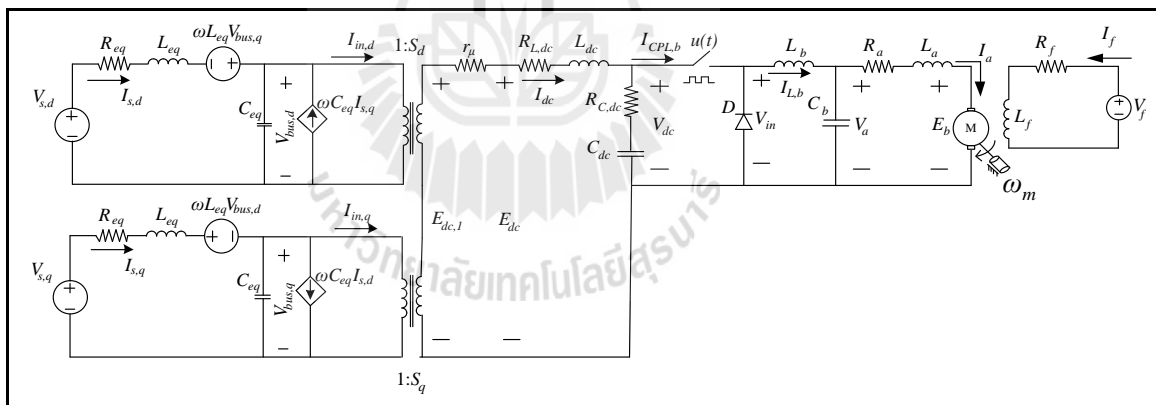
$$\begin{bmatrix} V_{s,d} \\ V_{s,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(\lambda + \phi + \phi_1) \\ V_m \sin(\lambda + \phi + \phi_1) \end{bmatrix} \tag{3-20}$$

จากสมการที่ (3-16) และ (3-20) เป็นสมการการแปลงฟังก์ชันสวิตซ์ของไดโอดและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของสมการดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงดีคิ

จากการแปลงดีคิที่กล่าวมาสามารถแปลงระบบไฟฟ้ากำลังเอซเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 3.1 เมื่อแปลงให้อยู่บนแกนดีคิจะพบว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสถูกแปลงด้วยวิธีดีคิเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอยู่บนแกนดีและแกนคว รวมไปถึงวงจรเรียงกระแสสลับสามเฟสที่ใช้ไดโอดเมื่อแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดจะได้วงจรสมมูลบนแกนดีคิเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกนดีคิ

จากสมการที่ (3-16) และ (3-20) สามารถทำให้วงจรสมมูลแบบแกนดีคิที่แสดงในรูปที่ 3.12 อยู่ในรูปวงจรง่ายด้วยการกำหนดให้ $\phi = \phi_1$ และจากการกำหนดค่าตัวแปรดังกล่าวสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (3-21) ถึง (3-24)

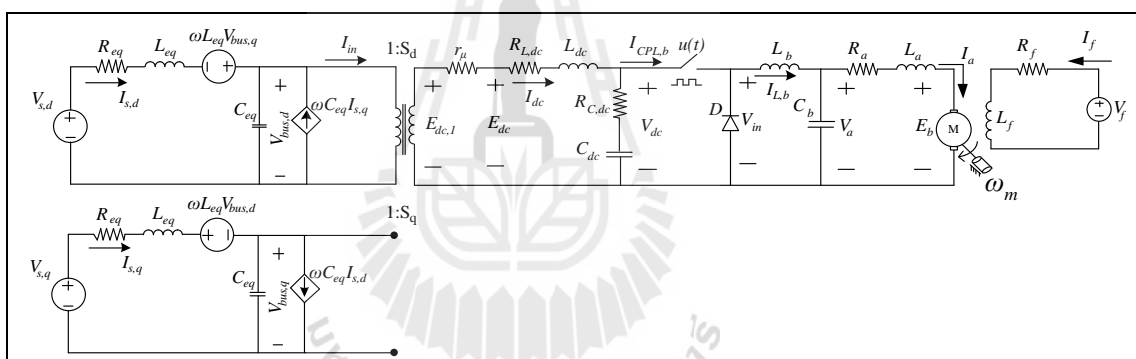
$$V_{s,d} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \tag{3-21}$$

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

$$S_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \quad (3-23)$$

$$S_q = 0 \quad (3-24)$$

จากสมการที่ (3-21) ถึง (3-24) จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนหม้อแปลงบนแกนคิก (S_q) มีค่าเท่ากับศูนย์ และมุมของฟังก์ชันสำหรับการแปลงแหล่งจ่ายบนแกนคิกและแกนคิกจะเหลือเพียง λ เป็นผลให้วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกนคิกคิกที่ได้จากสมการดังกล่าวเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



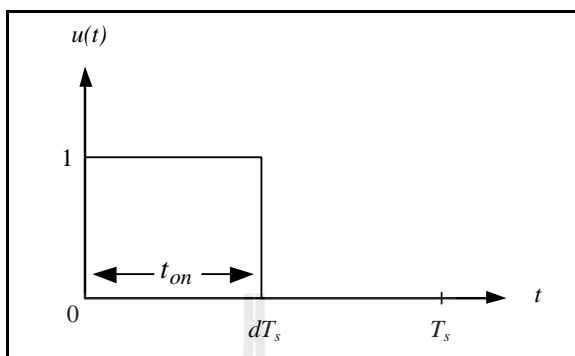
รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลบนแกนคิกอย่างง่าย

จากวงจรสมมูลบนแกนคิกของระบบไฟฟ้าเอซซีเป็นคิซซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปที่ 3.15 จะไม่พิจารณาวงจรสมมูลของแกนลำดับศูนย์ (zero-sequence) เนื่องจากระบบสามเฟสที่พิจารณาเป็นแบบสามเฟสสมดุล

ในลำดับต่อไปจะพิจารณาทางฝั่ง โหลดซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันแบบบัทคัที่ต่ออยู่กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กัเวลาซึ่งเป็นผลมาจากอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัทคั รายละเอียดของวิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ผ่านมา

พิจารณาจากรูปที่ 3.15 พบว่าสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัทคัก็มีลักษณะการทำงานในโหมดการนำกระแสและหยุดนำกระแสเป็นดังรูปที่ 3.16 เมื่อ T_s

คือ คาบการสวิตช์ d คือ วัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และ t_{on} คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส ซึ่งตัวแปรทั้งสามมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (3-25)



รูปที่ 3.16 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

$$d = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3-25)$$

จากรูปที่ 3.16 สามารถพิจารณาเงื่อนไขของฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ แสดงดังสมการที่ (3-26)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-26)$$

จากรูปที่ 3.15 พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบัคค์เมื่อสวิตช์ปิด จะทำให้ $I_{CPL,b} = I_{L,B}$ และ $V_{in} = V_{dc}$ ในลำดับถัดมาเมื่อสวิตช์เปิด จะทำให้ $I_{CPL,B} = 0$ A และ $V_{in} = 0$ V (สมมติให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมไดโอดเมื่อนำกระแส) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{CPL,b}$ กับ $I_{L,B}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง V_{in} กับ V_{dc} สามารถเขียนสมการในรูปของฟังก์ชันสวิตช์ $u(t)$ แสดงดังสมการที่ (3-27) และ (3-28) ตามลำดับ

$$I_{CPL,b} = u(t)I_{L,B} \quad (3-27)$$

$$V_{in} = u(t)V_{dc} \quad (3-28)$$

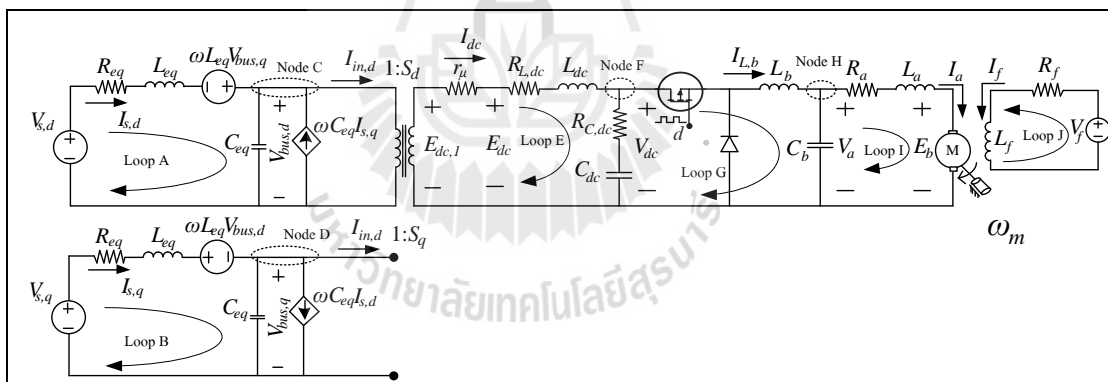
จากสมการที่ (3-27) และ (3-28) จะพบว่ามีฟังก์ชันการสวิตช์ปรากฏอยู่ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ $u(t)$ จะพิจารณาเพียงการประมาณอันดับศูนย์ได้ดังสมการที่ (3-29)

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} u(t) \cdot e^0 dt$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 dt$$

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3-29)$$

ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าจะอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ในการวิเคราะห์วงจร และสามารถแทนฟังก์ชันการสวิตช์ด้วยค่า d ซึ่งหมายถึงค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) มีค่าอยู่ระหว่าง 0% ถึง 100% บ่งบอกถึงสถานะการทำงานของสวิตช์ รายละเอียดการวิเคราะห์วงจรสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.17 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-30) ถึง (3-39)



รูปที่ 3.17 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- พิจารณา Loop A ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$-V_{s,d} + R_{eq} I_{s,d} + L_{eq} \dot{I}_{s,d} - \omega L_{eq} I_{s,q} + V_{bus,d} = 0$$

$$\dot{I}_{s,d} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,d} + \omega I_{s,q} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{V_{s,d}}{L_{eq}} \quad (3-30)$$

$$\text{เมื่อ } V_{s,d} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos \lambda$$

- พิจารณา Loop B ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

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

- พิจารณา Node C ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 I_{s,d} + \omega C_{eq}V_{bus,q} &= C_{eq}\dot{V}_{bus,d} + I_{in,d} \\
 \text{เมื่อ } I_{in,d} &= S_d I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}}I_{s,d} + \omega V_{bus,q} - \frac{S_d}{C_{eq}}I_{dc}
 \end{aligned} \tag{3-32}$$

- พิจารณา Node D ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 I_{s,q} - \omega C_{eq}V_{bus,d} - C_{eq}\dot{V}_{bus,q} - I_{in,q} &= 0 \\
 \text{เมื่อ } I_{in,q} &= S_q I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}}I_{s,q} - \omega V_{bus,d} - \frac{S_q}{C_{eq}}I_{dc}
 \end{aligned} \tag{3-33}$$

- 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 (3-29) ดังนี้

$$\dot{I}_{dc} = \frac{S_d}{L_{dc}} V_{bus,d} + \frac{S_q}{L_{dc}} V_{bus,q} - \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{d \cdot R_{C,dc}}{L_{dc}} I_{L,b} \quad (3-34)$$

- พิจารณา Node F ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} I_{dc} &= C_{dc} \dot{V}_{dc} + I_{L,b} u(t) \\ \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_{L,b} \end{aligned} \quad (3-35)$$

- พิจารณา Loop G ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} -V_{dc} u(t) + L_b \dot{I}_{L,b} + V_a &= 0 \\ \dot{I}_{L,b} &= \frac{d}{L_b} V_{dc} - \frac{1}{L_b} V_a \end{aligned} \quad (3-36)$$

- พิจารณา Node H ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} I_{L,b} &= C_b \dot{V}_a + I_a \\ \dot{V}_a &= \frac{1}{C_b} I_{L,b} - \frac{1}{C_b} I_a \end{aligned} \quad (3-37)$$

- พิจารณา Loop I ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} -V_a + R_a I_a + L_a \dot{I}_a + E_b &= 0 \quad \text{เมื่อ} \quad E_b = K_v I_f \omega_m \\ \dot{I}_a &= \frac{1}{L_a} V_a - \frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_v I_f \omega_m}{L_a} \end{aligned} \quad (3-38)$$

- พิจารณา Loop J ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned} -V_f + R_f I_f + L_f \dot{I}_f &= 0 \\ \dot{I}_f &= -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{V_f}{L_f} \end{aligned} \quad (3-39)$$

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ดังนั้นในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาจำเป็นต้องอาศัยสมการโพลตรงกลางของมอเตอร์และสมการทางกลของมอเตอร์ที่แปลงผันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล แสดงได้ดังสมการที่ (3-40) และ (3-41) ตามลำดับ

$$T_m - T_L - B\omega_m = J\dot{\omega}_m \quad (3-40)$$

$$T_m = K_t I_f I_a \quad (3-41)$$

จากการแทนค่าสมการที่ (3-41) ลงในสมการที่ (3-40) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อให้อยู่ในรูปของอัตรา การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อหนึ่งหน่วยเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3.42)

$$\dot{\omega}_m = \frac{K_t I_f}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} \quad (3-42)$$

จากการพิสูจน์สมการทั้งหมดที่ผ่านมาสามารถวิเคราะห์วงจรสมมูลบนแกนดีคิวในรูปที่ 3.17 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-43)

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

จากสมการที่ (3-43) สามารถเขียนสมการเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \\
\mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u}
\end{aligned} \tag{3-44}$$

โดยกำหนดให้

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

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

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

และรายละเอียดของแมทริกซ์ $A(x,u)$, $B(x,u)$, $C(x,u)$ และ $D(x,u)$ แสดงไว้ดังนี้

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

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

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

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

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบไฟฟ้าเอซี เป็นดีซีที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการแปลงดีควและค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในสมการที่ (3.43) เป็นแบบจำลองสำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยบล็อกการจำลองสถานการณ์ด้วย Simulink ที่ใช้สำหรับแสดงผลการตอบสนองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก

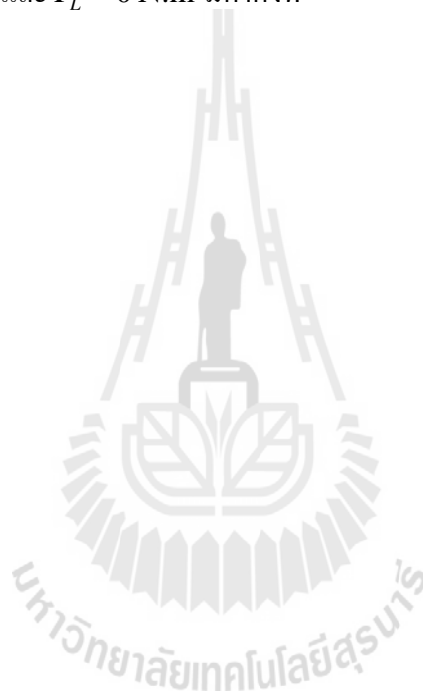
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดขึ้น

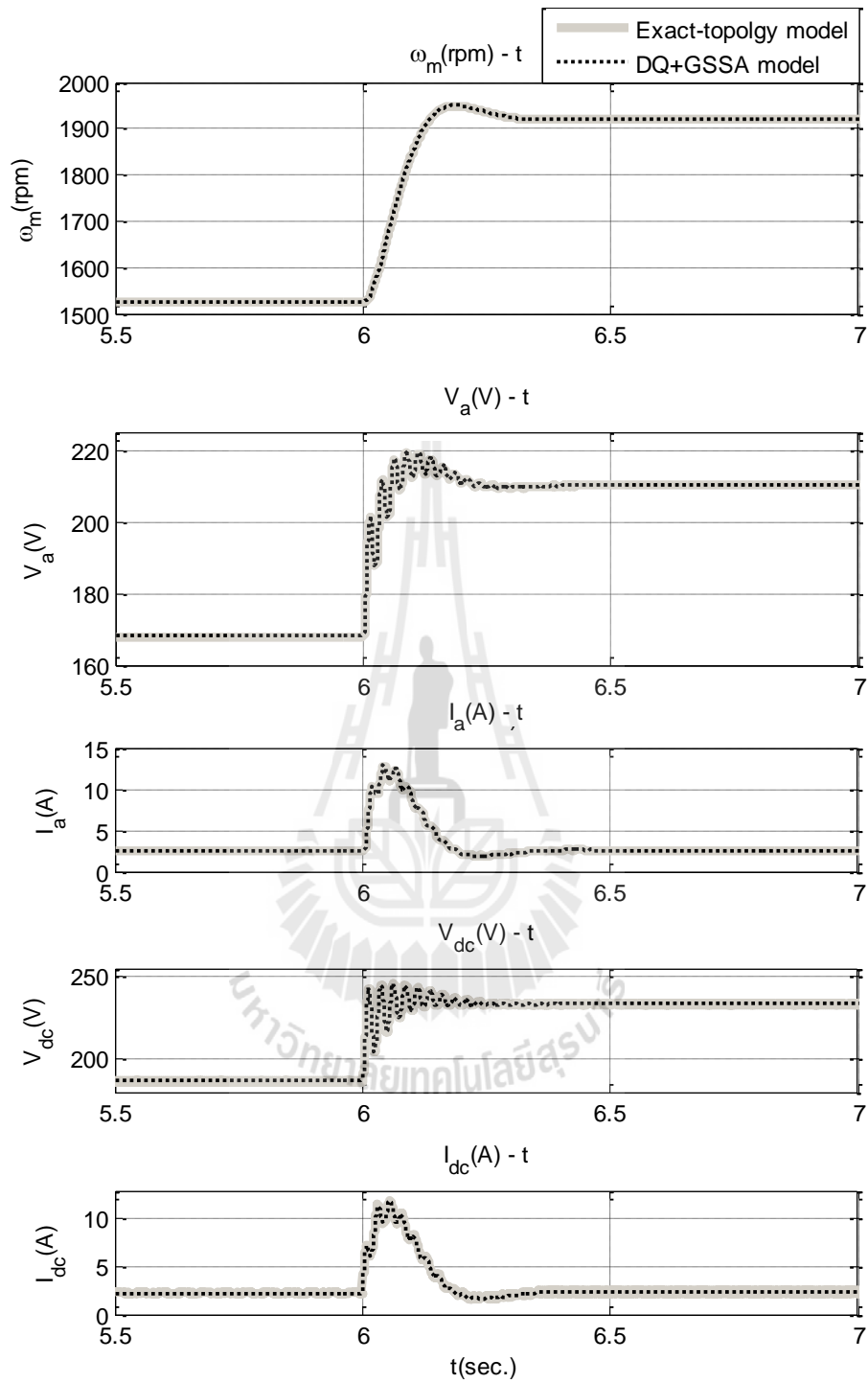
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
V_s	100 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
$R_{L,dc}$	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$R_{C,dc}$	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
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 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดขึ้น (ต่อ)

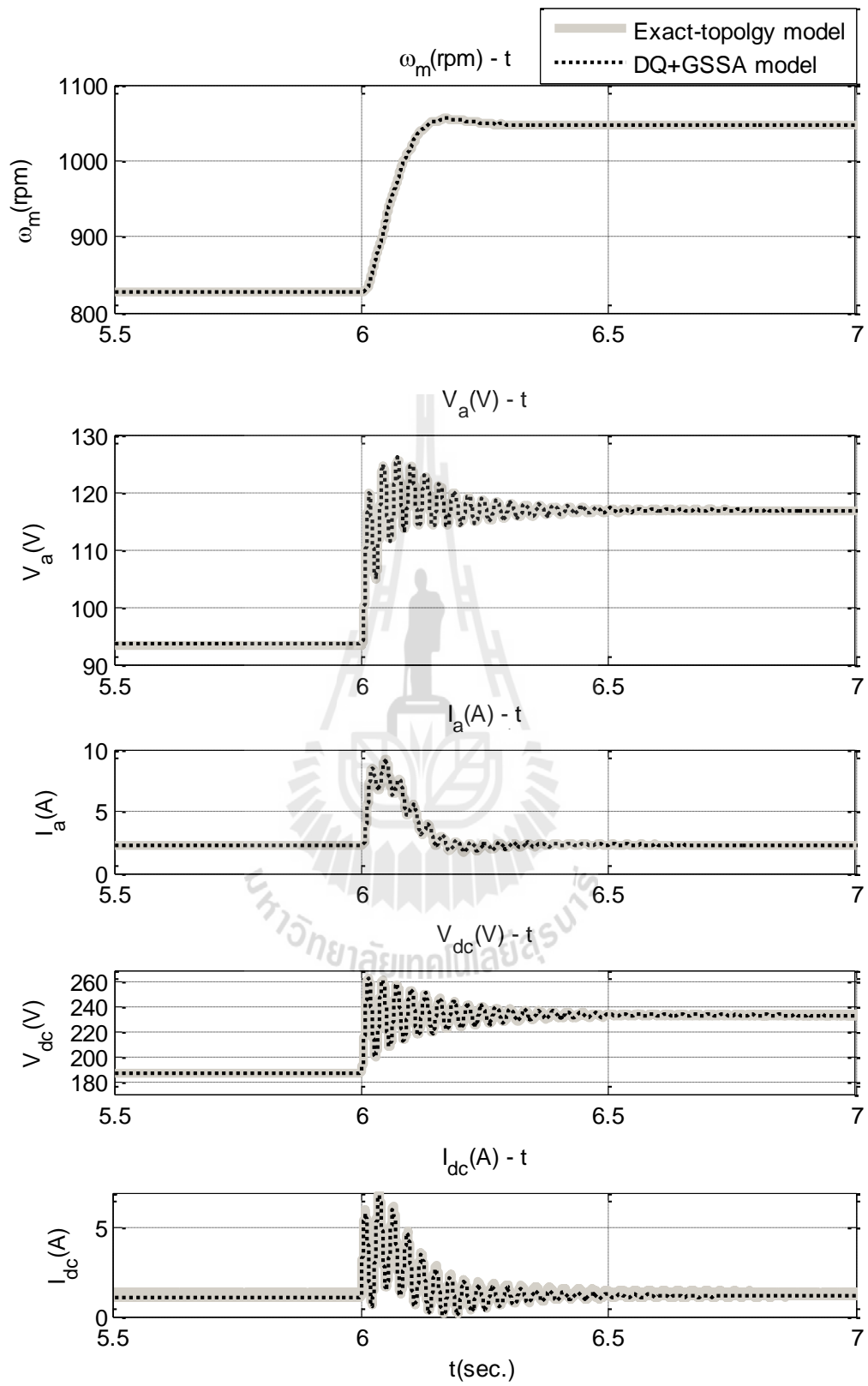
V_f	300 V	แหล่งจ่ายแรงดันสนามของมอเตอร์
J	0.02215 kg.m ²	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
B	0.002953 N.m.s	สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์

การจำลองสถานการณ์โดยการเปลี่ยนระดับแรงดัน V_m จาก $80 V_{\text{rms/phase}}$ เป็น $100 V_{\text{rms/phase}}$ ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าเป็น 90% และ 50% แสดงได้ดังรูป 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $V_f = 300 \text{ V}$ และ $T_L = 0 \text{ N.m}$ มีค่าคงที่



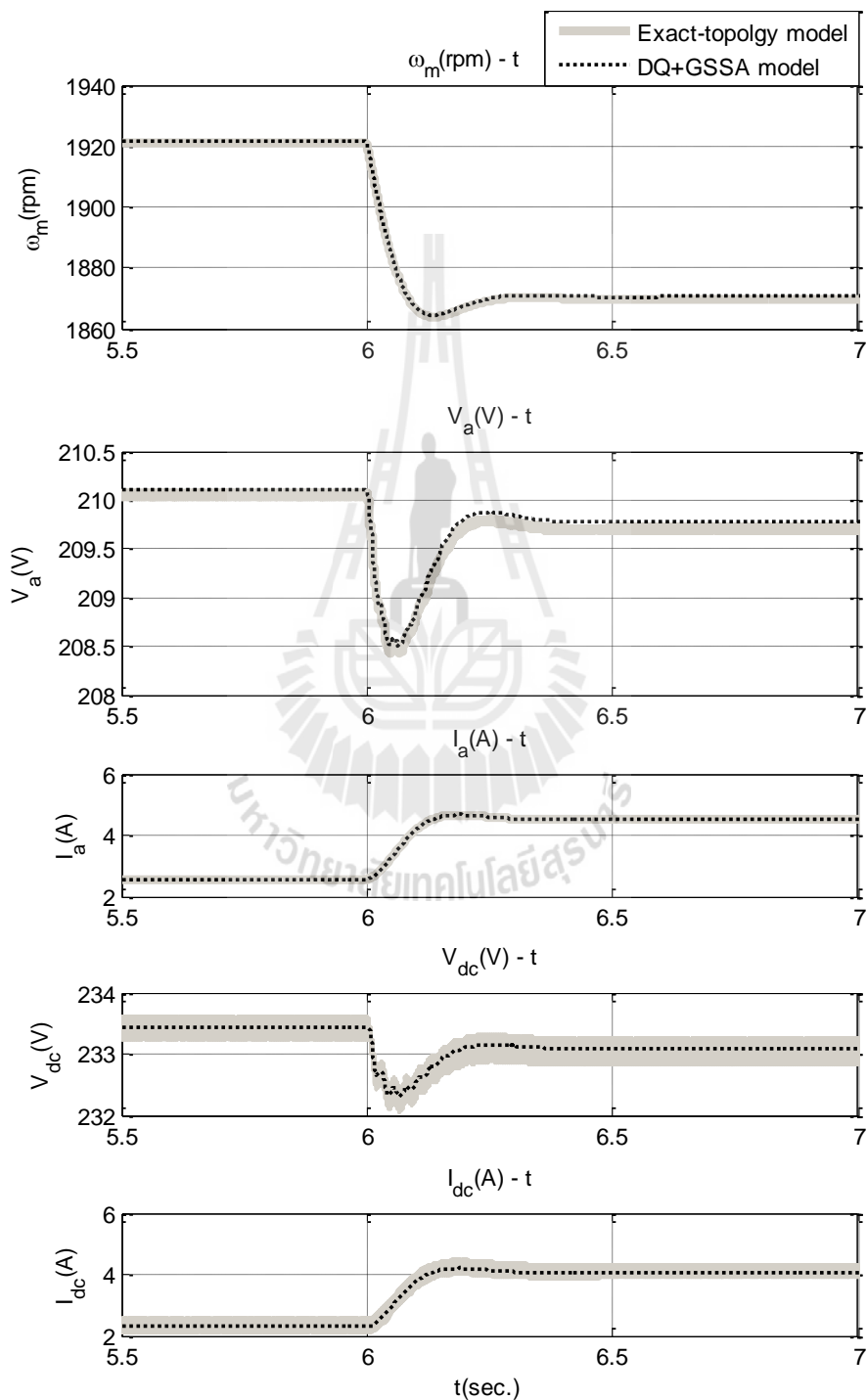


รูปที่ 3.18 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%)

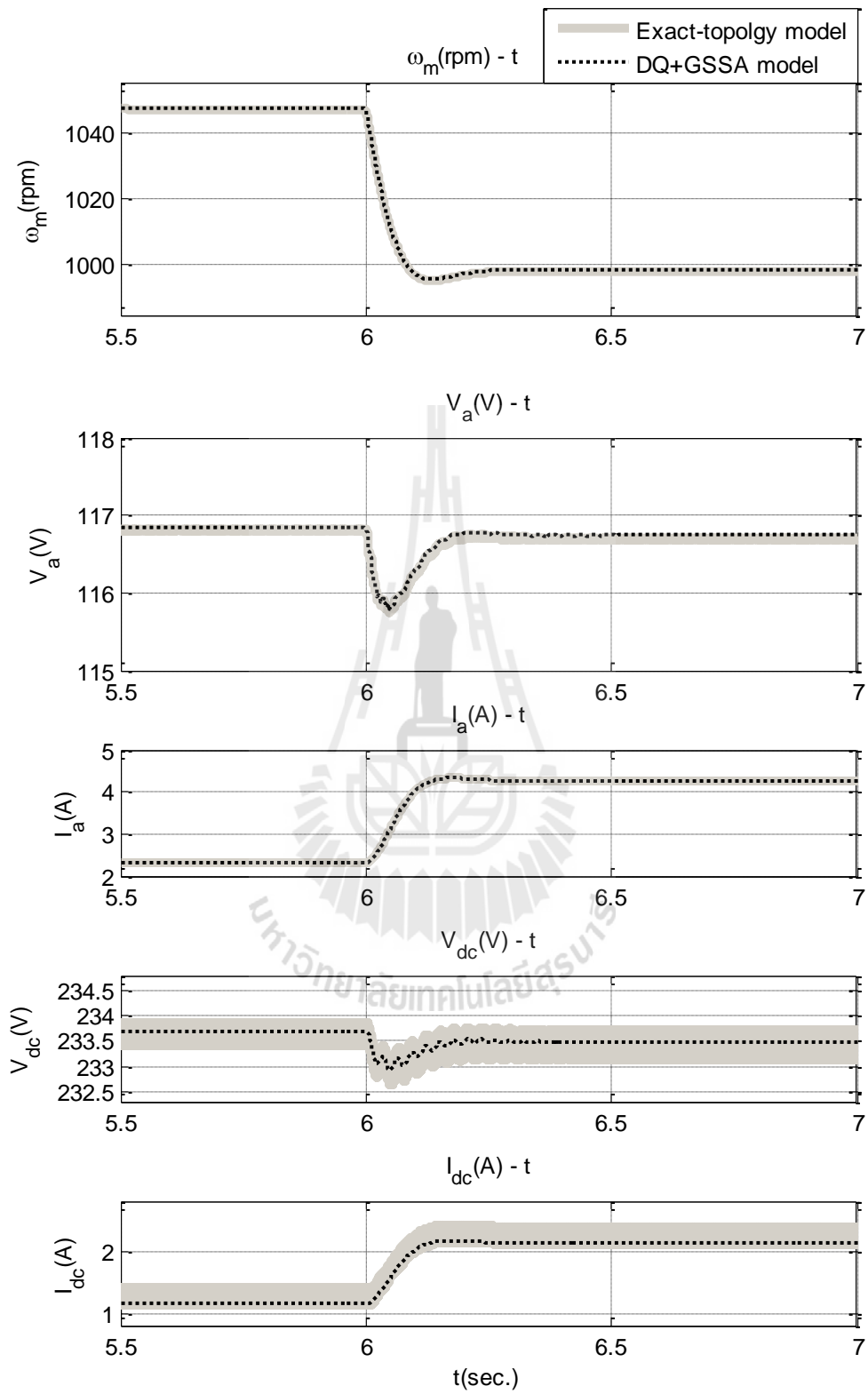


รูปที่ 3.19 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%)

การจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนโหลดทางกลของมอเตอร์ T_L จาก 2 N.m เป็น 4 N.m ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าเป็น 90% และ 50% แสดงได้ดังรูป 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $V_f = 300\text{V}$ และ $V_m = 100\text{ V}_{\text{rms/phase}}$ มีค่าคงที่



รูปที่ 3.20 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.9$ (90%)



รูปที่ 3.21 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ $d = 0.5$ (50%)

จากการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นในบทนี้นั้นมีความถูกต้อง เนื่องจากการจำลองโดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้า SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงแบบคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีผลสอดคล้องและคล้อยตามกัน ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองระบบที่พิจารณาแบบวงเปิดดังกล่าวไปพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบแบบวงปิดซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไปในบทที่ 4

3.4 สรุป

ความรู้เบื้องต้นที่ใช้อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานการแปลงคิควด้วยวิธีการแปลงของปาร์ครวมถึงพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมากในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นคิควที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการแปลงของคลาร์กซึ่งเป็นการแปลงปริมาณไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ หลังจากนั้นจึงทำการแปลงปริมาณไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ เป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกน $dq 0$ สำหรับวิธีการแปลงของปาร์คเป็นการแปลงปริมาณไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกน $dq 0$ วิธีการแปลงของปาร์คจึงมีความสำคัญและนิยมใช้มากกว่าวิธีการแปลงของคลาร์ก อีกทั้งยังมีวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่มีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าคิควเป็นคิคว ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วงจรแปลงผันแบบบักค์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นคิควที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงคิควร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจึงมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพที่จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.1 บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลายชนิด ซึ่งสามารถจำแนกเป็นประเภทหลัก ๆ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ การใช้งานมอเตอร์นั้นโดยส่วนใหญ่จะต้องควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อใช้งานในความเร็วรอบที่ต้องการ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งที่ต้องคำนึงคือพฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบไฟฟ้า ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้างดกล่าว ในบทนี้จะกล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธีดีคิวก่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทนี้พัฒนามาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีจากบทที่ผ่านมา และยังนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ลำดับสุดท้ายในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น โดยพิจารณาจากการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับบนคอมพิวเตอร์ เนื้อหาในบทที่ 4 เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่จะได้นำเสนอในบทที่ 7 เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแบบจำลองในการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

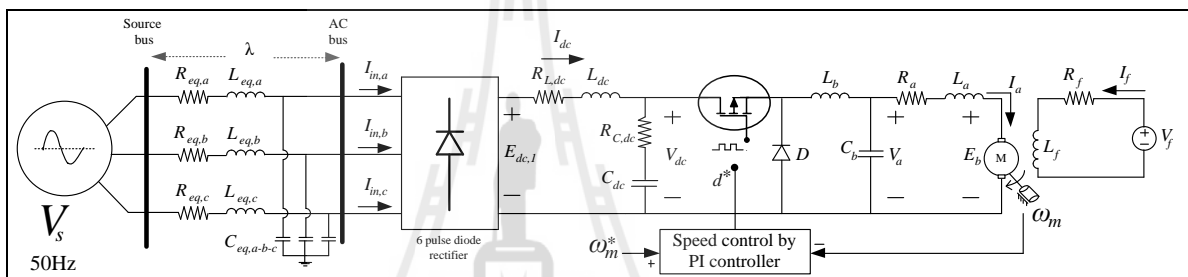
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจร

ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

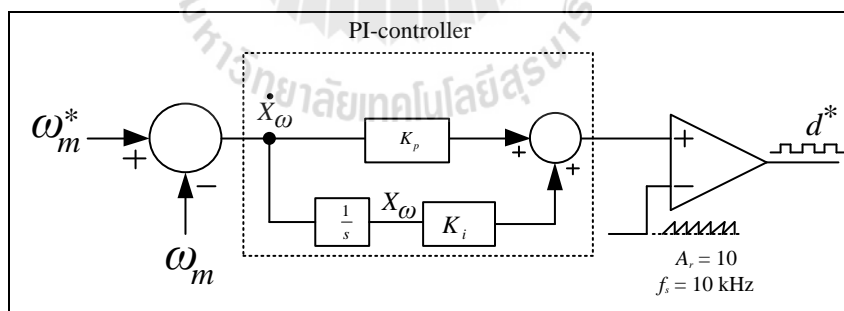
การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 ซึ่งเพิ่มในส่วนของตัวควบคุมในวงจรแปลงผันแบบบักค์ เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรง ตัวควบคุมที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลายประเภทโดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอ ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเหมาะสมและมีความเพียงพอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้จริง อีกทั้งยังมีการออกแบบตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อนซึ่งสามารถออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายและไม่ซับซ้อน นั่นคือการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามส่วนของระบบที่พิจารณากับระบบมาตรฐานอันดับสองเพื่อหาค่า K_p และ K_i

ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.1 และบล็อกตัวควบคุมพีไอแสดงดังรูปที่ 4.2 ในการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดีคิ๋วร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.2 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์

จากรูปที่ 4.1 เป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่ผู้วิจัยใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสผ่านวงจรสมมูลสายส่งและวงจรเรียงกระแสแบบ เต็มคลื่นเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมใช้ สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมพีไอ

ในการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคค์ จากรูปที่ 4.2 เป็นรูปองค์ประกอบของตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งความเร็วรอบที่ผู้ใช้ต้องการแทนด้วยตัวแปร ω_m^* และความเร็วรอบของมอเตอร์แทนด้วยตัวแปร ω_m โดยหลักการของตัวควบคุมพีไอคือ การหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างระหว่าง ω_m^* และ ω_m เพื่อปรับคด้วยค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่าเป็น ศูนย์ โดยสัญญาณที่ได้หลังจากการปรับคด้วยค่าสัมประสิทธิ์จะเข้าสู่ตัวเปรียบเทียบ (comparator) เพื่อให้ได้สัญญาณวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) สำหรับควบคุมสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้มอสเฟต (Mosfet) เป็นอุปกรณ์สวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ยังไม่มีการควบคุมที่พิสูจน์ขึ้นในบทที่ 3 ดังสมการที่ (3-37) ปรากฏพจน์ตัวแปร d ซึ่งหมายถึงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์สำหรับระบบที่ยังไม่มีการควบคุม จากรูปที่ 4.2 พบว่าปรากฏพจน์ d^* เป็นสัญญาณควบคุม (control signal) การพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบที่มีการควบคุมจะดำเนินการโดยการแทน $d = d^*$ สำหรับสมการ d^* แสดงดังสมการที่ (4-1)

$$d^* = \frac{1}{A_r} (K_p \omega_m^* - K_p \omega_m + K_i X_\omega) \quad (4-1)$$

