



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับระบบขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
แบบกระตุ้นตัวเอง

โดย

ยุทธนา ขำสุวรรณ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย โดยอุดหนุนทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ประจำปี 2552 จนกระทั่งงานวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ลงด้วยดี และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านเครื่องมือในการทดลองและขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและนักศึกษาปริญญาเอก ของห้องวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองวงจร

ยุทธนา จำสุวรรณ์

โครงการ

การควบคุมแรงโดยตรงสำหรับระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากข้อดีในด้านของขนาด ความแข็งแรง คงทน โครงสร้างของเครื่องจักรกลไม่ซับซ้อน การบำรุงรักษาสามารถกระทำได้ง่าย งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยอาศัยชุดตัวเก็บประจุที่ออกแบบให้มีค่าเหมาะสมช่วยในการกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอาศัยสถานะแม่เหล็กตกค้างในแกนโรเตอร์เหนี่ยวนำในการสร้างแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ได้ออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วจากตัวขับเคลื่อนกำลัง ชนิดของโหลด และขนาดของตัวเก็บประจุ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองจะมีปัญหาเกี่ยวกับการรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่เมื่อความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังหรือโหลดที่ต่ออยู่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยนำอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้หลักการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่ วัตถุประสงค์เพื่อควบคุมและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาให้มีขนาดคงที่เมื่อความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังหรือโหลดเปลี่ยนแปลง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความสามารถในการรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองให้คงที่ได้

Title Direct Torque Control Strategies for a Stand-alone
Self-Excited Induction Generator

ABSTRACT

Nowadays, an induction generator has been widely recognized. The advantages of using an induction generator are well known. Some of them are reduction of unit cost and size, ruggedness, brushless, ease of maintenance, etc. This research studies induction generators with capacitors excitation, known as self-excited induction generators (SEIG). Induction machine can be operated as an induction generator by connecting external capacitors across its stator terminals and using the residual magnetizing in the rotor side to build-up voltage. The steady-state output voltage depends on the prime mover speed, the load and the capacitor's size. However, the major drawbacks of SEIG are reactive power consumption, its relatively poor voltage and frequency regulation under varying prime mover speed or load characteristics.

To overcome these problems, this research presented a voltage control of self-excited induction generator using PWM-voltage source inverter with direct torque V/f technique. The aim of this research is to maintain constant voltage under varying prime mover speed and load. The experimental results of SEIG system at various speed and loads are given and shown that the proposed system is capable of good AC and DC voltages regulation.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 แนวทางการแก้ปัญหา	4
1.3 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	7
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย เชิงทฤษฎี และ/หรือเชิงประยุกต์	8
บทที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	
2.1 บทนำ	9
2.2 การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	9
2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า	11
2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	13
2.5 สรุป	15
บทที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว	
3.1 บทนำ	16
3.2 การแปลงระบบไฟฟ้า	16

3.3 ระบบแรงดันไฟฟ้า	18
3.4 ระบบกระแสไฟฟ้า	19
3.5 ระบบกำลังไฟฟ้า	19
3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	19
3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	23
3.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำร่วม	28
3.9 การคำนวณและออกแบบขนาดตัวเก็บประจุ	30
3.10 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองและผลการทดสอบ	31
3.11 สรุป	39
บทที่ 4 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	
4.1 บทนำ	40
4.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม	41
4.3 เทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมอดูเลชัน	43
4.4 หลักการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้หลักการควบคุม แบบแรงบิดโดยตรง	54
4.5 หลักการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์สเตเตอร์โดยตรง	55
4.6 ผลการทดสอบ	58
4.7 สรุป	67
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วม กับค่ากระแสกระตุ้น	74

ภาคผนวก ข	รายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	78
ภาคผนวก ค	งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่	82

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 เปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	12
4.1 สรุปภาพรวมของการมอดูเลตประเภทต่างๆสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส	44
4.2 สถานะของแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟส	50
4.3 สรุปช่วงเวลาของการสวิตช์ในทุกช่วงตอน	54
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ	59

สารบัญภาพ

รูป	หน้า	
1.1	โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว	2
1.2	ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่จ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว	3
1.3	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม	4
2.1	ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ค่าสลิปต่างๆ	10
2.2	การถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำ	12
2.3	การถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า	12
2.4	การถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	13
2.5	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	14
3.1	ระบบสามเฟสและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง	17
3.2	ระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่งและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน	18
3.3	เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส	20
3.4	วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส	21
3.5	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส	24
3.6	วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส	24
3.7	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเมื่อทำการจ่ายโหลด	28
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้น	29
3.9	วงจรสมมูลที่ใช้หลักการวงจรเรโซแนนซ์ในการวิเคราะห์หาขนาดตัวเก็บประจุ	31
3.10	แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	31
3.11	คลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสและความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังในสภาวะเริ่มทำงาน	33
3.12	คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดในสภาวะเริ่มทำงาน	34
3.13	คลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสและความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังในสภาวะคงตัว	35
3.14	คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดในสภาวะคงตัว	36
3.15	คลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสและความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังในสภาวะคงตัว	37

3.16	คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดในสภาวะคงตัว	38
4.1	โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้หลักการควบคุมแบบสเกลาร์ด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่ ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	40
4.2	วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม	41
4.3	คลื่นแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยเทคนิคเทคนิคคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยม	43
4.4	การสเปซเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า	45
4.5	พิกัดเวกเตอร์ระบบสามเฟสกับระบบสองเฟส	47
4.6	เวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการรวมของเวกเตอร์สองตัวในช่วงตอนที่ 1	48
4.7	รูปแบบวิธีการสวิตช์ในแต่ละช่วงตอน	50
4.8	ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 1	51
4.9	ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 2	51
4.10	ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 3	52
4.11	ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 4	52
4.12	ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 5	53
4.13	ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 6	53
4.14	เวกเตอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ	55
4.15	บล็อกไดอะแกรมการทดลองของระบบที่นำเสนอ	60
4.16	ชุดตัวขับเคลื่อนกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	60
4.17	วงจรการทดลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	61
4.18	การทดสอบในสภาวะพลวัตขณะเริ่มการทำงานของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm	63
4.19	การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm	64
4.20	การทดสอบในสภาวะพลวัตขณะเริ่มการทำงานของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์และความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังที่ 1650 rpm	64

- 4.21 การทดสอบในสภาวะพลวัตขณะเริ่มทำงานของคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์ และแรงบิด ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm 65
- 4.22 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์ และแรงบิด ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm 65
- 4.23 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และคลื่นกระแสต่อเฟสที่โหลด 66
- 4.24 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 900 rpm 67
- 4.25 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์ และแรงบิด ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 900 rpm 67
- 4.26 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และคลื่นกระแสต่อเฟสที่โหลด 68

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
ω_m	ความเร็วทางกล, rad/s
ω_r	ความเร็วโรเตอร์, rad/s
ω_s	ความเร็วซิงโครนัส, rad/s
T_e	แรงบิดทางไฟฟ้า, Nm
V_{dc}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, V
V_{dc}^*	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิง, V
V_{ma}	แรงดันไฟฟ้ามอดูเลชัน, V
θ_s	มุมความเร็วซิงโครนัส, rad
d_a, d_b, d_c	สัญญาณไฟฟ้าสามเฟสอ้างอิง, V
S_a, S_b, S_c	สัญญาณไฟฟ้าสามเฟสควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์, V
f_a, f_b, f_c	จำลองระบบสามเฟส
f_α, f_β, f_0	จำลองระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$)
f_d, f_q	จำลองระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน (dq)
v_a, v_b, v_c	แรงดันไฟฟ้าสามเฟส (rms), V
v_α, v_β	องค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าสองเฟส (rms) บนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$), V
V_m	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด, V
i_a, i_b, i_c	กระแสไฟฟ้าสามเฟส (rms), A
i_α, i_β, i_0	องค์ประกอบกระแสไฟฟ้าสองเฟส (rms) บนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$), A
P_e	กำลังไฟฟ้า, W
$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$	องค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$), V
\vec{V}_s	เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดสเตเตอร์, V
$v_{r\alpha}, v_{r\beta}$	องค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$), V
\vec{V}_r	เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดโรเตอร์, V
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	องค์ประกอบกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$), A
\vec{I}_s	เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าด้านขดลวดสเตเตอร์, A

สัญลักษณ์	ความหมาย
$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$	องค์ประกอบกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$), A
\bar{I}_r	เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าด้านขดลวดโรเตอร์, A
R_s	ความต้านทานด้านขดลวดสเตเตอร์, Ω
R_r	ความต้านทานด้านขดลวดโรเตอร์, Ω
L_s	ความเหนี่ยวนำด้านขดลวดสเตเตอร์, H
L_r	ความเหนี่ยวนำด้านขดลวดโรเตอร์, H
L_m	ความเหนี่ยวนำร่วม, H
$i_{m\alpha}, i_{m\beta}$	องค์ประกอบกระแสกระตุ้นบนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$), A
I_m	กระแสกระตุ้น (rms), A
$\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$	องค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$), Wb-turn
$\bar{\psi}_s$	เวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านขดลวดสเตเตอร์, Wb-turn
$\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$	องค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$), Wb-turn
$\bar{\psi}_r$	เวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านขดลวดโรเตอร์, Wb-turn
$\psi_{m\alpha}, \psi_{m\beta}$	องค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟาร่วมบนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$), Wb-turn
p	$\frac{d}{dt}$, ตัวกระทำอนุพันธ์
p_p	จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก
J	โมเมนต์ความเฉื่อย
D	ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง
T_m	แรงบิดทางกล, Nm
P_m	กำลังไฟฟ้าทางกล, W
C	ตัวเก็บประจุ, μF
$V_{c\alpha}, V_{c\beta}$	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุบนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$), μF
R_L	โหลดความต้านทาน, Ω
L_L	โหลดความเหนี่ยวนำ, H
i_{gen}	กระแสไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, A

สัญลักษณ์	ความหมาย
i_{inv}	กระแสไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์, A
i_{load}	กระแสไฟฟ้าโหลด, A
I_{dc}	กระแสไฟฟ้ากระแสตรง, A
m_a	ดัชนีการมอดูเลต
v_{an}, v_{bn}, v_{cn}	แรงดันไฟฟ้าสามเฟสต่อเฟส, V
f_s	ความถี่การสวิตช์, Hz
t	เวลา, s

บทที่ 1

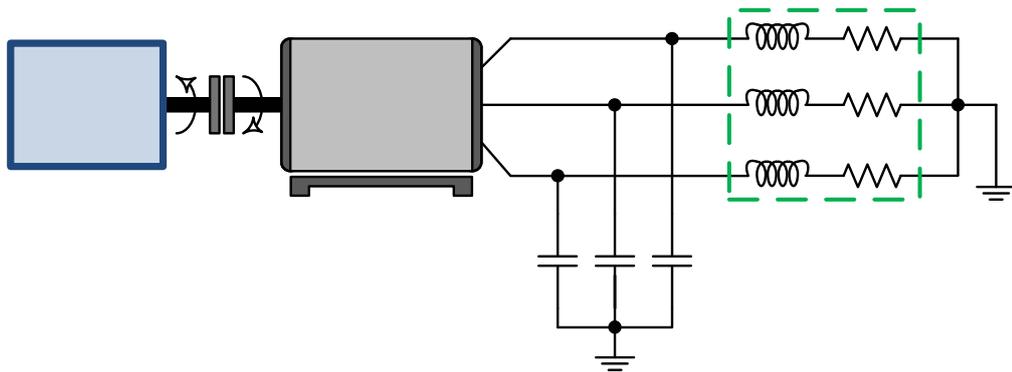
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโลกมีอัตราการใช้พลังงานจากแหล่งธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน หรือก๊าซธรรมชาติ แต่พลังงานดังกล่าวมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นในหลายประเทศเริ่มให้ความสำคัญและมีแนวคิดที่จะนำพลังงานทางเลือกใหม่มาใช้ แหล่งพลังงานดังกล่าวเรียกว่าพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังงานน้ำ, และพลังงานชีวมวล เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายรูปแบบ ทั้งยังเป็นการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน โดยรูปแบบที่นิยมนำมาใช้คือการนำพลังงานดังกล่าวมาแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าที่ใช้พลังงานหมุนเวียนมาเป็นพลังงานต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้านั้นจะเป็นระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังนั้นการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงมีความเหมาะสมมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอื่น เพราะมีข้อดีในด้านของขนาด ความแข็งแรง ทนทาน โครงสร้างของเครื่องจักรกลไม่ซับซ้อน การบำรุงรักษากระทำได้ง่าย ไม่ต้องอาศัยการเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าเมื่อทำงานในสภาวะกระตุ้นตัวเอง [1]-[6] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะตามโครงสร้างของโรเตอร์ คือแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) และแบบขดลวดโรเตอร์ (Wound rotor) โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบโรเตอร์กรงกระรอกในการทำงานแบบกระตุ้นตัวเอง (Self-excitation) สำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว (Stand-alone) จากรูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส, ตัวขับเคลื่อนกำลัง, ชุดโหลดสมดุล และชุดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งไว้ทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังไฟรีแอกทีฟ (Reactive power) สำหรับกระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [7],[8],[9] โดยเงื่อนไขที่จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองนั้น จะต้องมีสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) อยู่ภายในขดลวดโรเตอร์และชุดตัวเก็บประจุจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นอกจากนั้นแล้วขนาดของโหลดและความเร็วรอบที่ได้รับจากตัวขับเคลื่อนกำลังต้องมีความเหมาะสมจึงจะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม

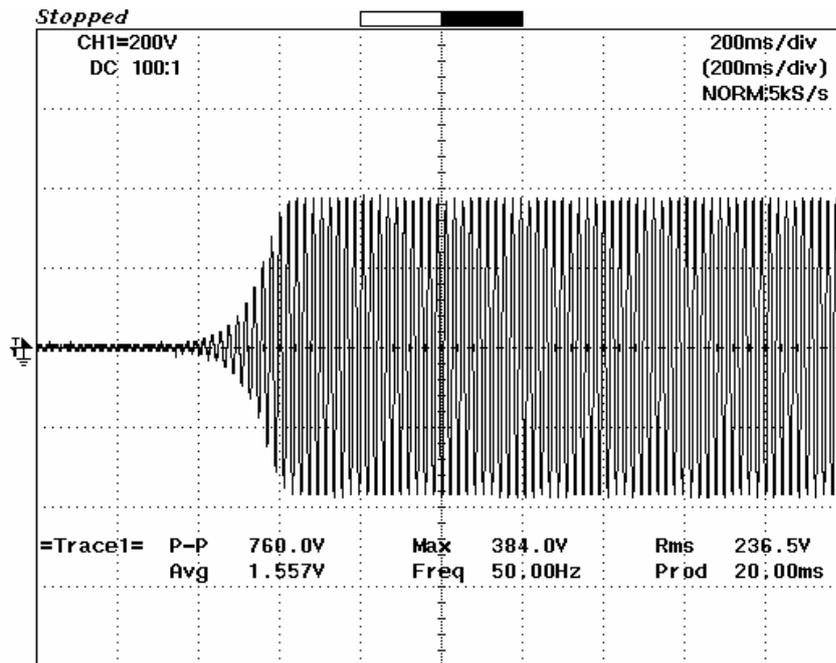
ในทางปฏิบัติปัญหาหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่เป็นจุดด้อยสำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและความถี่ที่ได้ออกมาในขณะที่โหลดหรือความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อนกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพและสมรรถนะลดลง [1],[10],[11]