เมื่อแทนค่า $d = d^*$ จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการควบคุมสามารถแสดงดังสมการที่ (4-2) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้แบบจำลองมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) ซึ่งการทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง โดยจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.2.2

$$\begin{cases}
\dot{I}_{s,d} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,d} + \omega I_{s,q} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \cos \lambda}{L_{eq}} \\
\dot{I}_{s,q} = -\omega I_{s,d} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,q} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \sin \lambda}{L_{eq}} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{s,d}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \frac{S_d}{C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{s,q}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} - \frac{S_q}{C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{I}_{dc} = \frac{S_d}{L_{dc}} V_{bus,d} + \frac{S_q}{L_{dc}} V_{bus,q} - \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} + \frac{K_p \omega_m^* \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_{dc}} I_{L,b} - \frac{K_p \omega_m \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_{dc}} I_{L,b} + \frac{K_i X_\omega \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_{dc}} I_{L,b} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{K_p \omega_m^* \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot C_{dc}} I_{L,b} + \frac{K_p \omega_m \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot C_{dc}} I_{L,b} - \frac{K_i X_\omega \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot C_{dc}} I_{L,b} \\
\dot{I}_{L,b} = -\frac{K_p \omega_m^* \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_b} V_{dc} + \frac{K_p \omega_m \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_b} V_{dc} - \frac{K_i X_\omega \cdot R_{C,dc}}{A_r \cdot L_b} V_{dc} - \frac{V_a}{L_b} \\
\dot{V}_a = \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{I_a}{C_b} \\
\dot{I}_a = \frac{V_a}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_v I_f}{L_a} \omega_m \\
\dot{I}_f = -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{V_f}{L_f} \\
\dot{\omega}_m = \frac{K_t I_f}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} \\
\dot{X}_\omega = \omega_m^* - \omega_m
\end{cases} \quad (4-2)$$

จากรูปที่ 4.1 เป็นระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนสำคัญลำดับถัดไปคือการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1

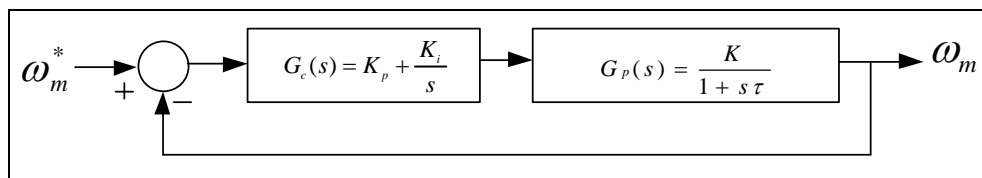
4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยตัวควบคุมพีไอในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบตัวควบคุมพีไอจะอาศัยวิธีแบบดั้งเดิม จากการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์เทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งอาร์เมเจอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่ง สามารถแสดงดังสมการที่ (4-3) และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอแสดงดังสมการที่ (4-4)

$$G_p(s) = \frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{1+s\tau} \quad (4-3)$$

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4-4)$$

จากสมการที่ (4-3) และ (4-4) สามารถพิจารณาเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิดซึ่งใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังรูปที่ 4.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ดังสมการที่ (4-5)



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิด

$$TF(s) = \frac{\omega_m}{\omega_m^*}(s) = \frac{K \cdot K_p s + K \cdot K_i}{s^2 + \frac{(K \cdot K_p + 1)}{\tau} s + \frac{K \cdot K_i}{\tau}} \quad (4-5)$$

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่าในส่วนของการป้อนกลับ (feedback) มีค่าอัตราขยาย (gain) เท่ากับ 1 ดังนั้น $H(s) = 1$ ทำให้พิจารณาเพียง $G_c(s) \cdot G_p(s)$ เท่านั้น ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามส่วนระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแบบวงปิดเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองมาตรฐาน ซึ่งสมการระบบอันดับสองมาตรฐานแสดงได้ดังสมการที่ (4-6) การออกแบบดำเนินการได้โดยง่าย เพียงแค่กำหนดค่า ζ และ ω_n เพื่อหาสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์

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

จากสมการที่ (4-5) และ (4-6) พิจารณาพหุนามส่วนเพื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมได้ดังสมการที่ (4-7) และ (4-8) ตามลำดับ

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n\tau - 1}{K} \quad (4-7)$$

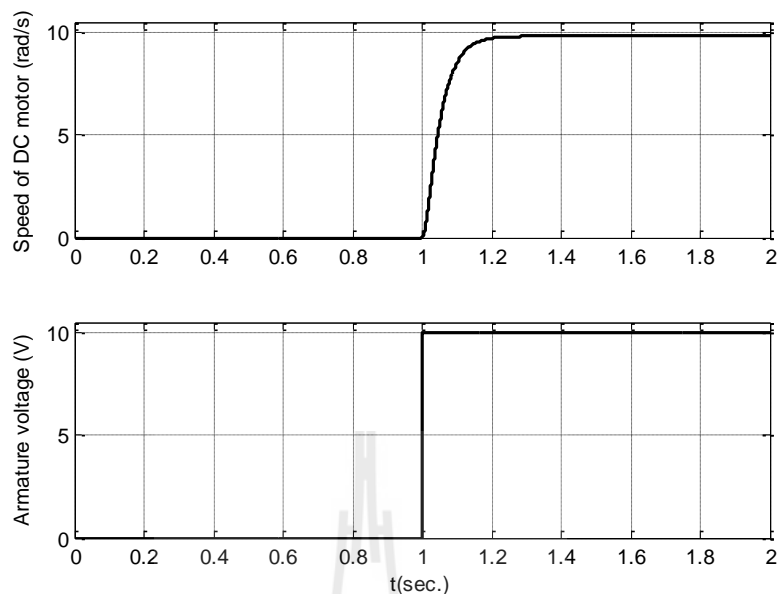
$$K_i = \frac{\omega_n^2\tau}{K} \quad (4-8)$$

จากการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์โดยมีความเร็วรอบของมอเตอร์และแรงดันทางฟลักซ์อาร์เมเจอร์เป็นเอาต์พุตและอินพุตตามลำดับ สามารถพิจารณาหาค่าอัตราขยาย K และค่าคงตัวทางเวลา τ ได้จากการจำลองผลการตอบสนองจากโปรแกรม MATLAB บนคอมพิวเตอร์ โดยบล็อกการจำลองสถานการณ์ด้วย Simulink ที่ใช้สำหรับแสดงผลการตอบสนองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ข การจำลองผลการตอบสนองดังกล่าวจะต้องอาศัยพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในบทนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในบทที่ 3 โดยพารามิเตอร์ของมอเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.1 เพื่อเป็นตัวอย่างในการออกแบบตัวควบคุมและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 7 จะใช้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องของมอเตอร์ซึ่งได้จากการระบุค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 6

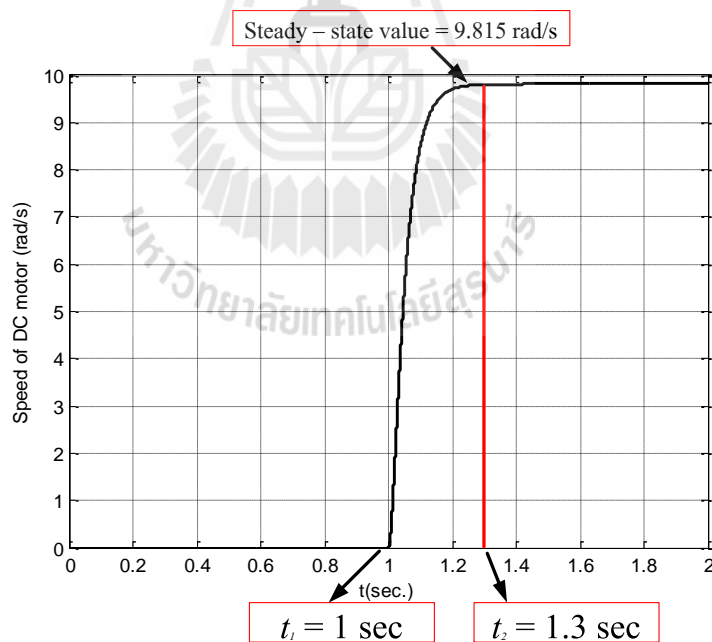
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
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

ผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยการหาผลการตอบสนองกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอินพุตแบบขั้นบันไดทางฟลักซ์อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์จาก 0 V เป็น 10 V ที่เวลา 1 วินาที และรูปที่ 4.5 เป็นการนำรูปที่ 4.4 (รูปบน) มาวัดค่า K และ τ เพื่อนำไปใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.5 พบว่าสามารถหาค่าอัตราขยาย K ได้ดังสมการที่ (4-9) ซึ่งได้ค่า $K = 0.9815$ และสามารถหาค่า τ ได้ดังสมการที่ (4-10) ซึ่งได้ค่า $\tau = 0.3$

$$K = \frac{\text{อินพุต}}{\text{เอาต์พุต}} = \frac{\omega_m (\text{rad/s})}{V_a (\text{V})} \quad (4-9)$$

$$\tau = t_2 - t_1 = \text{เวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว} - \text{เวลาที่เพิ่มอินพุตแบบขั้นบันได} \quad (4-10)$$

จากค่า K และค่า τ ที่คำนวณสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอโดยใช้สมการที่ (4-7) และ (4-8) ตามลำดับ โดยกำหนดการออกแบบให้เป็นหน่วยขาดซึ่ง $0 \leq \zeta < 1$ ดังนั้นกำหนดให้ $\zeta = 0.9$ สามารถแสดงค่า K_p และ K_i ที่ได้จากการออกแบบเมื่อเปลี่ยน ω_n ได้ดังตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะนำไปใช้ในการควบคุมโดยการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 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

4.2.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นจากสมการที่ (4-2) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเฉพาะที่จะกล่าวในบทที่ 7 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสจุนั้นให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (4-11)

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{aligned} \quad (4-11)$$

โดยกำหนดให้

ตัวแปรสถานะ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

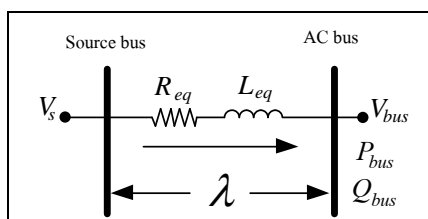
$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0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

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

จากสมการที่ (4-11) ในองค์ประกอบ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ พบพจน์ตัวแปรที่เป็นค่าในสถานะอยู่ตัวได้แก่ $I_{LB,0}$, $V_{dc,0}$, $\omega_{m,0}^*$, $\omega_{m,0}$, $X_{\omega,0}$ ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์ด้วยสัญญาณขนาดเล็กจำเป็นต้องแก้สมการเพื่อหาค่าในสถานะอยู่ตัวโดยกำหนดให้ $\delta \dot{\mathbf{x}} = 0$ เพื่อหาค่าที่สถานะอยู่ตัวของแต่ละตัวแปร ซึ่งในการหาค่าในสถานะอยู่ตัวได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3

4.2.3 การหาค่าในสถานะอยู่ตัว

การคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-11) มีความจำเป็นที่ต้องทราบค่า $V_{dc,0}$, 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 4.6 โดยจะไม่พิจารณาตัวเก็บประจุของแบบจำลองสายส่งเนื่องจากมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 4.6 สายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟสเพื่อนำไปคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการวนรอบนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนในการคำนวณได้ดังนี้ โดยโปรแกรมการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัวที่เห็นในหัวข้อนี้สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก 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 (4-12)

$$\begin{cases} \frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \end{cases} \quad (4-12)$$

จากสมการที่ (4-12) V_s คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสแหล่งจ่าย (Source bus) V_{bus} คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสเอซี 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} สามารถคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่โหลดรวมกับกำลังงานสูญเสียในส่วนต่างๆ ภายในวงจรดังสมการที่ (4-13)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{(P_{Load} + \Sigma P_{Loss})}{3} \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4-13)$$

จากสมการที่ (4-13) 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 (4-12) สามารถหา $Z \angle \gamma$ ได้ดังนี้

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

จากสมการที่กล่าวมาสามารถนำไปเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาผลเฉลยแรงดันที่บัสเอชอินที่นี้คือ V_{bus} เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหา $V_{dc,0}$ โดยคำนวณจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเต็มคลื่นหาได้ดังสมการที่ (4-14) เมื่อได้ค่า $V_{dc,0}$ แล้วจะพบว่าสามารถแก้สมการเพื่อหาค่าในสถานะอยู่ตัวสำหรับตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (4-15) ถึง (4-17)

$$V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus,0})}{\pi} \quad (4-14)$$

$$I_{Lb,0} = I_a = \frac{T_L}{K_t I_f} \quad (4-15)$$

$$\omega_{m,0} = \omega_{m,0}^* = \text{ความเร็วรอบที่ต้องการ} \quad (4-16)$$

$$X_{\omega,0} = \frac{V_a}{V_{dc,0} \cdot K_i} = \frac{\frac{R_a T_L}{K_i I_f} + K_v I_f \omega_{m,0}}{V_{dc,0} \cdot K_i} \quad (4-17)$$

เมื่อ $K_v = K_i$ ซึ่งหมายถึงค่าคงที่ของมอเตอร์

จากสมการที่ (4-14) ถึง (4-17) ทำให้ทราบค่าในสถานะอยู่ตัวของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งจะต้องนำไปแทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นจะเป็นการพิจารณาสัญญาณขนาดเล็กเนื่องจากการทำให้เป็นเชิงเส้น เพื่อให้มีความถูกต้องในการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 4.3 สังเกตได้ว่าแบบจำลองในสมการที่ (4-11) จะขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของระบบในที่นี้คือ ความเร็วรอบที่ต้องการและโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าจุดการทำงานเปลี่ยนไปค่าต่าง ๆ ในองค์ประกอบ $A(x_0, u_0)$ และ $B(x_0, u_0)$ ก็จะมีค่าเปลี่ยนไป โดยมีค่าสอดคล้องกับสมการที่ (4-14) ถึง (4-17)

4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบไฟฟ้าเอซี เป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังสมการที่ (4-11) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้นสำหรับจำลองสถานการณ์สัญญาณขนาดเล็กของระบบดังกล่าว โดยผู้วิจัยกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 4.3 การจำลองสถานการณ์จะแบ่งตามความถี่ธรรมชาติ (natural frequency, ω_n) ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อสังเกตผลการตอบสนองและพิจารณาถึงความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้น

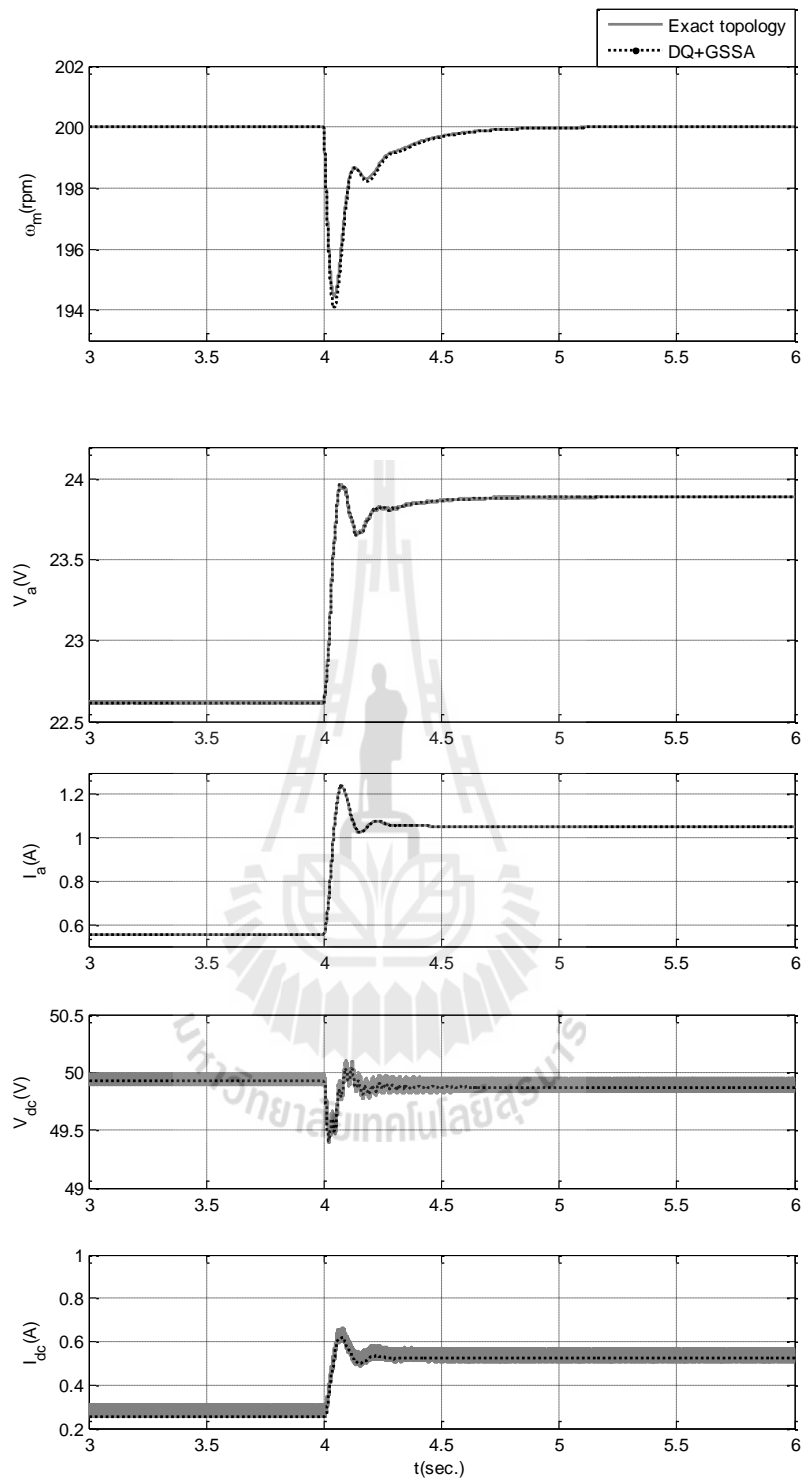
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ

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

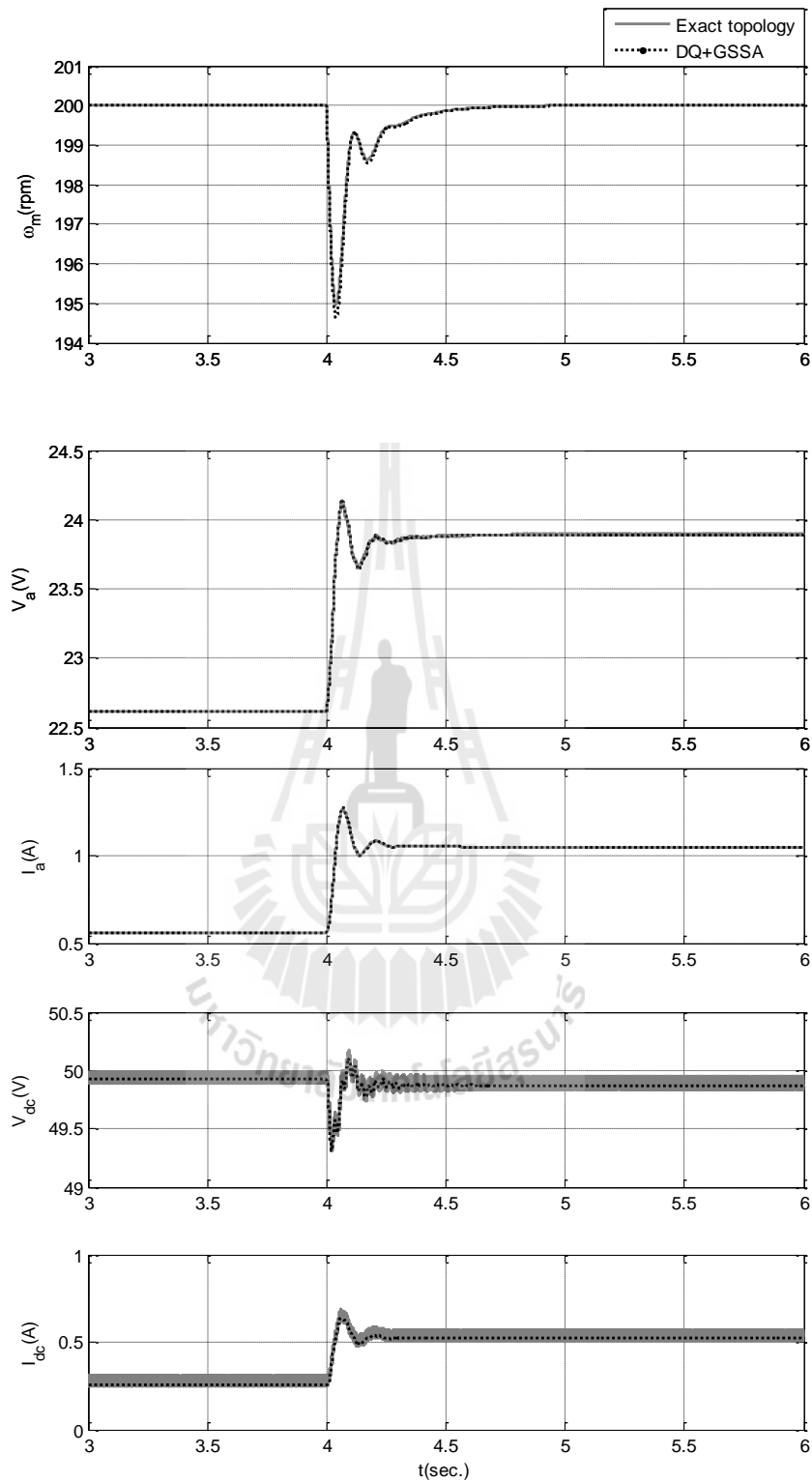
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ (ต่อ)

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	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc} (\Delta V_{dc} \leq 50 \text{ V})$	500 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L_b (\Delta I_L \leq 0.5 \text{ A})$	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

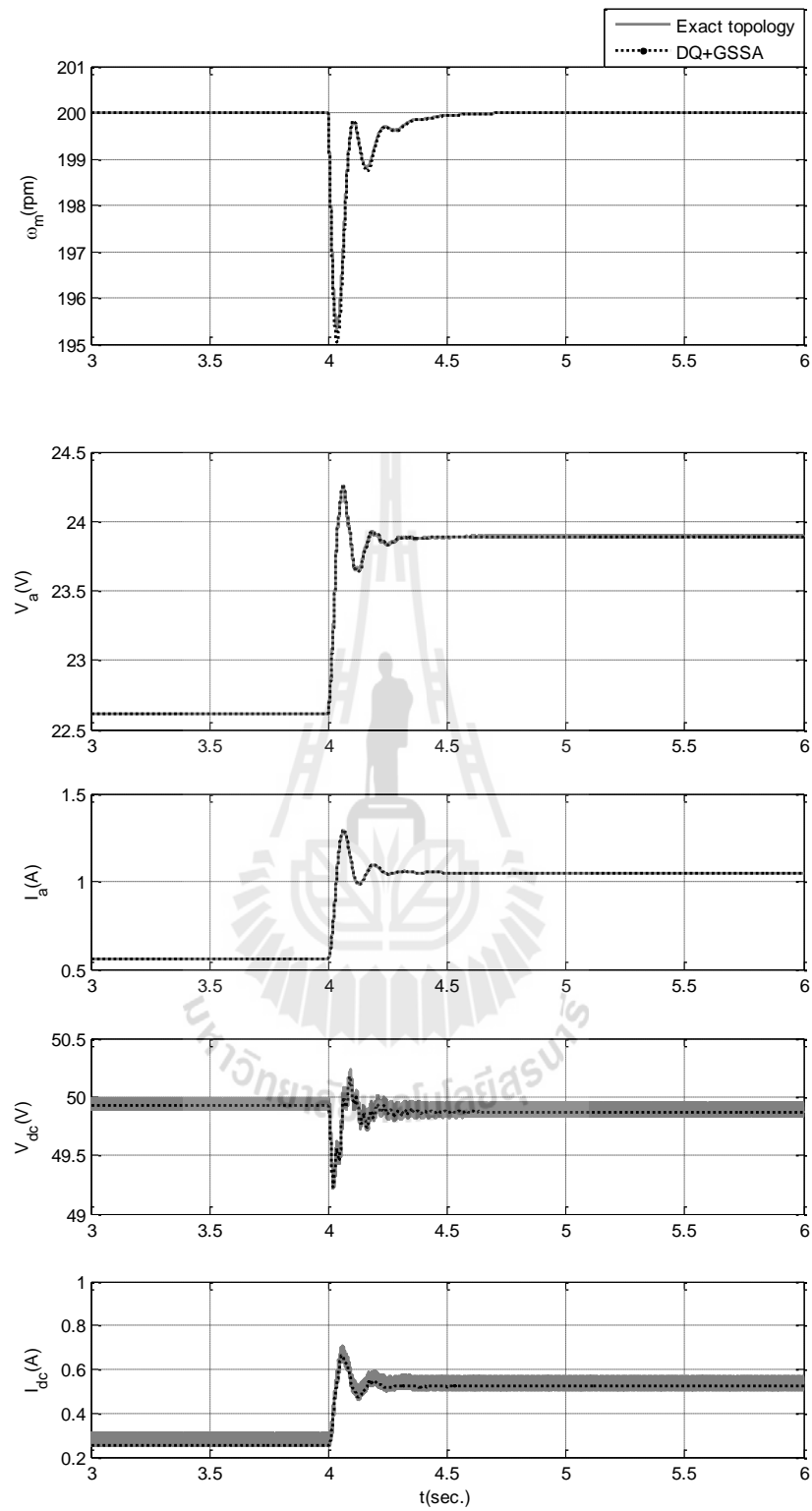
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 สำหรับจำลองสถานการณ์ โดยแบ่งการจำลองสถานการณ์ตามความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบดังตารางที่ 4.2 การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องจะดำเนินการโดยทำการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลจาก 0.5 N.m เป็น 1 N.m ที่เวลา 4 วินาที และให้มีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 200 rpm ผลการจำลองสถานการณ์ที่ค่าความถี่ธรรมชาติ 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 rad/s แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.12 ตามลำดับ



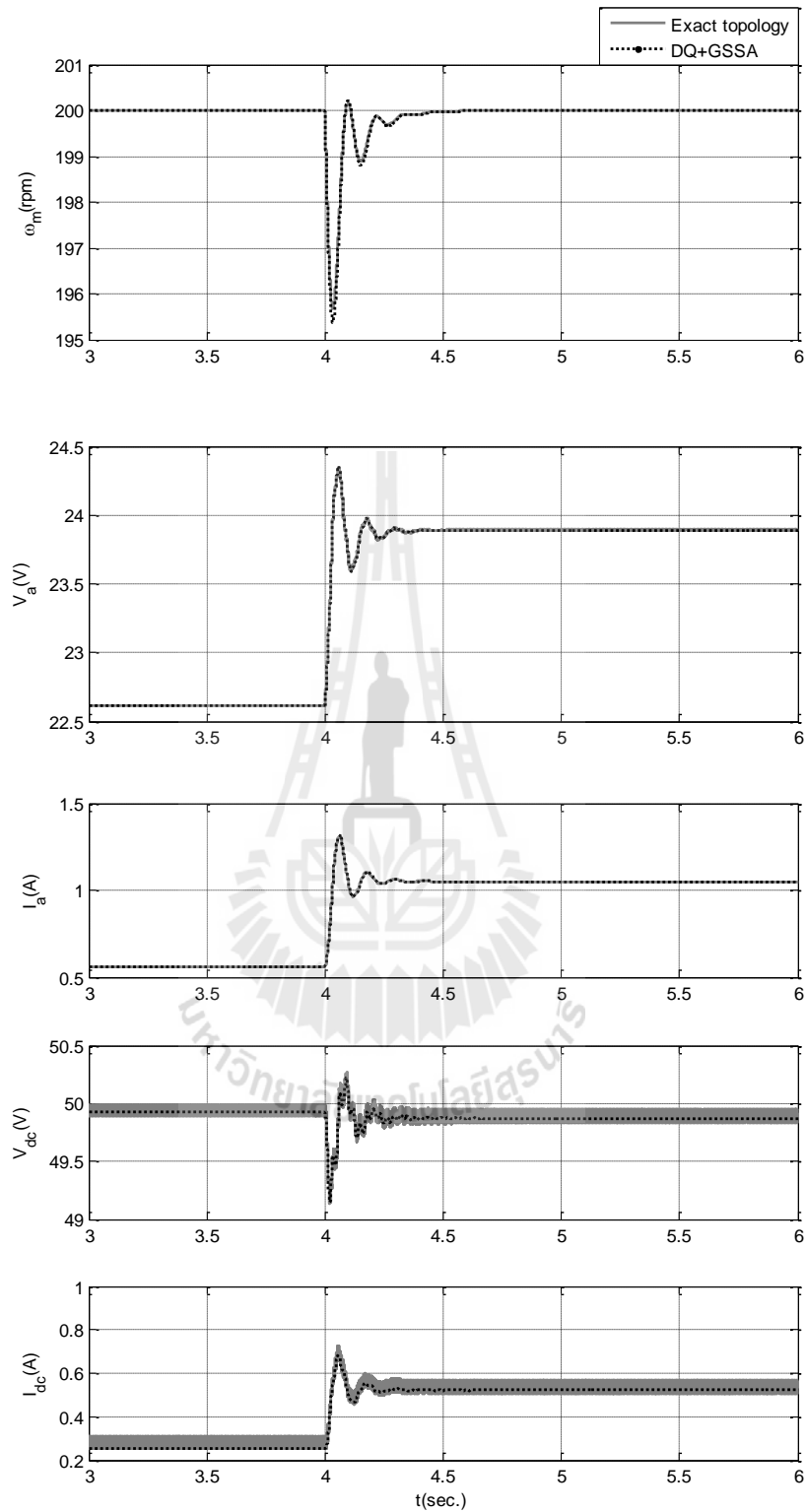
รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่รบกวน 10 rad/s



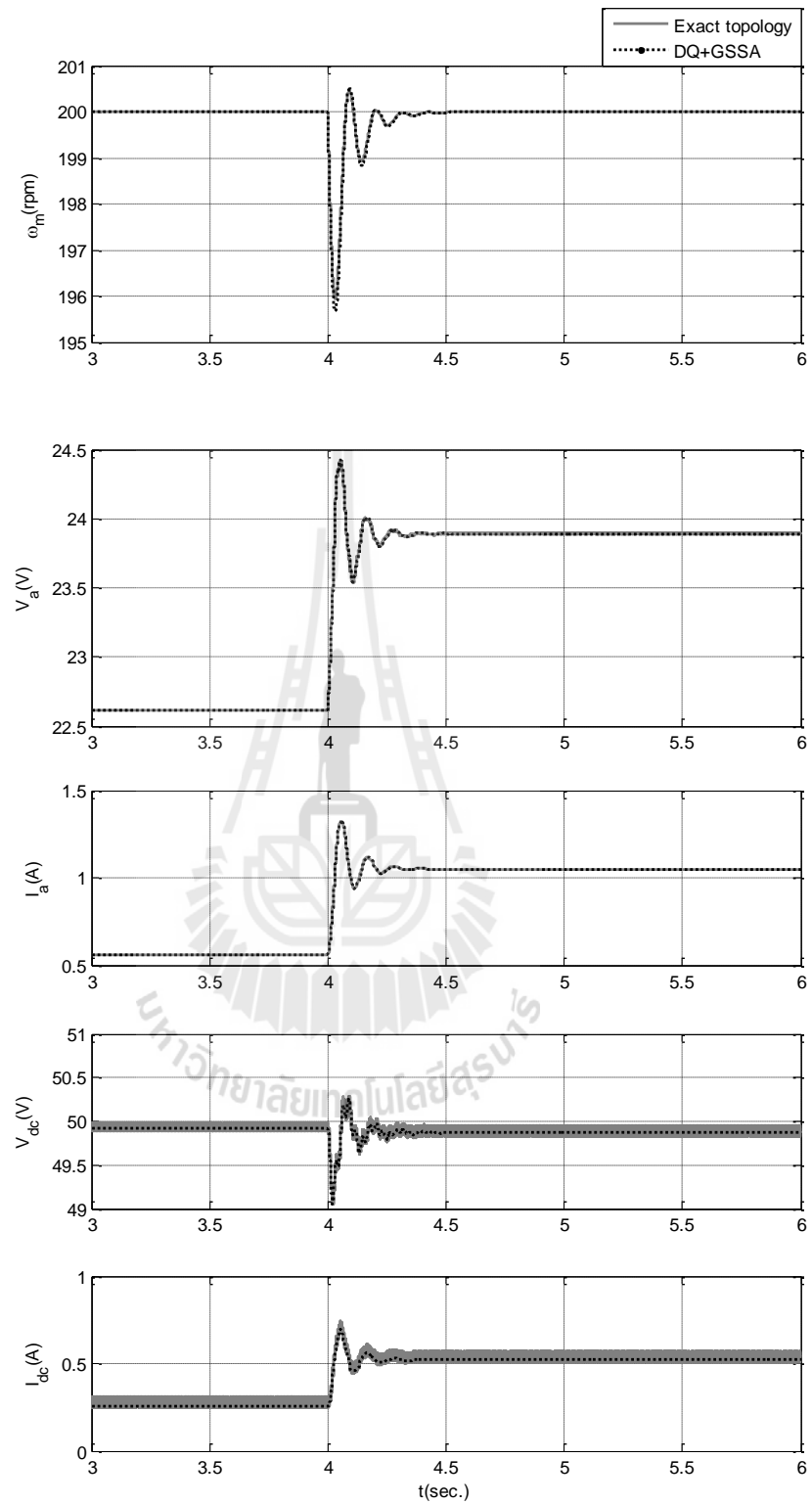
รูปที่ 4.8 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s



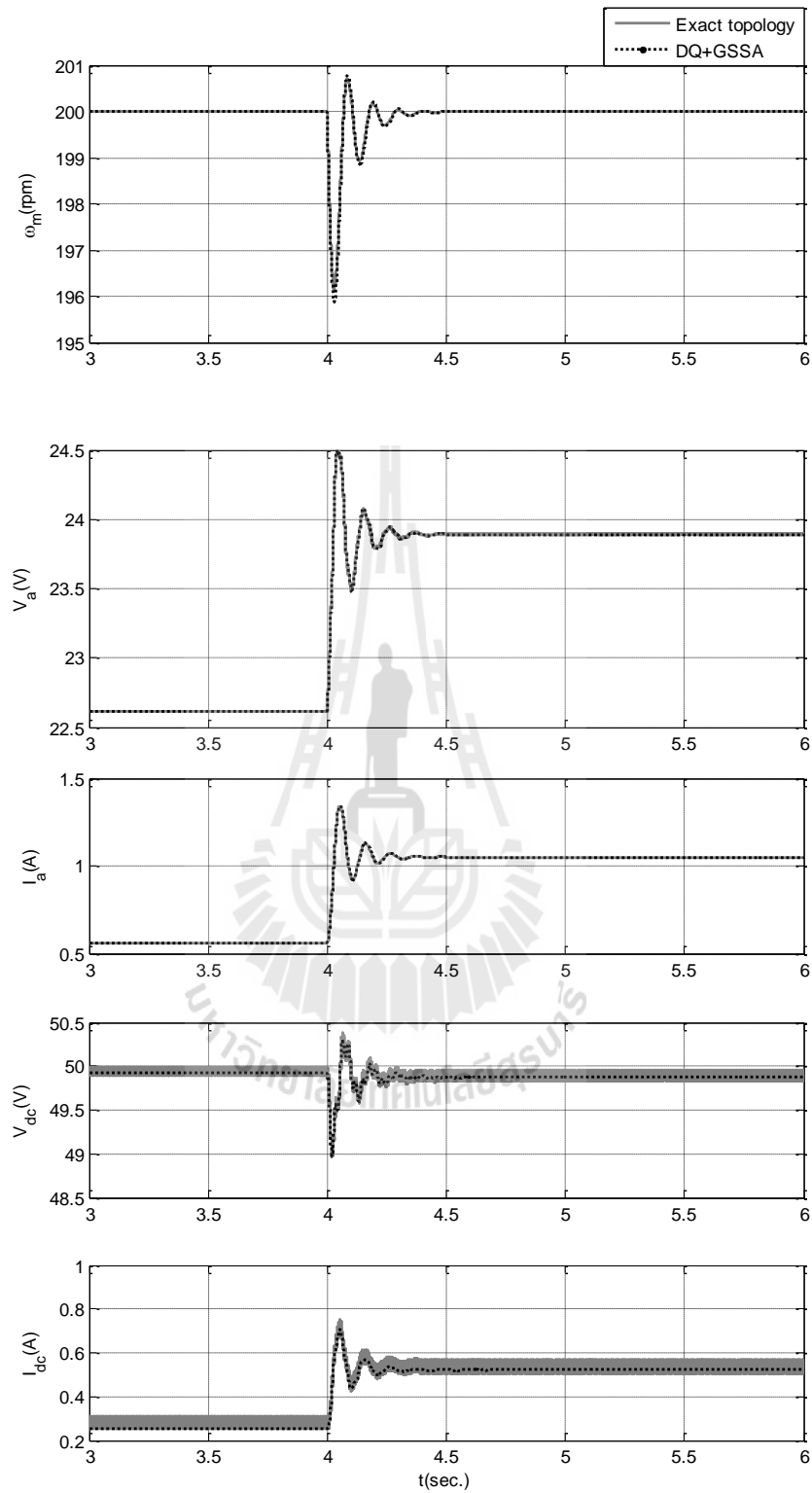
รูปที่ 4.9 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 14 rad/s



รูปที่ 4.10 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s

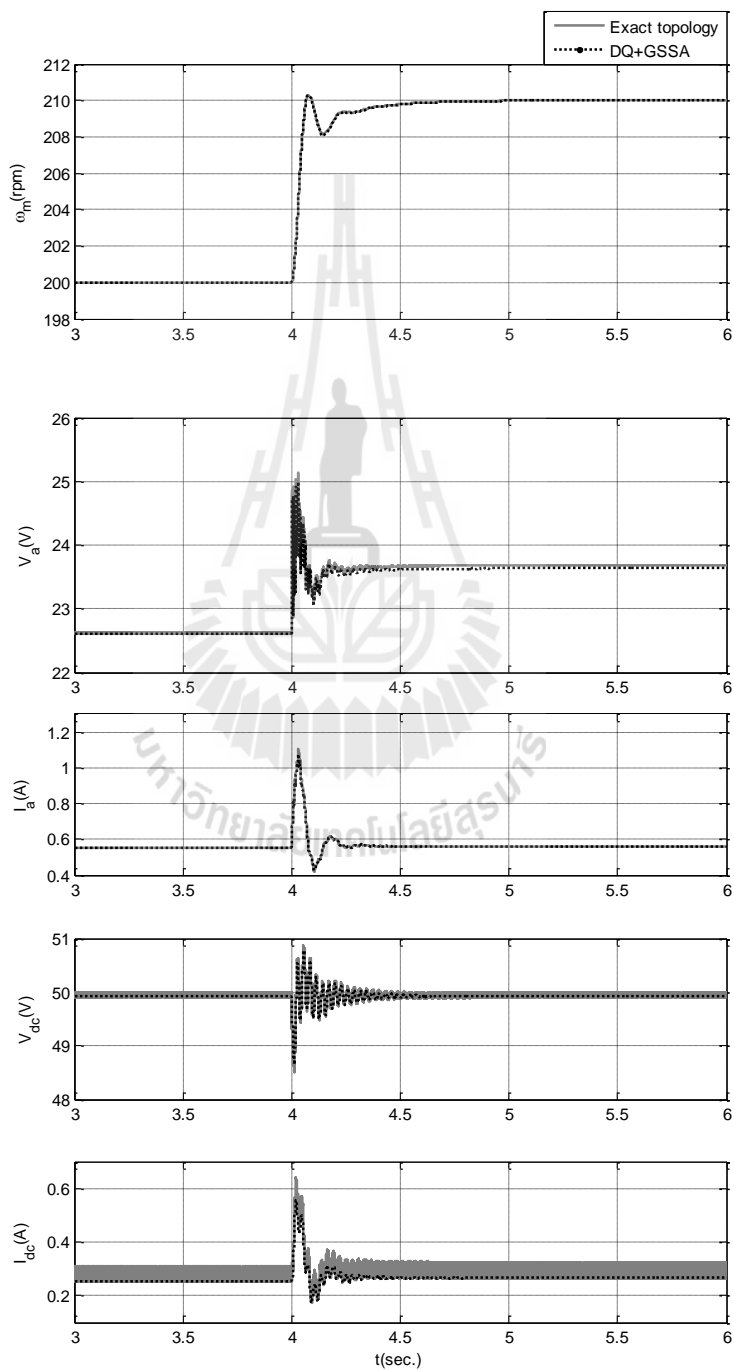


รูปที่ 4.11 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s

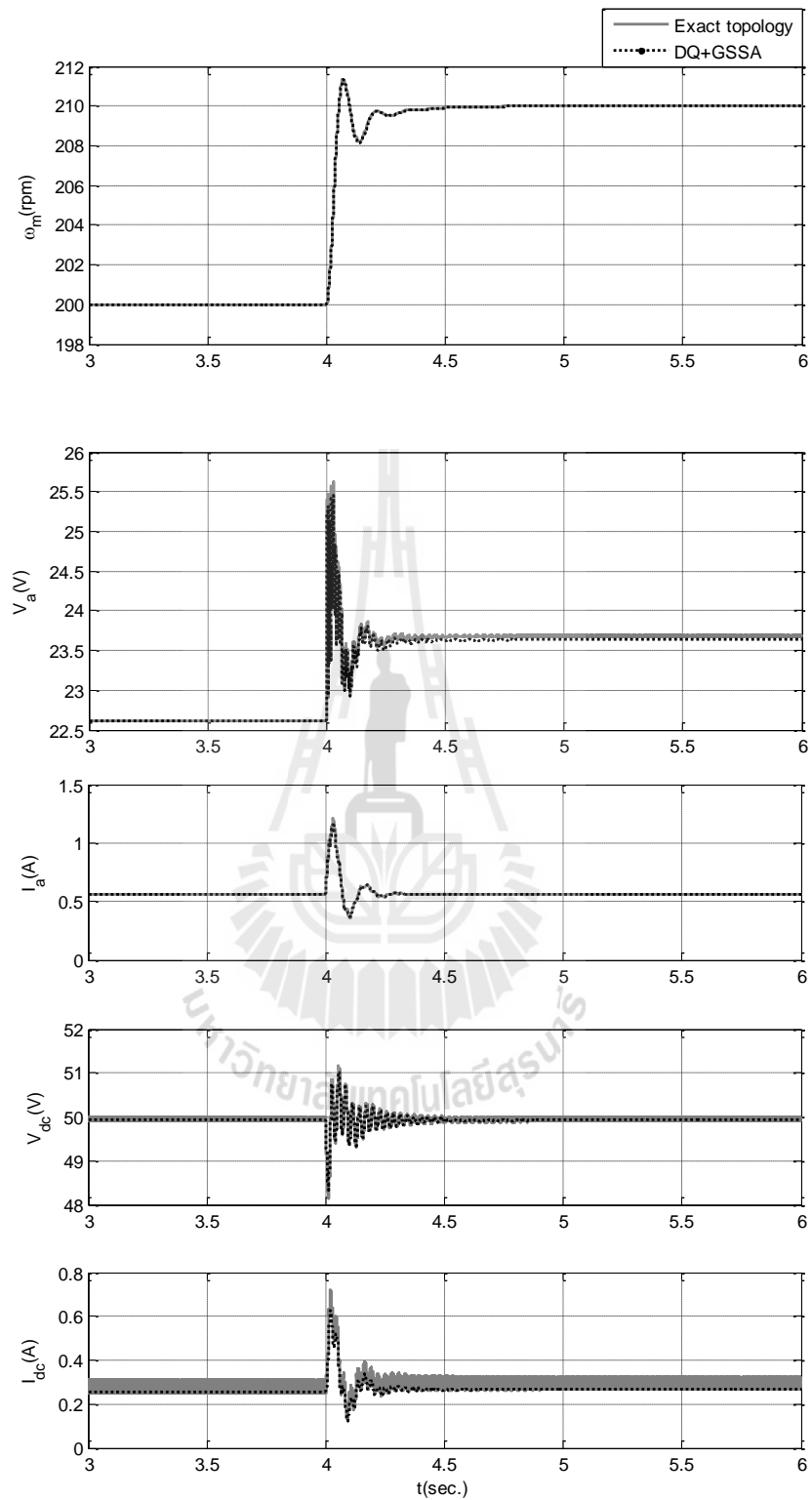


รูปที่ 4.12 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 20 rad/s

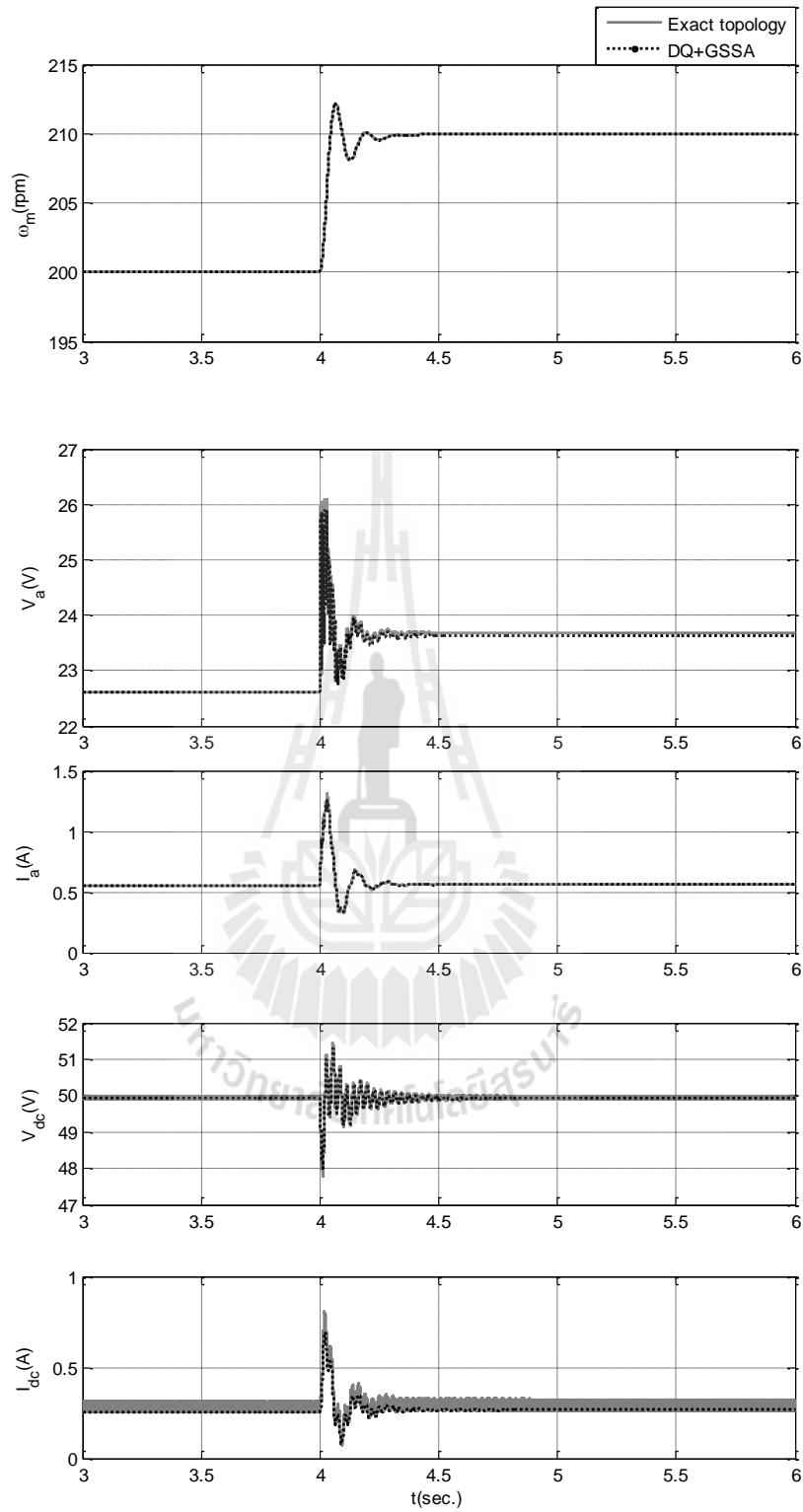
การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจาก 200 rpm เป็น 210 rpm ที่เวลา 4 วินาทีและให้มีโหลดทางกลคงที่เท่ากับ 0.5 N.m จะดำเนินการเช่นเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ที่ผ่านมาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.17 ตามลำดับ



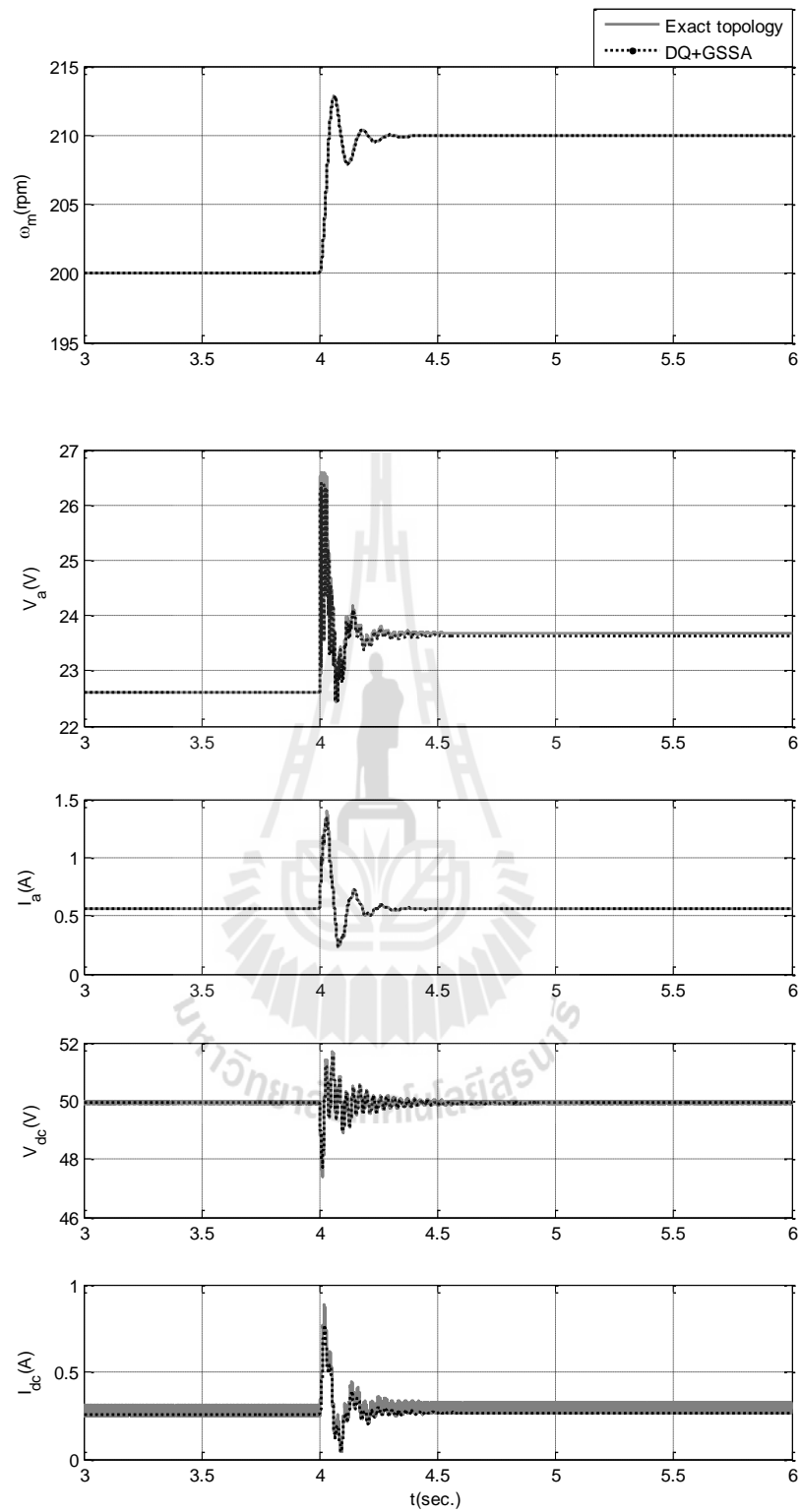
รูปที่ 4.13 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 10 rad/s



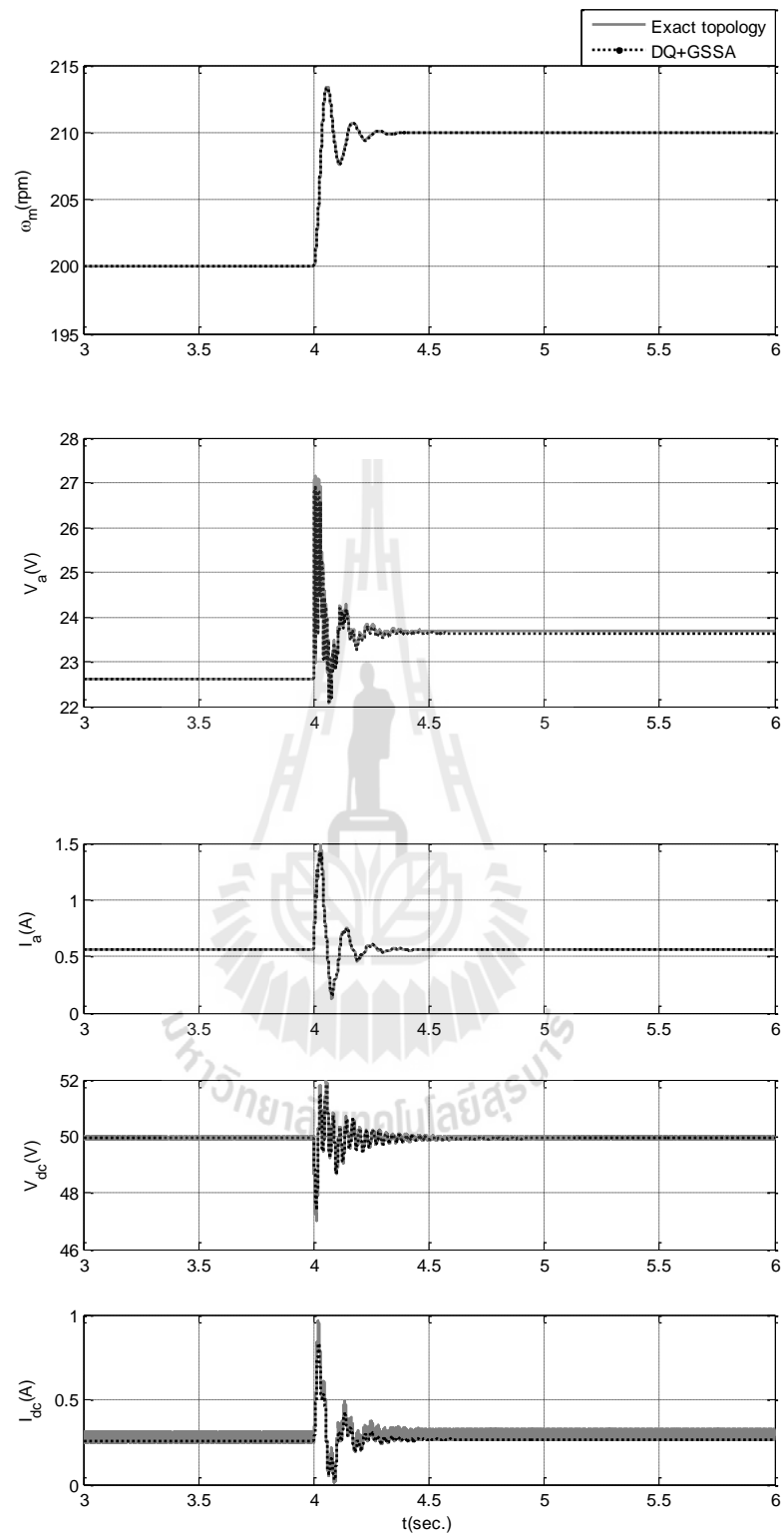
รูปที่ 4.14 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 12 rad/s



รูปที่ 4.15 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 14 rad/s



รูปที่ 4.16 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 16 rad/s



รูปที่ 4.17 การจำลองสถานการณ์ที่ความถี่ธรรมชาติ 18 rad/s

การจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.13 ถึง 4.17 พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบจะทำให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็วขึ้น แต่มีข้อจำกัดทำให้ไม่สามารถใช้ค่า K_p และ K_i ที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 20 rad/s ได้เนื่องจากจะทำให้การจำลองสถานการณ์อยู่ในโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode, DCM) ซึ่งไม่อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในบทที่ 1

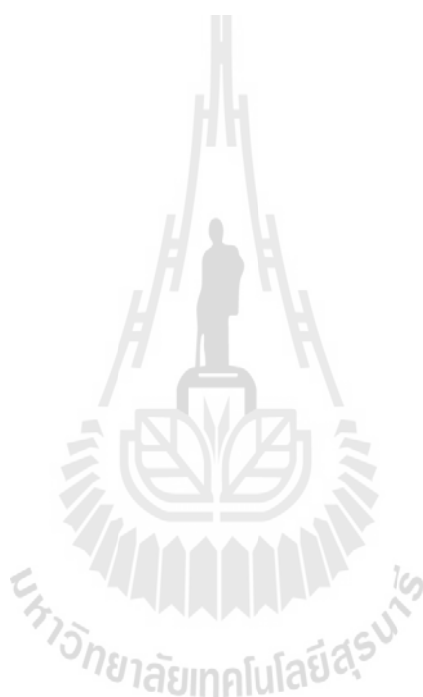
จากการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นในบทนี้มีความถูกต้อง เนื่องจากการจำลองโดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงแบบดีคิรวรร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่สอดคล้องและคล้อยตามกันแต่อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย เนื่องจากพฤติกรรมของผลตอบสนองทางพลวัตของระบบปกติเป็นแบบไม่เชิงเส้น แต่เพื่อให้สามารถนำแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจึงอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อทำให้แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นแบบจำลองระบบที่มีการควบคุมดังกล่าวจึงสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงในบทที่ 7 โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 7 นั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของอุปกรณ์ชุดทดสอบที่ได้จากการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตามเชิงปรับตัวในบทที่ 6

4.4 สรุป

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก อาศัยความรู้เบื้องต้นจากบทที่ 3 เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ยังไม่มีการควบคุมที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา จากนั้นจึงได้นำมาพัฒนาต่อโดยใส่ตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองสำหรับระบบที่มีการควบคุมแล้ว แต่แบบจำลองของระบบที่มีการควบคุมดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้จึงอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อทำให้แบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจึงได้อาศัยการพิจารณาเป็นสัญญาณขนาดเล็ก อีกทั้งในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีการดั้งเดิมซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะส่งผลต่อการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกินของระบบ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีดีคิรวรร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจึงมีประโยชน์อย่างมากสามารถนำไปจำลองสถานการณ์เพื่อดูผลการตอบสนองของการออกแบบตัวควบคุม หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 7

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 นี้ได้ตีพิมพ์บทความทางวิชาการในการประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37 ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

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



บทที่ 5

การสร้างชุดทดสอบ

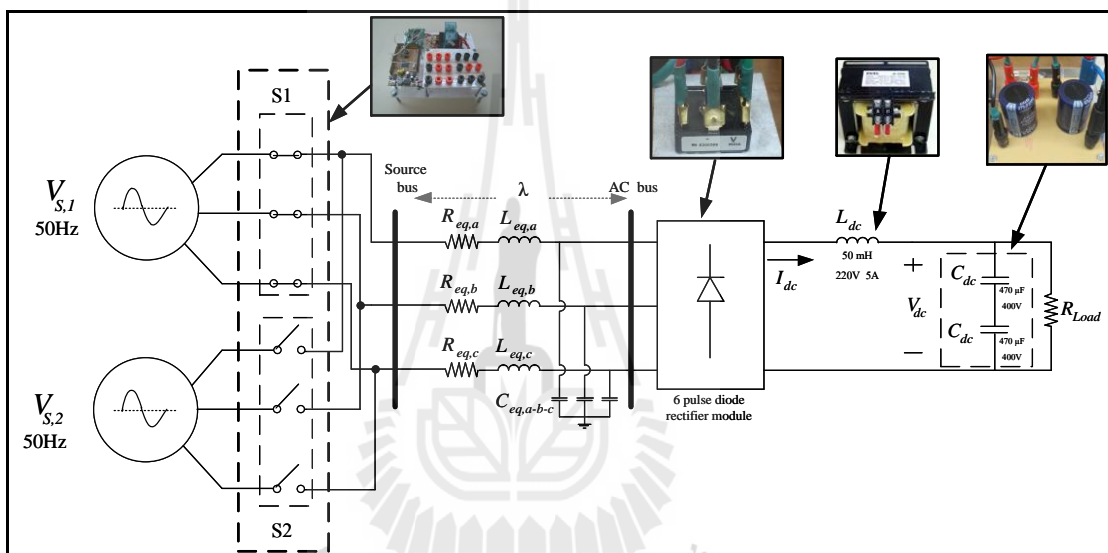
5.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซี เป็นดิซีสที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นจากบทที่ 4 โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้นได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งคำนวณค่าเจาะจงได้จากแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงอาจไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความจำเป็นในการสร้างชุดทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าว ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สำหรับเนื้อหาในบทนี้จึงได้กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ทางฝั่งแหล่งจ่าย และทางฝั่งโหลด โดยทางฝั่งแหล่งจ่ายจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับทางฝั่งโหลดจะประกอบด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมซึ่งใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 เป็นตัวควบคุมสัญญาณพัลส์หรือค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในบทนี้ได้นำเสนอเนื้อหาส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การสร้างสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแยกโคดสัญญาณสำหรับสั่งการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ การสร้างตัวควบคุมแบบพีไอจากไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมทั้งบทนี้ยังได้นำเสนอการตรวจวัดความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยทาโคมิเตอร์ (tachometer) และผลการทดสอบจากวงจรที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น

5.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

5.2.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้จำนวน 2 ชุด โดยมีรีเลย์ (relay) สำหรับการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โมดูลไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองทางฝั่งไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และโหลดของวงจรในที่นี้คือ ตัวต้านทาน



รูปที่ 5.1 วงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 5.1 พบว่ามีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสจำนวน 2 ค่า เนื่องจากในการทดสอบนี้ต้องการหาผลการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงขึ้นบันไดเพื่อประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 6 สำหรับการเลือกพิกัดของโมดูลวงจรเรียงกระแสผู้วิจัยได้พิจารณาจากโหลดมอเตอร์ที่จะทำการควบคุมความเร็วรอบซึ่งมีพิกัดอยู่ที่ 1 kW 220 V 6.2 A ดังนั้นชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยจึงได้เลือกพิกัดของโมดูลวงจรเรียงกระแสที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 500 V พิกัดกระแส 10 A สำหรับการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-1)

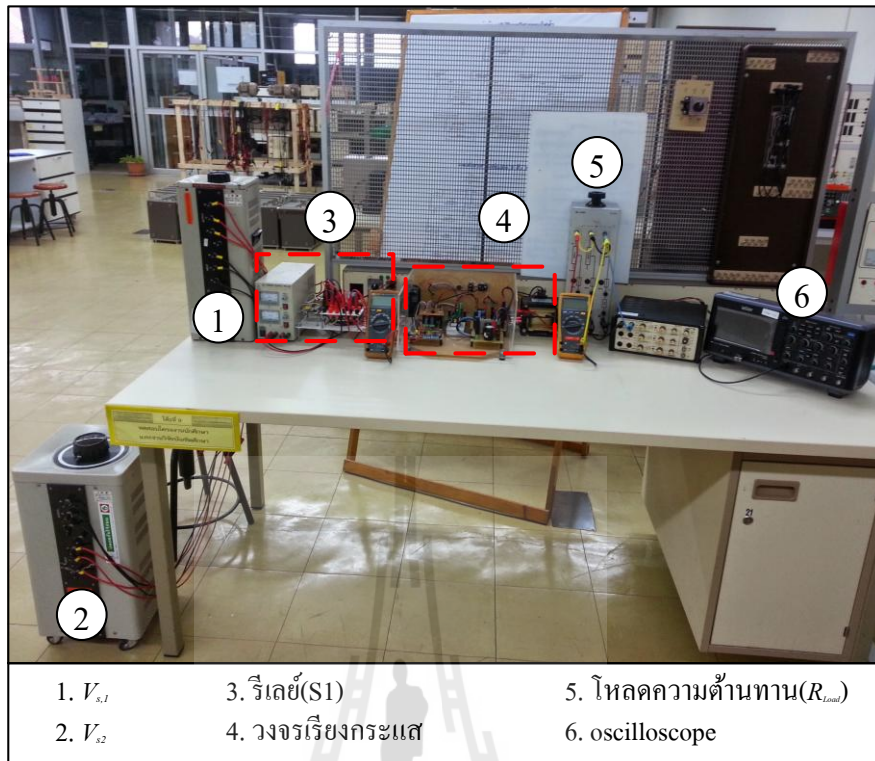
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (5-1)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ V_m คือ แรงดันค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับ

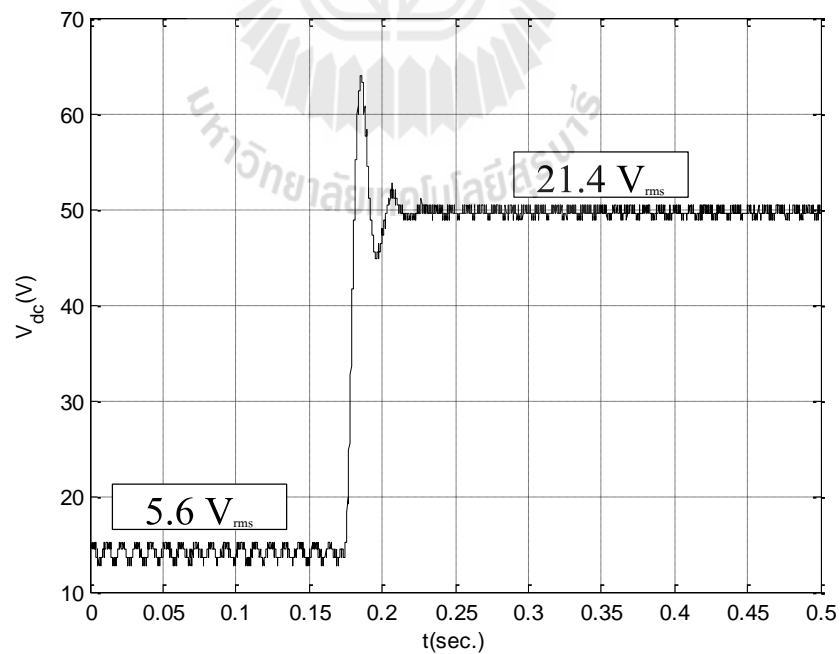
5.2.2 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้จะดำเนินการ โดยการเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แบบขึ้นบันไดเพื่อดูผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยจากสมการที่ (5-1) สามารถคำนวณผลของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะอยู่ตัวเพื่อนำมาตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบจริง

การทดสอบกำหนดให้ $V_{s,1}$ มีค่าเท่ากับ 5.6 V_{rms} ซึ่งจากสมการที่ (5-1) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ $\frac{3\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \times 5.6}{\pi} = 13.09$ V และ $V_{s,2}$ มีค่าเท่ากับ 21.4 V_{rms} จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ $\frac{3\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \times 21.4}{\pi} = 50.06$ V เมื่อกำหนดให้ $R_{Load} = 40 \Omega$ และทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันที่เวลา 0.175 วินาที โดยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตตามค่าดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน



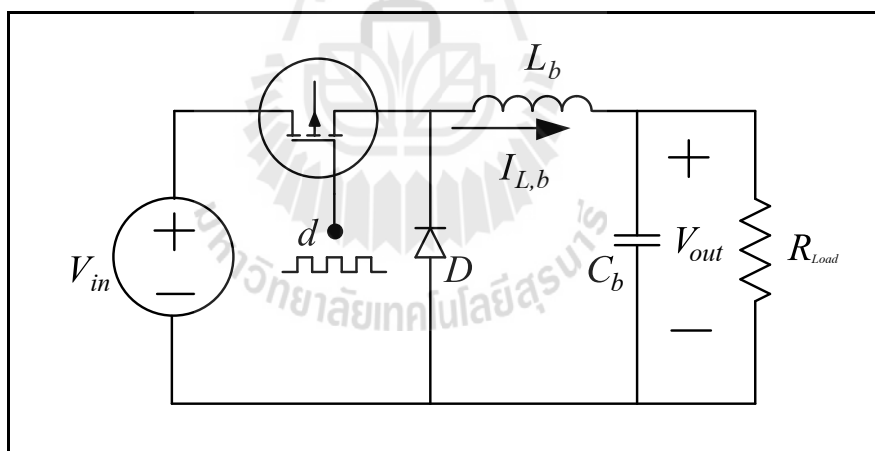
รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 5.3 พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ก่อน 0.175 วินาที มีค่าระดับแรงดันโดยประมาณเท่ากับ 13 V และหลัง 0.175 วินาที มีค่าระดับแรงดันโดยประมาณเท่ากับ 50 V ซึ่งจากการทดสอบดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานที่ได้สร้างขึ้น สามารถนำไปสร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยการปลด R_{Load} เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ และจะแสดงผลการทดสอบเป็นลำดับถัดไป

5.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

5.3.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ชุดสร้างสัญญาณพัลส์หรือคาว์จันท์หน้าทีของสวิตซ์ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และ โหลดความต้านทาน โดยวงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

5.3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

วงจรแปลงผันแบบบัคค์หรือวงจรลดระดับแรงดัน เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต เพื่อให้แรงดันและกระแสทางฝั่งเอาต์พุตมีการกระเพื่อมของสัญญาณให้น้อยที่สุด ซึ่งจะนิยมใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ในวงจรแปลง

ผันแบบบัคค์จะมีอัตราการลดระดับแรงดันไม่เกิน 100% จากแรงดันอินพุต ตามสมการค่าวัฏจักรหน้าซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 3 สมการที่ (3-25)

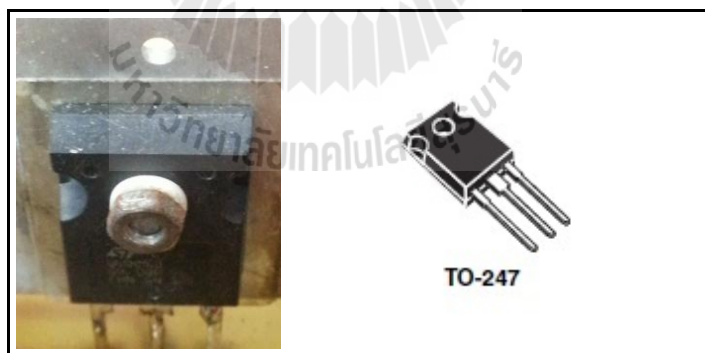
จากวงจรในรูปที่ 5.4 พบว่าสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ V_{out} (Muhammad H. Rashid) ได้จากสมการที่ (5-1)

$$V_{out} = d \cdot V_{in} \quad (5-1)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

d คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

การออกแบบอุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์โดยในส่วนแรกจะทำการออกแบบสวิทช์ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สวิทช์เป็นมอสเฟตเบอร์ W45NM60 แสดงรูปสวิทช์ได้ดังรูปที่ 5.5 โดยมีพิกัดของการทนกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 45A และทนแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 650V เนื่องจากพิกัดแรงดันและกระแสทางฝั่งอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 220V 6.2 A ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้สวิทช์เบอร์ดังกล่าวเพื่อป้องกันกระแสกระชากในช่วงการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 5.5 สวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ในส่วนของค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ จะต้องทำการออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมการออกแบบความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ ต้องคำนึงถึงริบเบิลของแรงดันหรือแรงดันพลิว ΔV_c (ripple voltage) โดยพิจารณาจากแรงดันที่ตกคร่อมโหลด และในทำนองเดียวกันค่าริบเบิลของกระแสหรือกระแสพลิว ΔI_L (ripple current) ซึ่ง

จะพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด (R_{Load}) โดยสมการที่ใช้ออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ และค่าของตัวเก็บประจุ (MUHAMMAD H. RASHID) แสดงได้ดังสมการที่ (5-2) และ (5-3) ตามลำดับ

$$L_b = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{\Delta I_{L,b} f V_{in}} \quad (5-2)$$

$$C_b = \frac{\Delta I_{L,b}}{8f\Delta V_c} \quad (5-3)$$

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

f คือ ความถี่ของสวิตช์วงจรแปลงผันแบบบักค์

ΔI_L คือ ค่ากระแสพลิว, L_b คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

ΔV_c คือ ค่าแรงดันพลิว, C_b คือ ค่าตัวเก็บประจุ

สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ กำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตในการออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักค์นี้จะมีค่าเท่ากับ 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

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

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

จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าความเหนี่ยวนำคือ 15 mH และค่าตัวเก็บประจุคือ 180 μF นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาค่ากระแสพิกัดของโหลดตัวต้านทาน R_{Load} ของวงจรแปลงผันแบบบักค์สามารถทนกระแสพิกัดได้สูงสุด 3 A

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต้องไม่เกิน 3 A ส่วนแรงดันพิกัดสำหรับค่าตัวเก็บประจุต้องไม่เกินแรงดันเอาต์พุตที่ออกมาคือ 185 V สำหรับค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงรายละเอียดดังนี้

- $L_b = 15 \text{ mH}$ พิกัดกระแส 5 A แรงดันไฟฟ้า 220 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.6



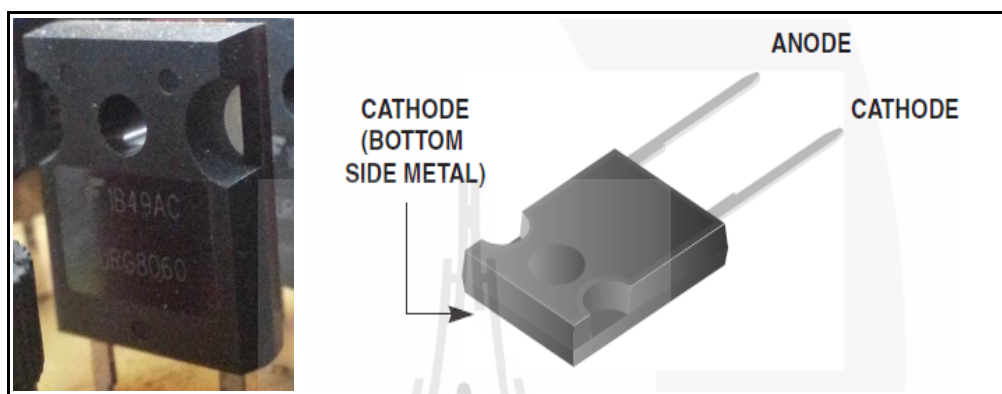
รูปที่ 5.6 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์

- $C_b = 180 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 400 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบักก์

ในส่วนต่อไปจะพิจารณาไดโอด D ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงในรูปที่ 5.8 ค่าพิกัดแรงดันเอาต์พุตต้องไม่เกินกว่าแรงดันอินพุตคือ 200 V เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ RURG8060 สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ 80 A และทนแรงดันไฟฟ้าได้ 600 V ซึ่งเพียงพอสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