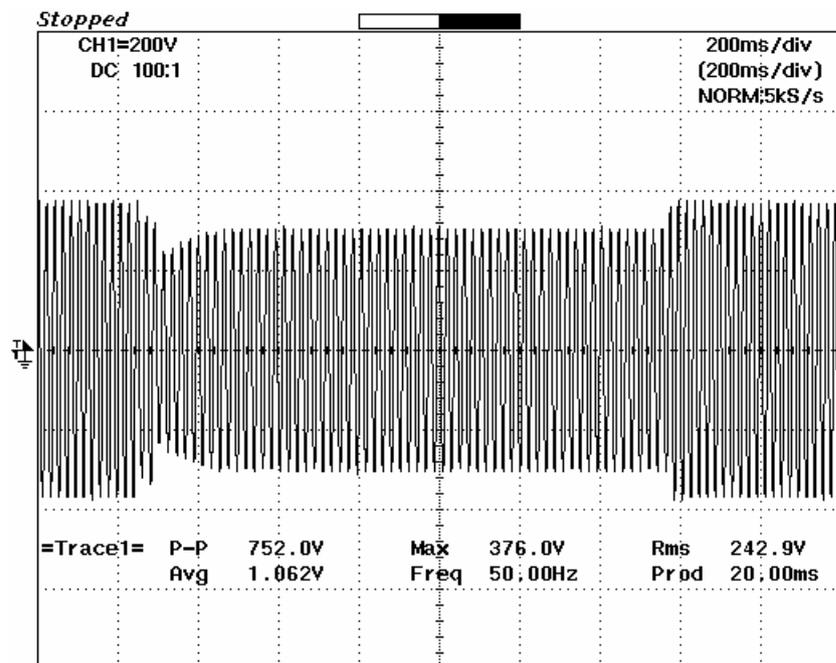
รูปที่ 1.1 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว

รูปที่ 1.2 (ก) แสดงการสร้างคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองขนาด 0.37 kW, 220/380 V, 1.8/1.05A, 50 Hz, 4 ขั้วแม่เหล็ก ที่ได้จากการทดสอบจริง จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาได้จริง โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลสูงสุดอยู่ที่ 384 V และใช้เวลาในการสร้างแรงดันไฟฟ้าจนเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 200 ms

รูปที่ 1.2 (ข) เป็นผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของปัญหาการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่สร้างออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยทำการทดสอบจริงในกรณีที่โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งในการทดสอบจะกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสภาวะไร้โหลดก่อนหลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มโหลดที่ค่าพิกัดและทำการปลดโหลดออกอย่างทันทีทันใดภายในช่วงเวลา 1.4 ms จากผลการตอบสนองในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแรงดันไฟฟ้ามีขนาดลดลงจริงเมื่อโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่โหลดจะไม่ส่งผลต่อความถี่เท่ากับความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่ยังคงรักษาไว้ได้ที่ 50 Hz



(ก) คลื่นแรงดันไฟฟ้าสภาวะชั่วขณะขณะเริ่มทำงาน

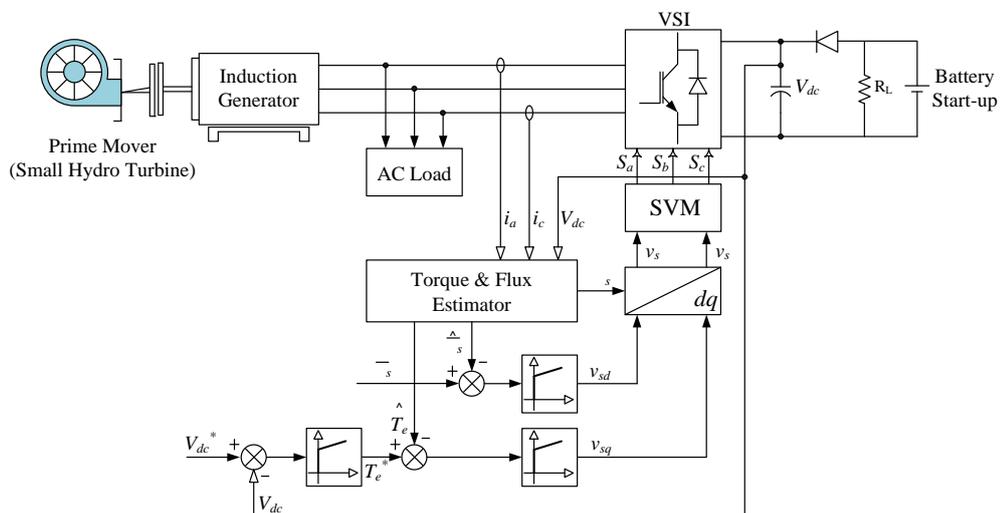


(ข) คลื่นแรงดันไฟฟ้าสภาวะคงตัวเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง

รูปที่ 1.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่จ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว

1.2 แนวทางการแก้ปัญหา

แนวทางในการทำงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการใหม่โดยจะใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็มควบคุมด้วยหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct torque control) ที่มีใช้งานกันทั่วไปกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มาประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว ซึ่งมีสมมติฐานและวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยเพื่อปรับปรุงสมรรถนะและรักษาแรงดัน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดหรือความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อนกำลัง อีกทั้งเพื่อที่เป็นการพัฒนา ออกแบบ วิเคราะห์และหาแนวทางใหม่ของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีความง่าย ไม่ซับซ้อนแต่ให้ประสิทธิภาพเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง สำหรับจ่ายโหลดแยกเดี่ยว โดยในรูปที่ 1.3 เป็นบล็อกไดอะแกรมหลักการของระบบควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะทำการควบคุมแรงดันด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากค่าความผิดพลาดของแรงบิดและค่าความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ ผ่านตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อสร้างคำสั่งแรงดันสเตเตอร์สำหรับนำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน โดยเครื่องต้นแบบที่จะออกแบบและสร้างขึ้นอยู่บนพื้นฐานของตัวควบคุมประมวลผลแบบดิจิทัล



รูปที่ 1.3 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้หลักการแรงบิดโดยตรง

1.3 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้าเอกสารและบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย จะเห็นได้ว่ามีหลายบทความที่แสดงให้เห็นถึงปัญหาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองและได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาเพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยสามารถสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องได้ดังต่อไปนี้

Novotny และคณะ [12] เป็นครั้งแรกที่นำหลักการ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สามารถใช้เป็นตัวกระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในตอนเริ่มต้นการทำงาน เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้แล้ว จะนำหลักการควบคุมสลิป มาช่วยในการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่สร้างออกมาให้คงที่ โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับระบบอินเวอร์เตอร์กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง นำค่าความผิดพลาดที่ได้มาผ่านวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage controlled oscillator) เพื่อหาค่าความเร็วเชิงมุมและนำค่าที่ได้มาขับสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยตรง การทำงานในวิธีการนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในย่านความเร็วที่กว้างมากยิ่งขึ้น

Brennen และ Abbondanti [9] ได้นำเสนอการใช้ตัวเก็บประจุในกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยได้รับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากชุดตัวเก็บประจุมาใช้ในการกระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าและใช้วงจรควบคุมไทรสเตอร์ (Thyristor controlled inductors) ในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับโหลด และนำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ โดยวิธีการออกแบบหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมนั้นจะนำกราฟความสัมพันธ์ทั้งสองมาวางทับซ้อนกัน เพื่อหาจุดตัดที่เป็นจุดสมดุลและเป็นจุดที่แสดงถึงขนาดตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง

Muljadi และ Lipo [13] ได้เสนอวิธีการชดเชยการทำงานระบบอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบพิดับเบิลยูเอ็มด้วยวิธีการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าและความถี่จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทำการวิเคราะห์ระบบอินเวอร์เตอร์ที่มีแบตเตอรี่ต่ออยู่สามารถทำงานได้ทั้งการควบคุมการกระตุ้นแรงดันไฟฟ้าและสามารถเก็บรักษาพลังงานได้ ซึ่งได้อธิบายลักษณะการทำงานออกเป็น 3 แบบ คือแบบที่ 1 แสดงการทำงานของระบบในสภาวะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, แบบที่

2 แสดงการทำงานของเบตเตอร์เมื่อรับเอากำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาสะสมพลังงานในเบตเตอร์ และแบบที่ 3 แสดงการทำงานขณะที่กำลังไฟฟ้าจ่ายออกมาให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีไม่เพียงพอ เบตเตอร์จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟให้กับโหลดอีกทางหนึ่ง โดยเบตเตอร์จะคายพลังงานเพื่อทำงานแทนเนื่องจาก โหลดต้องการกำลังไฟฟ้า จากผลการทดลองสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ แต่ยังมีข้อด้อยในด้านการตอบสนองในสภาวะชั่วขณะ

Marra และ Pomilio [18] นำเสนอการประยุกต์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่ทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสพีดับเบิลยูเอ็มแบบสองทาง (VS-PWM bidirectional inverter) โดยนำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือโหลดเป็นแบบไม่สมดุล โดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาผ่านวงจรเรียงกระแส เพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อหาค่าความผิดพลาดมาผ่านชุดควบคุมพีไอ และนำสัญญาณที่ได้ส่งให้กับวงจรขับสวิตซ์เอสซีอาร์ เพื่อช่วยในการควบคุมโหลดทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ข้อดีคือมีการหลีกเลี่ยงการไหลของกระแสไฟฟ้าจากกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ผ่านเข้าระบบอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นสามารถที่จะลดพิสัยกำลังไฟฟ้าของระบบอินเวอร์เตอร์ได้

Wekhande และ Agarwal [19] ได้นำเสนอการใช้อินเวอร์เตอร์ต่อขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและใช้หลักการควบคุมแบบง่าย เพื่อสร้างระบบเชิงแอนะล็อกควบคุมกระแสไฟฟ้าทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีค่าเท่ากับค่าอ้างอิง ซึ่งกำหนดโดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับแรงดันไฟฟ้าด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าด้านออกไม่มีการป้อนสัญญาณ ไปหน้าของสัญญาณกระแสกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่มีการป้อนไปหน้าของสัญญาณกระแสกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ดังนั้นระบบจึงให้ผลตอบสนองในสภาวะชั่วขณะได้ไม่ดีมากนัก

Ojo และ Davidson [20] นำเสนอวิธีการใหม่ด้วยการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดที่มีขดลวดสเตเตอร์สองชุดมาทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว ซึ่งสามารถควบคุมทั้งขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่โหลดให้มีค่าคงที่ได้ โดยขดลวดด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นการทำงานสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวที่เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส ส่วนขดลวดอีกชุดจะต่อเข้ากับระบบอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามาจ่ายให้กับระบบอินเวอร์เตอร์สามารถใช้เบตเตอร์หรืออาศัยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการสะสมประจุในตัวเก็บประจุก็ได้ ในบทความนี้ได้แสดงวิธีการและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายทั้งสองแบบ

Kuo และ Wang [21] ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยใช้การตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดแล้วใช้หลักการเปลี่ยนแกนจากแกนอ้างอิงหนึ่งเป็นแกนหมุน เพื่อแยกองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าที่โหลดให้เป็นสองส่วนคือ กระแสกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกระแสกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยสัญญาณกระแสกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะถูกนำไปรวมกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่มาจาก การควบคุมแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้มีผลตอบสนองที่ดีขึ้นเมื่อทำการปลดหรือจ่ายโหลดที่ดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในส่วนของสัญญาณกระแสกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะนำไปผ่านเพื่อนำเอากระแสกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ออกมาแล้วนำไปรวมกับสัญญาณกระแสที่มาจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แต่การใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ เพื่อกรองแยกเอากระแสกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ออกมาอาจทำได้ไม่สมบูรณ์แบบ ทำให้มีสัญญาณกระแสกำลังไฟฟ้าแอกทีฟปนอยู่ในกระแสไฟฟ้าคำสั่งซึ่งเป็นผลให้การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต้องทำงานมากยิ่งขึ้น

Jayaramaiah และ Fernandes [11] นำระบบอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้แบตเตอรี่ในการเริ่มการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว โดยได้จำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Matlab/Simulink) เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าที่สร้างออกมา ในเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของความเร็วย้อนและโหลด จากการศึกษพบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสามารถที่จะรักษาให้คงที่ได้ด้วยการปรับดัชนีการมอดูเลตของระบบอินเวอร์เตอร์ จากผลการทดสอบสามารถที่จะควบคุมแรงดันที่สร้างออกมาให้คงที่ได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของผลการตอบสนองในสภาวะชั่วขณะของระบบควบคุม

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมด้วยระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

1.4.2 เพื่อปรับปรุงและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ในการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาในขณะที่โหลดหรือความเร็วย้อนของตัวขับเคลื่อนกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง

1.4.3 เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนหลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 สร้างแบบจำลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้การจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Matlab/Simulink)

1.5.2 ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดีบีเอสเอ็มที่สามารถใช้งานได้จริง สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ขนาด 0.37 kW, 220/380 V, 50 Hz, 4 ขั้วแม่เหล็ก

1.5.3 ทดสอบและวิเคราะห์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับโหลดสามเฟสแบบสมดุลทั้งในขณะไร้โหลดและที่พิกัดโหลด

1.5.4 ทดสอบและวิเคราะห์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง เมื่อความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อนกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งความเร็วรอบต่ำและสูงกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย เจริญทฤษฎี และ/หรือเชิงประยุกต์

1.6.1 สามารถพัฒนาและเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว

1.6.2 ผลของการวิจัยสามารถที่จะนำไปใช้ในการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง เช่น ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม กังหันน้ำ เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

บทที่ 2

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปจะนิยมนำไปใช้งานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ สำหรับใช้เป็นตัวต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูก หลักการทำงานไม่ซับซ้อน มีความสะดวกและง่ายต่อการบำรุงรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ ปัจจุบันในต่างประเทศรวมทั้งภายในประเทศไทยได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานในสถานะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าน้ำ เป็นต้น โดยในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปจะมีด้วยกันสองแบบคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมโยกับระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง รวมทั้งได้แสดงถึงข้อดี ข้อเสีย ปัญหาของการใช้งานในแต่ละแบบ เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองการทำงาน of เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป

2.2 การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าผลต่างระหว่างความถี่ทางไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ ซึ่งเรียกว่าค่าสลิป (Slip) โดยสามารถแบ่งลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เป็น 3 ลักษณะตามค่าสลิป ดังต่อไปนี้

1. การทำงานในสถานะมอเตอร์ (Motor)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานในช่วงค่าสลิปตั้งแต่ 0 ถึง 1 จะรับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกเพื่อแปรผันเป็นพลังงานกลหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส สำหรับการขับเคลื่อนเพื่อนำไปใช้งานต่างๆ โดยหลักการทำงานเบื้องต้นคือ เมื่อทำการจ่ายไฟให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์เพื่อทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในขดลวดสเตเตอร์ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแปรเปลี่ยนตามค่าเวลาจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กขึ้น เรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็วซิงโครนัส บริเวณรอบๆ ช่องอากาศเมื่อสนามแม่เหล็กหมุนเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้าน

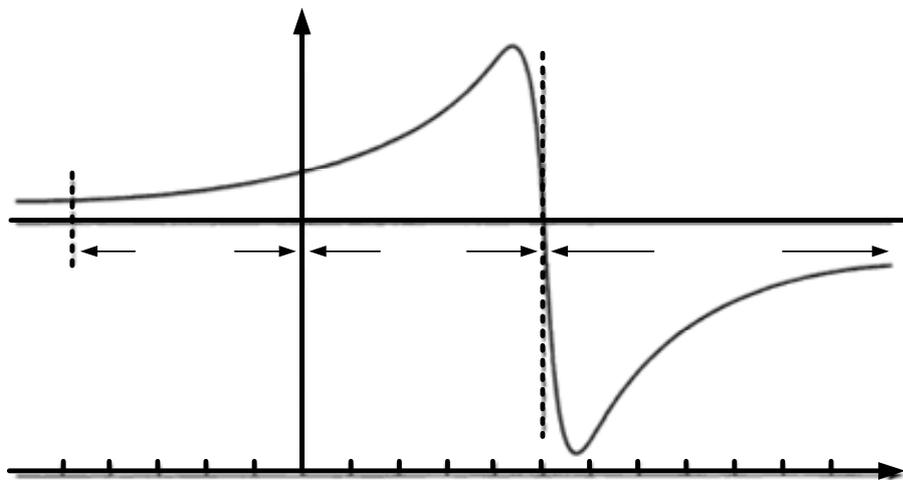
สเตเตอร์ต่อเวลาทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นเมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นรอบๆ ช่องอากาศก็จะสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดโรเตอร์ ทำให้เกิดกระแสโรเตอร์ เกิดฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ตามลำดับ เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ตัดกับฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์จึงทำให้เกิดแรงบิดทางกลขึ้น

2. การทำงานในสภาวะเบรก (Braking)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีช่วงที่ค่าสลิปมีค่ามากกว่า 1 อยู่ ซึ่งเป็นการให้พลังงานไฟฟ้าและทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ จึงทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุน สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการหยุดมอเตอร์อย่างทันทีทันใด โดยหลักการการทำงานนั้นในขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น เมื่อทำการสลับขั้วลำดับของไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางเดิม ทำให้มอเตอร์หยุดหมุนในทันทีแต่จะต้องปลดระบบการจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายออกในทันที เพื่อไม่ให้มอเตอร์หมุนในอีกทิศทางหนึ่ง

3. การทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

กรณีที่ทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น จะต้องมีตัวขับเคลื่อนกำลังขับเคลื่อนที่แกนโรเตอร์ให้หมุนที่ความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส ทำให้สลิปมีค่าน้อยกว่าศูนย์หรือมีค่าติดลบ โดยที่จะต้องได้รับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าตลอดเวลา เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟออกมา จึงสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้



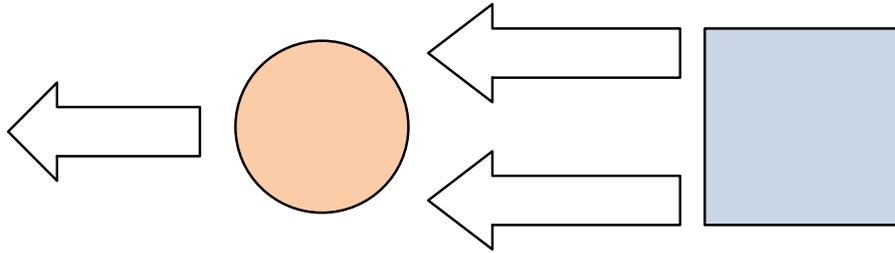
รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ค่าสลิปต่างๆ

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่านอกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำงานในสถานะที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วยังสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ แต่การนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้งานนั้นอาจจะมีปัญหาได้ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกออกแบบให้มีความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส แต่เมื่อนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น จะให้ตัวขับเคลื่อนกำลังหมุนแกนโรเตอร์ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่าพิกัดกำลังที่ออกแบบให้ใช้งานจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะทำให้อายุการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ มีประสิทธิภาพที่ลดลง ส่งผลให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการชำรุดเสียหายได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นในการเลือกใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจึงควรพิจารณาถึงพิกัดกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ด้วย

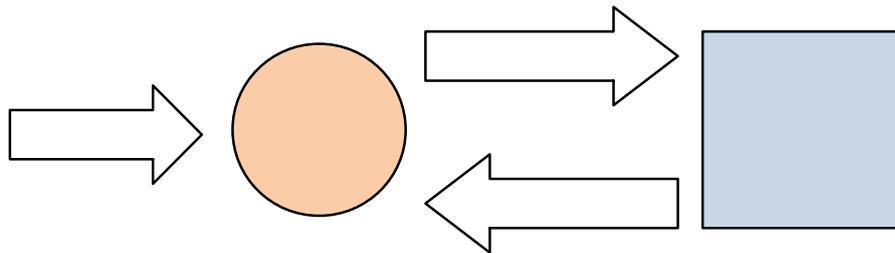
2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า

ในสถานะที่เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้า จะทำงานในสถานะมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าและจ่ายกำลังงานกลออกไปใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.2 แต่ถ้านำตัวขับเคลื่อนกำลังมาขับเคลื่อนโรเตอร์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส (ในขณะนี้สลลิปจะมีค่าเป็นลบ) โดยที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังเชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า จะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟให้แก่ระบบไฟฟ้าหรือจ่ายให้กับโหลด แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลักษณะที่เชื่อมโยงกับระบบนี้ยังจะต้องรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าอยู่เสมอ เพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ผลิตออกมาจะมีขนาดเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงอยู่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่มีค่าคงที่ตลอดเวลาขณะที่ทำการเชื่อมโยงอยู่กับระบบจึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้าและความถี่ อีกทั้งยังสะดวกในการบำรุงรักษาด้วย

จากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าการทำงานจะไม่ยุ่งยากซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งในที่นี้ได้แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

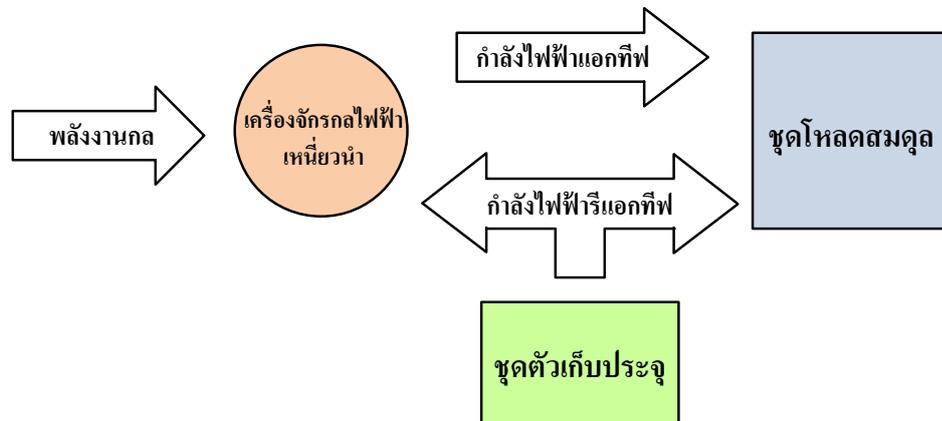
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
1. ทำงานที่ความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น จึงต้องมีตัวควบคุมความเร็วที่แม่นยำในการควบคุมความเร็วโรเตอร์	1. ทำงานที่ความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วโรเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง
2. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตแปรตามค่ามุมกำลังไฟฟ้า	2. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้แปรตามค่าสลลิป
3. ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่โรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง ถึงแม้ว่าระบบจะเกิดการขัดข้อง	3. รับกำลังไฟฟารีแอกทีฟจากระบบเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ไม่สามารถทำงานได้เมื่อระบบเกิดเหตุขัดข้อง
4. มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า	4. มีประสิทธิภาพต่ำกว่า
5. โครงสร้างของโรเตอร์มีความยุ่งยาก เพราะต้องมีส่วนที่แปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก	5. โครงสร้างโรเตอร์ไม่ยุ่งยาก แข็งแรงทนทาน เนื่องจากเป็นบรืสเลสโรเตอร์ (Brush less rotor)
6. ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้า	6. ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงอยู่แล้ว
7. ราคาแพง การออกแบบติดตั้งมีความยุ่งยาก	7. ราคาถูก ออกแบบติดตั้งได้ง่าย
8. การใช้งานและการบำรุงรักษายุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายสูง	8. การบำรุงรักษาง่าย ไม่ยุ่งยาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

พลังงาน

2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาจะสังเกตได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาได้ก็ต่อเมื่อเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าเพื่อดึงกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าเข้ามาในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้ระบบไฟฟ้าต้องจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อระบบไฟฟ้า อีกทั้งเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการขัดข้องจะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้ไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหาสิ่งที่จะช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำงานได้โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งการเชื่อมโยงจากระบบไฟฟ้าก็จะทำให้ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้

จะสังเกตได้ว่าการที่จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานได้นั้นจะต้องได้รับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 หากทำการติดตั้งตัวเก็บประจุซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแทนที่ได้รับจากระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งจะเรียกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้ว่า “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง”

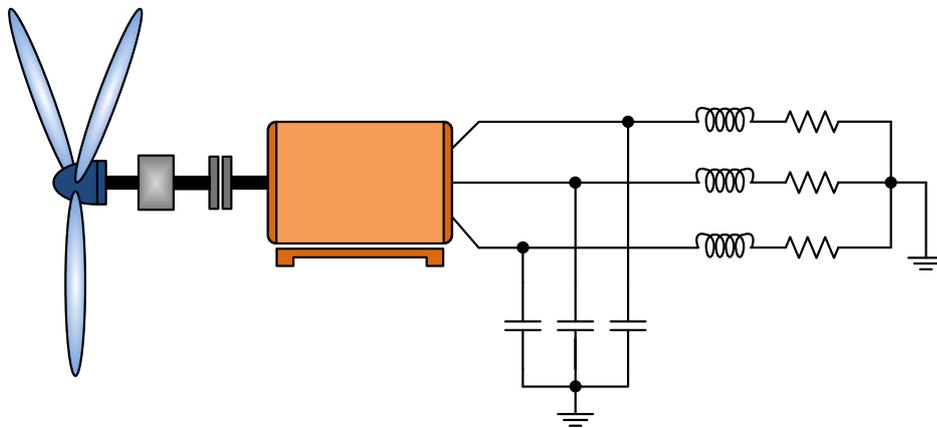


รูปที่ 2.4 การถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

2.4.1 สถานะการกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในขณะที่โรเตอร์ถูกขับด้วยตัวขับเคลื่อนกำลังหมุนที่ความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกจ่ายทางด้านสเตเตอร์ เมื่อวัดที่ขั้วทางด้านสเตเตอร์จะพบว่ามีความแรงดันไฟฟ้าขนาดประมาณ 1-2 % ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดซึ่งเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กตกค้างภายในขดลวดโรเตอร์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าจะมีความถี่เท่ากับความถี่ที่ความเร็วซิงโครนัส เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ปลายขดลวดสเตเตอร์ โดยที่สามารถต่อเป็นแบบสตาร์หรือเดลต้าก็ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการแรงดันไฟฟ้า รูปที่ 2.5 แสดงการประยุกต์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แบบกระตุ้นตัวเองที่ได้รับพลังงานลม โดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบสตาร์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดสเตเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์สูงขึ้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อเนื่องกลับมาให้กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์มีค่ามากขึ้น และเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงจุดอิ่มตัวของขดลวด จึงจะเกิดเสถียรภาพในการทำงาน ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สร้างออกมามีค่าคงที่



รูปที่ 2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

2.4.2 ปัญหาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

ในสถานะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ ทำให้ไฟฟ้าที่ผลิตออกมานั้นมีคุณภาพเสมือนจากระบบไฟฟ้า จึงเป็นข้อดีของระบบทำให้สะดวกต่อการนำไฟฟ้าใช้งาน อีกทั้งเมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปในปริมาณเท่าใดก็ได้ ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณโหลด ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้มากกว่าปริมาณโหลดส่วนที่เหลือก็จะถูกป้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้า แต่ถ้าผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ในปริมาณที่น้อยกว่าโหลด ก็จะดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าเข้ามาช่วย จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดหรือชนิดของโหลด

แต่สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองนั้นมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ถึงแม้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถที่สามารกระตุ้นตัวเองเพื่อให้ทำงานในสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการติดตั้งตัวเก็บประจุทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า

รีแอกทีฟแทนการรับจากระบบไฟฟ้า แต่ไฟฟ้าที่ผลิตได้ออกมานั้นยังไม่สามารถที่จะนำไปจ่ายให้กับโหลดได้ เนื่องจากจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นตัวเองจะขึ้นอยู่กับขนาดตัวเก็บประจุ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่สร้างออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าไม่แน่นอนจะเปลี่ยนไปตามขนาดตัวเก็บประจุ นอกจากนี้การที่ไม่ได้เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าทำให้ความถี่ที่ได้เป็นความถี่ที่เกิดขึ้นเองโดยจะแปรตามขนาดตัวเก็บประจุและโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ จึงเป็นปัญหาในการนำไปใช้งาน เพราะโหลดจะได้รับกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่านั้น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากก็จะจ่ายให้กับโหลดทั้งหมด ทำให้โหลดรับกำลังไฟฟ้ามากเกินไปอาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหายได้ แต่ถ้าโหลดมีปริมาณที่มากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะส่งผลให้ไม่เกิดการกระตุ้นตัวเอง ดังนั้นในสถานะการกระตุ้นตัวเองจึงจำเป็นที่จะต้องจัด โหลดให้มีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย

2.5 สรุป

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่เชื่อมโยงอยู่กับระบบไฟฟ้านั้นไม่มีความยุ่งยากเพียงแต่ควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้มีความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัสก็สามารถทำงานได้ เพราะจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้า แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการศึกษานั้นจะไม่สามารถควบคุมจุดทำงานอันได้แก่ แรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้โดยตรงเนื่องจากจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นที่จะต้องนำเสนอการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานและจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, การเลือกขนาดโหลด และการคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสม เพื่อที่จะนำไปสร้างแบบจำลองการทำงานซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 3

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะพลวัตด้วยวงจรมูลบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) และวิเคราะห์พฤติกรรมค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่ส่งผลต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณและออกแบบหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและมีความสอดคล้องกับการทดสอบจริง

3.2 การแปลงระบบไฟฟ้า

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจถึงหลักการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการแปลงระบบสามเฟส (abc) มาเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$) และแปลงเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน (dq) เป้าหมายของการแปลงระบบนั้นเพื่อช่วยในเรื่องของการลดรูปสมการ เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และคำนวณ

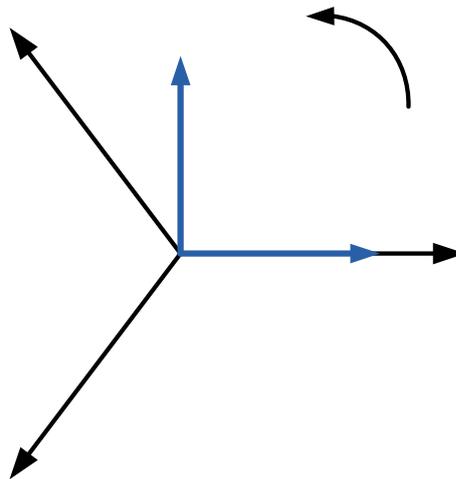
3.2.1 การแปลงระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$)

กำหนดให้ระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$) วางเปรียบเทียบกับระบบสามเฟส (abc) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งการแปลงระบบสามเฟสมาเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$) นั้นสามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) จะเห็นว่าค่าตัวประกอบเท่ากับ $\frac{2}{3}$ อยู่ ค่านี้จะเป็นส่วนที่สำคัญของการแปลงระบบ ที่ได้จากการปรับเวกเตอร์สามเฟสมาเป็นสองเฟส และสามารถแปลงกลับอยู่ในเป็นระบบสามเฟสได้เช่นเดิมดังแสดงในสมการ (3.2)

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



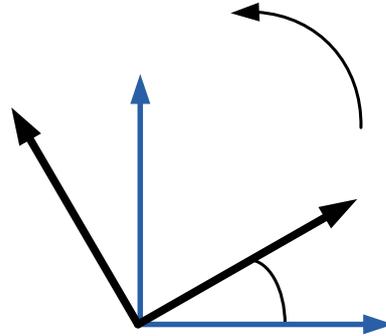
รูปที่ 3.1 ระบบสามเฟสและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง

3.2.2 การแปลงระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$) เป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน (dq)

จากสมการ (3.3) แสดงถึงการแปลงระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ($\alpha\beta$) มาเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน (dq) จะเห็นว่ามิมุมหมุน (ωt) เข้ามาเกี่ยวข้อง และสามารถแปลงกลับมาเป็นในรูปแบบแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ได้เหมือนเดิม ดังแสดงในสมการ (3.4)

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.2 ระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหนึ่งและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน

3.3 ระบบแรงดันไฟฟ้า

สำหรับระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (abc) แบบสมมูลนั้น สามารถแปลงเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$) ได้ตามรูปแบบทั่วไปดังแสดงในสมการ (3.1) ระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมมูลจะทำให้ค่าอ้างอิงศูนย์ (Zero sequence) มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถแสดงองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$) ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าสามเฟสมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$v_a = V_m \cos \omega t \quad (3.6)$$

$$v_b = V_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.7)$$

$$v_c = V_m \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.8)$$

3.4 ระบบกระแสไฟฟ้า

จากสมการ (3.1) แสดงถึงรูปแบบทั่วไปของการแปลงระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ดังนั้นจึงได้นำมาประยุกต์เข้ากับระบบกระแสไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ถ้ากระแสไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมมูลโดยมีมุมห่างกันแต่ละเฟสเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า จะทำให้ผลรวมของกระแสไฟฟ้าทุกเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ในสมการ (3.9) กระแสไฟฟ้าในแกนศูนย์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถพิจารณาสมการ (3.9) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.5 ระบบกำลังไฟฟ้า