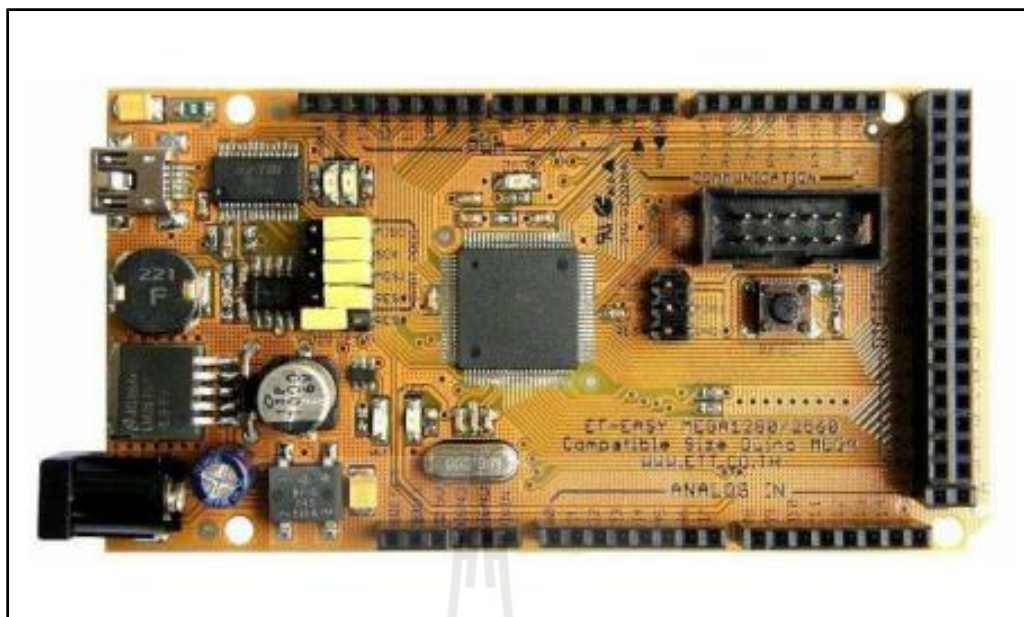


รูปที่ 5.8 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการออกแบบอุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ได้แก่ สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด โดยในการควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์นั้นจะอาศัยสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อ 5.3.3

5.3.3 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, พอร์ตดิจิทัล, พอร์ตอนาล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM และพอร์ตสื่อสารอนุกรม และขนาดความจำที่เพิ่มมากกว่าเดิม ทางอีทีทีจึงได้นำ ATmega1280 มาพัฒนาเป็นบอร์ดโดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA1280 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 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 เมกะเฮิรซ์ (MHz)
- หน่วยความจำ
 - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโหลดโปรแกรมขนาด 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 สามารถล๊อคการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์

- 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 เส้นแบบส่งข้อมูลแบบเรียงไปต์ (Byte Oriented)
 - มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
 - มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกอยู่ในตัว
 - มีการรองรับการขัดจังหวะและการเวค-อัพ (Wake - up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับขาชีพ
- คุณสมบัติพิเศษ
 - มีระบบเริ่มเมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับการเกิด บราวน์เอาท์ (Brown - out) ที่สามารถกำหนดการทำงานได้
 - มีตัวตรวจหาความเที่ยงตรงของออสซิลเลเตอร์อยู่ในตัว (Internal Calibrated Oscillator)
 - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายนอกและภายใน (External and Internal Interrupt Source)
 - มีโหมดการทำงานสลิป 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

การใช้งานพอร์ตสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

สำหรับในพอร์ตนี้มีความสำคัญในการรับค่าจากชุดทดสอบ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR พอร์ตแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลหรือ ADC (Analog to digital converter) ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5 V ซึ่งหมายถึงเมื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีพอร์ต ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณคือ ADC0-ADC15 สำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้เพียง 1 ช่องสัญญาณคือ ADC0 ผลการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล คำนวณได้จากสมการที่ (5-4)

$$ADC = \frac{V_{tachometer} \cdot 1024}{V_{ref}} \quad (5-4)$$

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

V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

การสร้างสัญญาณ PWM กับไทเมอร์/เคานเตอร์ 1

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

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

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

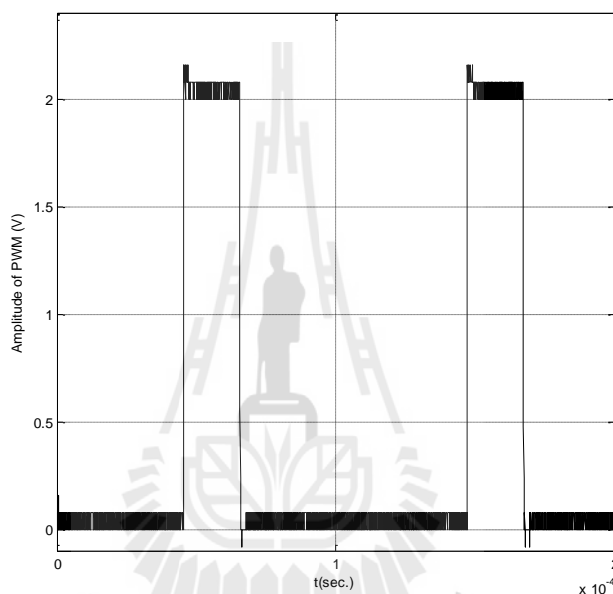
TOP คือ ค่าที่กำหนดให้รีจิสเตอร์ IRC1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

f_{clk} คือ ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่ต้องใช้ในที่นี้ใช้ 16 MHz

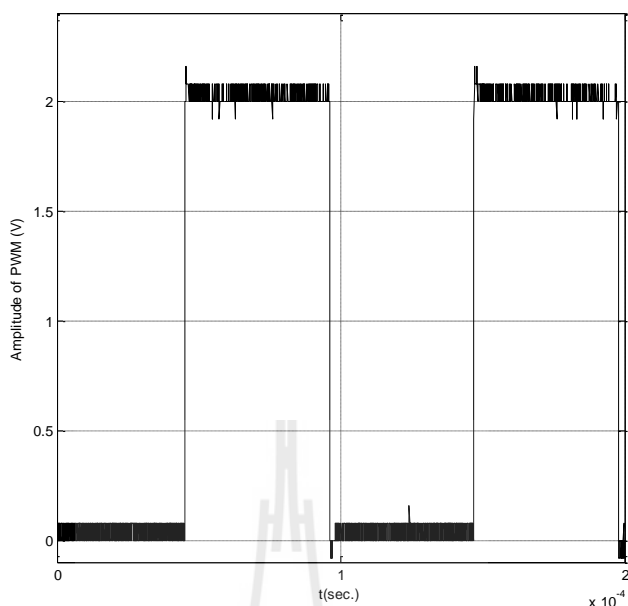
สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ความถี่ของสวิทซ์เท่ากับ 10 kHz โดยจะสามารถคำนวณค่า TOP หรือค่า IRC1 ได้จากสมการที่ (5-6)

$$TOP = \frac{16 \times 10^6}{2 \times 1 \times 10 \times 10^3} = 800 \quad (5-6)$$

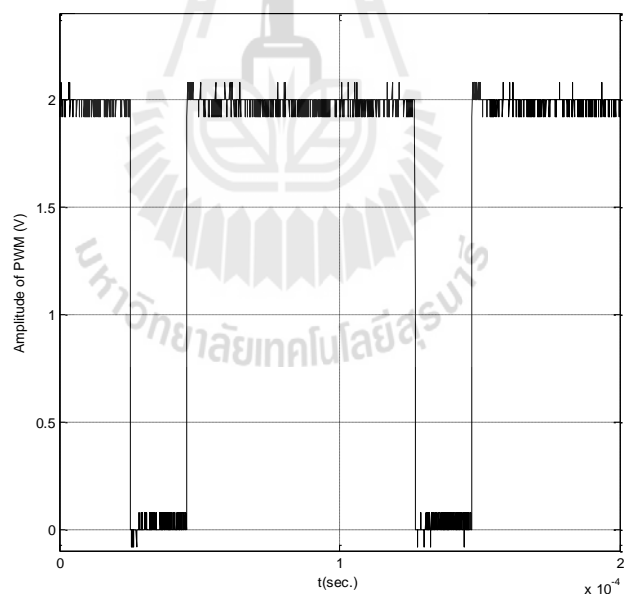
จากการออกแบบได้ค่า TOP หรือค่า IRC1 เท่ากับ 800 ซึ่งจะให้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 10 kHz ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 30% , 50% และ 80% ผู้วิจัยได้ใช้ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) เพื่อตรวจสอบสัญญาณซึ่งแสดงในรูปที่ 5.10 ถึง 5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 20%



รูปที่ 5.11 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 50%



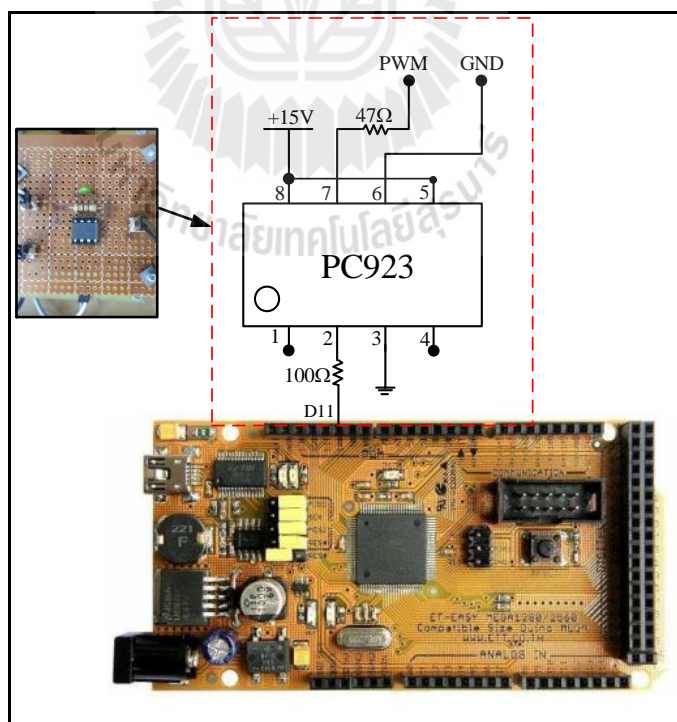
รูปที่ 5.12 สัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วัฏจักรหน้าที่ 80%

จากรูปที่ 5.10 ถึง 5.12 สังเกตได้ว่าลักษณะสัญญาณพัลส์ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีลักษณะตรงตามทีออกแบบไว้ นั่นคือ ที่ 10 kHz และมีความกว้างของสัญญาณตรงตามที่ได้ระบุไว้ สำหรับรายละเอียดโปรแกรมในการสร้างสัญญาณพัลส์สามารถศึกษาได้ในภาคผนวก ง ดังนั้นในลำดับถัดไปคือ การนำสัญญาณพัลส์ที่ได้จากบอร์ด

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสั่งการสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์ แต่เนื่องจากมอสเฟตเบอร์ W45NM60 ต้องใช้แรงดันที่มีค่าอย่างต่ำ 12 V ขึ้นไปสวิทช์จึงจะทำงาน อีกทั้งวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงจรไฟฟ้าแรงต่ำจึงต้องมีการแยกกราวด์ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วงจรจุดชนวนสวิทช์ด้วยไอซีเบอร์ PC923 ของบริษัทซาร์ฟ ไอซีเบอร์ดังกล่าวจะทำหน้าที่ขยายแรงดันของสัญญาณพัลส์ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และสามารถแยกกราวด์ระหว่างวงจรไฟฟ้าแรงต่ำและวงจรไฟฟ้าแรงสูงได้ในตัวเดียวกันโดยจะอธิบายการต่อวงจรในหัวข้อถัดไป

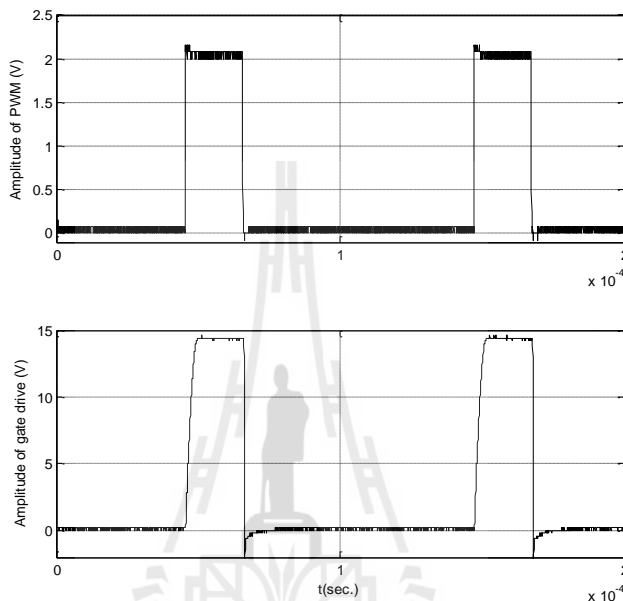
5.3.4 วงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์

สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้การสร้างวงจรจุดชนวนสวิทช์เพื่อทำการควบคุมสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์ และทำการแยกกราวด์ในส่วนของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำในที่นี้คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ออกจากวงจรไฟฟ้าแรงสูงในที่นี้คือ วงจรแปลงผันแบบบัก์ เพื่อที่จะไม่ให้กราวด์ของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำและกราวด์ของวงจรไฟฟ้าแรงสูงเชื่อมกัน ถ้าหากเกิดการใช้กราวด์ร่วมกันจะทำให้เกิดอันตรายต่อส่วนของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำได้ สำหรับวงจรจุดชนวนสวิทช์จะใช้ไอซีเบอร์ PC923 ซึ่งได้แสดงการต่อวงจรร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ดังนี้

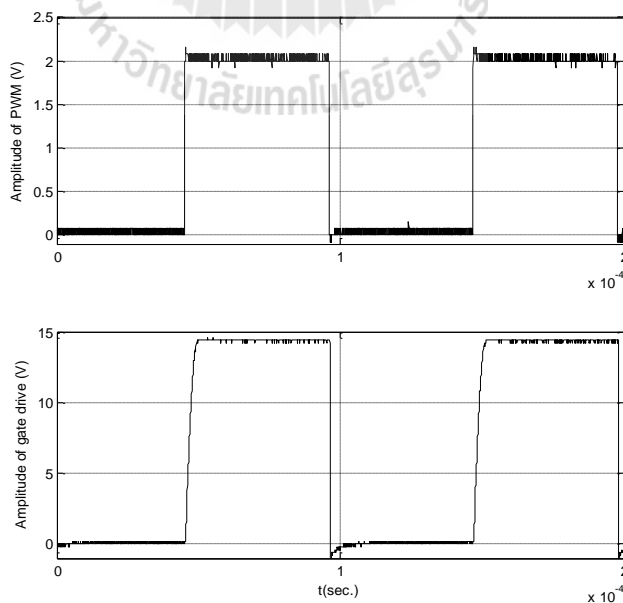


รูปที่ 5.13 วงจรร่วมระหว่างวงจรจุดชนวนเท่ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

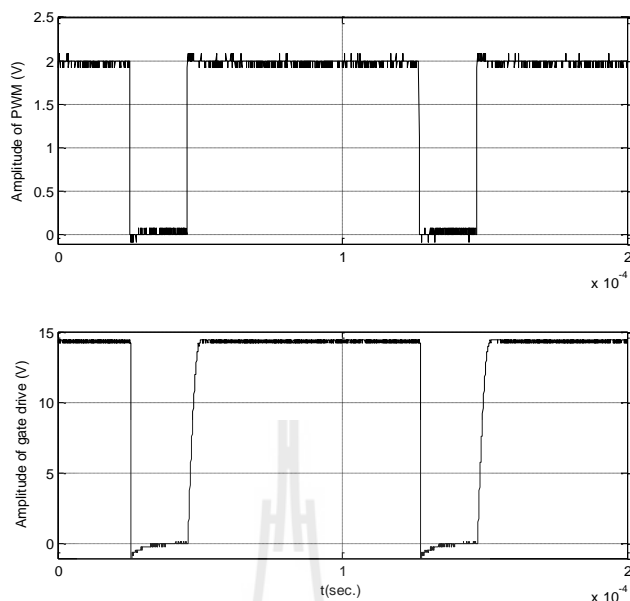
จากการต่อวงจรในรูปที่ 5.13 เพื่อเป็นการยืนยันขนาดแรงดันที่ได้จากวงจร จุดชนวนสวิทช์และลักษณะรูปสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรดังกล่าว โดยกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ มีค่าเท่ากับ 20% , 50% และ 80% ซึ่งจะได้ผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ดัง แสดงในรูปที่ 5.14 ถึง 5.16 ตามลำดับ



รูปที่ 5.14 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 20%



รูปที่ 5.15 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50%

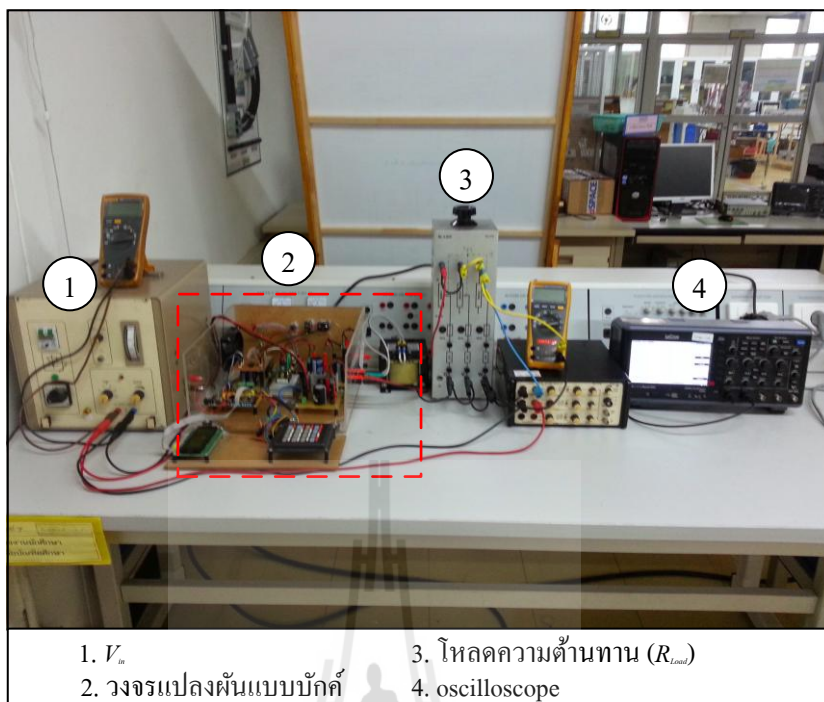


รูปที่ 5.16 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 80%

ผลการทดสอบวงจรจุดชนวนสวิทช์จากรูปที่ 5.14 ถึง 5.16 พบว่าให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่มีค่าตรงกับค่าวัฏจักรหน้าที่จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และมีความถี่ 10 kHz เท่ากัน ดังนั้นสัญญาณจากวงจรจุดชนวนสวิทช์ดังกล่าวสามารถนำไปสั่งการสวิทช์วงจรแปลงผันแบบบักค์ เนื่องจากด้วยค่าแรงดันที่ออกจากวงจรจุดชนวนมีค่าโดยประมาณ 15 V ซึ่งเพียงพอที่จะสั่งงานสวิทช์ให้ทำงานได้

5.3.5 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

สำหรับหัวข้อที่ 5.3 เป็นการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานซึ่งได้นำเสนอถึงการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ และได้ยังคงกล่าวถึงการสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งการสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ เพื่อให้เห็นถึงผลการตอบสนองของวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักค์โดยชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

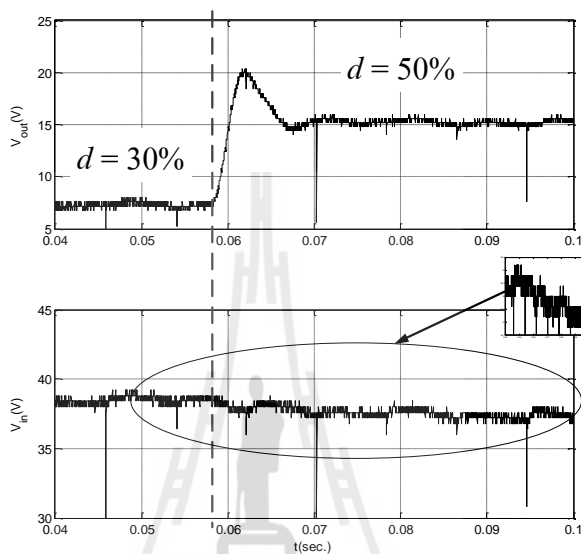
จากรูปที่ 5.17 หมายเลข 1 คือ V_{in} ซึ่งเป็นแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ หมายเลข 2 คือ วงจรแปลงผันแบบบักก์ หมายเลข 3 คือ โหลดความต้านทาน และ หมายเลข 4 คือ ออสซิลโลสโคปใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณแรงดันเพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลการตอบสนองซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูล (flash drive) โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจรแปลงผันแบบบักก์แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 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

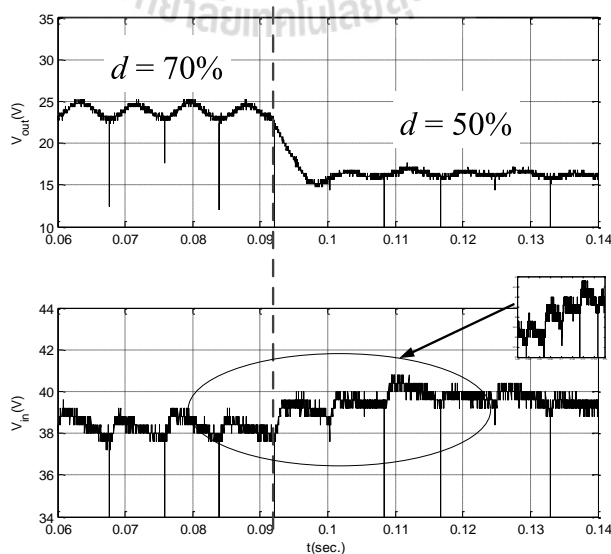
สำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่แบบขั้นบันไดเพื่อดูผลการตอบสนองและการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุต โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

1. ค่าวัฏจักรหน้าที่เปลี่ยนแปลงจาก 30% เป็น 50%



รูปที่ 5.18 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30% เป็น 50%

2. ค่าวัฏจักรหน้าที่เปลี่ยนแปลงจาก 70% เป็น 50%



รูปที่ 5.19 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 70% เป็น 50%

ผลการตอบสนองจากวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งในรูปที่ 5.18 และ 5.19 จะเห็นได้ว่า วงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่สร้างขึ้น สามารถทำงานได้ตรงตามค่าวัฏจักรหน้าที่ที่กำหนด โดยจากรูปที่ 5.18 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30% เป็น 50% หากคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตจากสมการที่ (5-1) เมื่อมีแรงดันอินพุตเท่ากับ 40 V จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 12 V และ 20 V ตามลำดับ และจากรูปที่ 5.19 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 70% เป็น 50% หากคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตจะได้ 28 V และ 20 V ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเนื่องจากการสร้างชุดอุปกรณ์ในทางปฏิบัติอาจมีการผิดเพี้ยนจากแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ตัวต่าง ๆ ไม่เหมือนในอุดมคติ ดังนั้นวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีโพลดเป็นตัวต้านทานจึงสามารถนำไปสร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ในอนาคตโดยลดโพลดตัวต้านทานออกเพื่อนำวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุม ซึ่งจะนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะได้กล่าวเป็นลำดับถัดไปในหัวข้อที่ 5.4

5.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุมใช้สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

5.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกดังแสดงรูปวงจรในบทที่ 4 มีส่วนประกอบ 2 ส่วนหลักคือ แหล่งจ่ายและโพลด ส่วนประกอบทางด้านแหล่งจ่ายคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านวงจรสมมูลสายส่งเพื่อเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และส่วนประกอบทางด้านโพลดคือ วงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุมซึ่งใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอโดยมีคำสั่งโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อ 5.6.2 และส่วนสำคัญอีกประการหนึ่งในการสร้างชุดทดสอบสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือ การรับค่าหรืออ่านค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งจะเข้าสู่กระบวนการของตัวควบคุมพีไอต่อไป สำหรับการอ่านค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.6.3 เป็นลำดับถัดไป

5.4.2 การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

สำหรับการสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยพื้นฐานการนำตัวควบคุมทั้ง 2 แบบมารวมกันคือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional controller) และตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) มารวมกันซึ่งจะมีข้อดีคือ สามารถปรับปรุ้งค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลดน้อยลงจนหมดไป โดยเมื่อมีตัวควบคุมต้องไม่ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง ตัวควบคุมพีไอสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (5-7)

$$\omega_m = K_p \omega_{m,error} + K_i \int \omega_{m,error} dt \quad (5-7)$$

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

จากสมการที่ (5-7) เป็นสมการที่ต่อเนื่องทางเวลาซึ่งไม่สามารถเขียนในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เนื่องจากการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีลักษณะเป็นแบบสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) ดังนั้นจำเป็นต้องสร้างสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาเพื่อให้สามารถเขียนเป็นโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการหาสมการเวลาที่ไม่ต่อเนื่องแสดงได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาสมการตัวควบคุมแบบพีไอในช่วงเวลาที่ต่อเนื่องจากสมการที่ (5-7)

ขั้นตอนที่ 2 แก่หาอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (5-7) แสดงได้ดังสมการที่ (5-8)

$$\frac{d}{dt} \omega_m = K_p \frac{d}{dt} \omega_{m,error} + K_i \omega_{m,error} \quad (5-8)$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้ $dt = T_i$ เมื่อ T_i คือ ค่าสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และอนุพันธ์ของความเร็วจึงและอนุพันธ์ของความเร็วจึงผิดพลาดเพื่อประมาณค่าให้อยู่ในรูปแบบผลต่างแสดงได้ดังสมการที่ (5-9)

$$\frac{\Delta \omega_m}{T_i} = K_p \frac{\Delta \omega_{m,error}}{T_i} + K_i \omega_{m,error} \quad (5-9)$$

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้ผลต่างของความเร็รรอบเอาต์พุต ($\Delta\omega_m$) มีค่าเท่ากับ $\omega_{m(i)} - \omega_{m(i-1)}$ และผลต่างของค่าความเร็วผิดพลาด ($\Delta\omega_{m,error}$) มีค่าเท่ากับ $\omega_{m,error(i)} - \omega_{m,error(i-1)}$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-10)

$$\frac{\omega_{m(i)} - \omega_{m(i-1)}}{T_i} = K_p \frac{\omega_{m,error(i)} - \omega_{m,error(i-1)}}{T_i} + K_i \omega_{m,error(i)} \quad (5-10)$$

โดยที่ $\omega_{m(i)}$	คือ ค่าความเร็รรอบเอาต์พุตในรอบปัจจุบัน
$\omega_{m(i-1)}$	คือ ค่าความเร็รรอบเอาต์พุตในรอบก่อนหน้า (อดีต)
$\omega_{m,error(i)}$	คือ ค่าความเร็รรอบผิดพลาดในรอบปัจจุบัน
$\omega_{m,error(i-1)}$	คือ ค่าความเร็รรอบผิดพลาดในรอบก่อนหน้า (อดีต)

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

$$\omega_{m(i)} = \omega_{m(i-1)} + K_p \omega_{m,error(i)} - K_p \omega_{m,error(i-1)} + K_i \omega_{m,error(i)} T_i \quad (5-11)$$

จากสมการที่ (5-11) สามารถนำไปเขียนโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งในการเขียนโปรแกรม การควบคุมแบบวงปิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมวงจรรอื่น ๆ ได้เช่นกัน

5.4.3 การอ่านค่าความเร็วจากทาคอไมเตอร์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้พอร์ต ADC

การควบคุมความเร็รรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงส่วนสำคัญจุดหนึ่งคือ การวัดความเร็รรอบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเร็รรอบที่ผู้ใช้งานต้องการ หากเครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการบอกความเร็รรอบของมอเตอร์มีความผิดพลาดจะทำให้ความเร็รรอบที่ผู้ใช้งานต้องการมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นไป สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยทาคอไมเตอร์ โดยทาคอไมเตอร์ที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ทาโคมิเตอร์สำหรับชุดทดสอบ

จากรูปที่ 5.20 ทาโคมิเตอร์ชนิดดังกล่าวมีหลักการทำงานเป็นดังเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็ก เมื่อแกนมอเตอร์หมุนผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นค่าหนึ่งโดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแปรผันตามความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทาโคมิเตอร์ที่ใช้งานจริงสำหรับชุดทดสอบเลือกใช้อัตราระดับแรงดันต่อความเร็วรอบเป็นดังเช่นสมการที่ (5-12) เนื่องจากหากเลือกใช้อีกอัตราส่วนที่เหลืออาจสร้างความเสียหายต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เนื่องจาก 1000rpm สร้างแรงดันขนาด 20V จะเห็นว่าเกินขนาดที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถอ่านได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อัตราส่วนดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

$$V_{tachometer} = \frac{\omega_m \text{ (rpm)}}{1000} \quad (5-12)$$

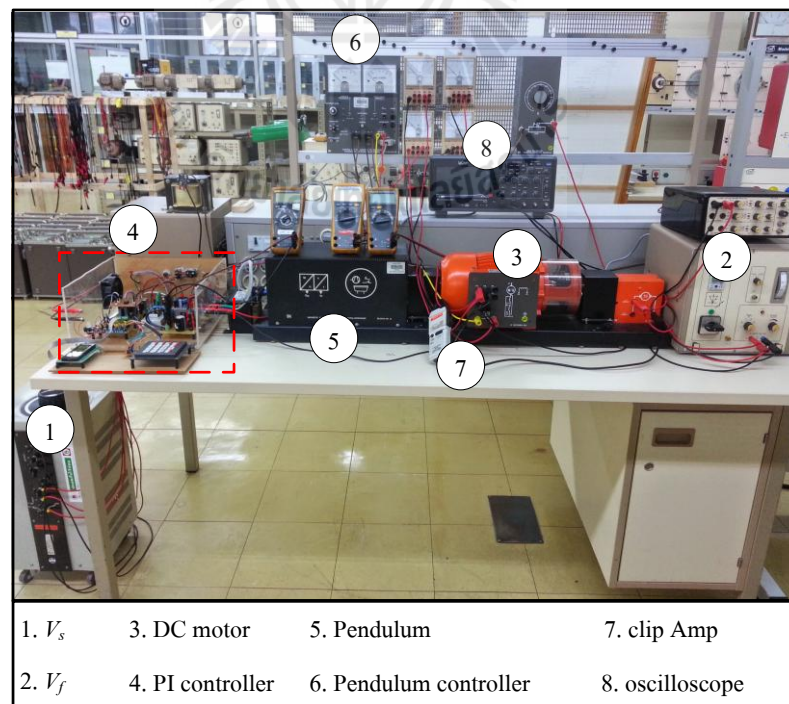
จากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับทดสอบมีพิสัยความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบเท่ากับ 2100 rpm เมื่อคำนวณตามสมการที่ (5-12) แล้วพบว่ามิชขนาดแรงดันไม่เกิน 2.1 V ซึ่ง

จากพอร์ตสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3.3 มีความสามารถในการรับค่าแรงดันขนาดดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม และเพื่อให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับรู้ระดับแรงดันอินพุตของสัญญาณอนาลอกจะใช้สมการที่ (5-4) ในการแปลงค่าระดับแรงดันเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

5.4.4 ผลการทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

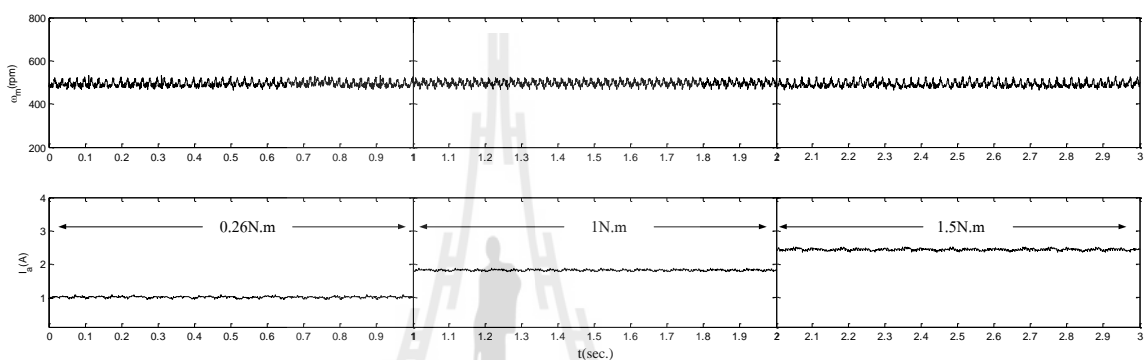
ในการทดสอบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับหัวข้อนี้ได้นำเสนอการคงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วทำการเปลี่ยน โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่เนื่องจากอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถปรับเปลี่ยนโหลดทางกลแบบขึ้นบันได ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปลี่ยนโหลดแบบเพิ่ม โหลดทางกลทีละน้อยเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงระดับกระแสอาร์เมเจอร์ซึ่งจะสื่อถึงการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลเช่นกัน

การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงรูปชุดทดสอบได้ดังรูปที่ 5.21

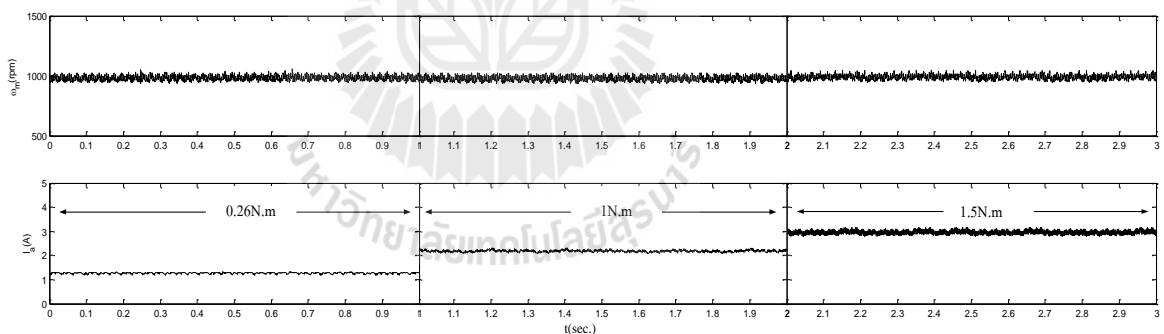


รูปที่ 5.21 ชุดการทดสอบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 5.21 สำหรับในการทดสอบกำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ 95Vrms/phase แรงดันสนาม 200V ปรับกระแสสนามให้มีค่าเท่ากับ 0.24A และกำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 500rpm มีโหลดทางกลเปลี่ยนแปลงจาก 0.26N.m เป็น 1N.m และเป็น 1.5N.m ตามลำดับ แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.22 และกำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 1000rpm มีโหลดทางกลเปลี่ยนแปลงจาก 0.26N.m เป็น 1N.m และเป็น 1.5N.m ตามลำดับ ผลการทดสอบจากชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบที่ 500 rpm



รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบที่ 1000 rpm

จากรูปที่ 5.22 และ 5.23 พบว่าระดับความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าคงที่ตามที่ได้กำหนดไว้แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลโดยดูได้จากกระแสอาร์มเจอร์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นชุดทดสอบที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ในอนาคตซึ่งจะได้กล่าวไว้ในบทที่ 7

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกโดยใช้วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งผู้วิจัยจะได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแหล่งจ่ายนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 และในส่วนของโหลดนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3 และในส่วนสุดท้ายเป็นการนำชุดทดสอบทางฝั่งแหล่งจ่ายและโหลดมาต่อเข้าด้วยกันพร้อมทั้งใส่ ตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.4 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 5 เป็นการสร้างชุดทดสอบที่รวมทั้ง 2 ส่วนเข้า ด้วยกันคือ แหล่งจ่ายและโหลด เมื่อทำการทดสอบวงจรดังกล่าวพบว่าให้ผลการตอบสนองที่ได้ ตรงตามวัตถุประสงค์ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตอีกด้วย ส่วนสำคัญที่จะ นำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตนั่นคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวซึ่งจะกล่าวไว้ใน บทที่ 7 และเพื่อให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้อง ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบจะต้อง เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง ซึ่งค้นหาได้จากด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะได้กล่าวในบทที่ 6 เป็น ลำดับถัดไป