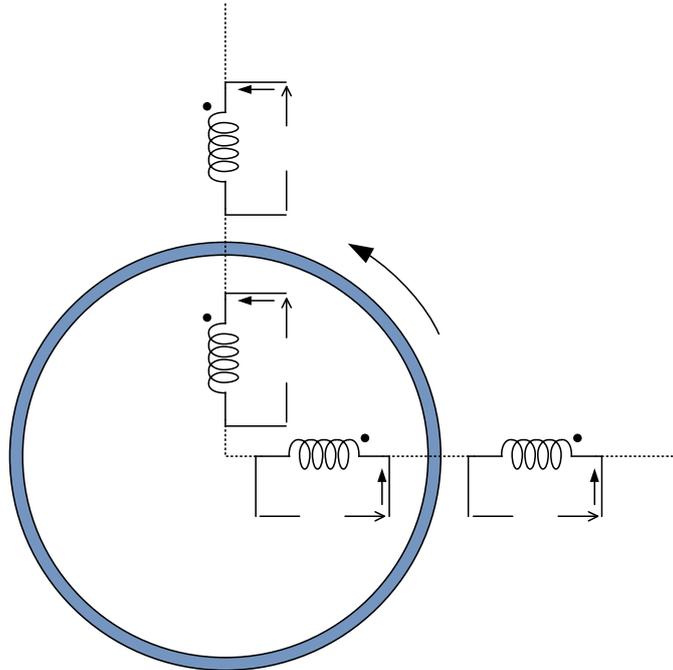
การหาค่ากำลังไฟฟ้าสามารถหาจากองค์ประกอบของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ซึ่งต้องมีค่าตัวประกอบ $\frac{3}{2}$ คูณเข้าไป เพื่อรักษากำลังไฟฟารวมให้มีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส ซึ่งสามารถแสดงสมการกำลังไฟฟ้าได้จาก

$$P_e = \frac{3}{2} (i_\alpha v_\alpha + i_\beta v_\beta) \quad (3.11)$$

3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นสมการพื้นฐานของการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้หลักการวิเคราะห์

วงจรสมมูลบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือมีความง่าย สะดวกต่อการวิเคราะห์ทั้งการทำงานในเงื่อนไขของสภาวะคงตัวและสภาวะพลวัต รูปแบบทั่วไปของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Kron's Primitive Machine [23] ดังแสดงดังรูปที่ 3.3

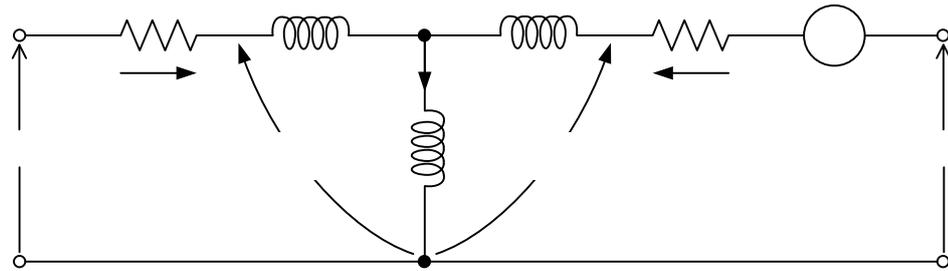


รูปที่ 3.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส

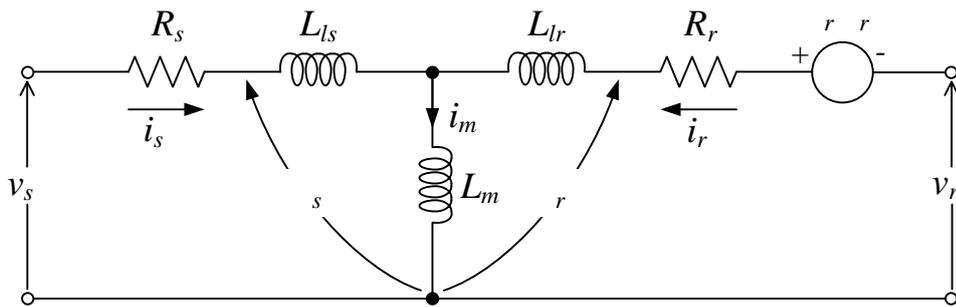
จากรูปที่ 3.3 แสดงถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยวิเคราะห์แบบ Kron's Primitive Machine ที่อาศัยขดลวดตัวนำจำนวน 4 ขด นำมาสร้างสมการ ซึ่งมีขดลวดตัวนำ 2 ขด ในแนวแกนอ้างอิง α และขดลวดตัวนำอีก 2 ขด ในแนวแกนอ้างอิง β หลังจากการสร้างแบบจำลองของ Primitive Machine แล้วจึงนำทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบทั่วไปมาใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ซึ่งจะได้รูปแบบเมทริกซ์สมการแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังแสดงในสมการ (3.12)

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{r\alpha} \\ v_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) สามารถนำมาแปลงเป็นวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4



(ก) แกนอ้างอิง α



(ข) แกนอ้างอิง β

รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส

วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำรูปที่ 3.4 กำหนดให้วงจรสมมูลทางด้านขดลวดสเตเตอร์แทนด้วย “ s ” และวงจรสมมูลทางด้านขดลวดโรเตอร์แทนด้วย “ r ” สามารถวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

สมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์

สเตเตอร์

$$v_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + p\psi_{s\alpha} \tag{3.13}$$

$$v_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + p\psi_{s\beta} \tag{3.14}$$

$$\vec{V}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta} \tag{3.15}$$

$v_{s\alpha}$

R
 $i_{s\alpha}$

โรเตอร์

$$v_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + p\psi_{r\alpha} + \omega_r \psi_{r\beta} \quad (3.16)$$

$$v_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + p\psi_{r\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha} \quad (3.17)$$

$$\vec{V}_r = v_{r\alpha} + jv_{r\beta} \quad (3.18)$$

สมการฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์

สเตเตอร์

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \quad (3.19)$$

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \quad (3.20)$$

$$\vec{\psi}_s = \psi_{s\alpha} + j\psi_{s\beta} = L_s \vec{I}_s + L_m \vec{I}_r \quad (3.21)$$

โรเตอร์

$$\psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} \quad (3.22)$$

$$\psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} \quad (3.23)$$

$$\vec{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta} = L_m \vec{I}_s + L_r \vec{I}_r \quad (3.24)$$

สมการฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าในแกนอากาศ

$$\psi_{m\alpha} = L_m i_{m\alpha} = L_m (i_{s\alpha} + i_{r\alpha}) \quad (3.25)$$

$$\psi_{m\beta} = L_m i_{m\beta} = L_m (i_{s\beta} + i_{r\beta}) \quad (3.26)$$

สมการ (3.27) แสดงกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตของขดลวดสเตเตอร์เมื่อทำงานในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของขดลวดสเตเตอร์เมื่อทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกนอ้างอิงทั้งสองเฟส

$$P_e = \frac{3}{2} (i_{s\alpha} v_{s\alpha} + i_{s\beta} v_{s\beta}) \quad (3.27)$$

แรงบิดทางกลที่เกิดจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถเขียนแทนได้จาก [23]

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \bar{\psi}_m \times \bar{I}_r \quad (3.28)$$

จากสมการ (3.28) สามารถเขียนใหม่ในรูปของสมการแรงบิดทางกลจากความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์บนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ได้ดังต่อไปนี้

$$T_e = \frac{3}{2} p_p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (3.29)$$

และสามารถเขียนในรูปแบบของสมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำได้จาก

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_m \quad (3.30)$$

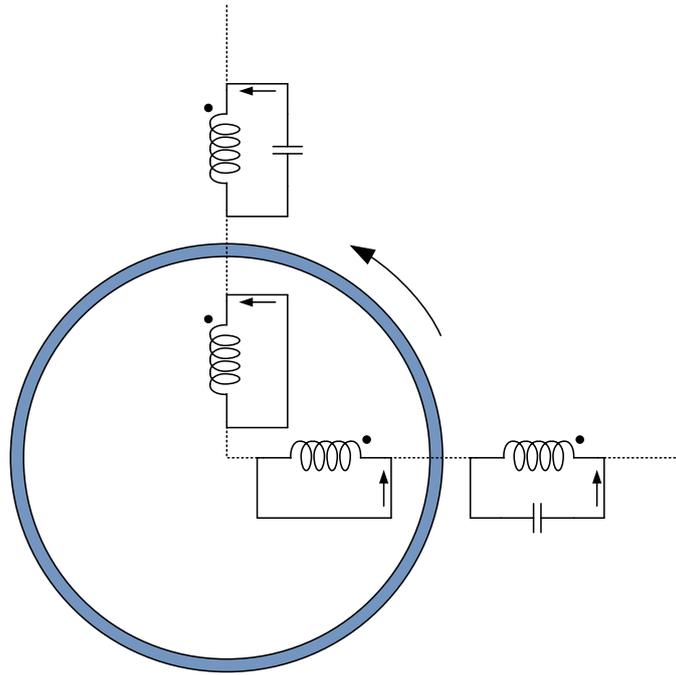
สมการกำลังไฟฟ้าทางกลเมื่อทำงานในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือความต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้จาก

$$P_m = T_e \omega_m \quad (3.31)$$

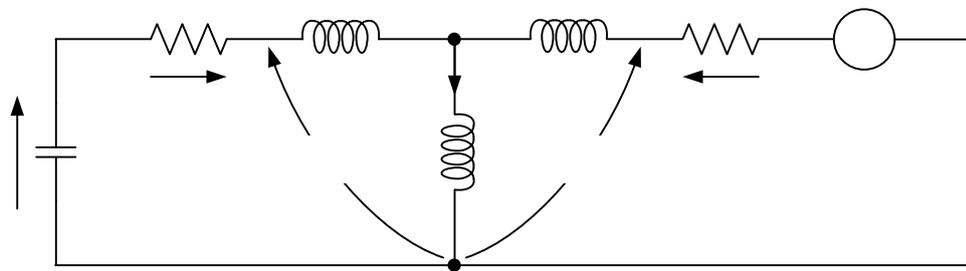
3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวจะมีลักษณะของการวิเคราะห์เช่นเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่จะมีข้อแตกต่างในส่วนของการต่อชุดตัวเก็บประจุทางด้านขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งชุดตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่กระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับจ่ายให้กับชุดโหลด และการที่จะให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะต้องมีชุดตัวขับเคลื่อนกำลังมาขับให้โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส

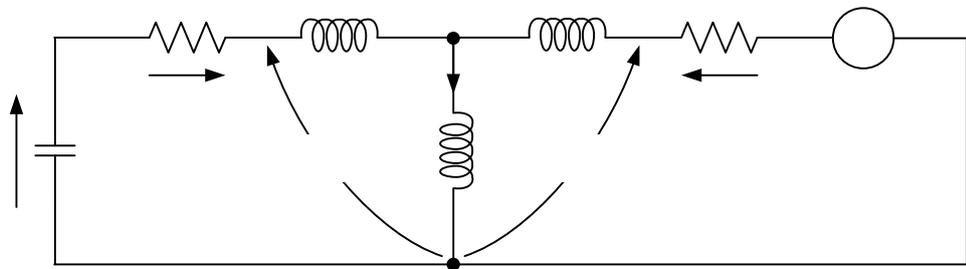
รูปที่ 3.5 แสดงถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ Kron's Primitive Machine เช่นเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 3.3 สังเกตว่าทางขดลวดด้านสเตเตอร์จะถูกต่อเข้ากับชุดตัวเก็บประจุและทางด้านปลายขดลวดโรเตอร์จะถูกต่อรวมกันลักษณะการต่อคล้ายกับการลัดวงจร ซึ่งในรูปที่ 3.5 สามารถวิเคราะห์เพื่อแสดงรายละเอียดให้อยู่ในรูปแบบวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส



(ก) แกนอ้างอิง α



(ข) แกนอ้างอิง β

รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส

รูปที่ 3.6 เป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ในสถานะไร้โหลด ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง เพื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเงื่อนไขที่จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถกระตุ้นตัวเองได้นั้นจะต้องมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ในตัวขดลวดโรเตอร์และตัวเก็บประจุที่นำมาต่อเข้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์จะต้องมีขนาดเหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [14],[15],[16]

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.6 ขณะที่ยังไม่ได้อัดตัวเก็บประจุและโหลดนั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถแสดงสมการแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเทอมของแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$) ได้จาก [17]

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองนั้นจะต้องต่อตัวเก็บประจุเข้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุได้จาก

$$V_{C\alpha} = \frac{1}{C} \int i_{C\alpha} dt + V_{C\alpha 0} \quad (3.33)$$

$$V_{C\beta} = \frac{1}{C} \int i_{C\beta} dt + V_{C\beta 0} \quad (3.34)$$

โดยที่ $V_{C\alpha 0}$ และ $V_{C\beta 0}$ คือค่าองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ตามลำดับ และในขดลวดโรเตอร์นั้นจะมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ภายในตัวโรเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงสมการทางฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นตัวเองได้จาก

$$\psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} + \psi_{r\alpha 0} \quad (3.35)$$

$$\psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} + \psi_{r\beta 0} \quad (3.36)$$

โดย $\psi_{r\alpha 0}$ และ $\psi_{r\beta 0}$ เป็นองค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกค้างในแกนโรเตอร์ เมื่อมีพลังงานทางกลจากตัวขับเคลื่อนกำลังมาขับให้ขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุน จะทำให้สร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้มาจากแม่เหล็กตกค้างภายในตัวขดลวดโรเตอร์ โดยเขียนสมการได้เป็น

$$\omega_r \psi_{r\alpha} = \omega_r L_m i_{s\alpha} + \omega_r L_r i_{r\alpha} + \omega_r \psi_{r\alpha 0} \quad (3.37)$$

$$\omega_r \psi_{r\beta} = \omega_r L_m i_{s\beta} + \omega_r L_r i_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\beta 0} \quad (3.38)$$

ดังนั้นสามารถแสดงรูปแบบสมการทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองในเงื่อนไขที่ยังไม่ได้ต่อโหลด ซึ่งได้วิเคราะห์มาจากสมการ (3.32) ถึง (3.38) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \\ \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -\omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

โดยสมการ (3.39) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสเตต (State equation) ได้เป็น

$$ApI_G + BI_G + V_G = 0 \quad (3.40)$$

$$\text{กำหนดให้ } A = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_m & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix}, I_G = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, V_G = \begin{bmatrix} V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \\ \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -\omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix}$$

จากสมการ (3.40) ใช้หลักการเมทริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) ในการแก้สมการ เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จาก

$$pI_G = -A^{-1}BI_G - A^{-1}V_G \quad (3.41)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} pi_{s\alpha} \\ pi_{s\beta} \\ pi_{r\alpha} \\ pi_{r\beta} \end{bmatrix} = L_\sigma \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r L_m^2 & R_r L_m & \omega_r L_r L_m \\ -\omega_r L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_r L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_r L_s L_r \\ \omega_r L_s L_m & R_s L_m & \omega_r L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_r V_{C\alpha} + L_m \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -L_r V_{C\beta} - L_m \omega_r \psi_{r\alpha 0} \\ L_m V_{C\alpha} - L_s \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ L_m V_{C\beta} + L_s \omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

กำหนดให้
$$L_\sigma = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}$$

เมื่อต่อโหลดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยพิจารณาจากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.7 สามารถที่จะวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดได้ดังนี้

$$i_{C\alpha} = i_{s\alpha} - i_{L\alpha} \quad (3.43)$$

$$i_{C\beta} = i_{s\beta} - i_{L\beta} \quad (3.44)$$

$$v_{L\alpha} = R_L i_{L\alpha} + L_L pi_{L\alpha} \quad (3.45)$$

$$v_{L\beta} = R_L i_{L\beta} + L_L pi_{L\beta} \quad (3.46)$$

พิจารณาสมการ (3.33), (3.34), (3.43) และ (3.44) จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด ซึ่งเขียนในรูปสมการอนุพันธ์แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะต่อโหลดได้เป็น

$$pv_{L\alpha} = \frac{1}{C} (i_{s\alpha} - i_{L\alpha}) \quad (3.47)$$

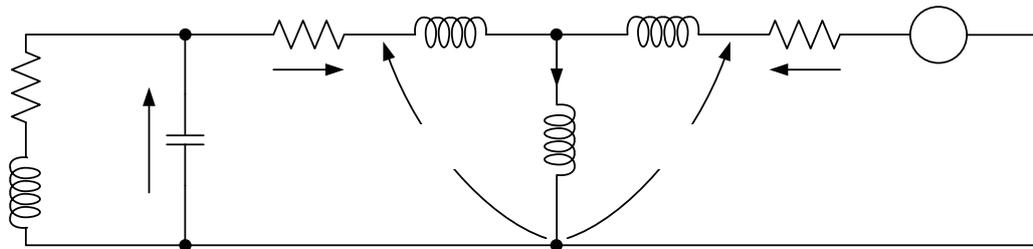
$$pv_{L\beta} = \frac{1}{C} (i_{s\beta} - i_{L\beta}) \quad (3.48)$$

และใช้สมการ (3.45) และ (3.46) ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด ดังนั้นสามารถเขียนสมการอนุพันธ์กระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

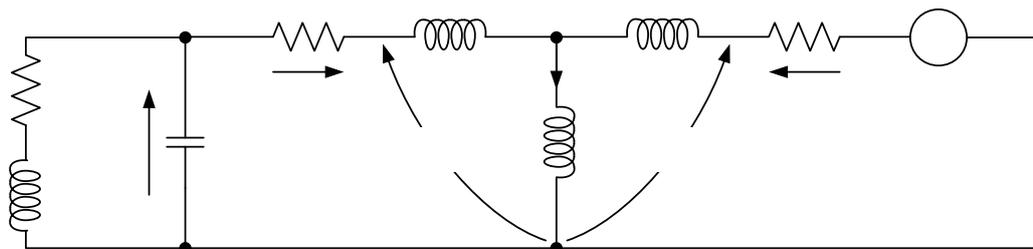
$$p_{i_{L\alpha}} = \frac{1}{L_L}(v_{L\alpha} - R_L i_{L\alpha}) \tag{3.49}$$

$$p_{i_{L\beta}} = \frac{1}{L_L}(v_{L\beta} - R_L i_{L\beta}) \tag{3.50}$$

จากการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยอาศัยสมการที่ได้ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดดังกล่าวไว้ข้างต้นในการอธิบายถึงพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ซึ่งสามารถที่จะนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณการทำงานในสถานะชั่วขณะและสถานะคงตัว



(ก) แกนอ้างอิง α



(ข) แกนอ้างอิง β

รูปที่ 3.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเมื่อทำการจ่ายโหลด

3.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

เมื่อทำการต่อโหลดในลักษณะการต่อแบบแยกเดี่ยวเข้ากับขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) และค่ากระแสกระตุ้น (I_m) ไม่สามารถที่จะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ได้เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทั่วไป

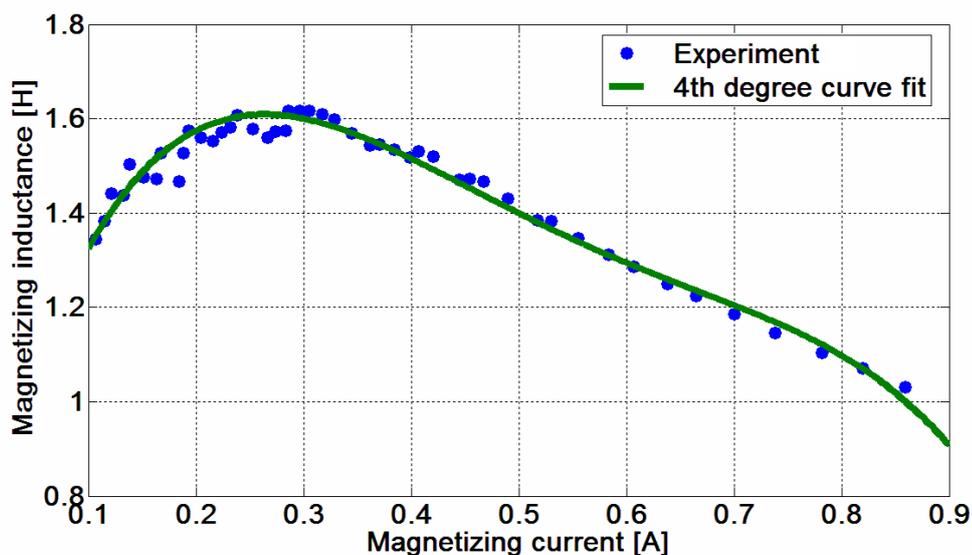
เพราะจะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นและทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อันจะส่งผลโดยตรงต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งในสภาวะพลวัตและสภาวะคงตัว

รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้น ซึ่งได้จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยอาศัยหลักการทดสอบแบบไร้โหลด (No-load test) ค่ากระแสกระตุ้นสามารถคำนวณหาได้จาก

$$I_m = \sqrt{(i_{s\alpha} + i_{r\alpha})^2 + (i_{s\beta} + i_{r\beta})^2} \quad (3.51)$$

โดยสัญลักษณ์จุด “•” เป็นการแสดงค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากการทดสอบ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นที่ใช้ทดสอบค่าต่างๆ และจะใช้หลักการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) อธิบายลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว ด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับที่ 4 เพื่อยืนยันถึงความถูกต้องของค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิด ดังเส้นกราฟความสัมพันธ์ตามรูปที่ 3.8 โดยสมการดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้จาก

$$L_m = -15.28I_m^4 + 34.45I_m^3 - 28.08I_m^2 + 8.473I_m + 0.698 \quad (3.52)$$



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้น

ในสมการ (3.52) ได้แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้น เพื่อที่จะนำไปสร้างแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้นทำงานอย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่สภาวะปกติจนถึงสภาวะอิ่มตัว

3.9 การคำนวณและออกแบบขนาดตัวเก็บประจุ

กระบวนการกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้นนั้นจะต้องอาศัยตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม โดยงานนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุ โดยใช้หลักการของวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งจะพิจารณาการต่อตัวเก็บประจุในสภาวะรีโพลดเป็นหลัก เมื่อมีพลังงานทางกลจากตัวขับเคลื่อนกำลังขับให้โรเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบใดๆ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากแม่เหล็กตกค้างในตัวโรเตอร์ โดยจะละเลยค่าแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์และสเตเตอร์ ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส ($V_{m\alpha\beta,ph}$) มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุต่อเฟส ($V_{C\alpha\beta,ph}$) จึงทำให้วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้นมีลักษณะเป็นวงจรเรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุต่อเฟสที่เหมาะสมได้จาก

$$V_{m\alpha\beta,ph} = V_{C\alpha\beta,ph} \quad (3.53)$$

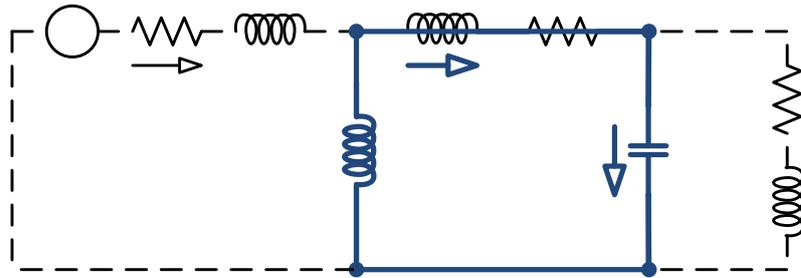
$$j\omega_r \psi_{m\alpha\beta} = \frac{i_{C\alpha\beta,ph}}{-j\omega_r C_{min,ph}} \quad (3.54)$$

กำหนดให้ $\psi_{m\alpha\beta,ph} = L_m i_{m\alpha\beta,ph}$ และ $i_{m\alpha\beta,ph} = i_{C\alpha\beta,ph}$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในสภาวะรีโพลดได้คือ

$$C_{min,ph} = \frac{1}{\omega_r^2 L_m} \times 3 \quad (3.55)$$

จากสมการ (3.55) ขนาดตัวเก็บประจุต่อเฟสที่เหมาะสมสำหรับกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้นั้น จะเลือกค่าความเหนี่ยวนำร่วมในช่วงไม่อิ่มตัว (Unsaturation) โดยพิจารณาได้จากบริเวณที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมมีค่าสูงสุดในรูปที่ 3.8 ซึ่งสามารถเลือกค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากการทดสอบ

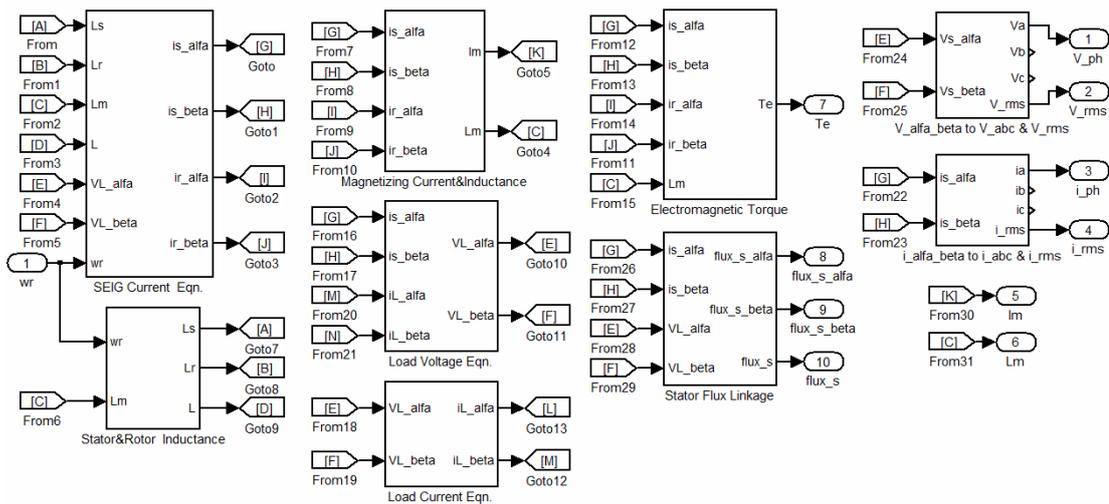
โดย $L_m = L_{unsaturation} \cong 1.62 \text{ H}$ เพราะฉะนั้นขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าเท่ากับ $C_{min,ph} \cong 18.75 \mu\text{F}$



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลที่ใช้หลักการวงจรเรโซแนนซ์ในการวิเคราะห์หาขนาดตัวเก็บประจุ

3.10 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองและผลการทดสอบ

รูปที่ 3.10 แสดงแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองขนาด 0.37 kW, 220/380 V, 1.8/1.05A, 50 Hz, 4 ขั้วแม่เหล็กและใช้ขนาดตัวเก็บประจุขนาด $18 \mu\text{F}$ ที่ได้ ออกแบบและสร้างขึ้นมา โดยนำสมการที่ได้มาจากการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดมา สร้างบล็อกสมการด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink



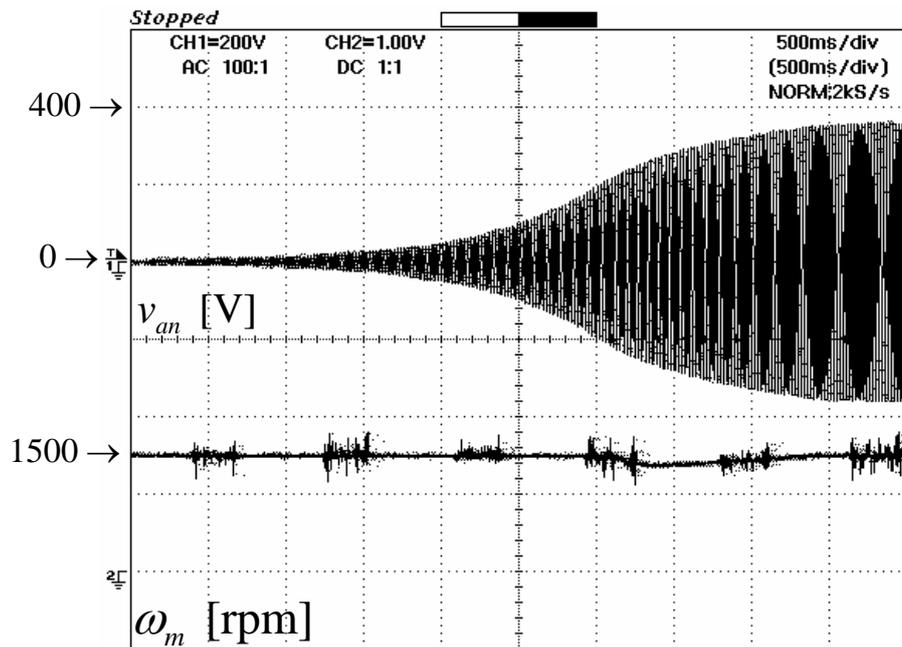
รูปที่ 3.10 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

จากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่ใช้ตัวเก็บประจุช่วยในการกระตุ้น สามารถแสดงผลการทดสอบในสภาวะการทำงานที่เงื่อนไขต่างๆ เปรียบเทียบกับการทดสอบจริงเพื่อเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

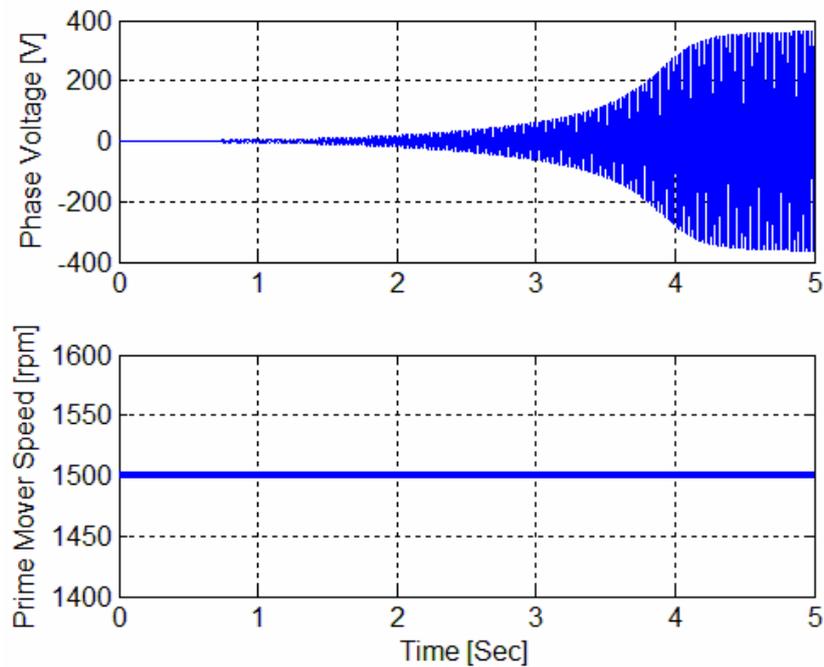
จากรูปที่ 3.11 (ก) แสดงคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (v_{an}) ที่ได้จากการทดสอบจริงในสภาวะเริ่มการทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ตัวขับเคลื่อนกำลังมีค่าความเร็วรอบ (ω_m) คงที่เท่ากับ 1500 rpm ในสภาวะไร้โหลด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเก็บประจุจะสามารถช่วยในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองในรูปที่ 3.11 (ข) มีความสอดคล้องกันกับคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากการทดสอบจริง และได้ทำการวัดคลื่นกระแสไฟฟ้า (i_a) และแรงบิด (T_e) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในรูปที่ 3.12 (ก) จะสังเกตได้ว่าคลื่นกระแสไฟฟ้าจะเริ่มเพิ่มขึ้นตามคลื่นแรงดันไฟฟ้าทำให้แรงบิดจะเพิ่มขึ้นในทางลบ ซึ่งแสดงว่าทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจากการทดสอบแบบจำลองในรูปที่ 3.12 (ข) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันกับการทดสอบจริง

จากรูปที่ 3.13 (ก) แสดงคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ได้จากการทดสอบจริงในสภาวะคงตัวภายใต้เงื่อนไขที่ตัวขับเคลื่อนกำลังมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบจาก 1500 rpm ลดลงมาเหลือ 1100 rpm และกลับเข้าสู่ความเร็วรอบที่ 1500 rpm ซึ่งทำการทดสอบในสภาวะไร้โหลดจะเห็นว่าคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสมีค่าลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อนกำลัง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองในรูปที่ 3.13 (ข) และจากการวัดคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.14 (ก) แสดงคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ลดลงตามคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเช่นเดียว และจะส่งผลต่อแรงบิดทำให้ในช่วงที่กระแสไฟฟ้าลดลงคลื่นแรงบิดก็จะลดลงตามซึ่งเป็นไปทางเดียวกันกับแบบจำลองในรูปที่ 3.14 (ข)

จากคลื่นแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 3.15 (ก) ที่ได้จากการทดสอบจริงในสภาวะคงตัวภายใต้เงื่อนไขที่ตัวขับเคลื่อนกำลังมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบแบบขึ้นจาก 1500 rpm ลดลงมาเหลือ 1300 rpm, 1100 rpm และกลับเข้าสู่ความเร็วรอบที่ 1500 rpm ตามลำดับ โดยทำงานในสภาวะไร้โหลดจะเห็นว่าคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ค่าลดลงตามความเร็วรอบที่แปรเปลี่ยน ซึ่งจากผลการจำลองในรูปที่ 3.15 (ข) จะเห็นถึงแนวโน้มการทำงานที่ใกล้เคียงกันกับการทดสอบจริง และจะเห็นว่าคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองในรูปที่ 3.16 (ข) มีความสอดคล้องกันกับคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก)