บทที่ 6

การระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

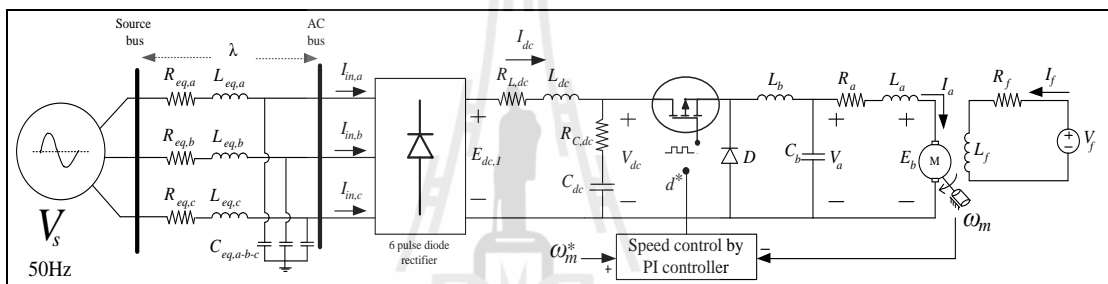
6.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 6 จะนำเสนอการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นวิธีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพกับระบบจริงเป็นอย่างมากเนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้องเมื่อนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทฤษฎีมายืนยันผลจากชุดทดสอบจริงจะทำให้จุดการขาดเสถียรภาพเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง และพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบจริง โดยจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัด ซึ่งจะพิจารณาการหาค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง และค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ในวิธีเดียวกันนี้จะได้นำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานทั้งฝั่งอาร์เมเจอร์และฝั่งสนามรวมทั้งตัวเหนี่ยวนำทั้งฝั่งอาร์เมเจอร์และฝั่งสนาม เนื่องจากเป็นส่วนที่ง่ายต่อการทดสอบและได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ สำหรับในส่วนที่สองจะเป็นการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search) (K-N Areerak, S. Sujijom, 2002) โดยจะพิจารณาในส่วนของค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ ค่าความต้านทานภายในสายส่งและค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง รวมไปถึงค่าคงที่ต่างๆของมอเตอร์ได้แก่ ค่าคงที่ของมอเตอร์ ($K = K_t = K_v$) ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ (B) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J) เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดได้โดยง่าย ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งในที่นี้คือ การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบโดยจะพิจารณาแยกเป็น 2 วงจรในการค้นหาคือ วงจรที่หนึ่งเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่าน วงจรกรองที่มี

โหลดเป็นตัวต้านทาน และวงจรที่สองเป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ส่วนสำคัญที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบอยู่ในส่วนของวงจรกรอง และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

6.2 ระบบที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล วงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองต่อเข้ากับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมใช้สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

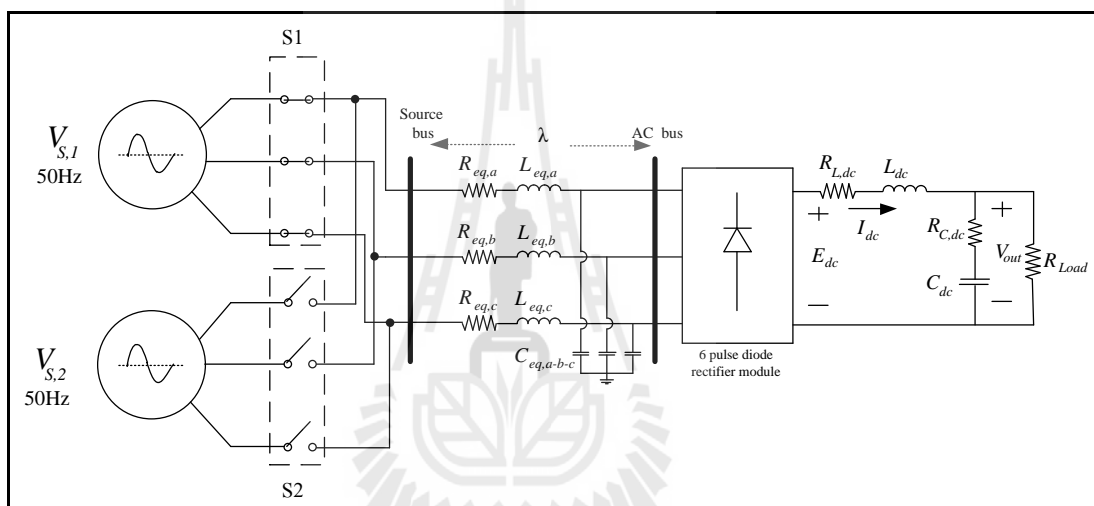


รูปที่ 6.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์

จากรูปที่ 6.1 เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับระบบที่พิจารณาดังกล่าวค่าพารามิเตอร์ในวงจรกรองและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพอย่างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของระบบซึ่งจะได้ทำการแบ่งวงจรที่พิจารณาออกเป็น 2 ส่วนดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพเป็นอย่างมาก โดยผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองเมื่อนำมาต่อเข้ากับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งจะส่งผลกระทบในการวิเคราะห์จุดเกิดการขาดเสถียรภาพ หากไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของมอเตอร์อาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากชุดทดสอบจริง ดังนั้นสำหรับโหลดของระบบที่แยกพิจารณาในส่วนที่ 1 กำหนดให้เป็นโหลดของความต้านทาน (R_{Load}) และสำหรับส่วนที่สองจะพิจารณาเฉพาะวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยนำผลการตอบสนองของความเร็วรอบและผล

การตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์มาพิจารณาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา ซึ่งในการระบุเอกลักษณ์ทั้ง 2 ส่วนจะทำให้สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

สำหรับการพิจารณาในส่วนของที่ 1 นั้นคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงรูปวงจรได้ดังรูปที่ 6.2 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส วงจรสมมูลสายส่ง วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีวงจรกรองโดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน และมีรีเลย์ (S1) ในการตัดต่อเพื่อสลับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

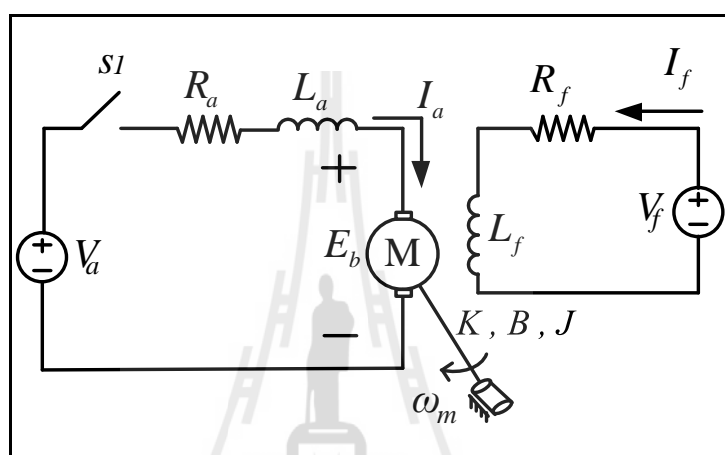


รูปที่ 6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 6.2 เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานที่จะใช้ในการพิจารณาค้นหาพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง ซึ่งในการค้นหาพารามิเตอร์นั้นผู้วิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนที่หนึ่งจะเป็นการระบุค่าพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ($R_{L,dc}$) และตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (L_{dc}) โดยใช้วิธีการวัดค่าจากเครื่องมือวัด ซึ่งจะแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ในส่วนที่สองจะทำการค้นหาพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานภายในวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า (R_{eq}) ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า (L_{eq}) ค่าความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ($R_{C,dc}$) และค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง (C_{dc}) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในส่วนที่สองนี้ผู้วิจัยจะเลือกใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งรายละเอียดจะได้แสดงในหัวข้อที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องที่ได้จากการค้นหา

ในบทนี้จะนำไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองสถานการณ์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

สำหรับการพิจารณาในส่วนของ 2 นั้นคือ วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก รูปวงจรได้ดังรูปที่ 6.3 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางฝั่งอาร์เมเจอร์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางฝั่งสนาม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมีสวิตช์ (SI) ในการปิด – เปิดวงจร



รูปที่ 6.3 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

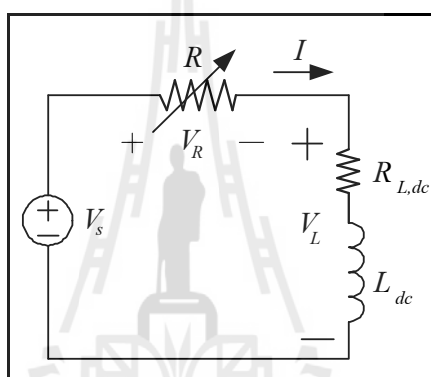
จากรูปที่ 6.3 เป็นวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะใช้ในการศึกษาค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง ซึ่งในการระบุค่าพารามิเตอร์นั้นผู้วิจัยจะแบ่งการค้นหาค้นออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน คือ ในส่วนที่หนึ่งจะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_a) ตัวเหนี่ยวนำทางฝั่งอาร์เมเจอร์ (L_a) ค่าความต้านทานสนาม (R_f) และตัวเหนี่ยวนำทางฝั่งสนาม (L_f) โดยใช้วิธีการวัดค่าจากเครื่องมือวัด ซึ่งจะแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 6.5 ในส่วนที่สองจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของค่าคงที่ของมอเตอร์ (K) ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์ (B) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในส่วนที่สองนี้ผู้วิจัยจะเลือกใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งรายละเอียดจะได้แสดงในหัวข้อที่ 6.6 ต่อไป

จากการศึกษาการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ค่าพารามิเตอร์ทุกตัวของระบบจะส่งผลกระทบต่อผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบนั้น ๆ ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าว ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้จึงจำเป็นต้องทำการระบุเอกลักษณ์เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีความ

ถูกต้อง ซึ่งจะนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ แสดงจุดการขาดเสถียรภาพที่ใกล้เคียงกับจุดที่ได้จากชุดทดสอบจริง

6.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยเครื่องมือวัด

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ เป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดสอบและให้ผลที่ถูกต้อง ลักษณะการต่อวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_s) ตัวต้านทานปรับค่าได้ (R) ตัวความเหนี่ยวนำ (L_{dc}) และความต้านทานแฝงอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ ($R_{L,dc}$)



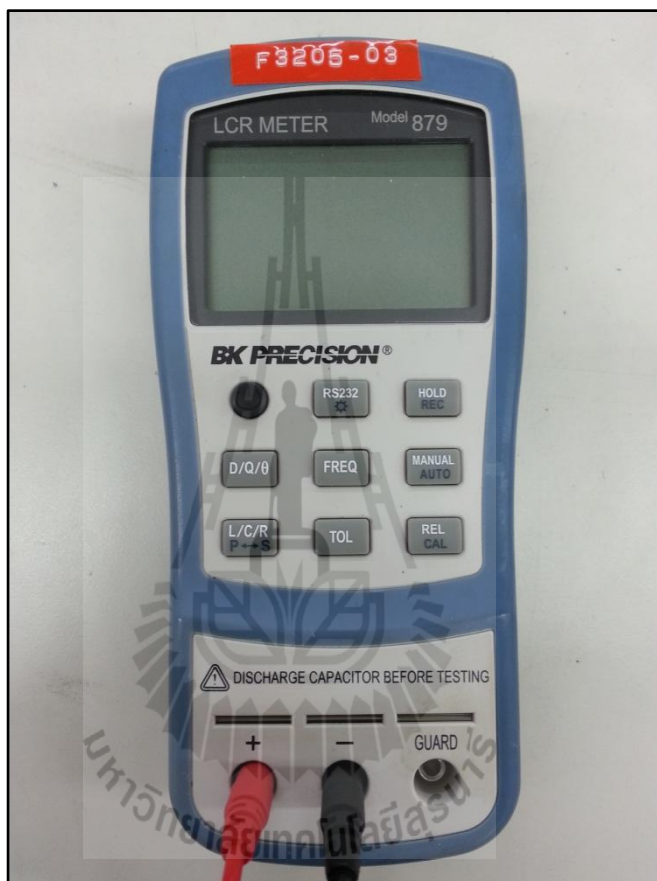
รูปที่ 6.4 วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

สำหรับการทดสอบหาค่าตัวต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำจะอาศัยกฎของโอห์ม โดยการทดสอบจะดำเนินการโดยการปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_s) เพิ่มขึ้นทีละ 20 V เริ่มจาก 100 V – 180 V เพื่อวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และคำนวณค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำซึ่งผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ

V_s	V_R	I	R	V_L	$R_{L,dc}$	$R_{L,dc}$ เฉลี่ย
100.7	100.2	0.197	508.63	0.499	2.533	2.1754
121.3	120.8	0.238	507.56	0.492	2.067	
140.3	139.8	0.276	506.52	0.557	2.018	
160.9	160.2	0.316	506.96	0.703	2.225	
180.1	179.2	0.354	506.214	0.72	2.034	

การหาค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (L_{dc}) จะอาศัยเครื่องมือวัด LCR METER ในห้องปฏิบัติการรุ่น 879 จากบริษัท BK PRECISION แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 ในการทดสอบจะดำเนินการโดยทำการวัดด้วยกัน 3 ครั้ง เพื่อนำค่าที่วัดได้มาเฉลี่ยซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองที่ได้จากการวัด แสดงได้ดังตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.5 LCR meter รุ่น 879 จากบริษัท BK PRECISION

ตารางที่ 6.2 ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำ

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
39.42 mH	38.38 mH	39.36 mH	39.053 mH

จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำและค่าความเหนี่ยวนำด้วยเครื่องมือวัด แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการวัดไม่ตรงกับค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้จาก

ป้ายของอุปกรณ์หากนำค่าที่อ่านได้จากป้ายอุปกรณ์ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการทดสอบจึงเป็นค่าที่มีความถูกต้องมีความเหมาะสมที่จะนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริง โดยเนื้อหาในส่วนของการวิเคราะห์เสถียรภาพได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7

สำหรับค่าพารามิเตอร์ส่วนที่เหลือในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ได้แก่ ค่าความต้านทานภายในสายส่ง ค่าความเหนี่ยวนำภายในสายส่ง ความต้านทานในตัวเก็บประจุ และค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของวงจรกรอง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดระบุค่าได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากในการวัดค่าจริงจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะใช้วิธีค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 6.4 เป็นลำดับถัดไป

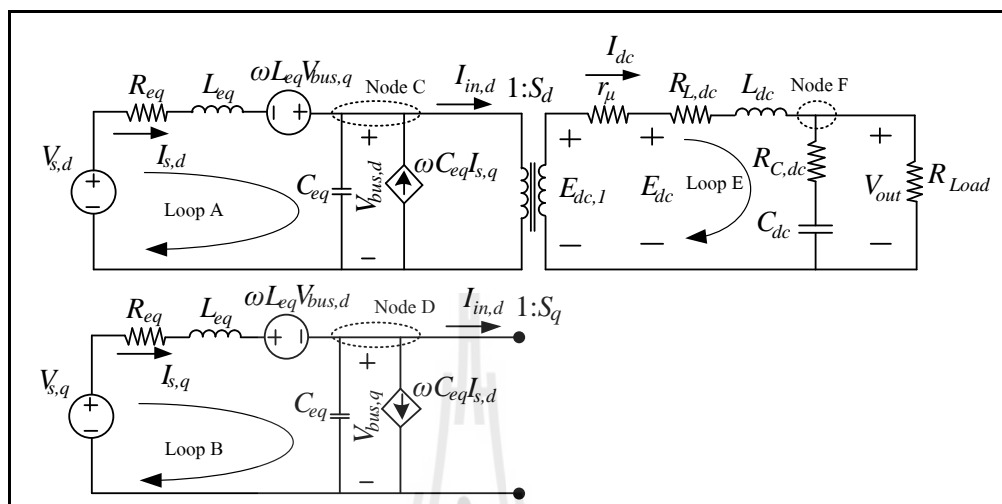
6.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ วิธีทางปัญญาประดิษฐ์เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดด้วยเครื่องมือวัดได้ โดยเนื้อหาที่สำคัญจะประกอบไปด้วย การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิวสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้จากชุดทดสอบจริง และการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

6.4.1 การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีดีคิว

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่แสดงในรูปที่ 6.2 จะพิจารณาเงื่อนไขการพิสูจน์เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับวงจรในรูปที่ 6.2 ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแบบสมมูล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} แทนพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ส่วนพารามิเตอร์วงจรกรองสัญญาณทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงแทนด้วย $R_{L,dc}$, L_{dc} , $R_{C,dc}$ และ C_{dc} ในขณะที่ E_{dc} เป็นแรงดันเอาต์พุตดีซีและ V_{out} เป็นแรงดันเอาต์พุตคกร่อมโหลดตัวต้านทาน R_{Load} สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

วิธีคิด ซึ่งสามารถทำให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้โดยกำหนดให้ $\theta = \phi - \phi_1$ ทำให้ได้วงจรสมมูลอย่างง่ายดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดีคิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

จากวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 6.6 สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าด้วยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตามโหนดแรงดันและลูปกระแสต่างๆ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดตัวแปรสถานะอินพุตและเอาต์พุตดังนี้

$$\text{ตัวแปรสถานะ : } \mathbf{x} = [I_{s,d} \quad I_{s,q} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{dc}]^T$$

$$\text{ตัวแปรอินพุต : } \mathbf{u} = [V_m]$$

$$\text{ตัวแปรเอาต์พุต : } \mathbf{y} = [V_{dc}]$$

เมื่อวิเคราะห์วงจรด้วยกฎพื้นฐานทางไฟฟ้าจะได้สมการอนุพันธ์ซึ่งสามารถทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงได้สมการที่ (6-1)

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{I}_{s,d} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,d} + \omega I_{s,q} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \cos \lambda}{L_{eq}} \\
 \dot{I}_{s,q} = -\omega I_{s,d} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,q} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \sin \lambda}{L_{eq}} \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{s,d}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \frac{S_d}{C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{s,q}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} - \frac{S_q}{C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{I}_{dc} = \frac{S_d}{L_{dc}} V_{bus,d} + \frac{S_q}{L_{dc}} V_{bus,q} - \frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{C,dc})}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{(R_{Load} - R_{c,dc})}{R_{Load} \cdot L_{dc}} V_{out} \\
 \dot{V}_{out} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{1}{R_{Load} \cdot C_{dc}} V_{out}
 \end{array} \right. \quad (6-1)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ (6-1) สามารถแสดงรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแมทริกซ์ $A(x,u)$, $B(x,u)$, $C(x,u)$ และ $D(x,u)$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(x,u) = \begin{bmatrix}
 -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\
 -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\
 \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{S_d}{C_{eq}} & 0 \\
 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{S_d}{L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + R_{L,dc} + R_{c,dc})}{L_{dc}} & -\frac{(R_{Load} - R_{c,dc})}{R_{Load} \cdot L_{dc}} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & -\frac{1}{R_{Load} \cdot C_{dc}}
 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos \lambda}{L_{eq}} \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin \lambda}{L_{eq}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6}$$

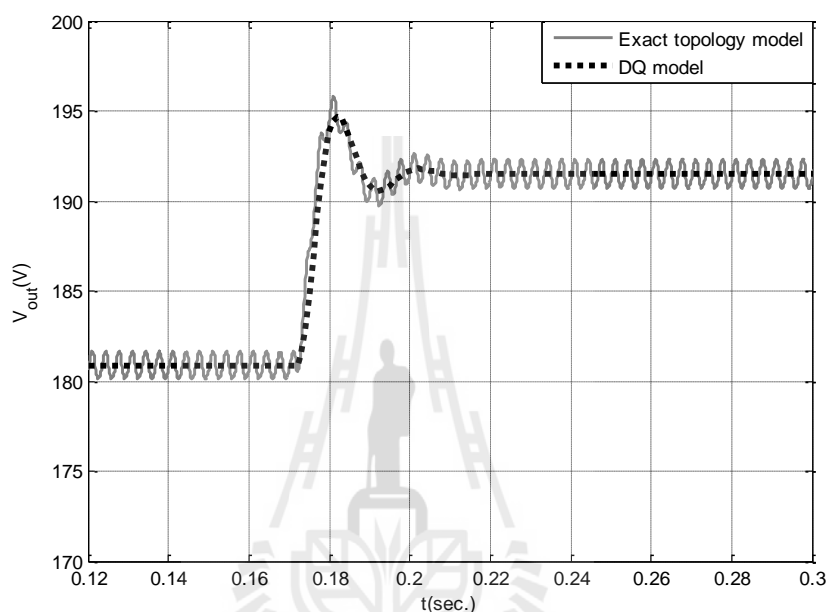
$$\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [0]_{1 \times 1}$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น
ดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6-1) ซึ่ง
เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่แสดงในรูปที่ 6.2 เพื่อ
ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะ
อาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB ซึ่งพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์ของ
ระบบแสดงได้ดังตารางที่ 6.3 สำหรับชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์สามารถดูรายละเอียด
เกี่ยวกับบล็อกการจำลองสถานการณ์ได้จากภาคผนวก จ

ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 6.2

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	80 – 84 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
$R_{L,dc}$	2.1754 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$R_{C,dc}$	5 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$L_{dc} (\Delta I_{dc} \leq 1.5 \text{ A})$	39.053 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc} (\Delta V_{dc} \leq 50 \text{ V})$	235 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
R_{Load}	80 Ω	โหลดความต้านทาน

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 6.3 สามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนที่จะนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดำเนินการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก $80 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ เป็น $84 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องแสดงได้ดังรูปที่ 6.7

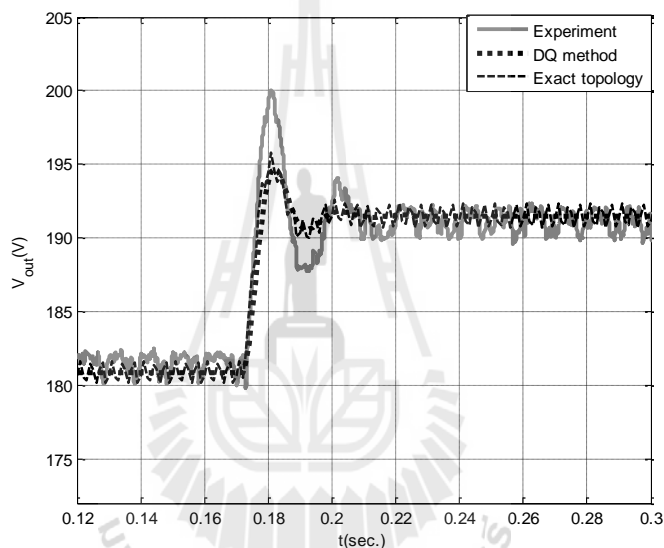


รูปที่ 6.7 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากรูปที่ 6.7 แสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบไฟฟ้าจากรูปที่ 6.2 ซึ่งจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6-1) (DQ model) เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Exact topology model) เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก $80 \text{ V}_{\text{rms}}$ เป็น $84 \text{ V}_{\text{rms}}$ ที่เวลา 0.18 วินาที การเปลี่ยนแปลงค่าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวมีความถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อระบุเอกลักษณ์ของชุดทดสอบจริงซึ่งจะแสดงรายละเอียดได้ในหัวข้อที่ 6.4.3 ต่อไป

6.4.2 การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานจากชุดทดสอบจริง

สำหรับการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ได้ดำเนินการโดยการต่อวงจรชุดทดสอบเช่นเดียวกับการต่อวงจรในบทที่ 5 ดังรูปที่ 5.2 เพื่อแสดงผลการตอบสนองเอาต์พุตจากชุดทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการแปลงคิคว โดยผลการตอบสนองแสดงดังรูปที่ 6.8 ดำเนินการโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทันทีทันใดจาก $80 \text{ V}_{\text{rms}}$ เป็น $84 \text{ V}_{\text{rms}}$



รูปที่ 6.8 ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์

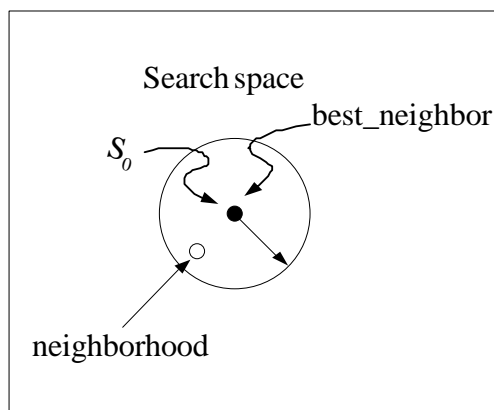
จากรูปที่ 6.8 แสดงให้เห็นผลการตอบสนองแรงดันเอาต์พุตของการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่สอดคล้องกันกับผลการตอบสนองจากชุดทดสอบจริง แต่ยังไม่ถูกต้องเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีค่ายังไม่ถูกต้องซึ่งปัญหาดังกล่าวจะทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความผิดพลาดได้ ถึงแม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความถูกต้องสูงก็ตาม ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าว นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องที่สุด ซึ่งรายละเอียดจะแสดงได้ในหัวข้อที่ 6.4.3 ต่อไป

6.4.3 การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive tabu search: ATS) เป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (tabu search: TS) โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูได้นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combination optimization) ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวได้ถูกค้นพบโดย (Glover, 1989) และต่อมาได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) และยังสามารถทำการค้นหาคำตอบจนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global solution) ต่อมาในปี พ.ศ. 2545 กองพัน อารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร ได้พัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพการค้นหาที่ดียิ่งขึ้น โดยการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในอัลกอริทึม สำหรับกลไกแรก คือ การเดินย้อนรอย (back - tracking) เป็นกลไกที่อนุญาตให้ระบบการค้นหาสามารถย้อนกลับไปค้นหาคำตอบบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน ซึ่งทำให้ระบบการค้นหามีโอกาสที่จะค้นหาคำตอบในบริเวณพื้นที่ใหม่ และหลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น ได้ กลไกที่สอง คือ การปรับลดรัศมีในการค้นหา (adaptive radius) ซึ่งจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

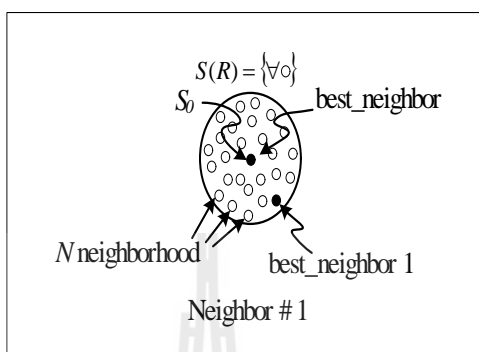
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) แสดงได้ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

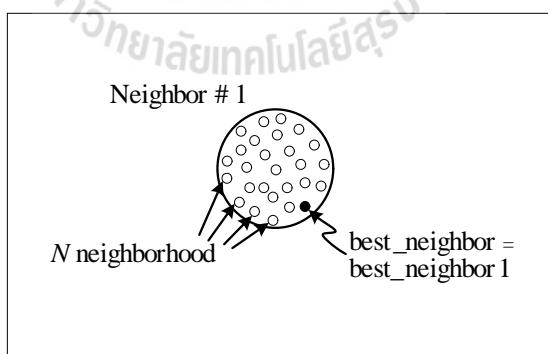
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง แสดงได้ดังรูปที่ 6.10



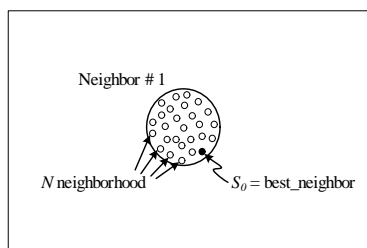
รูปที่ 6.10 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบรอบข้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่สุดใน $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาม แสดงได้รูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12

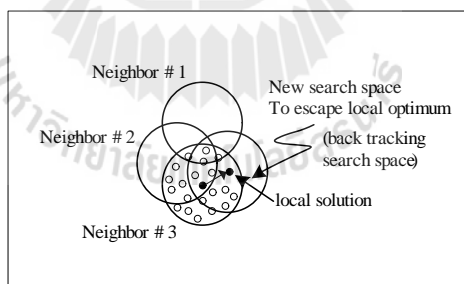


รูปที่ 6.11 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่

รูปที่ 6.12 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $count \geq count_{max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหาโดยที่ค่า S_0 คือ ค่าตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนคำตอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้จากการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น แสดงได้ดังรูปที่ 6.13 ซึ่งค่า local solution ในรายการตามเป็นค่าเริ่มต้นการค้นหา



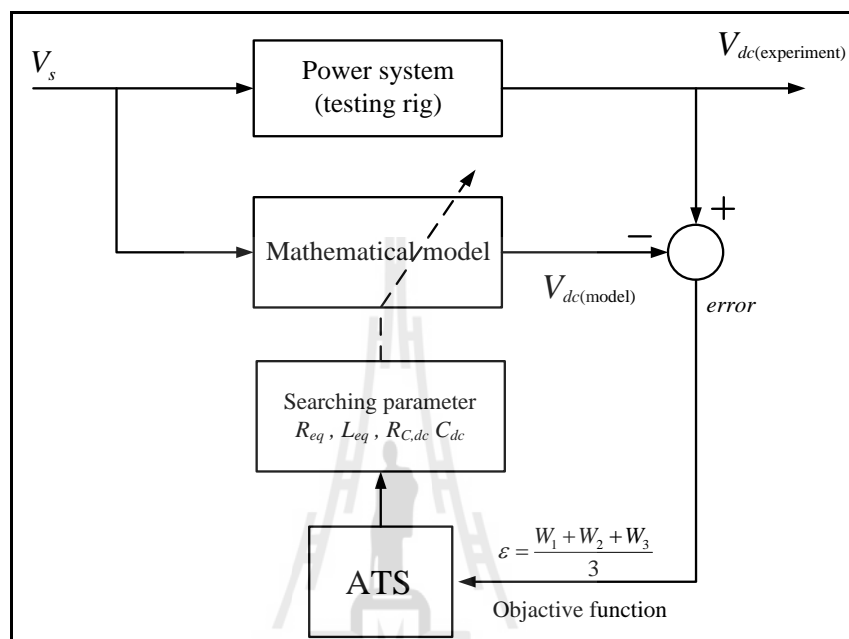
รูปที่ 6.13 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-2)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (6-2)$$

โดยที่ $DF > 1$ คือ ตัวประกอบปรับลดรัศมี (Decreasing Factor)

สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จะได้แสดงโครงสร้าง บล็อกไดอะแกรมในการค้นหาแสดงได้ดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

สำหรับบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 6.14 แสดงวิธีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวซึ่งทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ R_{eq} , L_{eq} , $R_{C,dc}$ และ C_{dc} ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดง ได้ดังสมการที่ (6-1) สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_s) ทันทีทันใดจาก $80 \text{ V}_{\text{rms}}$ เป็น $84 \text{ V}_{\text{rms}}$ และนำผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตคิซิกซ์ของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ($V_{dc(model)}$) และผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตคิซิกซ์ของชุดทดสอบ จริง ($V_{dc(experiment)}$) มาทำการเปรียบเทียบกัน ผ่านค่าความคลาดเคลื่อน (*error*) ค่าดังกล่าวนำมาใช้ สำหรับการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ ดังนั้นสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS จะอาศัยค่า W เป็นตัวบ่งบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตคิซิกซ์ของชุด ทดสอบจริงและผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตคิซิกซ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบจุด ต่อจุด ซึ่งจะสามารถแสดงสมการการหาค่าความผิดพลาดได้ดังสมการที่ (6-3)

$$W_x = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \quad (6-3)$$

โดยที่ $error$ คำนวณได้จาก $|V_{dc(experiment)} - V_{dc(computation)}|$ และ n คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

จากสมการที่ (6-3) กำหนดค่า x มีค่าเท่ากับ 1 2 และ 3 จากบล็อกไดอะแกรมของระบบค่า W_1 , W_2 และ W_3 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดที่ 1 ถึงชุดที่ 3 สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าวัตถุประสงค์ (*Objective function*) ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะนำค่า W_1 , W_2 และ W_3 สำหรับหาค่าเฉลี่ยแสดงได้ดังสมการที่ (6-4)

$$\varepsilon = \sum_{x=1}^{\beta} \frac{W_x}{\beta} \quad (6-4)$$

เมื่อ β คือ จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาทั้งหมด 3 ชุด

จากสมการที่ (6-4) จะได้ค่า ε เฉลี่ยออกมา จากนั้นค่า ε จะถูกนำไปใช้ในการปรับจูนด้วยอัลกอริทึม ATS และให้อัลกอริทึม ATS ทำการค้นหาพารามิเตอร์จนกระทั่งได้ค่า ε ที่น้อยที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลของการค้นหาพารามิเตอร์จะเข้าใกล้ค่าที่แท้จริงมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญสำหรับการค้นหาด้วยวิธีค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวคือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมของอัลกอริทึม ATS และการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการค้นหา เพื่อให้การค้นหาประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมของอัลกอริทึม ATS

สำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมของอัลกอริทึม ATS จะพิจารณาจากค่า ε ที่น้อยที่สุด โดยพารามิเตอร์เริ่มต้นของอัลกอริทึม ATS มีทั้งหมด 5 ตัวคือ จำนวนค่าคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีของคำตอบ ตัวปรับคุณลรัศมี และจำนวนรอบของการค้นหา โดยสามารถดำเนินการได้ดังนี้

การหาจำนวนค่าคำตอบเริ่มต้นที่เหมาะสม

กำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 5 รอบ , จำนวนคำตอบรอบข้าง มีค่าเท่ากับ 5 ตัว, รัศมีของคำตอบมีค่าเท่ากับ 5 และตัวปรับคุณลดรัศมี = 1

จำนวนคำตอบ เริ่มต้น	ค่า ε ครั้งที่					ค่า ε เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
10	1.1659	1.1657	1.1657	1.1658	1.1656	1.16574
20	1.1657	1.1657	1.1658	1.1659	1.1657	1.16576
30	1.1657	1.1656	1.1656	1.1655	1.1656	1.16378
40	1.1656	1.1656	1.1657	1.1657	1.1657	1.16566

การหาจำนวนคำตอบรอบข้างที่เหมาะสม

กำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 5 รอบ , จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 ตัว , รัศมีของคำตอบมีค่าเท่ากับ 5 และตัวปรับคุณลดรัศมี = 1

คำตอบ รอบข้าง	ค่า ε ครั้งที่					ค่า ε เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
10	1.1657	1.1655	1.1656	1.1656	1.1657	1.16562
20	1.1655	1.1656	1.1655	1.1655	1.1656	1.16554
30	1.1656	1.1656	1.1656	1.1656	1.1656	1.1656

การหารัศมีของคำตอบที่เหมาะสม

กำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 5 รอบ , จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 ตัว, จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 20 ตัวและตัวปรับคุณลดรัศมี = 1

รัศมี	ค่า ε ครั้งที่					ค่า ε เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
10	1.1657	1.1657	1.1657	1.1655	1.1656	1.16564
20	1.1656	1.1658	1.1657	1.1656	1.1655	1.16564
30	1.1655	1.1656	1.1656	1.1655	1.1655	1.16554
40	1.1657	1.1656	1.1657	1.1656	1.1657	1.16566

การหาตัวปรับคุณลคร์ศมีที่เหมาะสม

กำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 5 รอบ , จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 ตัว, จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 20 ตัวและรัศมีมีค่าเท่ากับ 30

ตัวปรับ คุณลคร์ศมี	ค่า ε ครั้งที่					ค่า ε เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
1.2	1.1656	1.1656	1.1656	1.1656	1.1655	1.16558
1.4	1.1655	1.1656	1.1655	1.1655	1.1655	1.16552
1.6	1.1656	1.1656	1.1657	1.1565	1.1655	1.1656

จากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้งานการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จะกำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 ตัว , จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 20 ตัว , รัศมีมีค่าเท่ากับ 30 และตัวปรับคุณลคร์ศมีเท่ากับ 1.4 ในลำดับถัดไปจะเป็นการกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่จะทำการค้นหา

ขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหา

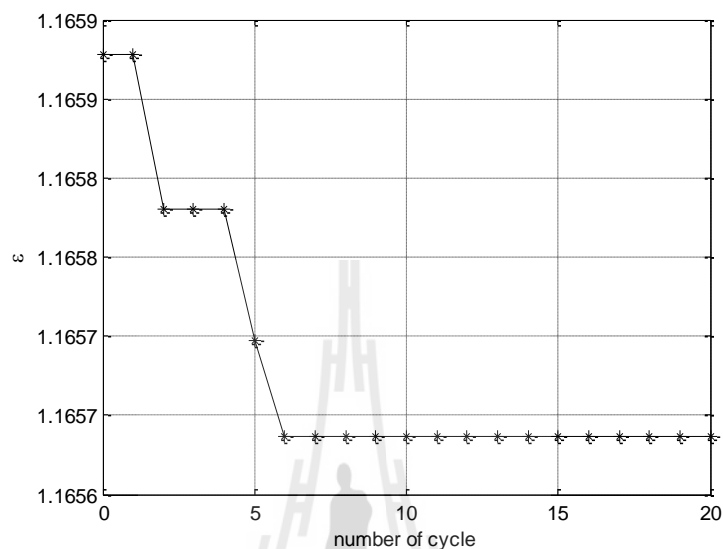
การกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์นั้นจะอาศัยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ให้มีขอบเขตครอบคลุมค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 6.3 เมื่อคำตอบที่ทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับขอบเขตล่างหรือขอบเขตบน จะทำการขยายขอบเขตเพิ่มขึ้นอีก สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแล้วพบว่าค่าขอบเขตที่เหมาะสมของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

พารามิเตอร์ของระบบ	ขอบล่าง	ขอบบน
R_{eq}	$5 \times 10^{-5} \text{ m}\Omega$	$15 \times 10^{-5} \text{ m}\Omega$
L_{eq}	$4 \times 10^{-7} \text{ mH}$	$6 \times 10^{-7} \text{ mH}$
$R_{C,dc}$	0.1 Ω	0.6 Ω
C_{dc}	210 μF	230 μF

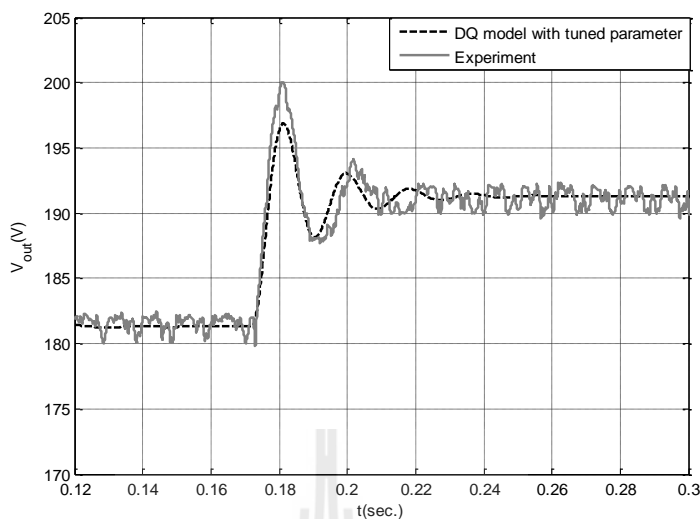
จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของอัลกอริทึม ATS และขอบเขตของการหาคำตอบ เมื่อนำค่าต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นมาใช้สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง จะได้

การลู่เข้าของคำตอบที่ถูกต้องซึ่งสังเกตได้จากกราฟค่า ε ที่มีค่าน้อยลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวดังแสดงในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 ผลของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 6.15 แสดงค่าความผิดพลาดที่น้อยลงไปเรื่อยๆ ซึ่งหมายถึงการลู่เข้าหาคำตอบที่ถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการค้นหาด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาครั้งนี้ $R_{eq} = 9.6465 \times 10^{-5} \Omega$ $L_{eq} = 5.0531 \times 10^{-7} \text{ H}$, $R_{C,dc} = 0.4937 \Omega$, $C_{dc} = 2.2046 \times 10^{-6} \text{ F}$ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้ถือได้ว่าเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ของชุดทดสอบจริงมากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจะได้นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทำการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_s) ทันทีทันใดจาก $80 \text{ V}_{\text{rms}}$ เป็น $84 \text{ V}_{\text{rms}}$ ที่เวลา 0.172 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 6.16

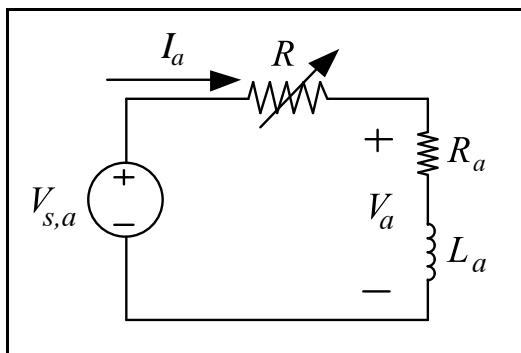


รูปที่ 6.16 ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี

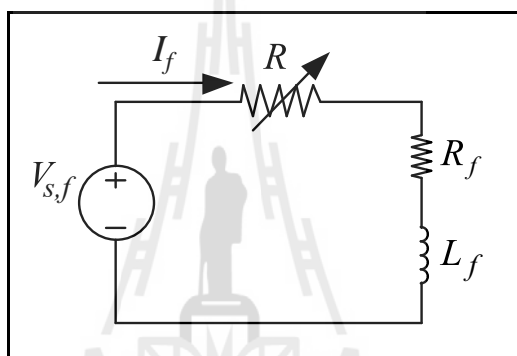
จากรูปที่ 6.16 สังเกตผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบจริง พบว่าผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีที่ได้มีความใกล้เคียงกันทั้งสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ซึ่งถือได้ว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นมีความถูกต้อง

6.5 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องมือวัด

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดสำหรับค่าพารามิเตอร์วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถดูอุปกรณ์ที่ใช้ได้จากหัวข้อที่ 6.3 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถหาค่าได้จากเครื่องมือวัดได้แก่ ความต้านทานฝั่งอาร์เมเจอร์ ค่าความเหนี่ยวนำฝั่งอาร์เมเจอร์ ความต้านทานฝั่งสนาม และค่าความเหนี่ยวนำฝั่งสนาม ซึ่งการหาค่าด้วยเครื่องมือวัดถือเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดสอบและให้ผลที่ถูกต้อง ลักษณะการต่อวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ฝั่ง คือ ฝั่งอาร์เมเจอร์และฝั่งสนาม แสดงรูปวงจรที่ใช้สำหรับทดสอบฝั่งอาร์เมเจอร์แสดงได้ดังรูปที่ 6.17 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ($V_{s,d}$) ตัวต้านทานปรับค่าได้ (R) ค่าความเหนี่ยวนำทางฝั่งอาร์เมเจอร์ (L_a) และความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_a) ในทำนองเดียวกันสำหรับทางฝั่งสนามแสดงรูปวงจรที่ใช้สำหรับทดสอบได้ดังรูปที่ 6.18 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ($V_{s,d}$) ตัวต้านทานปรับค่าได้ (R) ค่าความเหนี่ยวนำทางฝั่งสนาม (L_p) และความต้านทานสนาม (R_p)



รูปที่ 6.17 วงจรทดสอบค่าพารามิเตอร์ทางฝั่งอาร์เมเจอร์



รูปที่ 6.18 วงจรทดสอบค่าพารามิเตอร์ทางฝั่งสนาม

จากรูปที่ 6.17 และ 6.18 เป็นวงจรที่ใช้สำหรับทดสอบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงด้วยวิธีวัดจากเครื่องมือวัด ซึ่งในการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานปรับค่าได้เพื่อให้กระแสมีการเปลี่ยนแปลงแล้วบันทึกค่า สามารถแสดงผลการทดสอบจากเครื่องมือวัด ดังแสดงได้ดังตารางที่ 6.5 ถึง 6.8

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงวงจรอาร์เมเจอร์

ครั้งที่	V_s	V_a	I_a	R_a	R_a เฉลี่ย
1	58.4	0.418	0.15	2.7867	2.7828
2	80.5	0.577	0.208	2.774	
3	100.6	0.722	0.259	2.7876	

ตารางที่ 6.6 การวัดค่า L_a โดยใช้ LCR มิเตอร์

ค่าที่วัดได้จาก LCR meter (mH)			เฉลี่ย(mH)
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
216.41	214.08	216.01	215.5

ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงวงจรมอด

ครั้งที่	V_s	V_f	I_f	R_f	R_f เฉลี่ย
1	49.7	30.14	0.051	590.98	591.7139
2	74.3	45.1	0.076	593.421	
3	105.2	63.8	0.108	590.7407	

ตารางที่ 6.8 การวัดค่า L_f โดยใช้ LCR มิเตอร์

ค่าที่วัดได้จาก LCR meter (H)			เฉลี่ย(H)
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
137.16	136.5	135.5	136.4

จากตารางที่ 6.5 ถึง 6.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ 4 ตัว ได้แก่ R_a , L_a , R_f และ L_f สำหรับค่าพารามิเตอร์ในส่วนที่เหลือ ซึ่งในที่นี้คือ K , B และ J เป็นพารามิเตอร์ที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการทดสอบด้วยเครื่องมือวัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อนำมาใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

6.6 การค้นหาค่าพารามิเตอร์วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการทาง

ปัญญาประดิษฐ์

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์บางตัวไม่สามารถวัดด้วยเครื่องมือวัดได้ ซึ่งส่วนสำคัญของการค้นหาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ดังกล่าวไว้แล้วนั้น คือ การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการค้นหาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ สำหรับรายละเอียดและวิธีการค้นหาได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.4.3 และใน

ส่วนของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีส่วนที่เพิ่มเติมจากหัวข้อที่ 6.4 นั่นคือ การพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาเป็นแบบหลายฟังก์ชัน เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหามีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ค้นหาได้จะต้องให้ผลการตอบสนองทั้งความเร็วรอบของมอเตอร์และกระแสอาร์เมเจอร์ที่ถูกต้อง ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

6.6.1 การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก รูปวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 จะพิจารณาวงจรโดยใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าและสมการทางกลของมอเตอร์ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับรูปที่ 6.3 ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายทางฝั่งอาร์เมเจอร์ V_a แหล่งจ่ายทางฝั่งสนาม V_f พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สามารถวัดค่าได้คือ R_a , L_a , R_f และ L_f ในส่วนสุดท้ายจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดค่าได้คือ K , B และ J แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะกำหนดตัวแปรสถานะอินพุตและเอาต์พุตดังนี้

$$\text{ตัวแปรสถานะ : } \mathbf{x} = [I_a \quad I_f \quad \omega_m]^T$$

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

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

เมื่อวิเคราะห์วงจรด้วยกฎพื้นฐานทางไฟฟ้าจะได้สมการอนุพันธ์ซึ่งสามารถทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงได้สมการที่ (6-5)

$$\begin{cases} \dot{I}_a = -\frac{R_a}{L_a} I_a + \frac{K_v I_f}{L_a} \omega_m + \frac{V_a}{L_a} \\ \dot{I}_f = -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{V_f}{L_f} \\ \dot{\omega}_m = \frac{K_t I_f}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} \end{cases} \quad (6-5)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ (6-5) สามารถแสดงรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของเมทริกซ์ $A(x,u)$, $B(x,u)$, $C(x,u)$ และ $D(x,u)$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & \frac{K_v I_f}{L_a} \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ \frac{K_t I_f}{J} & 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [1 \quad 0 \quad 1]_{1 \times 3}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [0 \quad 0 \quad 0]_{1 \times 3}$$

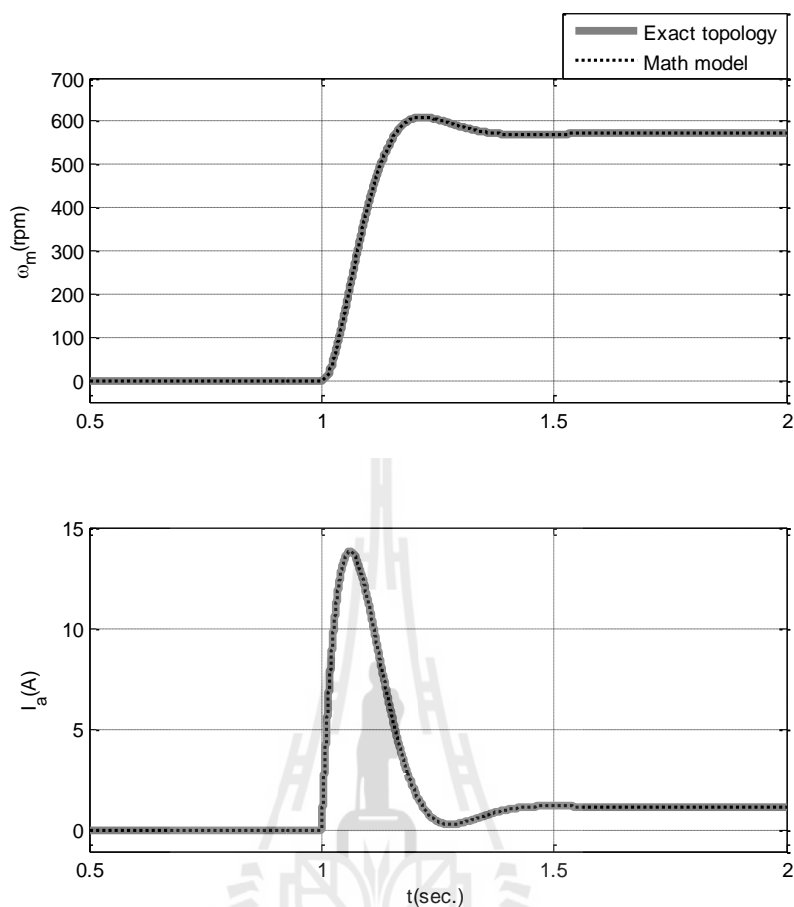
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นด้วยการจำลองสถานการณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6-5) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งแสดงในรูปที่ 6.3 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถดำเนินการได้โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ซึ่งจะใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB ซึ่งพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงได้ดังตารางที่ 6.9 สามารถดูรายละเอียดบล็อกการจำลองสถานการณ์ได้จากภาคผนวก ก

ตารางที่ 6.9 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 6.3

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_a	0 – 60 V	แหล่งจ่ายแรงดันอาร์เมเจอร์
V_f	200 V	แหล่งจ่ายแรงดันสนาม
T_L	0 N.m	โหลดทางกลของมอเตอร์
R_a	2.7828 Ω	ความต้านทานอาร์เมเจอร์
L_a	0.2155 H	ความเหนี่ยวนำทางฟลักซ์อาร์เมเจอร์
R_f	591.7139 Ω	ความต้านทานสนาม
L_f	136.4 H	ความเหนี่ยวนำทางฟลักซ์สนาม
$K = K_t = K_v$	0.9483	ค่าคงที่ของมอเตอร์
B	0.002953	สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์
J	0.02215 kg.m ²	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 6.9 จะนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการช่วงการสตาร์ทมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์ในช่วงสตาร์ทมีค่าสูงมาก ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในที่นี้จึงดำเนินการให้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากชุดทดสอบ ซึ่งจะดำเนินการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าทางฟลักซ์อาร์เมเจอร์จาก 0 V เป็น 60 V ผลจากการตรวจสอบความถูกต้องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.19

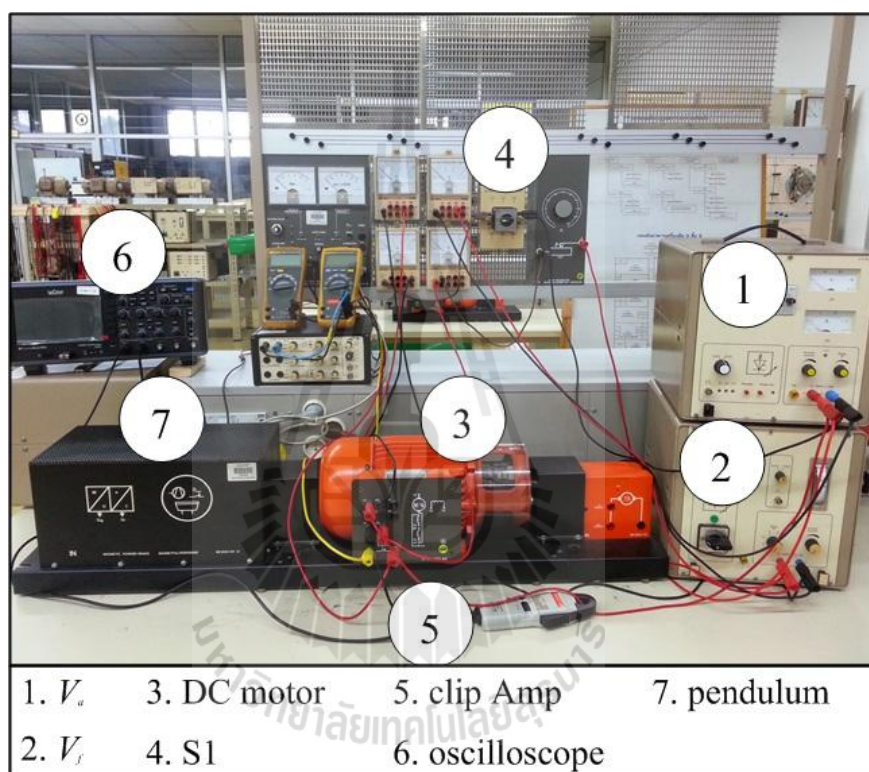


รูปที่ 6.19 ผลการตรวจสอบความถูกต้อง

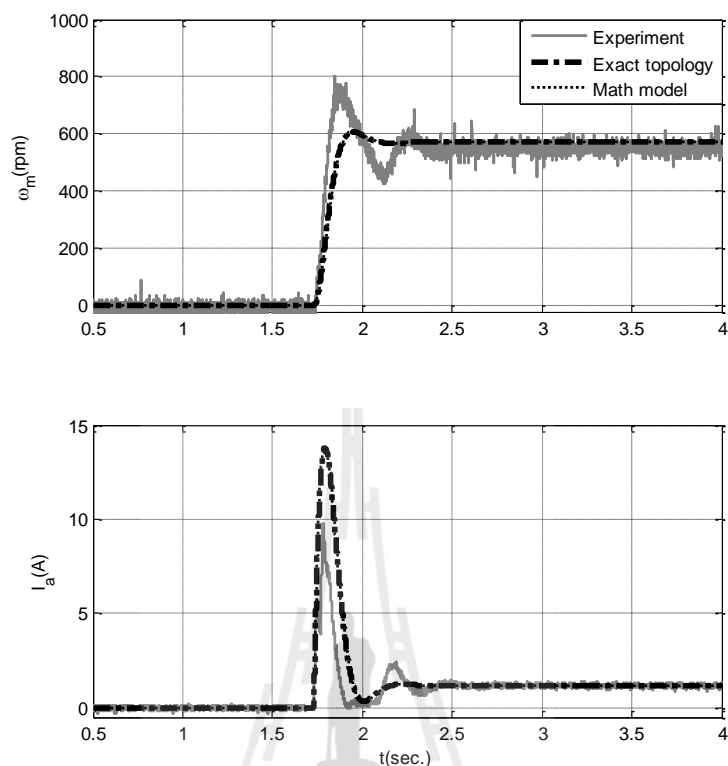
จากรูปที่ 6.19 แสดงผลการตอบสนองความเร็วรอบและผลการตอบสนองกระแสอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของระบบในรูปที่ 6.3 ซึ่งจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6-5) เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอาร์มเจอร์มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0V เป็น 60V ที่เวลา 1 วินาที การเปลี่ยนแปลงค่าจากแหล่งจ่ายแรงดันอาร์มเจอร์ในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อระบุเอกลักษณ์ของชุดทดสอบจริง ซึ่งวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์แสดงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.4.3

6.6.2 การทดสอบวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดทดสอบจริง

การทดสอบวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้ทราบถึงผลการตอบสนองในช่วงสภาวะชั่วคราวดำเนินการโดยปิดวงจรด้วยสวิตช์ S1 ในรูปที่ 6.3 แบบทันทีทันใดซึ่งกำหนดให้ V_d มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0V เป็น 60V รูปอุปกรณ์ชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.20 และผลการตอบสนองแสดงดังรูปที่ 6.21 โดยจะเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ซึ่งใช้พารามิเตอร์ที่ยังไม่ได้ทำการค้นหาแสดงไว้ดังตารางที่ 6.9



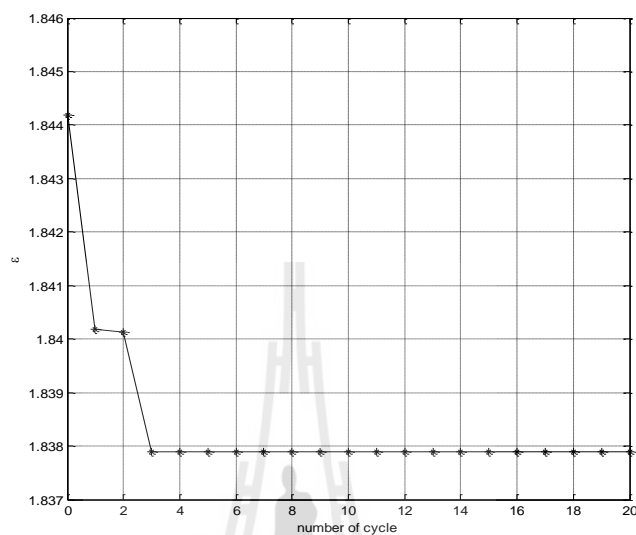
รูปที่ 6.20 ชุดทดสอบวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



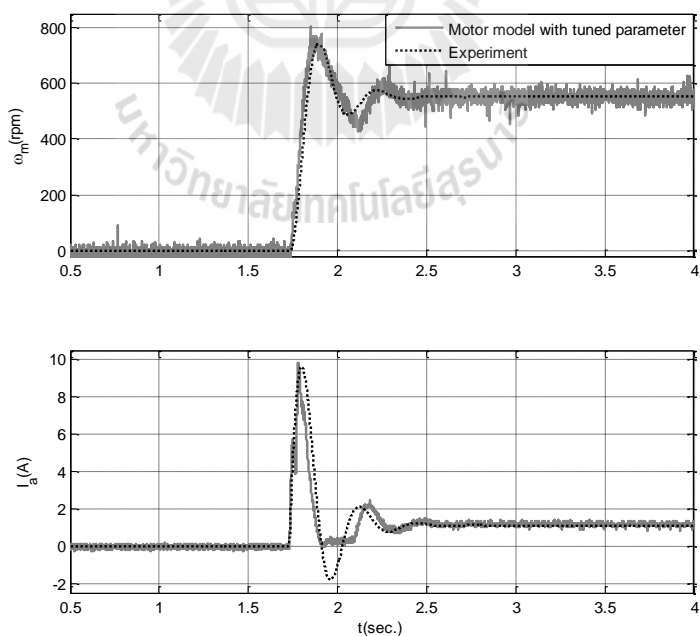
รูปที่ 6.21 ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 6.21 แสดงให้เห็นผลการตอบสนองแรงดันเอาต์พุตของการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ยังไม่ถูกต้องกับผลตอบสนองทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวเมื่อเทียบกับชุดทดสอบ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ยังมีค่าไม่ถูกต้อง ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความผิดพลาดได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับเริ่มต้นโปรแกรมการค้นหาคำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 40 ตัว , จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 30 ตัว , รัศมีมีค่าเท่ากับ 30 และตัวปรับคุณลดรัศมีมีค่าเท่ากับ 1.6 ซึ่งรายละเอียดการกำหนดค่าเริ่มต้นจะดำเนินการตามแนวทางที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.4.3 ผลการค้นหาคำสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ $K = 4.1$, $B = 0.0027$ และ $J = 0.0109$ ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้ผลตอบสนองจากชุดทดสอบและ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด การคู่เข้าของค่าตอบสนองได้ดังรูปที่ 6.22 และผลการจำลองสถานการณ์เทียบกับผลการตอบสนองจากชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.22 ผลของค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง



รูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหา

จากรูปที่ 6.23 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว มีผลการตอบสนองที่คล้อยตามและใกล้เคียงกับผลการทดสอบมาก ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

6.7 สรุป

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 6 นี้เป็นการนำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ เพื่อให้การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงในบทที่ 7 มีความถูกต้องแม่นยำ งานวิทยานิพนธ์นี้จะได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ไว้ 2 วิธี คือ วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัด และการค้นหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว อีกทั้งยังได้นำเสนอการค้นหาในแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวและหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สำหรับในส่วนแรกจะค้นหาพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำและตัวเหนี่ยวนำของวงจร เนื่องจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดเป็นการหาค่าที่เหมาะสมและไม่ซับซ้อน ค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดจึงเป็นค่าที่ถูกต้อง สำหรับในส่วนที่สองจะเป็นการพิจารณาส่วนของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง ค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดได้ยากและมีความซับซ้อนมาก สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อทำการค้นหาพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า วิธีการนี้อาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกมาใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ โดยเนื้อหาในบทนี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งอัลกอริทึมจะทำงานให้มีประสิทธิภาพต้องมียอดประกอบที่สำคัญในตัวอัลกอริทึมการค้นหา ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการกำหนดค่าต่างๆ ได้แก่ขอบเขตการค้นหา ค่าปรับลดครีสมิ ค่ารีสมิ ค่าคำตอบเริ่มต้น ค่าคำตอบรอบข้าง เป็นต้น ซึ่งจากผลการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบ พบว่าผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีของวงจรเรียงกระแส ผลการตอบสนองความเร็วรอบและกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองจากชุดทดสอบ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่มีความสอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจึงเป็นค่าพารามิเตอร์

ที่มีความถูกต้อง สามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการค้นหาในบทนี้ไปวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 7 เป็นลำดับถัดไป



บทที่ 7

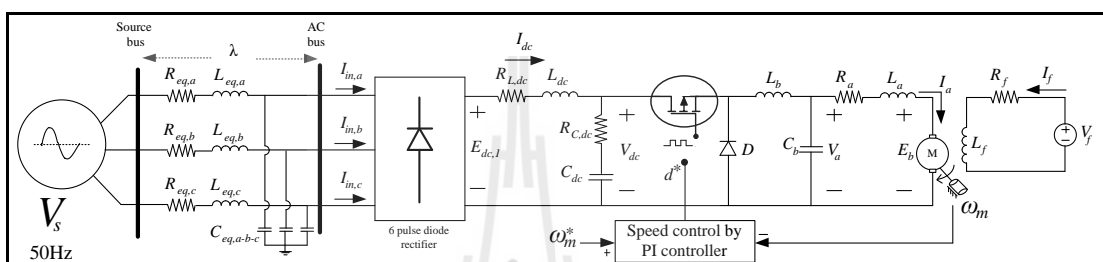
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซียเป็นดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

7.1 บทนำ

การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในโรงงานอุตสาหกรรมปัจจุบันพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถรับโหลดทางกลได้สูงในช่วงเริ่มต้นการใช้งาน (start motor) สำหรับการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะมีตัวควบคุมความเร็วรอบเพื่อให้ใช้งานได้ในระดับความเร็วรอบที่ผู้ใช้งานต้องการ เมื่อมอเตอร์มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ จะทำให้มีลักษณะเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จากงานวิจัยในอดีตพบว่า โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ใช้งานรวมถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้างกล่าว ในบทนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าว เนื้อหาในบทนี้ยังได้กล่าวถึงแนวโน้มผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองไฟฟ้าดีซี ตัวเก็บประจุของวงจรรองกำลังไฟฟ้าดีซี และแบนด์วิดท์สำหรับการออกแบบตัวควบคุม อีกทั้งยังมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB แต่อาจยังไม่เพียงพอสำหรับความน่าเชื่อถือ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงซึ่งจะต้องให้ผลการขาดเสถียรภาพที่มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎี

7.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีสี่ที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ระบบดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 มีส่วนประกอบคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส วงจรสมมูลสายส่ง วงจรเรียงกระแสสลับแบบบริดจ์ วงจรกรองกำลังไฟฟ้าทางฝั่งดิซีสี่ วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุมใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 7.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

จากรูปที่ 7.1 เป็นระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังไฟฟ้าดิซีสี่ หากเพิ่มกำลังไฟฟ้าทางฝั่งโหลดมากเกินไปจะทำให้ระบบดังกล่าวขาดเสถียรภาพได้ หากเกิดการขาดเสถียรภาพจะทำให้แรงดันไฟฟ้าทางฝั่งดิซีสี่มีการกระเพื่อมที่มากขึ้น จากกรณีดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และความไม่ปลอดภัยของผู้ใช้งานอุปกรณ์นั้น ๆ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานที่จุดเกิดการขาดเสถียรภาพจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อศึกษาแนวโน้มขีดความสามารถในการรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของระบบกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีสี่ที่มีวงจรกรอง

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงในการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยวิธีการแปลงดิคิร่วร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และบทที่ 4 และค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 6 สำหรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าสมมติที่ใช้ในบทที่ 4 จึงทำให้ค่า K และ τ ในฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์

มีการเปลี่ยนแปลง การพิจารณาค่า K และ τ จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 7.2.1 ค่าที่ได้จะนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับชุดทดสอบจริง

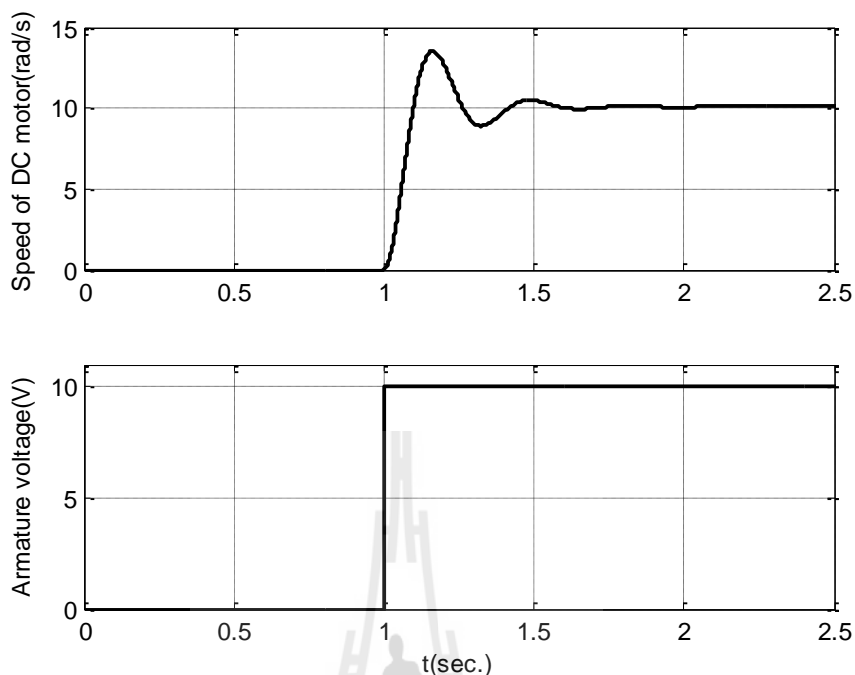
7.2.1 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงได้นำเสนอวิธีการไว้แล้วในบทที่ 4 ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม คือ ค่า K และ τ ของฟังก์ชันถ่ายโอนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับการหาค่า K และ τ จะใช้วิธีเดียวกันกับวิธีที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จากบทที่ 6 แสดงดังตารางที่ 7.1

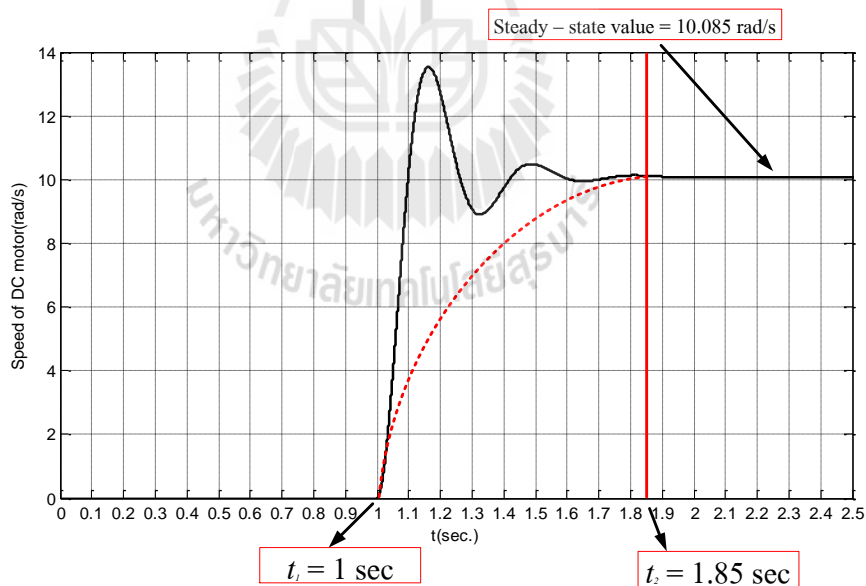
ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการจำลองผลการตอบสนองฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
R_a	2.7828 Ω	ความต้านทานวงจรมอเตอร์
L_a	0.11203 H	ความเหนี่ยวนำวงจรมอเตอร์
R_f	591.7139 Ω	ความต้านทานวงจรสนาม
L_f	156 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

ผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1 แสดงได้ดังรูปที่ 7.2 โดยการหาผลตอบสนองจะกำหนดให้มีอินพุตขั้นบันไดทางฝั่งอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าจาก 0 V เป็น 10 V ที่เวลา 1 วินาที และรูปที่ 7.3 เป็นการนำรูปที่ 7.2 (รูปบน) มาวัดค่า K และ τ เพื่อนำไปใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม การพิจารณาค่า K และ τ จะใช้วิธีเดียวกันกับบทที่ 4 ซึ่งจะได้ค่า $K = 1.0085$ และค่า $\tau = 0.85$ สังเกตได้ว่าค่า K และ τ มีค่าไม่เท่าเดิมซึ่งจะเป็นสาเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอเปลี่ยนไปเช่นกัน



รูปที่ 7.2 ผลการตอบสนองของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1



รูปที่ 7.3 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1

จากรูปที่ 7.3 พบว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะส่งผลให้ผลการตอบสนองมีการแกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 0.85 วินาที และมีค่าอัตราขยายอยู่ที่ 1.0085 เท่าเทียบจากอินพุต ซึ่งจะส่งผลให้ผลการตอบสนองมีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในบทที่ 4 ดังนั้น

เพื่อให้ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมมอเตอร์ที่ใช้งานจริง จึงต้องมีการออกแบบตัวควบคุมใหม่ โดยใช้ค่า K และ τ จากการทดสอบข้างต้น สำหรับการออกแบบค่า K_p และ K_i จะดำเนินการเช่นเดียวกันในบทที่ 4 โดยจะได้ค่า K_p และ K_i เมื่อ ω_n มีค่าเปลี่ยนแปลงและ $\zeta = 0.9$ ดังแสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 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 7.2 เป็นค่าที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบซึ่งได้ทดสอบไว้ในบทที่ 6 เมื่อความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบเพิ่มขึ้นสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกย่านความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 16 – 24 rad/s ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในย่านที่สามารถทดสอบได้จริง สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อที่ 7.3

7.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในการคาดการณ์จุดขาดเสถียรผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเมื่อเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้กับระบบไฟฟ้าจะทำให้ค่าเจาะจงของระบบเลื่อนจากทางฝั่งซ้ายไปทางฝั่งขวาของระนาบเอส ทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะใช้เมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) มาใช้ในการคำนวณหาค่าเจาะจงตามสมการที่ (7-1) ซึ่งเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้พิสูจน์ไว้แล้วในบทที่ 4

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (7-1)$$

จากสมการที่ (7-1) ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ

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

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

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7.1 เมื่อความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเป็นดังตารางที่ 7.2 ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วย $\lambda_1 - \lambda_{12}$ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะ λ_9 และ λ_{10} เนื่องจากเป็นค่าเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดังกล่าวจะใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 7.3

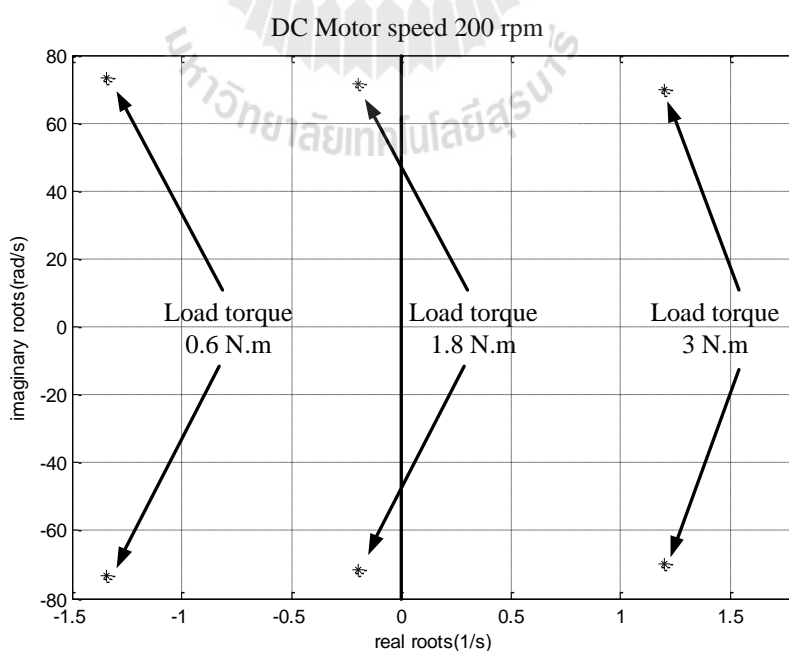
ตารางที่ 7.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

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
$L_{dc} (\Delta I_{dc} \leq 1.5 \text{ A})$	39.053 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc} (\Delta V_{dc} \leq 50 \text{ V})$	220.46 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L_b (\Delta I_L \leq 0.5 \text{ A})$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักค์
$C_b (\Delta V_o \leq 50 \text{ mV})$	180 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์
R_a	2.7828 Ω	ความต้านทานวงจรอาร์เมเจอร์
L_a	215.5 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรอาร์เมเจอร์
R_f	591.7139 Ω	ความต้านทานวงจรสนาม

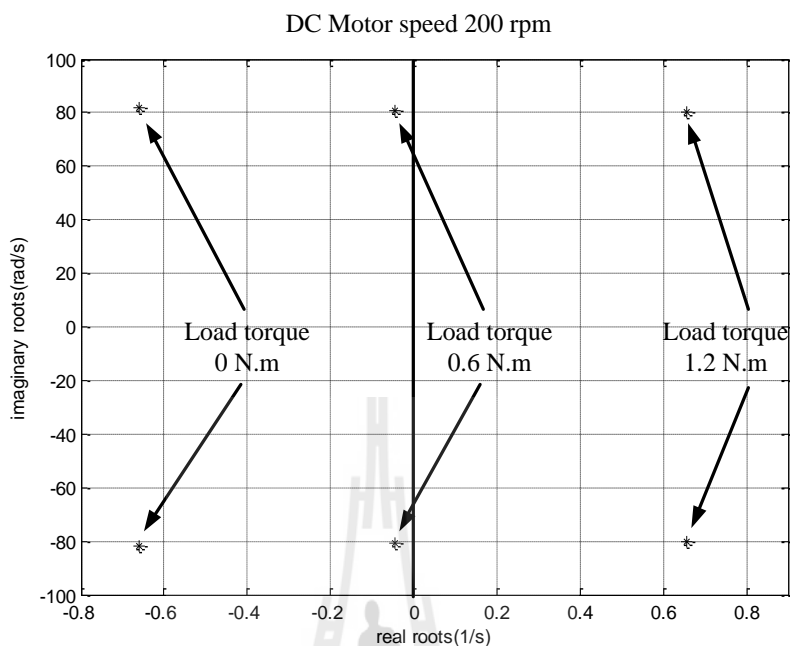
ตารางที่ 7.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสำหรับจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ (ต่อ)