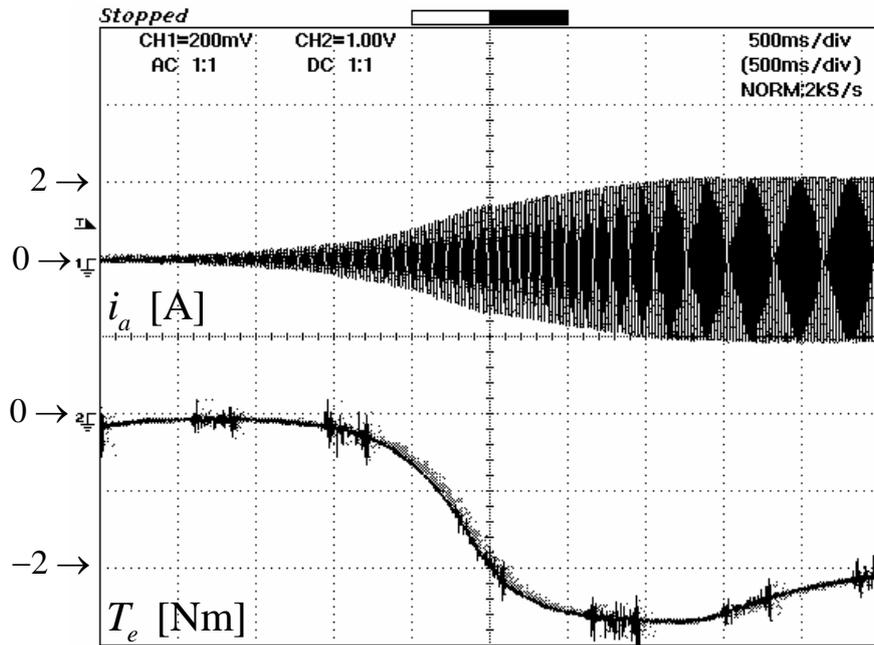


(ก) ผลการทดสอบจริง

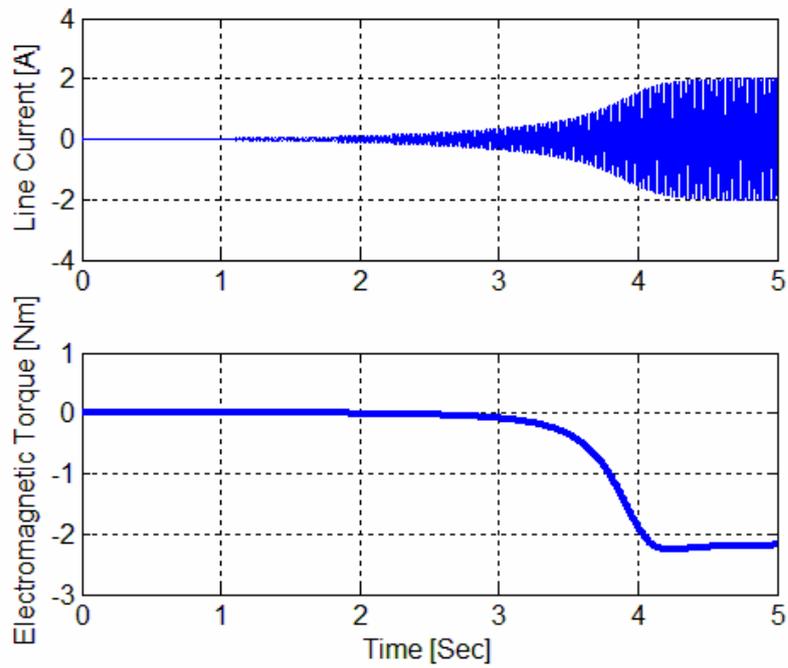


(ข) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

รูปที่ 3.11 คลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสและความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังในสภาวะเริ่มทำงาน

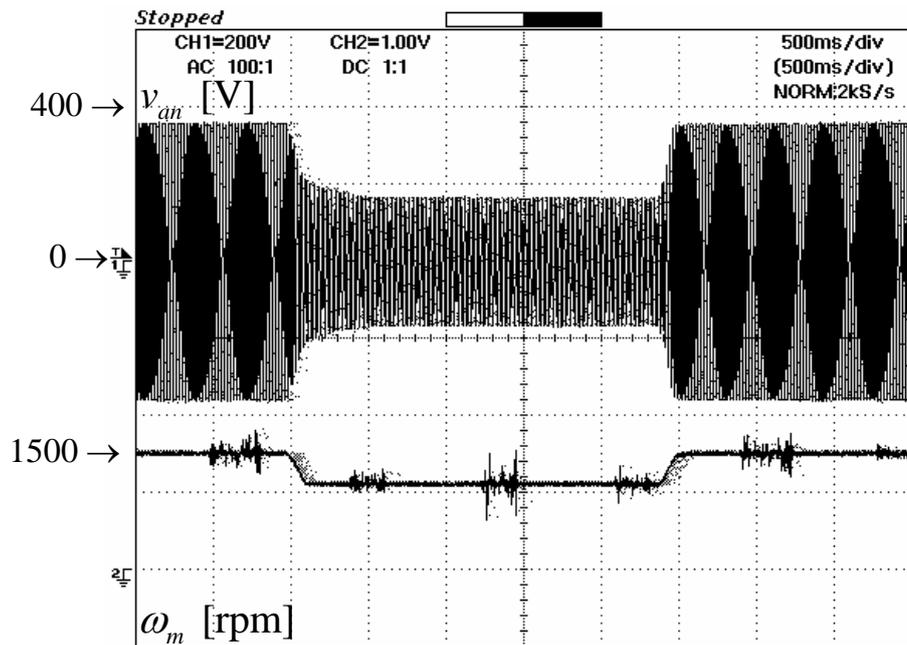


(ก) ผลการทดสอบจริง

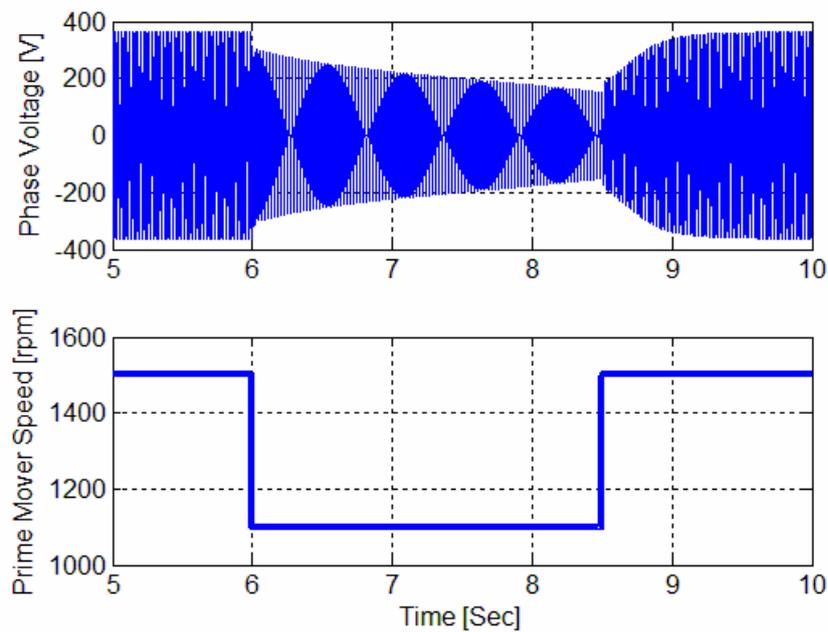


(ข) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

รูปที่ 3.12 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดในสภาวะเริ่มทำงาน

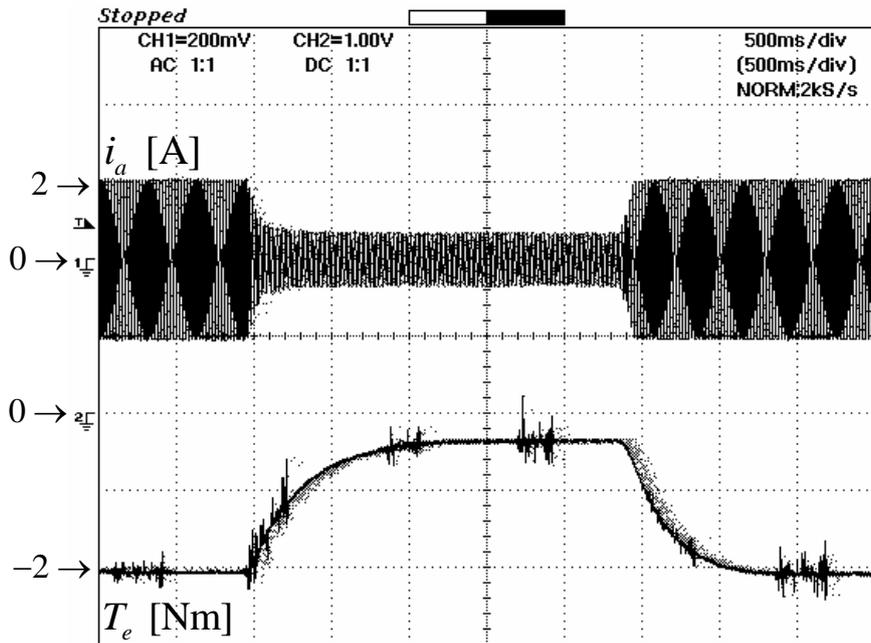


(ก) ผลการทดสอบจริง

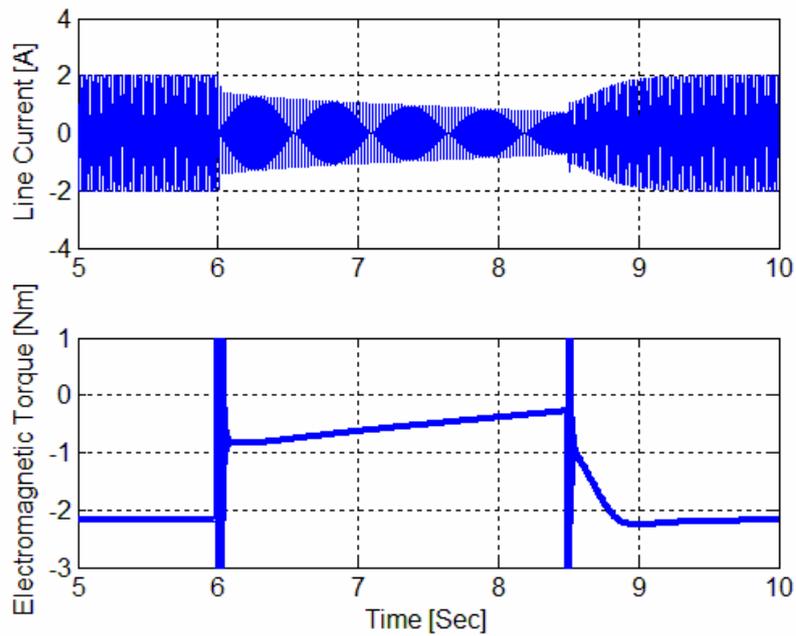


(ข) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

รูปที่ 3.13 คลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสและความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังในสภาวะคงตัว

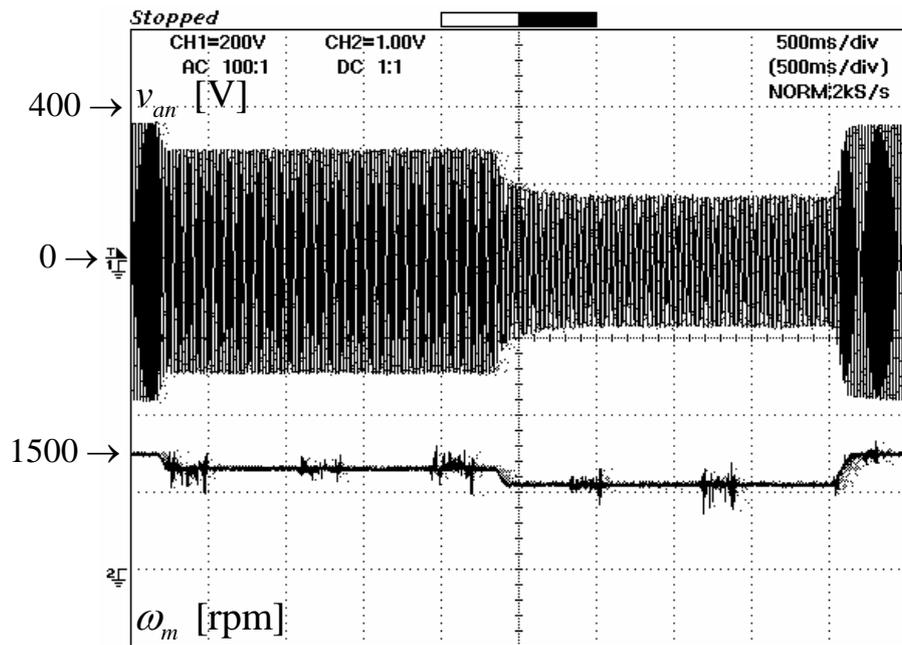


(ก) ผลการทดสอบจริง

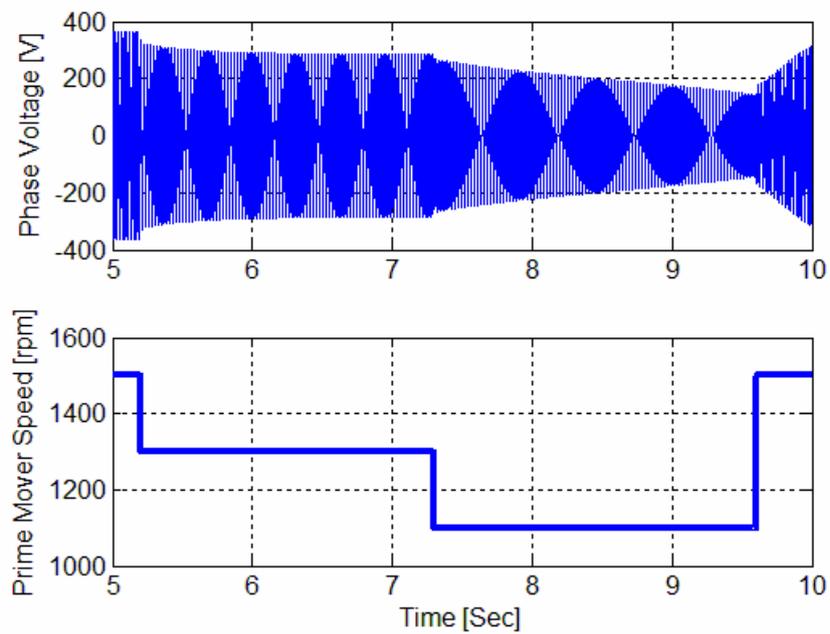


(ข) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

รูปที่ 3.14 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดในสภาวะคงตัว

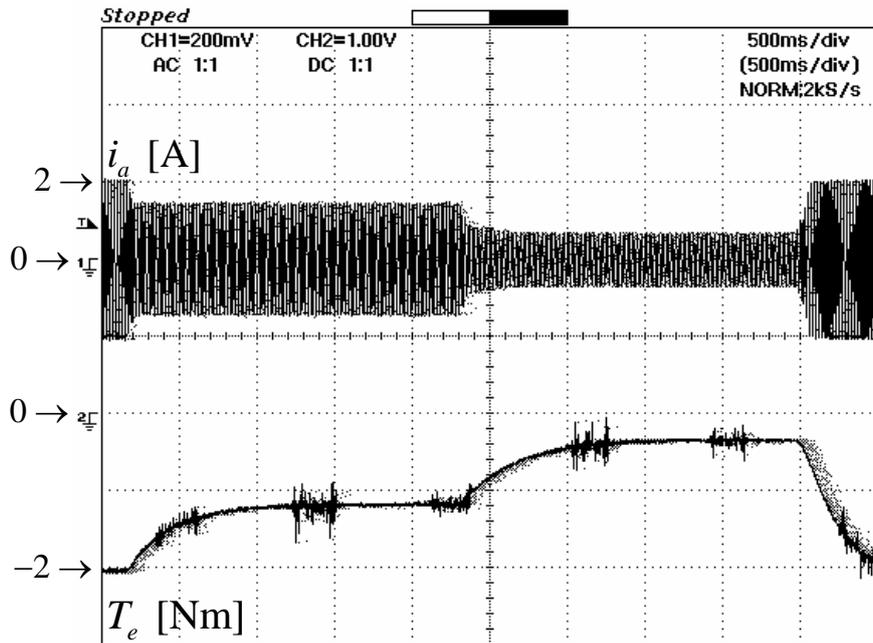


(ก) ผลการทดสอบจริง

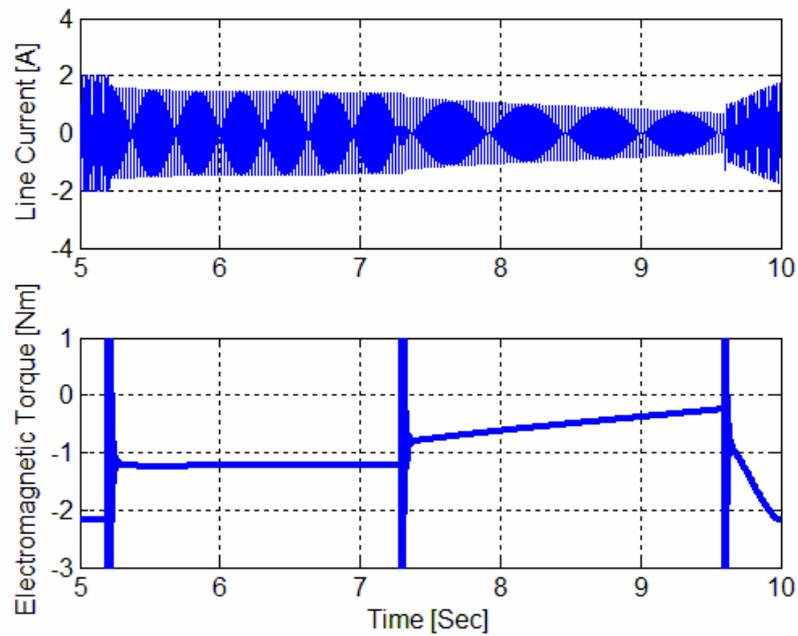


(ข) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

รูปที่ 3.15 คลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสและความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังในสภาวะคงตัว



(ก) ผลการทดสอบจริง



(ข) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

รูปที่ 3.16 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงบิดในสภาวะคงตัว

3.11 สรุป

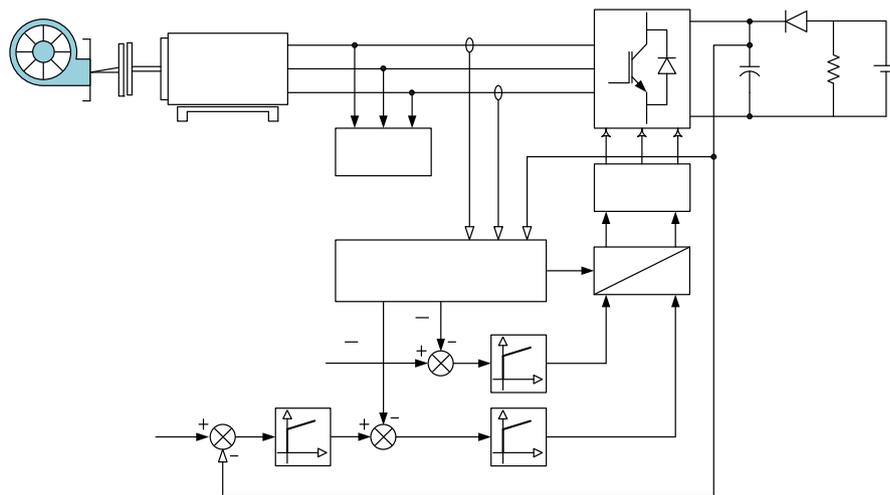
ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยว โดยทำการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลบนแกนอ้างอิงนี้ สองเฟส ($\alpha\beta$) รวมทั้งวิเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าค่าความเหนี่ยวนำร่วมเมื่อทำงานในสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะมีอิทธิพลต่อการทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกมีเสถียรภาพ อีกทั้งยังสามารถนำมาคำนวณและออกแบบหาขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมสำหรับการกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อได้ทำการวิเคราะห์และเข้าใจในหลักการกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการทำงาน ซึ่งจากการจำลองการทดสอบที่ได้แสดงไว้ดังกล่าวในข้างต้นจะเห็นถึงความถูกต้องและสอดคล้องกันระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากการจำลองการทำงาน

บทที่ 4

การควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้นตัวเอง

4.1 บทนำ

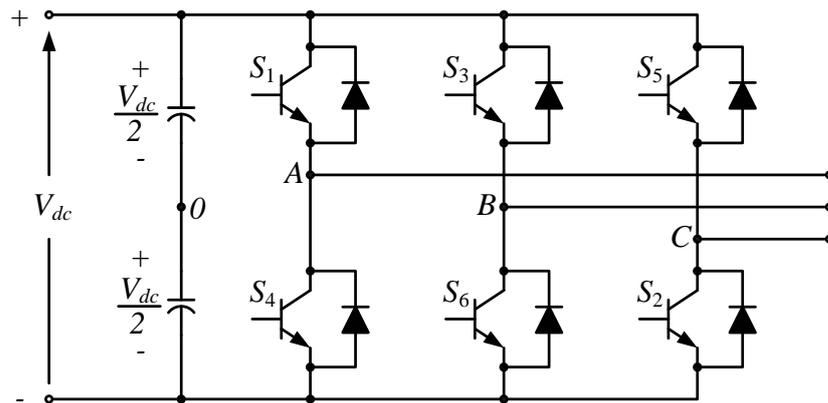
ในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่แล้วจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งในปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีสมรรถนะสูงสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมให้ได้ความเร็วรอบ แรงบิด ตามต้องการและมีประสิทธิภาพสูง มีสภาวะการทำงานที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหากรวนแก่ระบบไฟฟ้า ทำให้อินเวอร์เตอร์จึงมีบทบาทในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยในบทนี้ได้้นำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้หลักการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อควบคุมและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาให้มีค่าคงที่เมื่อความเร็วรอบที่ตัวขับเคลื่อนกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความสามารถในการควบคุมการรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงได้ตลอดเวลา เมื่อความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อนกำลังเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้หลักการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ที่ นำเสนอในงานวิจัยนี้

4.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟส นิยมแปลงผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพื่อใช้ในการควบคุมที่ได้ทั้งขนาดและความถี่ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้านั้นมีค่าที่สอดคล้องและมีเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นในการควบคุมที่ง่ายและสะดวกจึงต้องใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่มีรูปคลื่นไซน์สามเฟส เพื่อให้กับสัญญาณในการขับสวิตช์อินเวอร์เตอร์ให้ทำงาน ซึ่งจะเรียกวิธีการนี้ว่าอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะใช้เทคนิคคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยม (Sinusoidal pulse width modulation: SPWM) [22] ดังแสดงคลื่นแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.3 หลักการดังกล่าวมีข้อดีคือง่ายต่อการสร้างสัญญาณควบคุม จึงทำให้สะดวกและสามารถออกแบบวงจรองความถี่ทางด้านออกได้ง่ายและมีขนาดเล็ก



รูปที่ 4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

โดยสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง คำนวณได้จาก

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_{dc}}{C} \quad (4.1)$$

ในการออกแบบจะกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีขนาดที่สูงกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถที่จะคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการสวิตช์โดยใช้เทคนิคคลื่นไซน์ตัดคลื่นสามเหลี่ยม ได้จากสมการ

$$V_s = \sqrt{3} m_a \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (4.2)$$

ตัวดัชนีการมอดูเลต (m_a) จะถูกออกแบบให้มีค่าเป็น 1 ตลอดเวลา ซึ่งเป็นค่าที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดการสวิตช์เชิงเส้นและเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายออกมาได้มากที่สุด สามารถเขียนสมการของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ผ่านการควบคุมจากอินเวอร์เตอร์ได้เป็น

$$d_a = m_a \frac{V_{dc}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\omega t) \quad (4.3)$$

$$d_b = m_a \frac{V_{dc}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (4.4)$$

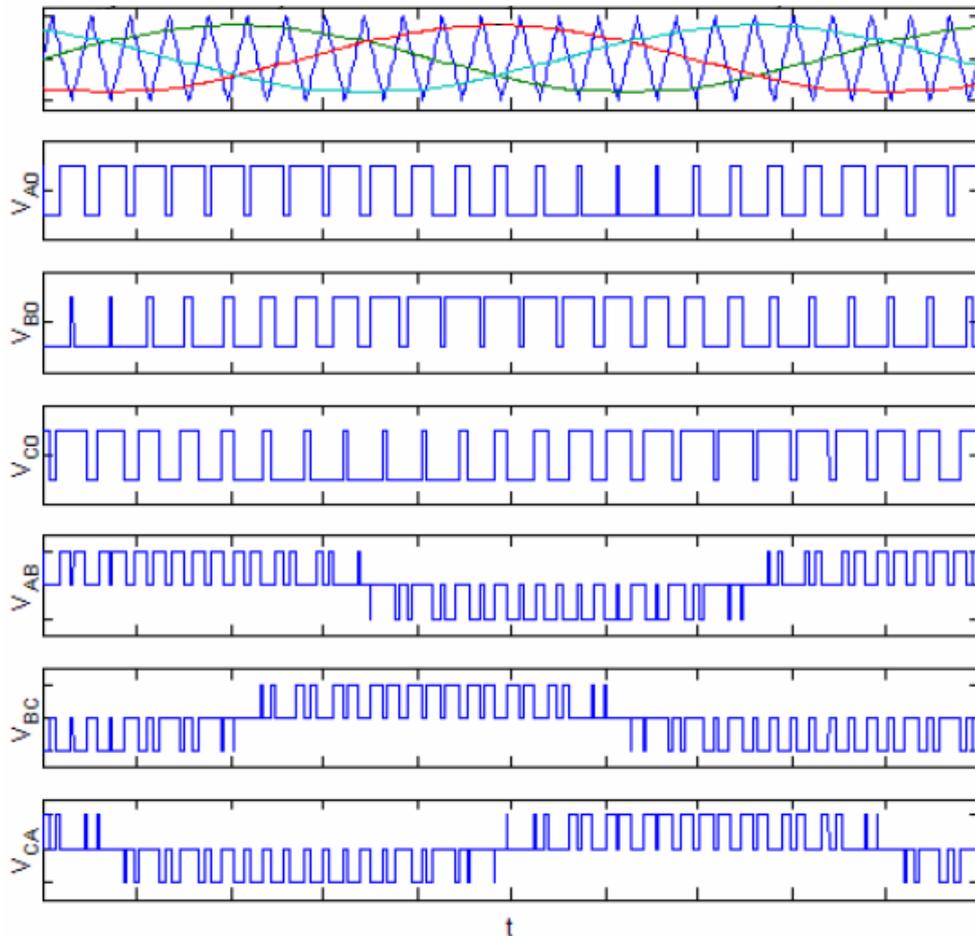
$$d_c = m_a \frac{V_{dc}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (4.5)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์จะต้องมีค่าเท่ากับ

$$v_{an} = V_m \cos(\omega t) \quad (4.6)$$

$$v_{bn} = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (4.7)$$

$$v_{cn} = V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.3 คลื่นแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยเทคนิคเทคนิคคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยม

4.3 เทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมอดูเลชัน

หลักการของเทคนิคการมอดูเลตโดยทั่วไปนั้นจะเป็นการปรับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีองค์ประกอบของสัญญาณหลักมูล (Fundamental) มีค่ามากที่สุดและมีฮาร์มอนิกอื่น ๆ น้อยที่สุด ซึ่งจากการพัฒนาที่ผ่านมาได้มีการใช้เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มหลากหลายแบบที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ โดยมีจุดประสงค์หลักคือ

1. ช่วงความถี่มอดูเลตกว้าง
2. การสูญเสียจากการสวิตช์น้อยที่สุด
3. การสูญเสียจากผลรวมของฮาร์มอนิกส์ประกอบมีค่าต่ำ

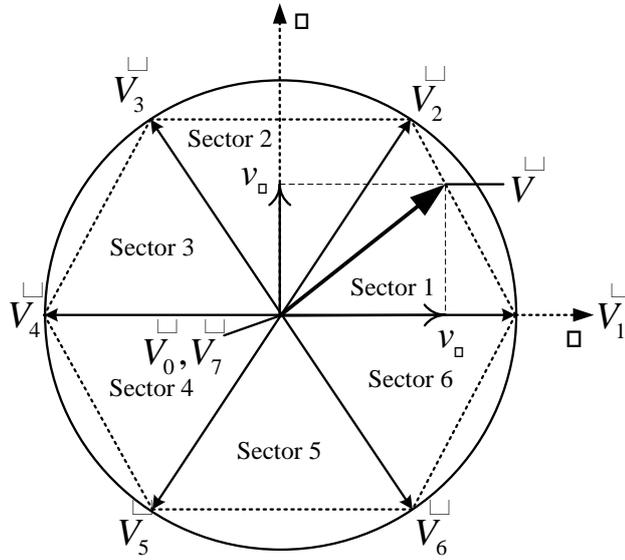
ตารางที่ 4.1 สรุปภาพรวมของการมอดูเลตประเภทต่างๆสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส [22]

Modulation Type	Normalized phase voltage	Normalized line voltage	Output waveform
Sinusoidal PWM	0.5	0.866	Sinusoidal
60° PWM	0.57735	1	Sinusoidal
Third-harmonic PWM	0.57735	1	Sinusoidal
SVM	0.57735	1	Sinusoidal
Overmodulation	Higher than the value for $m=1$	Higher than the value for $m=1$	Nonsinusoidal
Six-step	0.4714	0.81645	Nonsinusoidal

เทคนิคสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมอดูเลชัน (Space vector pulse width modulation: SVM) [23] เป็นเทคนิคที่ใช้การอย่างแพร่หลายมาวิธีหนึ่ง เนื่องจากให้คุณลักษณะที่ดังต่อไปนี้

1. ให้ช่วงความถี่มอดูเลชันกว้าง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับวิธีพีดับเบิลยูเอ็มแบบ Harmonic Injection Pulse Width Modulation (HIPWM) [22]
2. ให้ฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่าพีดับเบิลยูเอ็มมาตรฐาน
3. ให้แรงดันเอาต์พุตสูงกว่าวิธีคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยมแบบพีดับเบิลยูเอ็มโดยประมาณ 15% จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรทวีแรงดัน
4. เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันมีแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแบบคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยมโดยปราศจากผลการลดทอนของสัญญาณแรงดันระหว่างสาย
5. การประยุกต์ใช้งานง่าย และสัญญาณมอดูเลชันมีความแน่นอนกว่าแบบคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยม
6. ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยม
7. สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการสวิตช์โดยไม่จำเป็นได้

แนวคิดของเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน ได้มาจากการที่สนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งใช้สำหรับการมอดูเลตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยเทคนิคนี้สามารถจะเปลี่ยนแปลงจากปริมาณสามเฟส (abc) ไปเป็นปริมาณสองเฟส (dq) จากองค์ประกอบสองเฟส จะทำให้เกิดขนาดของเวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์แปดสถานะและสามารถนำไปใช้หาการมอดูเลตของเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์ได้ การเคลื่อนที่ของสเปซเวกเตอร์จะเคลื่อนที่ไปตามที่แบ่งเป็นตอน (Section) ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การสเปซเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า [22]

โดยสามารถแสดงองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในฟังก์ชันคลื่นไซน์ได้ดังนี้

$$v_a = V_m \sin \omega t \tag{4.9}$$

$$v_b = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \tag{4.10}$$

$$v_c = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \tag{4.11}$$

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสให้กับมอเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศของมอเตอร์ องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนสามารถแสดงเป็นเวกเตอร์ลัพธ์ (\vec{V}) ของแรงดันไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.4 การสเปซเวกเตอร์สามารถแสดงในรูปปริมาณไฟฟ้าสามเฟสได้คือ

$$\vec{V} = v_\alpha + jv_\beta = \frac{2}{3}(v_a + av_b + a^2v_c) \tag{4.12}$$

เมื่อ $a = e^{j2\pi/3}$

$$|\vec{V}| = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad \text{และ} \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \tag{4.13}$$