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 7.1 จะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 200 rpm จากนั้นทำการเพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์ ซึ่งทำให้ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าบนระนาบเอสเลื่อนจากซ้ายไปขวา ในการหาค่าเจาะจงของระบบจะใช้ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 18 rad/s เมื่อโหลดทางกลของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 3 N.m จะทำให้ค่าเจาะจงอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส นั่นคือ ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 22 rad/s ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1.2 N.m ซึ่งค่าเจาะจงที่ได้จากการคำนวณเมทริกซ์จาโคเบียนของระบบที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 18 rad/s และ 22 rad/s แสดงได้ดังรูปที่ 7.4 และ 7.5 ตามลำดับ

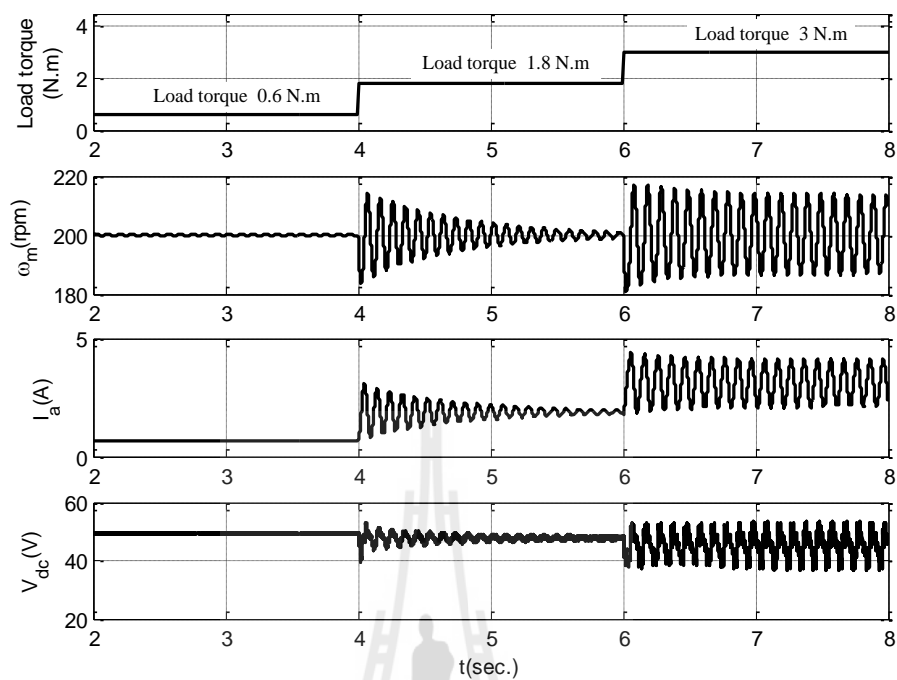


รูปที่ 7.4 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 18$ rad/s

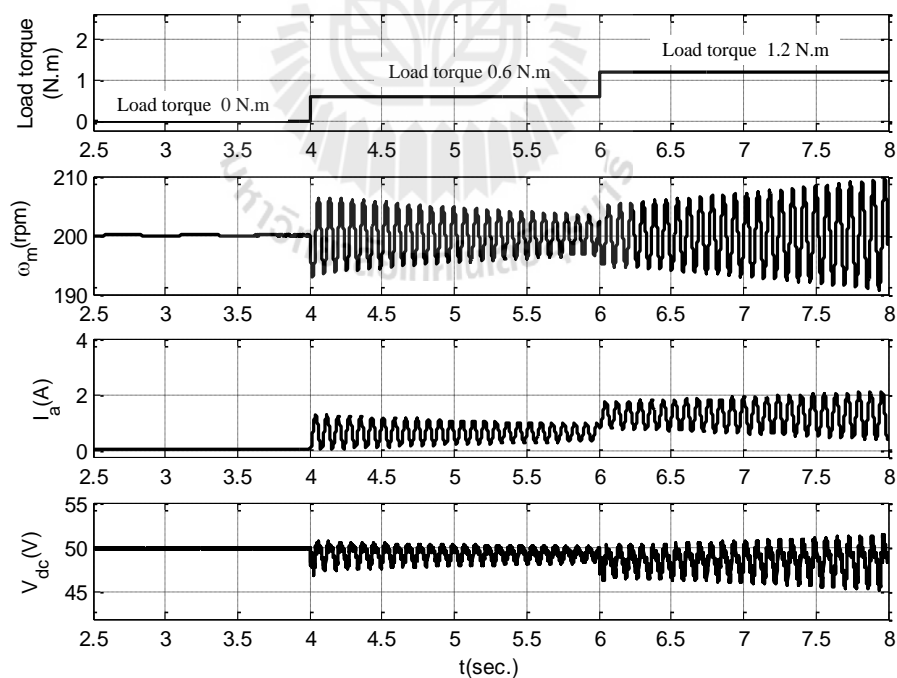


รูปที่ 7.5 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเมื่อ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$

ค่าเจาะจงที่แสดงในรูปที่ 7.4 และ 7.5 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 7.6 และ 7.7 ตามลำดับ



รูปที่ 7.6 ผลการจำลองสถานะที่ $\omega_n = 18 \text{ rad/s}$

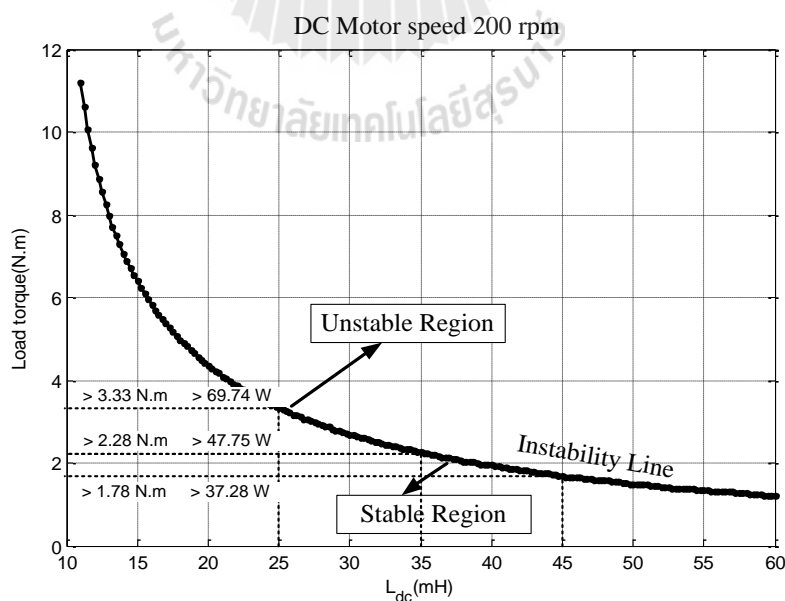


รูปที่ 7.7 ผลการจำลองสถานะที่ $\omega_n = 22 \text{ rad/s}$

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7.6 และ 7.7 แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาเสถียรภาพด้วยการคำนวณค่าเจาะจงของระบบมีความถูกต้อง และมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

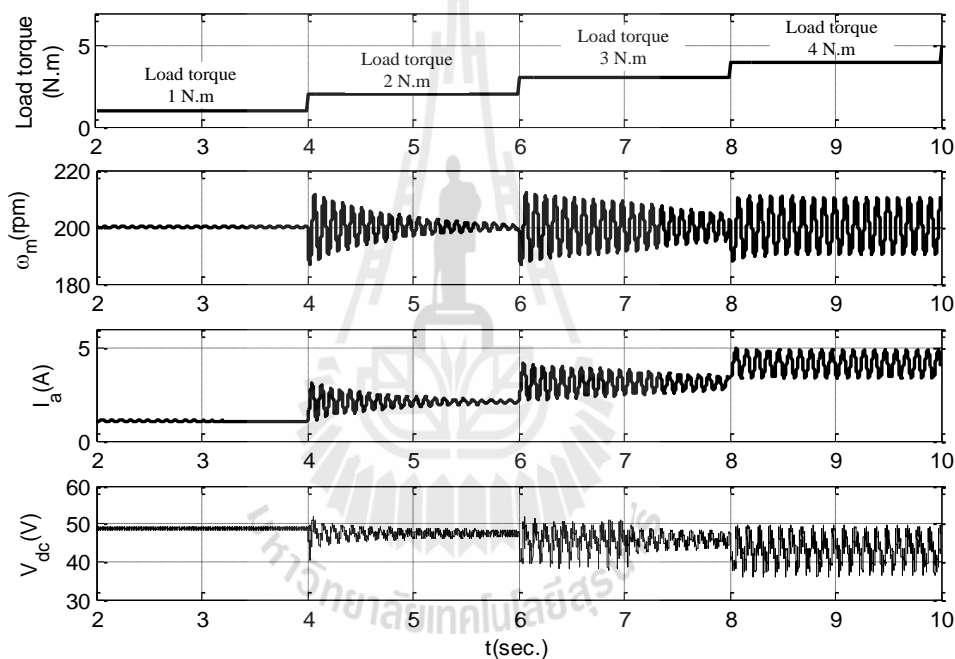
7.4 ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 7.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดขึ้นจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าได้ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับผลกระทบที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ของระบบที่สามารถออกแบบได้โดยวิศวกร ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงเป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งสามารถออกแบบได้ ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรกรองจึงเป็นที่น่าสนใจ การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์และแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมมีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และ 18 rad/s ตามลำดับ ผลกระทบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า L_{dc} จาก 11 mH ถึง 60 mH แสดงได้ดังรูปที่ 7.8 สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบไฟฟ้าได้แสดงไว้แล้วดังตารางที่ 7.3

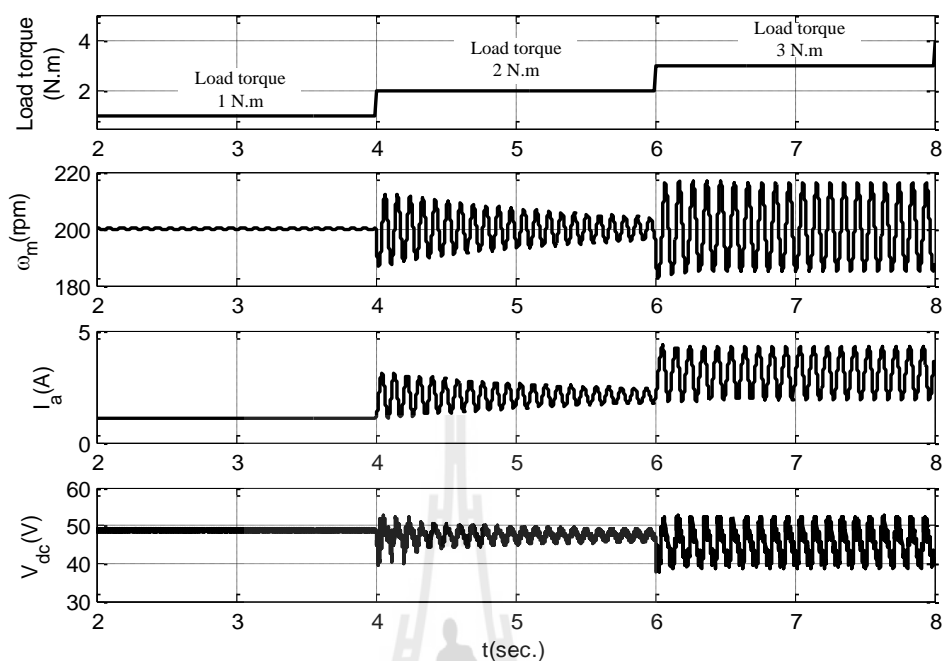


รูปที่ 7.8 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ L_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง

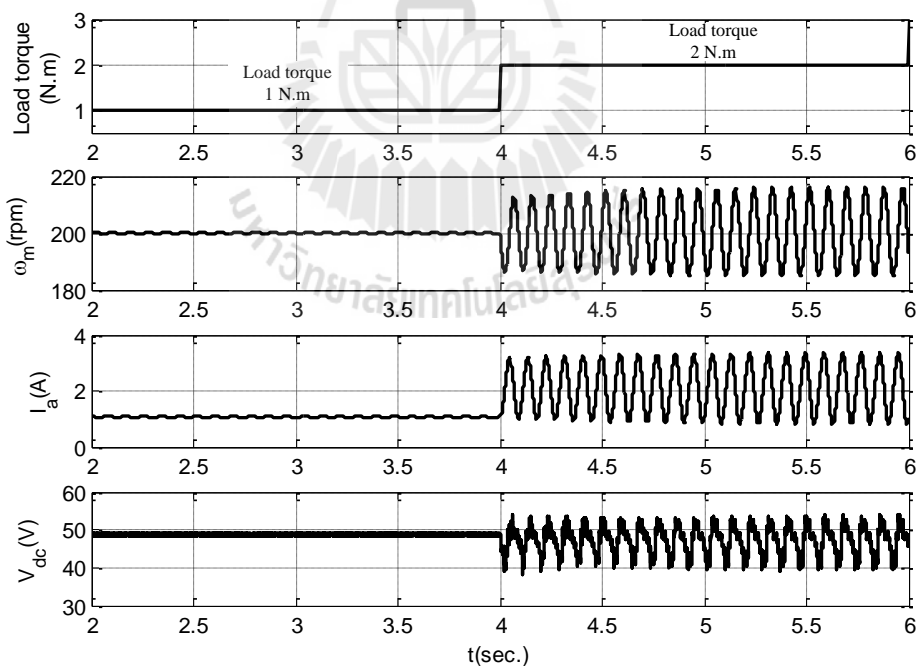
การวิเคราะห์ผลกระทบในรูปที่ 7.8 พบว่าหากทำการเพิ่มค่า L_{dc} ให้มากขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือจึงทำการคัดเลือกจุดการทำงาน 3 จุด มาใช้ในการยืนยันผลกระทบจากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า โดยกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามี่ค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และที่ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรกรอมมีค่าเท่ากับ 25 mH , 35 mH และ 45 mH ซึ่งจะทำการระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 4 N.m , 3 N.m และ 2 N.m ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7.9 ถึง 7.11



รูปที่ 7.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 25$ mH



รูปที่ 7.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 35$ mH



รูปที่ 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $L_{dc} = 45$ mH

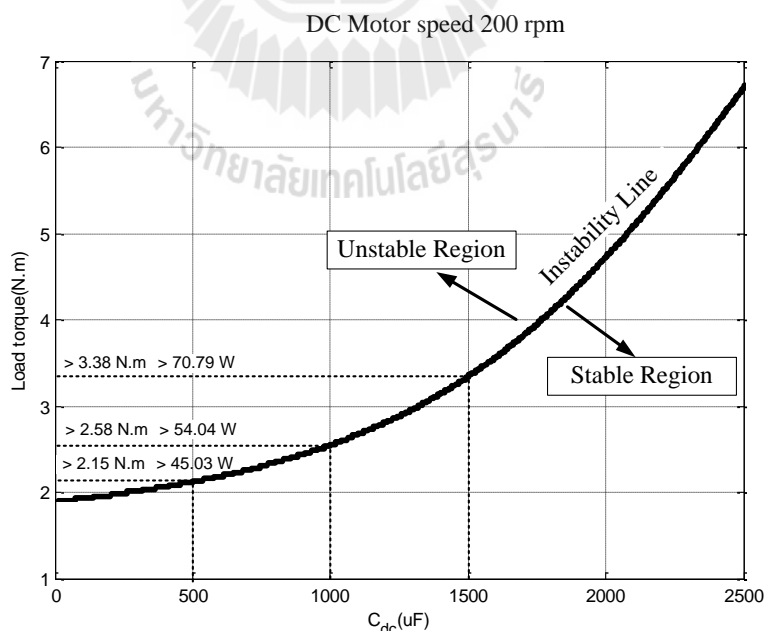
ผลการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 7.9 ถึง 7.11 สามารถยืนยันได้ชัดเจนว่าเมื่อค่า L_{dc} เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแย่ลง ซึ่งเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพจะมีการ

กระเพื่อมของสัญญาณต่าง ๆ ที่มากขึ้นอีกทั้งลักษณะของสัญญาณจะไม่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้างดังกล่าวอาจเกิดความเสียหายหรือเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบอีกตัวหนึ่งคือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง โดยผลกระทบของค่าความจุไฟฟ้าจะได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.5

7.5 ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากตัวเก็บประจุของวงจรกรองไฟฟ้า

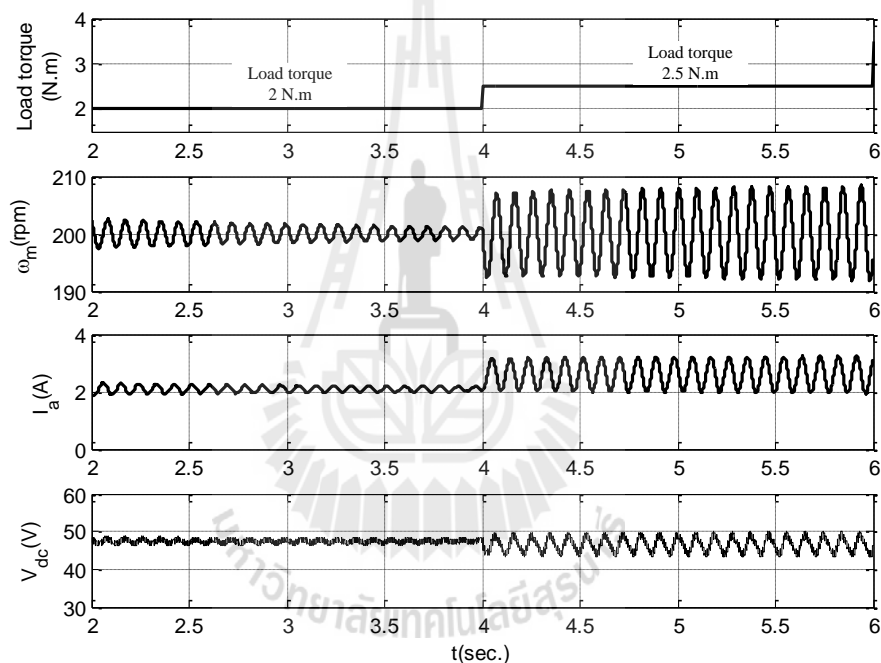
กระแสดตรง

ผลกระทบที่น่าสนใจอีกส่วนหนึ่งของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสดตรง นั่นคือ การพิจารณาผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่สามารถออกแบบได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการออกแบบในจุดการทำงานที่ขาดเสถียรภาพจึงต้องมีการศึกษาผลกระทบเมื่อค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์และแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมมีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และ 18 rad/s ตามลำดับ ผลกระทบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า C_{dc} จาก 1 μF ถึง 2500 μF แสดงดังรูปที่ 7.12 สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่นของระบบไฟฟ้าได้แสดงไว้แล้วดังตารางที่ 7.3

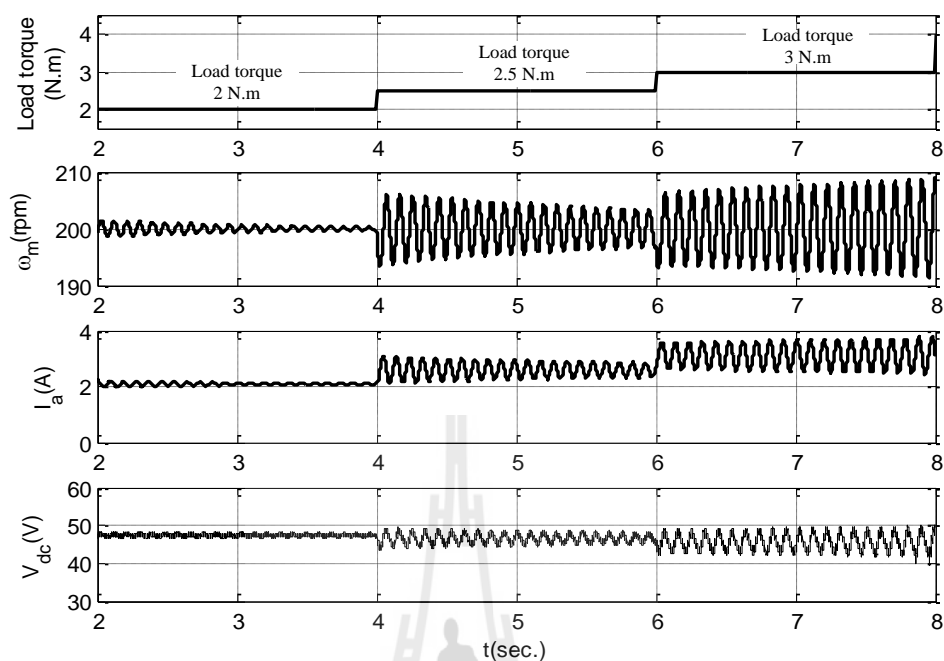


รูปที่ 7.12 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ C_{dc} มีการเปลี่ยนแปลง

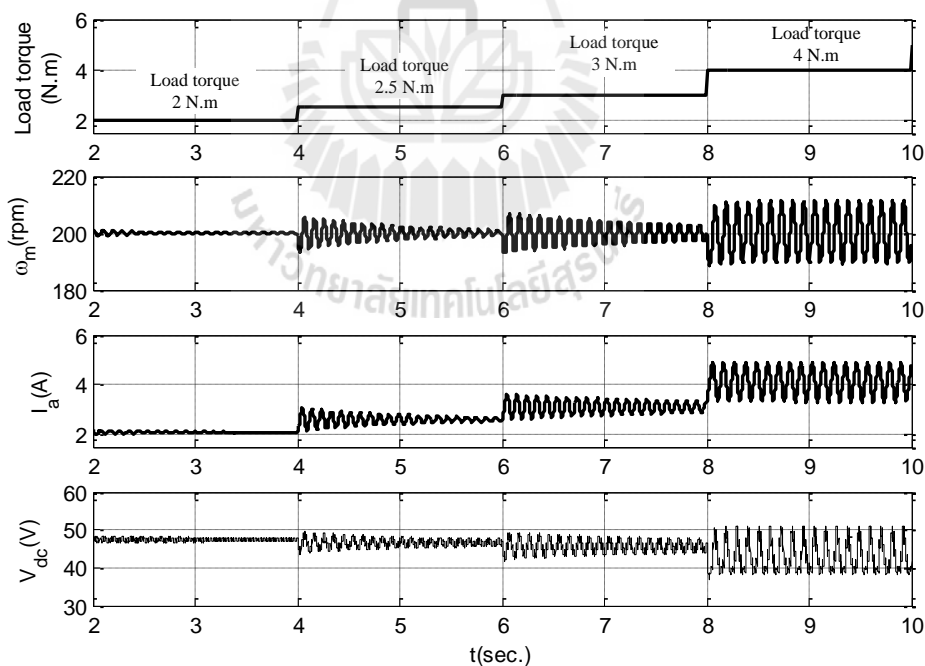
การวิเคราะห์ผลกระทบในรูปที่ 7.12 พบว่าหากทำการเพิ่มค่า C_{dc} ให้มากขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือจึงทำการคัดเลือกจุดการทำงาน 3 จุด มาใช้สำหรับการยืนยันผลกระทบจากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และที่ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับ 500 μF , 1000 μF และ 1500 μF ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2.5 N.m , 3 N.m และ 4 N.m ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7.13 ถึง 7.15



รูปที่ 7.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 500 \mu\text{F}$



รูปที่ 7.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1000 \mu\text{F}$



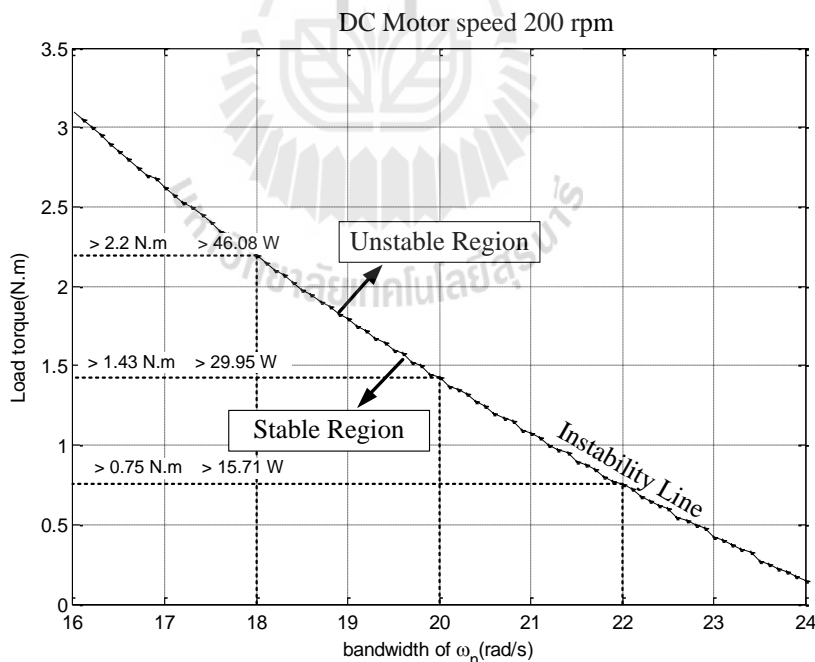
รูปที่ 7.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $C_{dc} = 1500 \mu\text{F}$

ผลการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 7.13 ถึง 7.15 สามารถยืนยันได้ชัดเจนว่าเมื่อค่า C_{dc} เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพจะมี

ลักษณะการกระเพื่อมของสัญญาณต่าง ๆ ที่มากขึ้น ผลกระทบที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ในลำดับถัดไปจะพิจารณาผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมซึ่งจะได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.6

7.6 ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากแบนด์วิธความถี่ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

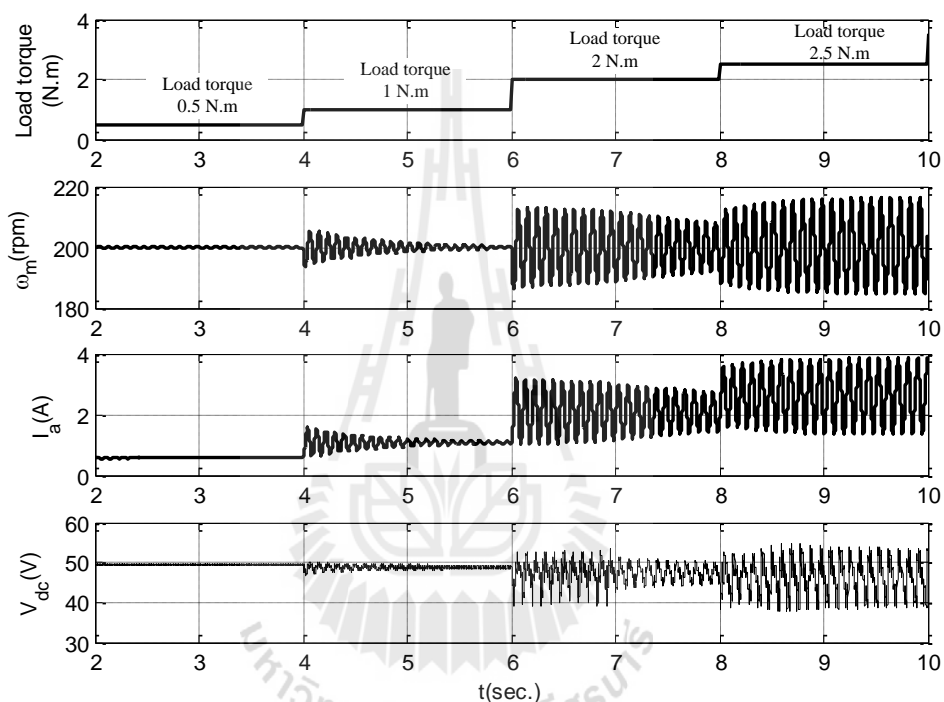
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญอย่างยิ่งกับผลกระทบอันเนื่องมาจากแบนด์วิธของความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ออกแบบระบบควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ซึ่งหากไม่ทำการศึกษาผลกระทบดังกล่าวอาจส่งผลให้นักออกแบบใช้ค่าความถี่ธรรมชาติในการออกแบบที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm ผลกระทบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า ω_n จาก 16 rad/s ถึง 24 rad/s แสดงดังรูปที่ 7.16 สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แสดงไว้แล้วดังตารางที่ 7.3



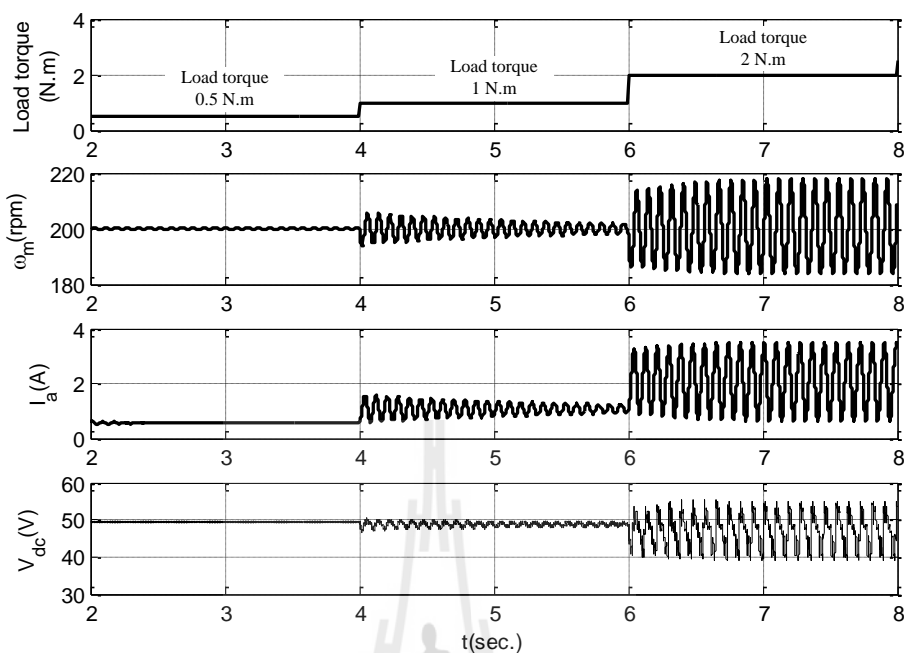
รูปที่ 7.16 แนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อ ω_n มีการเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ผลกระทบในรูปที่ 7.16 พบว่าหากทำการเพิ่มค่า ω_n ให้มากขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือจึงทำการคัดเลือจุดการทำงาน

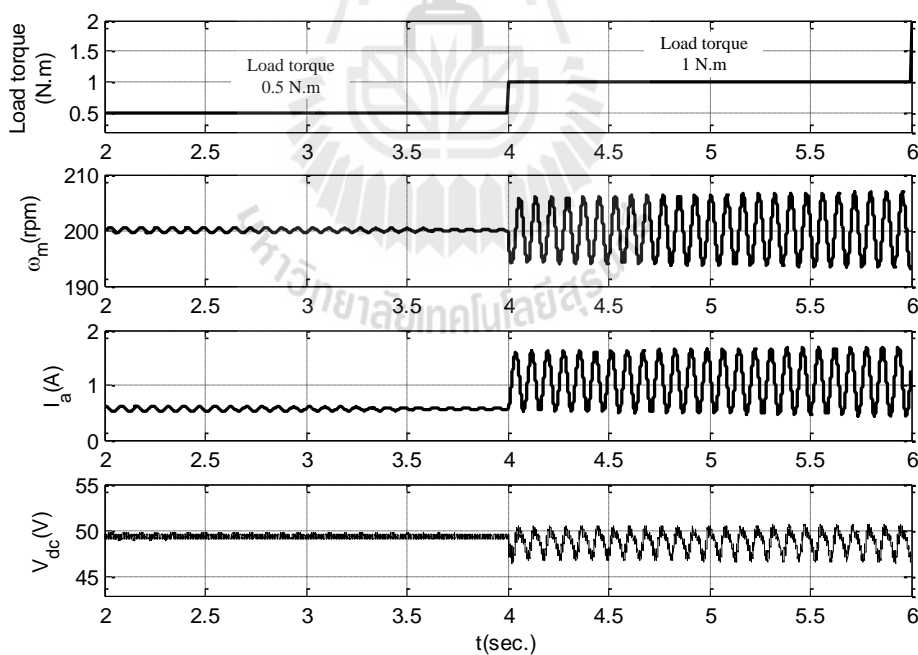
3 จุด มาใช้สำหรับการยืนยันผลกระทบบจากการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 200 rpm และที่ ω_n มีค่าเท่ากับ 18 rad/s , 20 rad/s และ 22 rad/s ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2.5 N.m , 2 N.m และ 1 N.m ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7.17 ถึง 7.19



รูปที่ 7.17 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 18$ rad/s



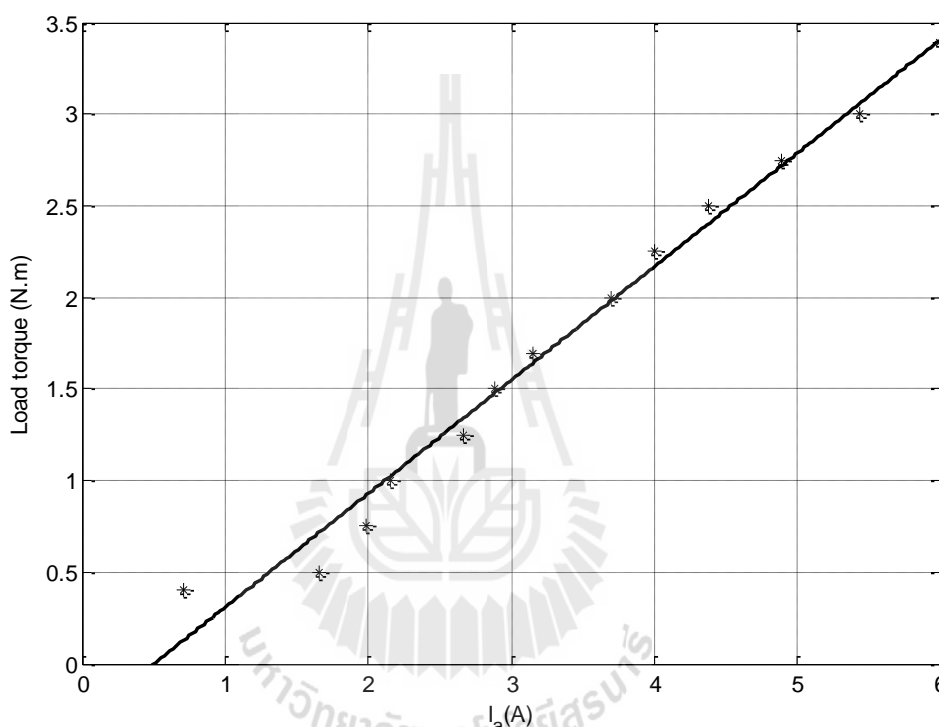
รูปที่ 7.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 20$ rad/s



รูปที่ 7.19 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อ $\omega_n = 22$ rad/s

ผลการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 7.17 ถึง 7.19 สามารถยืนยันได้ชัดเจนว่าเมื่อค่า ω_n เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพน้อยลง ดังนั้นเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นการยืนยัน

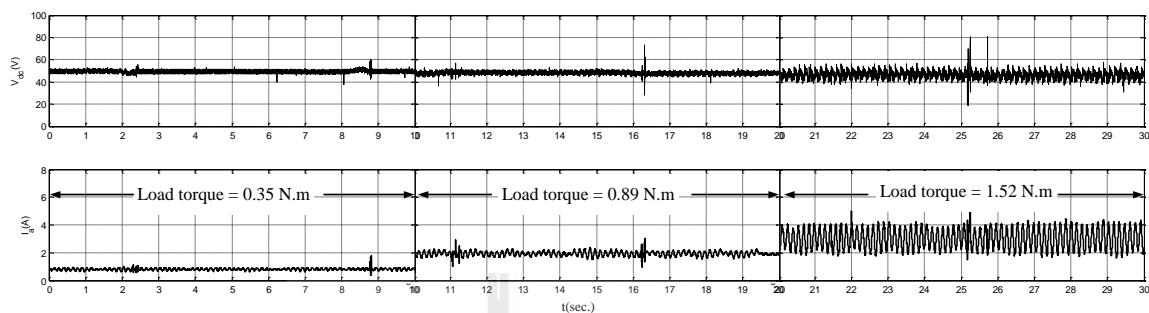
ผลกระทบจากโปรแกรม MATLAB อาจไม่เพียงพอ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการทดสอบผลกระทบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น แต่เนื่องจากชุดทดสอบจริงไม่สามารถวัดโหลดทางกลของมอเตอร์ได้อย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงได้อาศัยการประมาณค่าเปรียบเทียบระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ต่อโหลดทางกลที่ได้จากการทดสอบจริง การทดสอบระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกลของมอเตอร์จะคงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าไว้ที่ 200 rpm ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 7.20



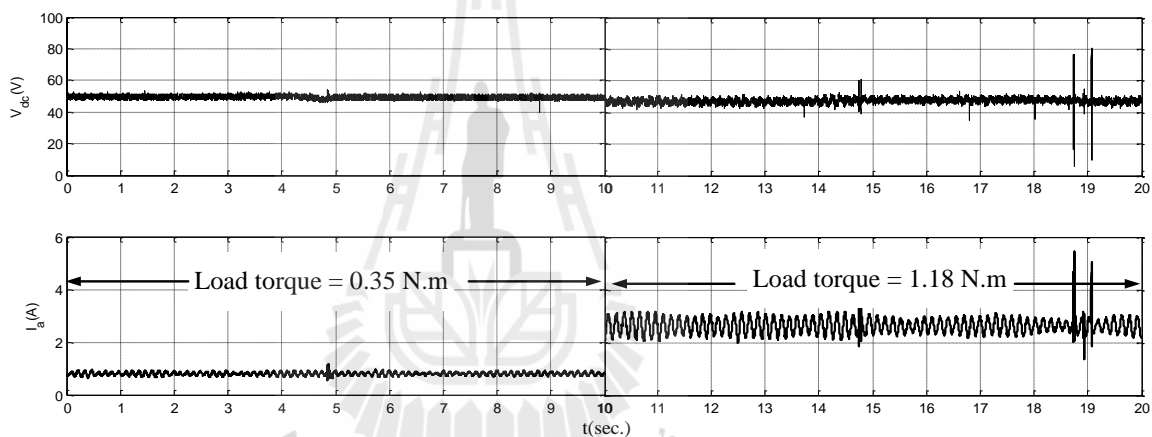
รูปที่ 7.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และโหลดทางกลในรูปที่ 7.20 พบว่าเมื่อโหลดทางกลของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นการระบุโหลดทางกลของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการนำกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการทดสอบสภาวะการขาดเสถียรภาพมาเทียบจากกราฟ การทดสอบการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบจะกำหนดให้มอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 200 rpm จากนั้นทำการเพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์จนเกิดการขาดเสถียรภาพที่ความถี่ธรรมชาติในการออกแบบตัวควบคุมค่าต่าง ๆ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการทดสอบที่ค่าความถี่ธรรมชาติในการ

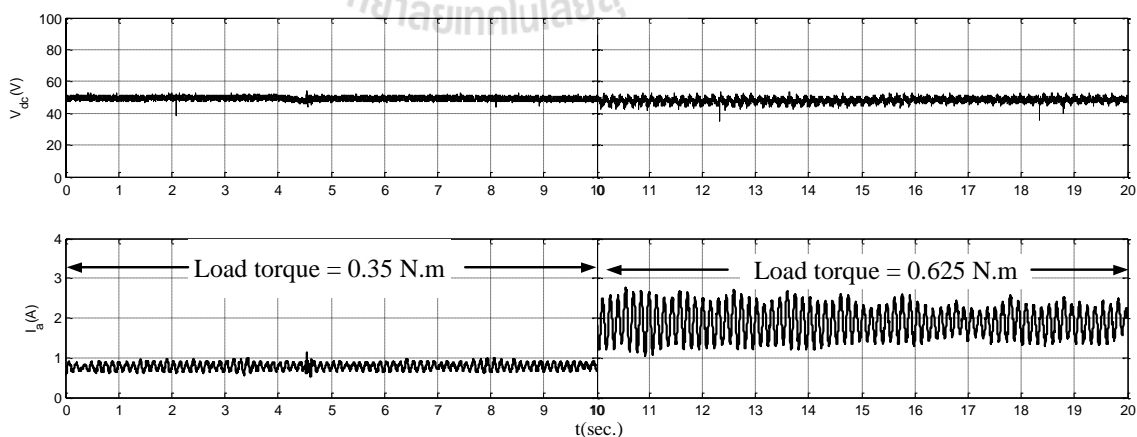
ออกแบบเท่ากับ 18 rad/s , 20 rad/s และ 22 rad/s ผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริงสามารถแสดง
ได้ดังรูปที่ 7.21 ถึง 7.23



รูปที่ 7.21 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 18$ rad/s

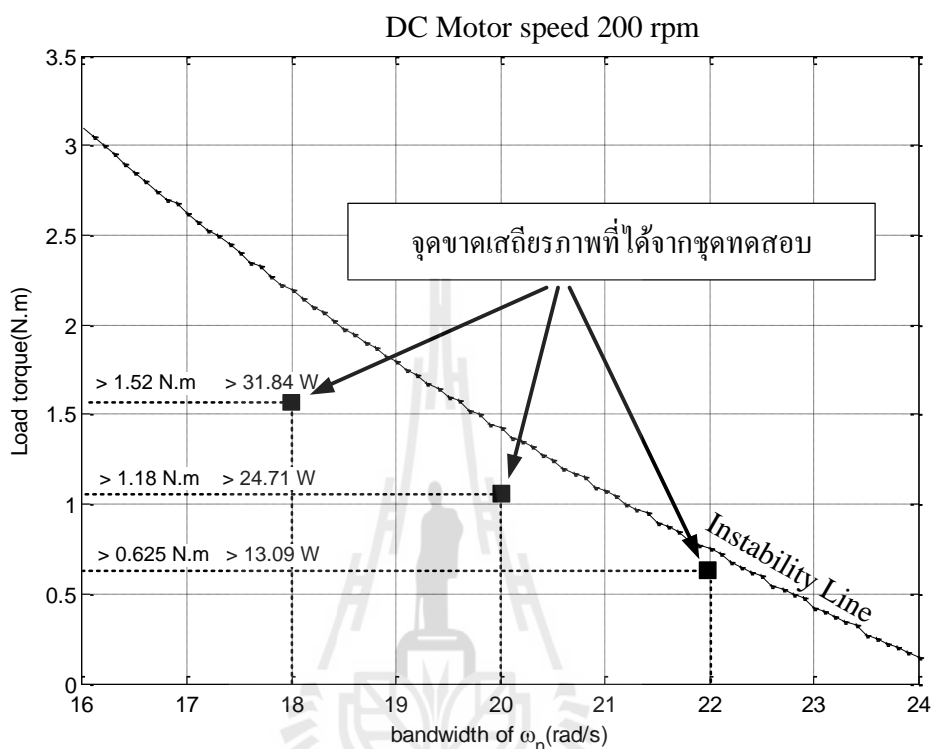


รูปที่ 7.22 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 20$ rad/s



รูปที่ 7.23 ผลการทดสอบที่ $\omega_n = 22$ rad/s

จากการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 7.21 ถึง 7.22 พบว่าจุดการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ซึ่งจากการทดสอบสามารถสรุปจุดการขาดเสถียรภาพได้ดังรูปที่ 7.24



รูปที่ 7.24 จุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง

จุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงในรูปที่ 7.24 พบว่าจุดขาดเสถียรภาพที่ได้จากชุดทดสอบมีการขาดเสถียรภาพที่โหลดทางกลของมอเตอร์น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคาดการณ์ทางทฤษฎี ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าที่แท้จริงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถระบุค่าได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 เป็นเพียงการระบุค่าที่จุดการทำงานของระบบจุดใดจุดหนึ่งเท่านั้น หรืออาจมีสาเหตุมาจากการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่งเพื่อสะดวกในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม เหตุผลดังกล่าวอาจทำให้การทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเล็กน้อย แต่จากลักษณะแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่คล้ายคลึงกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้ สามารถสรุปได้ว่าการที่ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแ่ลงเมื่อเพิ่มความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นเป็นจริง

7.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ซึ่งถูกทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง แต่การคำนวณหาค่าเจาะจงเพียงอย่างเดียวเพื่อบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอาจยังไม่เพียงพอจึงต้องมีการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ของระบบจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังนำเสนอแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{dc} , L_{dc} และ ω_n ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ นักออกแบบสามารถออกแบบได้จึงต้องศึกษาเพื่อหลีกเลี่ยงการออกแบบ ณ จุดที่ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ สำหรับค่าพารามิเตอร์ ω_n เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายสำหรับชุดทดสอบ เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงนำกรณีที่ ω_n มีการเปลี่ยนแปลงมาทำการทดสอบด้วยชุดทดสอบจริง จากผลการทดสอบพบว่าจุดขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลกระทบที่ได้วิเคราะห์ไว้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นประโยชน์ให้กับวิศวกรหรือนักออกแบบตัวควบคุม หากในการออกแบบใช้แบบจำลองความถี่สำหรับการออกแบบสูงเกินไปอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เกิดความเสียหายหรืออาจเกิดเหตุอันตรายต่อผู้ใช้งาน

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดังกล่าวมีความจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องซึ่งจากการค้นคว้าพบว่าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป วิธีการแปลงดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดังกล่าวได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่ได้กล่าวมานี้ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเริ่มพิจารณาจากระบบแบบวงเปิด (กรณียังไม่มีตัวควบคุม) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบวงเปิดก่อนซึ่งการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณียังไม่มีตัวควบคุมได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 3 หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบพีไอเข้าไปในระบบแล้วทำการพิสูจน์แบบจำลองเพิ่มเติมเฉพาะส่วนของตัวควบคุมที่ใส่เข้าไปซึ่งการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีมีตัวควบคุมเพิ่มเข้าไปในระบบได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4 พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์จุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

การศึกษาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอแบบรูปเดียว สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์เทียบกับแรงดันอาร์เมเจอร์จะอยู่ในรูปของระบบอันดับสอง เมื่อมีตัวควบคุมแบบพีไอรวมเข้ามามีจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดเป็นระบบอันดับสาม ส่งผลให้ไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ค่าพารามิเตอร์จากระบบทั่วไปอันดับสองได้ ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่งซึ่งเมื่อรวมกับตัวควบคุมพีไอแล้วจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดสอดคล้องระบบทั่วไปอันดับสอง โดยการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนได้กล่าวไว้อย่างละเอียดแล้วในบทที่ 4

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไม่เพียงแต่มุ่งเน้นการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎีเท่านั้น ยังได้ทำการสร้างชุดทดสอบขึ้นเพื่อใช้สำหรับยืนยันผลการขาดเสถียรภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสำหรับรายละเอียดในการสร้างชุดทดสอบแต่ละส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รวมทั้งการทดสอบวงจรต่าง ๆ ได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 5 จากการสร้างชุดทดสอบดังกล่าวส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์จริงของชุดทดสอบกับค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นไม่ตรงกันซึ่งจะให้ผลการตอบสนองทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัวที่แตกต่างกันส่งผลให้การคาดเดาจุดเกิดการขาดเสถียรภาพผิดพลาด ดังนั้นจึงต้องมีการระบุเอกลักษณ์ระบบไฟฟ้าของชุดทดสอบจริง โดยในที่นี้จะแยกเป็น 2 ส่วน เนื่องจากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ส่วนมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ส่วนแรกที่จะทำการระบุเอกลักษณ์ได้แก่วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีวงจรกรองและมีโหลดเป็นตัวต้านทาน ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำการระบุเอกลักษณ์ได้แก่ R_{eq} , L_{eq} , $R_{L,dc}$, L_{dc} , $R_{C,dc}$ และ C_{dc} โดยจะแบ่งเป็นการระบุเอกลักษณ์ด้วยเครื่องมือวัดได้แก่ $R_{L,dc}$ และ L_{dc} ในส่วนที่เหลือจะเป็นการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว ในส่วนที่สองของการค้นหาคือค่าพารามิเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำการระบุเอกลักษณ์ได้แก่ R_a , L_a , R_f , L_f , K , B และ J เช่นเดียวกับข้างต้นการระบุเอกลักษณ์จะแบ่งเป็นการระบุเอกลักษณ์ด้วยเครื่องมือวัดได้แก่ R_a , L_a , R_f และ L_f ส่วนค่า K , B และ J จะทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์จะถูกนำไปตรวจสอบความถูกต้องกับผลที่ได้จากชุดทดสอบซึ่งให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องตรงกับผลการตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบ รายละเอียดในการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ได้นำเสนอไว้อย่างละเอียดในบทที่ 6

การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ค่าเจาะจงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าสามารถคาดการณ์จุดเกิดการขาดเสถียรภาพได้เมื่อมีการเพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถตรวจสอบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้จากการจำลองสถานการณ์จากชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบว่าจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรเป็นจุดเดียวกัน จากการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าดังกล่าวพบว่าจุดเกิดการขาดเสถียรภาพตรงกัน อีกทั้งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยังได้วิเคราะห์แนวโน้มการขาดเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{dc} , C_{dc} และ ω_n พบว่าเมื่อ L_{dc} มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่เร็วขึ้น และเมื่อ C_{dc} มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ช้าลงในลำดับสุดท้ายเมื่อ ω_n มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกับการเพิ่ม L_{dc} นั่นคือจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่เร็วขึ้น ผลจากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 3 กรณีให้ผลการขาดเสถียรภาพที่ตรงกับการวิเคราะห์ แต่การจำลองสถานการณ์อาจยังไม่เพียงพอผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง สำหรับการปรับเพิ่มค่า L_{dc} และ C_{dc} นั้นในทางปฏิบัติมีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากจะต้องเปลี่ยนชุดอุปกรณ์และทำการระบุเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ใหม่เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอผลการทดสอบเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่า ω_n ซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติที่ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบส่งผลให้ค่า K_p และ K_i ของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงผลทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบจริงพบว่ามีลักษณะแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบรวมทั้งการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าและการทดสอบจากชุดทดสอบจริงได้แสดงไว้ในบทที่ 7

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการพิจารณาภายใต้เงื่อนไขการทำงานของโหมดการนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น ในอนาคตควรมีการพัฒนาให้สามารถพิจารณาในโหมดการนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode : DCM)

- ตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอลูปเดียว ในอนาคตควรมีการปรับปรุงให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอสองลูปนั่นคือลูปความเร็วรอบและลูปกระแสอาร์เมเจอร์ ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะทำให้ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์มีการกระเพื่อมที่น้อยลงหรือลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เร็วขึ้น และยังสามารถนำมาเปรียบเทียบผลการขาดเสถียรภาพหรือแนวโน้มที่เกิดจากแบนด์วิธความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
- การออกแบบตัวควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่ง ในอนาคตควรพัฒนาให้สามารถออกแบบได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนที่แท้จริงของมอเตอร์ซึ่งเป็นระบบอันดับสอง ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะได้ผลการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น
- การระบุเอกลักษณ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ควรมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่สามารถสวิตช์แรงดันเพื่อปรับเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ เพื่อให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งการระบุเอกลักษณ์สำหรับหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควรมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้แบบขั้นบันได เพื่อให้ผลการตอบสนองมีค่าสอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์จากการระบุค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งมีข้อจำกัดคือต้องวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น ดังนั้นเพื่อความถูกต้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
- การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์นั้นสามารถใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ได้เช่นเดียวกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าน่าจะให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้นกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม
- ระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่ใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงนั้น หากมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาต่อเข้ากับระบบจะให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพดังที่วิเคราะห์ไว้ เพื่อให้เกิดการพัฒนาควรมีการเปลี่ยนโหลดกำลังไฟฟ้าแบบคงตัวเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อสังเกตผลการขาดเสถียรภาพ

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

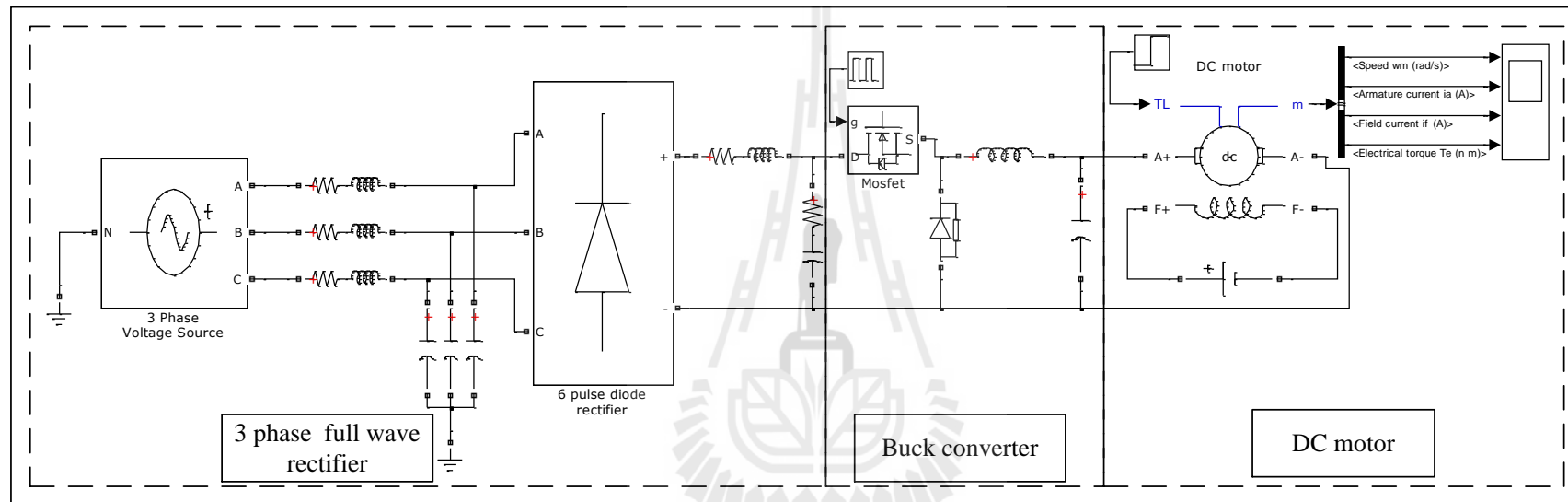
- Jusoh, A.B., The instability effect of constant power loads, **Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National**, Nov. 2004, : 175 - 179
- Krause, P.C, Wasynczuk, O., and Sudhoff, S.D.. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. **2nd ed.Nework :Wiley-IEEE Press**. 2002
- 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, สุชาติรัตน์ขวัญอ่อน, 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)

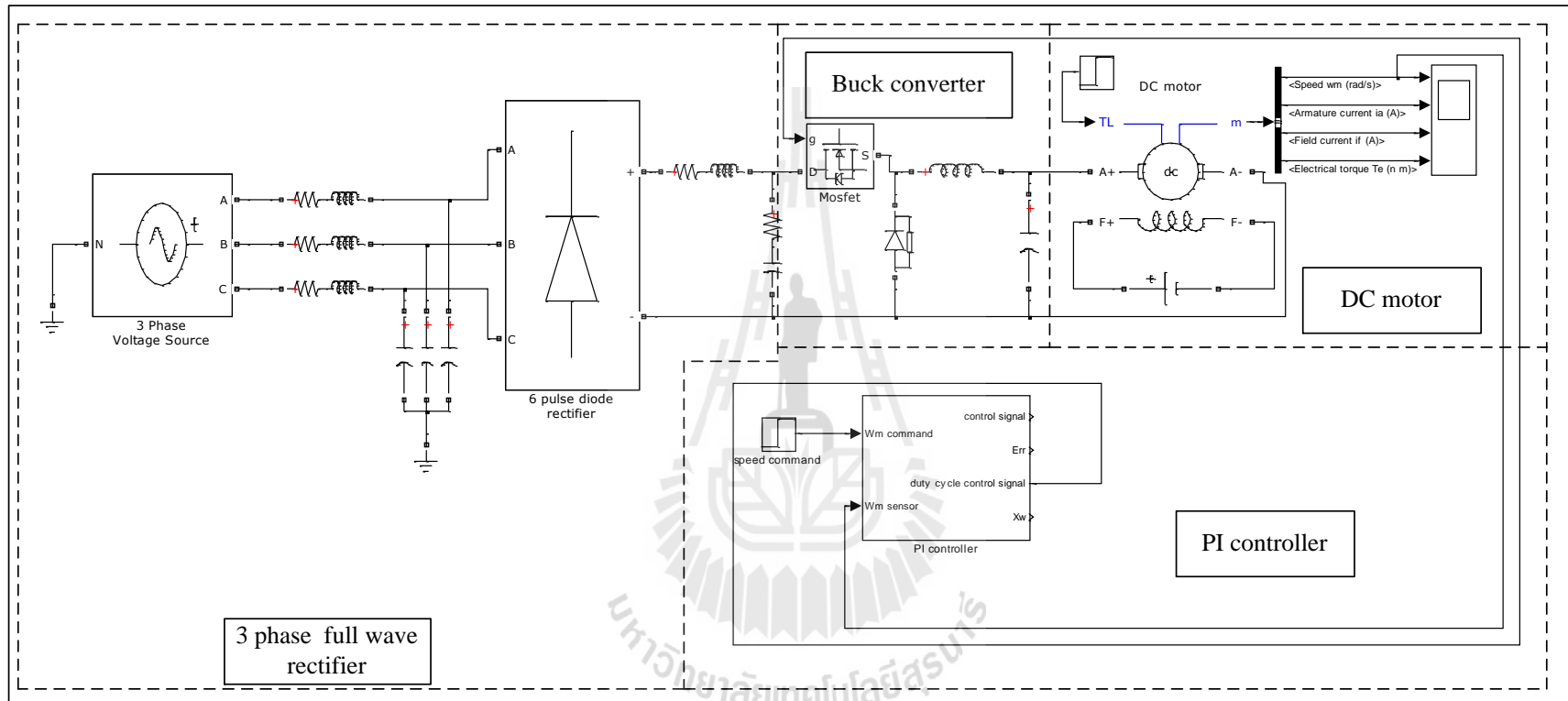
ภาคผนวก ข

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
                    แบบบัสคัท
*****
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

```

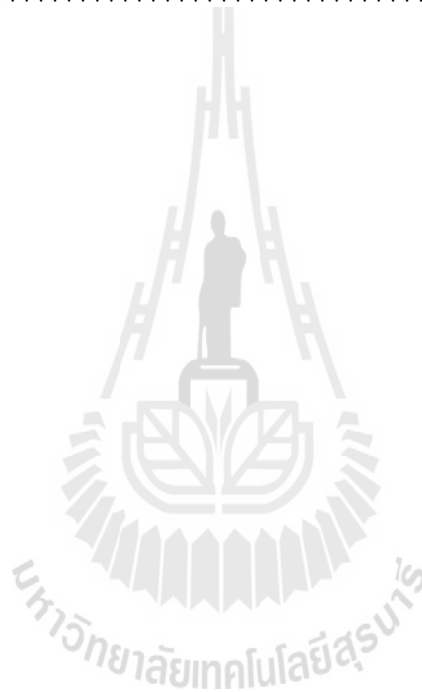
```

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



%ค่าในสภาวะอยู่ตัวที่คำนวณได้จะถูกลำนำไปใช้สำหรับกรอกค่าลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

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
//*****

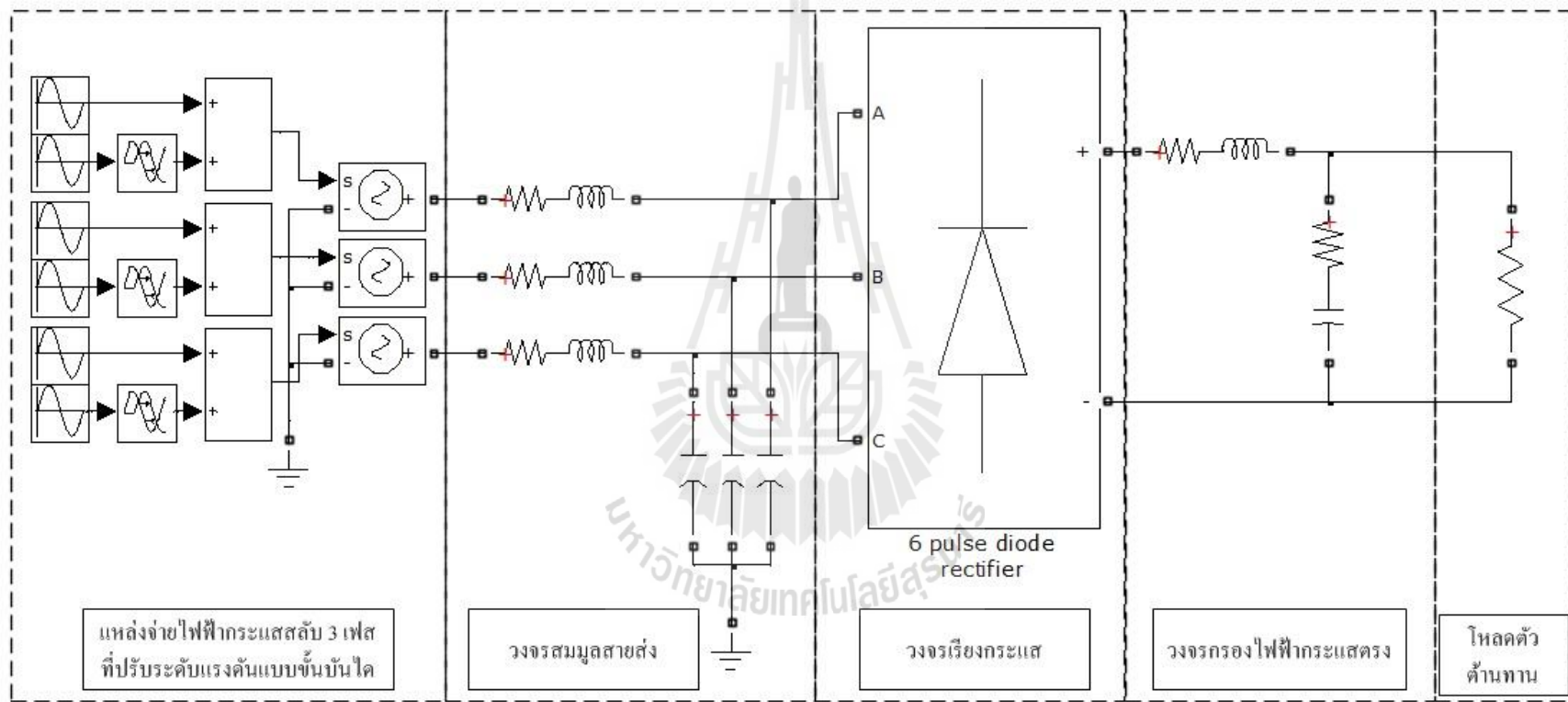
void loop(){
  char key = myKeypad.getKey();
  if (key != NO_KEY &&
(key=='1' || key=='2' || key=='3' || key=='4' || key=='5' || key=='6' || key=='7' || key=='8' || key=='9' || key=='0' || key
=='.'))){
    if (valOnePresent != true){
      num1 = num1 + key;
      int numLength = num1.length();
    } }
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

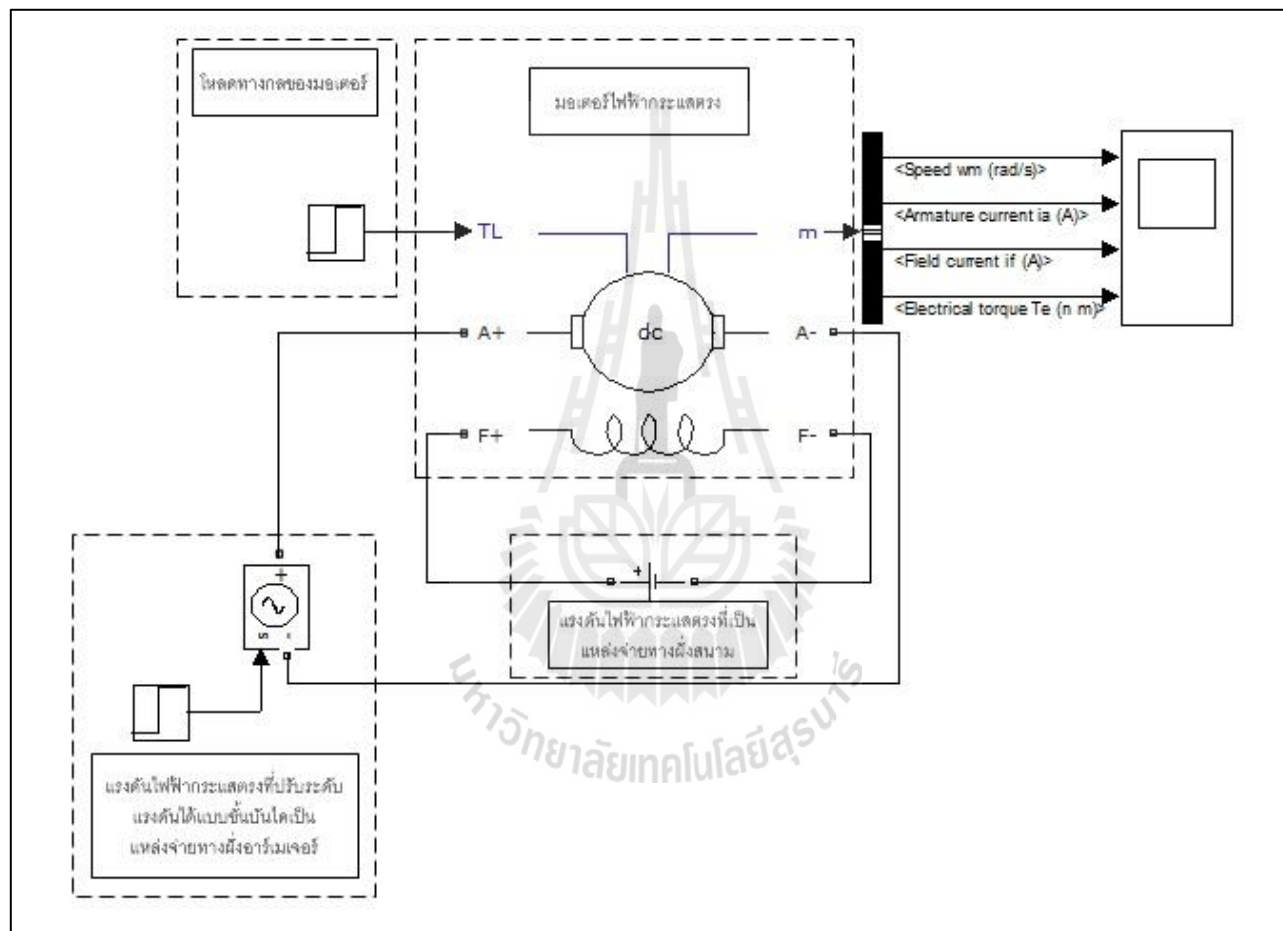


รูปที่ จ.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ภาคผนวก ฉ

บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันได
ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ๑.1 บล็อกจำลองสถานการณ์การเพิ่มระดับแรงดันแบบขั้นบันไดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ภาคผนวก ข

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



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

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

จักรกริช กักสิทธิ์ กองพัน อารีรัตน์* และกองพล อารีรัตน์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

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

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพหรือออกแบบระบบควบคุม จะมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีระบบควบคุมพื้นฐาน การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีดีคิว วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป วงจรรวมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Abstract

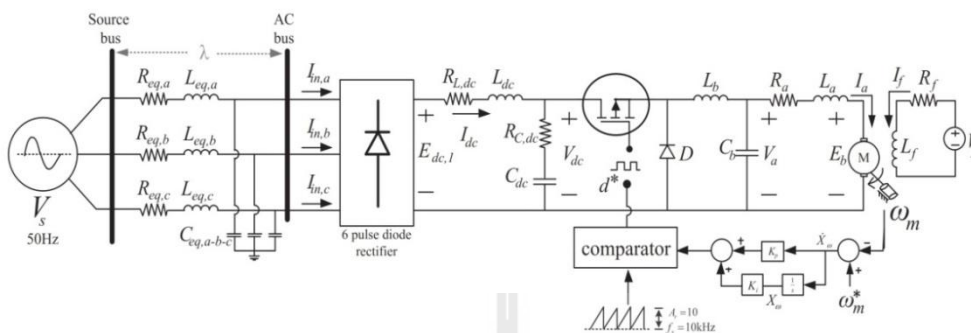
Generally, the mathematical model of power converters is time-varying due to the switching action. The time-varying model is very complicated for the system analysis and design. Therefore, this paper presents how to derive the time-invariant model using the combination between the DQ method and the generalized 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 แบบจำลองของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ เนื่องมาจากอุปสรรคของวงจรแปลงผันกำลัง [1]-[2] ในปัจจุบันมีงานวิจัยได้นำเสนอวิธีการหลายวิธี [3]-[4] ที่นำมาใช้จัดการของสวิตช์ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ ระบบควบคุมพื้นฐานสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบระบบควบคุมได้อย่างง่ายดาย ในบทความนี้จะทำการพิจารณาแบบจำลองสามเฟสเอซีเป็นดีซีที่มีวงจรเรียงกระแสจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรรวมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังอยู่สองส่วน คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟส และวงจรแปลงผันแบบบักซึ่งอยู่ในวงจรรวมความเร็วมอเตอร์ ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองของระบบจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ ซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์ระบบบทความนี้จะนำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ของระบบดังกล่าวด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีดีคิว (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 กล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้รับการนำเสนอในส่วนที่ 4 และส่วนที่ 5 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

บทความนี้ได้พิจารณาในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลผ่านสายส่งต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงผันแบบบิกค์ที่มีการควบคุมสำหรับใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งตัวควบคุมในระบบดังกล่าวเป็นตัวควบคุมชนิดพีโอ การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาส่วนอนิกท์ที่เกิดขึ้น ซึ่งระบบไฟฟ้าง่ายดังกล่าวสามารถพบได้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้จริงในปัจจุบัน สำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3 จะใช้วิธีคิดเพื่อแปลงแหล่งจ่ายสามเฟสสมดุลผ่านสายส่งต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนดิกซ์เพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ทางด้านแหล่งจ่ายและใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปทางด้านโหลดของระบบไฟฟ้าเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์ที่มีการควบคุม เมื่อใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ทฤษฎีระบบควบคุมพื้นฐานต่อไป

3. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

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

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

เมื่อพิจารณาถึงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยวิธีคิดเพื่อเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด จะได้ดังสมการที่ (2) ซึ่งพบว่าสมการดังกล่าวไม่มีตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา

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

โดยที่ ϕ_i คือ มุมเฟสของแกนหมุนดิกซ์ และ ϕ คือ มุมเฟสของบัสแรงดันเอชซี

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

จากรูปที่ 2 พบว่าทางฝั่งแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อใช้วิธีคิดจะทำให้ได้วงจรสมมูลบนแกนดิกซ์ที่เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน รวมไปถึงการกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ซึ่งจะทำให้เมื่อวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์

ลำดับต่อไปจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปพิจารณาทางด้านโหลดของระบบไฟฟ้าเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์ โดยฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์แสดงดังสมการที่ (3)

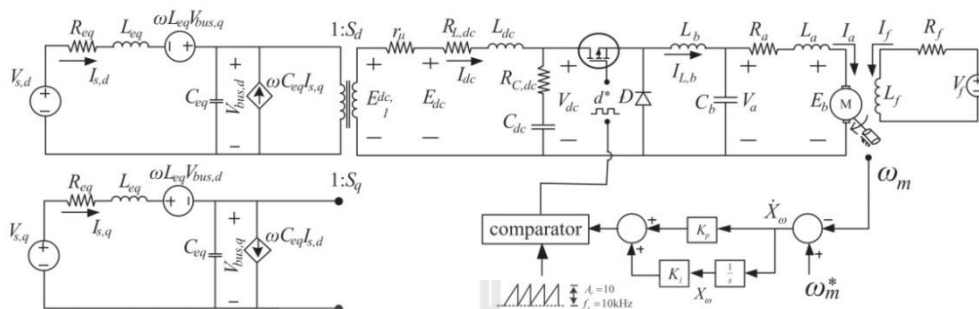
$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T \end{cases} \tag{3}$$

เมื่อ T_s และ d คือ คาบการสวิตช์และค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบิกค์ ตามลำดับ

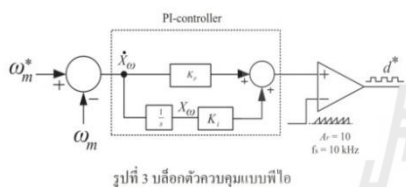
พิจารณาเฉพาะที่ความถี่มูลฐานและ โหมดกระแสต่อเนื่องด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยฟังก์ชันการสวิตช์แสดงดังสมการที่ (4)

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

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]

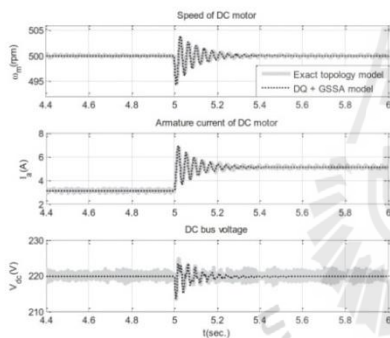
$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_0, u_0) \delta x + B(x_0, u_0) \delta u \\ \delta y = C(x_0, u_0) \delta x + D(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \quad (7)$$

การตรวจสอบความถูกต้องจะพิจารณาเป็นสัญญาณขนาดเล็กโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นมีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

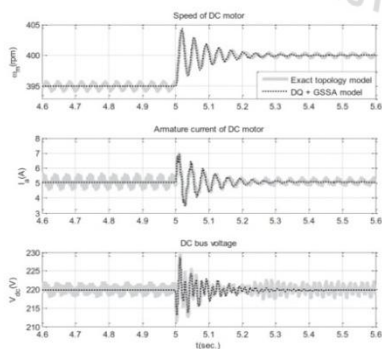
$$\begin{cases} \dot{i}_{r,d} = -\frac{R_{cq}}{L_{cq}} i_{r,d} + \omega i_{r,q} - \frac{V_{bus,d}}{L_{cq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \cos \lambda}{L_{cq}} \\ \dot{i}_{r,q} = -\omega i_{r,d} - \frac{R_{cq}}{L_{cq}} i_{r,q} - \frac{V_{bus,q}}{L_{cq}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \sin \lambda}{L_{cq}}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

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

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป 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. Chaijarunodumrung, 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.

ประวัติผู้เขียน

นายจักรกริช ภัคดีโต เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2534 ศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาและมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2555 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษา ผู้วิจัยได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ในปี พ.ศ.2556 และในปีเดียวกัน ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโทได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และมีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 1 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ง