ดังนั้น

$$v_\alpha + jv_\beta = \frac{2}{3} \left(v_a + \cos \frac{2\pi}{3} v_b + \cos \frac{2\pi}{3} v_c \right) + j \frac{2}{3} \left(\sin \frac{2\pi}{3} v_b - \sin \frac{2\pi}{3} v_c \right) \quad (4.14)$$

ทำการเปรียบเทียบส่วนจริงกับส่วนจินตภาพในสมการ (4.14) จะได้

ส่วนจริง

$$v_\alpha = \frac{2}{3} \left(v_a + \cos \frac{2\pi}{3} v_b + \cos \frac{2\pi}{3} v_c \right) \quad (4.15)$$

ส่วนจินตภาพ

$$v_\beta = \frac{2}{3} \left(\sin \frac{2\pi}{3} v_b - \sin \frac{2\pi}{3} v_c \right) \quad (4.16)$$

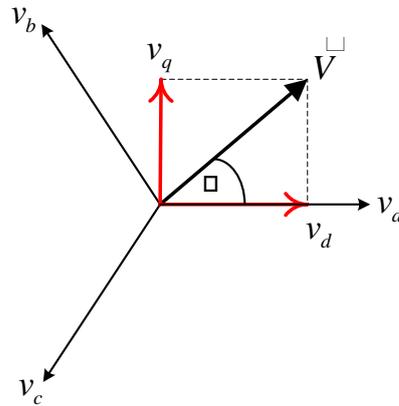
จากสมการ (4.15) และ (4.16) สามารถแสดงในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{2\pi}{3} \\ 0 & \sin \frac{2\pi}{3} & -\sin \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

จะได้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

หลักการของสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมอดูละชันนั้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าคลื่นไซน์เกิดจากการที่เวกเตอร์ที่มีขนาดคงที่เคลื่อนที่ไปด้วยความถี่คงที่ เทคนิคสเปซเวกเตอร์นี้จะอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (\vec{V}) โดยเป็นการรวมของรูปแบบการสวิตช์ที่แปลงสถานะรูปแบบ (V_0 ถึง V_8) จากรูปที่ 4.5 แสดงวิธีการแปลงพิกัดเวกเตอร์สามเฟส (abc) เป็นสองเฟส (dq) เพื่อหาสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง



รูปที่ 4.5 พิกัดเวกเตอร์ระบบสามเฟสกับระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหนึ่ง

การสร้างสัญญาณสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมอดูละชั้นมี 3 ขั้นตอนคือ

1. การหาแรงดันไฟฟ้า v_d, v_q, \vec{V} และมุม ϕ

การหา v_d, v_q, \vec{V} และมุม ϕ จะต้องแปลงพิกัดสามเฟส (abc) เป็นพิกัดสองเฟส (dq) แรงดันไฟฟ้าเวกเตอร์ในพิกัดสองเฟสแสดงในรูปที่ 4.5

$$\begin{aligned} v_d &= v_{an} - v_{bn} \cos 60^\circ - v_{cn} \cos 60^\circ \\ &= v_{an} - \frac{1}{2}v_{bn} - \frac{1}{2}v_{cn} \end{aligned} \quad (4.19)$$

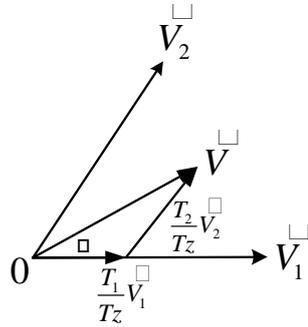
$$\begin{aligned} v_q &= v_{bn} \cos 30^\circ - v_{cn} \cos 30^\circ \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2}v_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{cn} \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$|\vec{V}| = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (4.22)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{v_d}{v_q} \right) = \omega_s t = 2\pi f_s t \quad (4.23)$$

2. การหาค่าช่วงเวลา T_1, T_2, T_0



รูปที่ 4.6 เวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการรวมของเวกเตอร์สองตัวในช่วงตอนที่ 1

จากรูปที่ 4.6 แสดงการหาค่าช่วงเวลาโดยได้ทำการยกตัวอย่างการหาค่าช่วงเวลาในช่วงตอนที่ 1 ที่ช่วง $0 \leq \phi \leq 60^\circ$ ซึ่งสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\int_0^{T_z} \vec{V} dt = \int_0^{T_1} \vec{V}_1 dt + \int_0^{T_1+T_2} \vec{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \vec{V}_0 dt \quad (4.24)$$

เพราะฉะนั้น $T_z \cdot \vec{V} = (T_1 \cdot \vec{V}_1 + T_2 \cdot \vec{V}_2)$ (4.25)

ดังนั้น $T_z \cdot |\vec{V}| = T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(0) \\ \cos(\pi/2) \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix}$ (4.26)

เพราะฉะนั้นช่วงเวลา T_1, T_2, T_0 จะมีค่าเท่ากับ

$$T_1 = T_z \cdot m_a \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \phi)}{\sin(\pi/3)} \quad (4.27)$$

$$T_2 = T_z \cdot m_a \cdot \frac{\sin(\phi)}{\sin(\pi/3)} \quad (4.28)$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (4.29)$$

กำหนดให้ $T_z = \frac{1}{f_s}$ และ $m_a = \frac{|\vec{V}|}{\frac{2}{3} \cdot V_{dc}}$

ดังนั้นสามารถที่จะหาช่วงเวลาการสวิตช์ที่ช่วงตอนใดๆ ได้จาก

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\vec{V}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \phi + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\
 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\vec{V}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi - \phi \right) \\
 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\vec{V}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi \cos \phi - \cos \frac{n}{3} \pi \sin \phi \right)
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

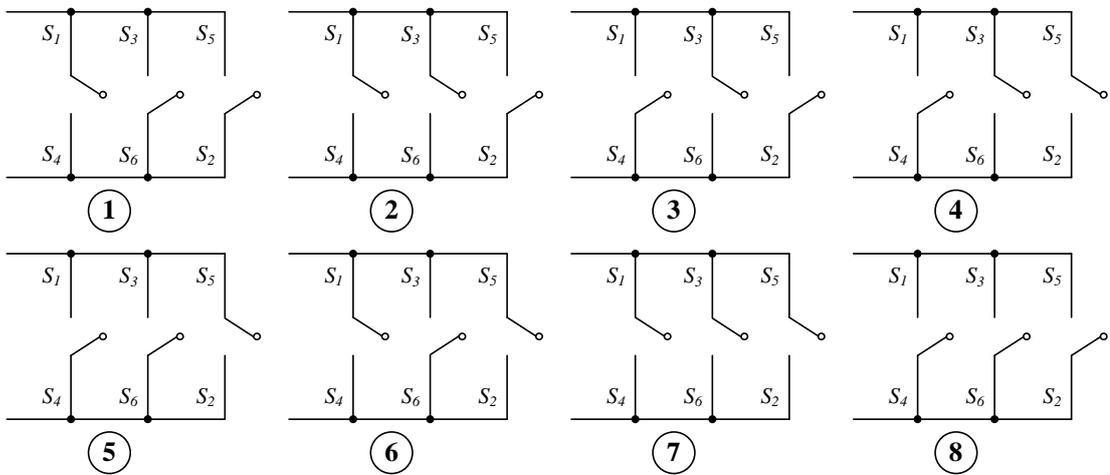
$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\vec{V}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\phi - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\
 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\vec{V}|}{V_{dc}} \left(-\cos \phi \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi + \sin \phi \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right)
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$\text{และ} \quad T_0 = T_z - T_1 - T_2 \tag{4.32}$$

กำหนดให้ n เท่ากับจำนวน 1 ถึง 6 แทนค่าแต่ละช่วงตอน

3. หาค่าเวลาในการสวิตช์ของไอจีบีทีแต่ละตัว (ตั้งแต่ S_1 ถึง S_6)

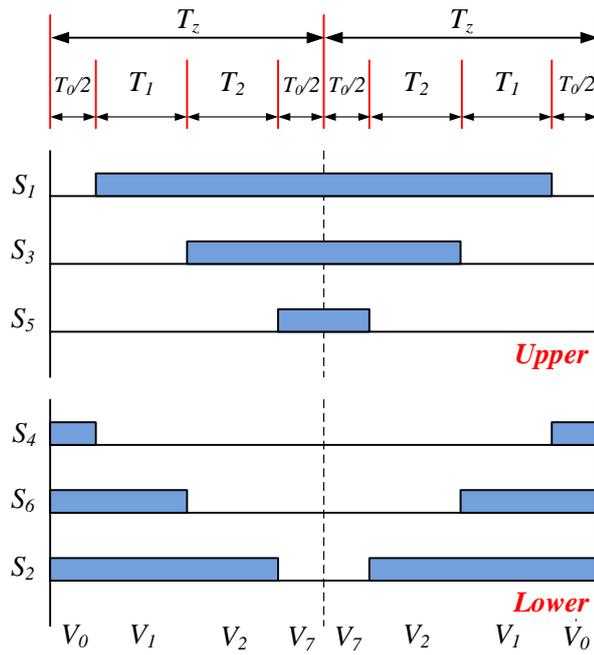
วงจรรินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส เมื่อแต่ละเฟสเชื่อมต่อกันกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบวกหรือด้านลบจะมีสถานะการทำงานเกิดขึ้นแปดสถานะดังเงื่อนไขของการสวิตช์ ดังรูปที่ 4.7 ยกตัวอย่างเช่นสถานะที่ 1 กึ่งแรกคือเฟส A ถูกเชื่อมทางด้านด้านบวก ในขณะที่เฟส B เชื่อมต่อทางด้านลบ ซึ่งสถานะลำดับอื่นๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ลำดับที่ 7 จะมีสถานะเป็นบวกทั้งหมด และสถานะที่ 8 จะมีสถานะเป็นลบทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงช่วงเวลาการสวิตช์ในแต่ละช่วงตอนได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 – 4.13 ตามลำดับช่วงตอน



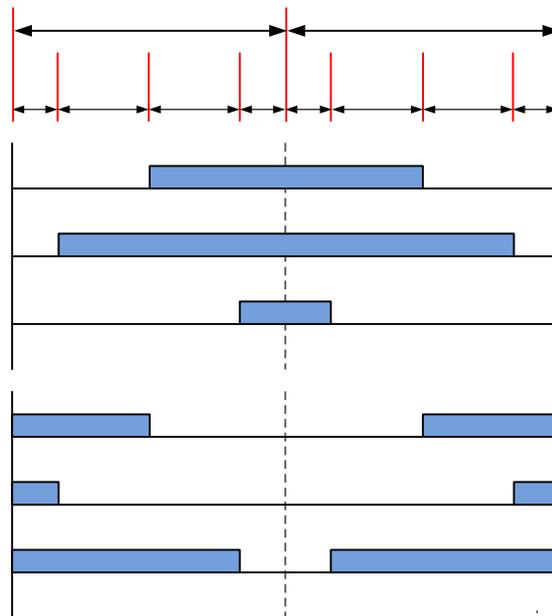
รูปที่ 4.7 รูปแบบวิธีการสวิตช์ในแต่ละช่วงตอน [22]

ตารางที่ 4.2 สถานะของแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟส (1=สถานะเปิด, 0=สถานะปิด)

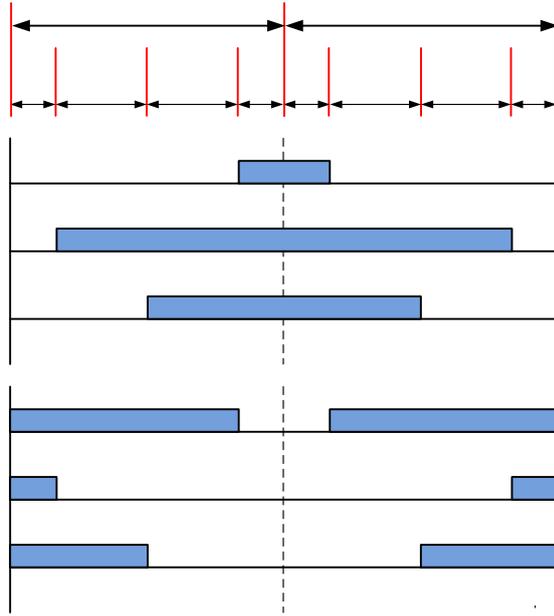
สถานะลำดับที่	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	1	0	0
2	1	1	0
3	0	1	0
4	0	1	1
5	0	0	1
6	1	0	1
7	1	1	1
8	0	0	0



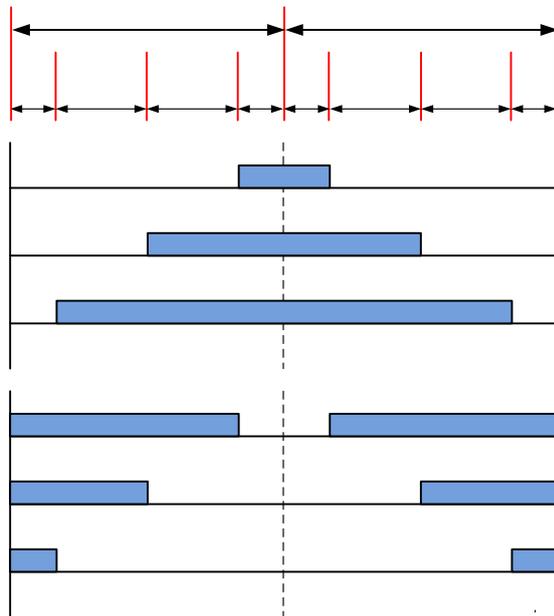
รูปที่ 4.8 ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 1



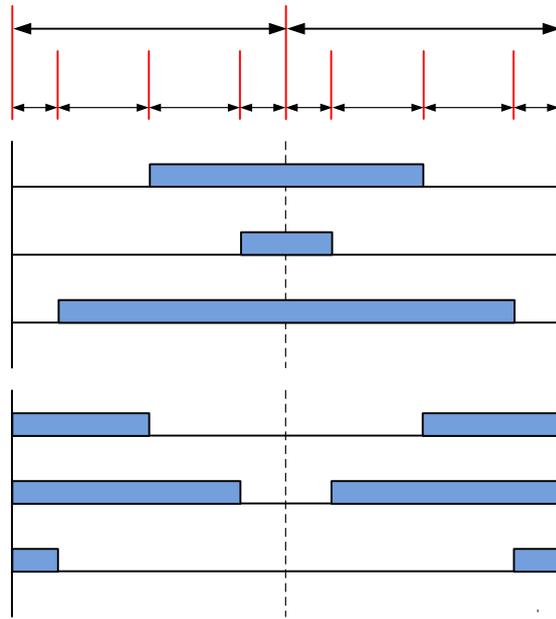
รูปที่ 4.9 ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 2



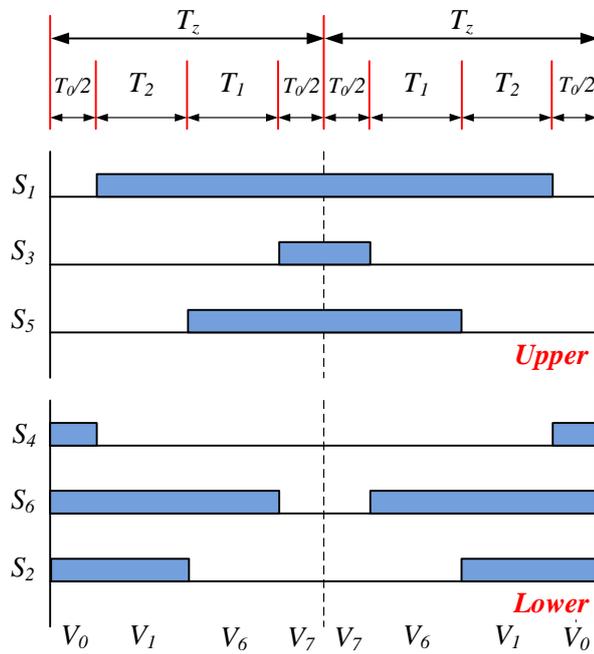
รูปที่ 4.10 ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 3



รูปที่ 4.11 ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 4



รูปที่ 4.12 ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 5



รูปที่ 4.13 ช่วงเวลาของการสวิตช์ในช่วงตอนที่ 6

ตารางที่ 4.3 สรุปช่วงเวลาของการสวิตช์ในทุกช่วงตอน

Sector	Upper switch (S_1, S_3, S_5)	Lower switch (S_4, S_6, S_2)
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
2	$S_1 = T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
3	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_2 + T_0 / 2$
4	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
5	$S_1 = T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_2 + T_0 / 2$

4.4 หลักการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้หลักการควบคุม

แบบแรงบิดโดยตรง

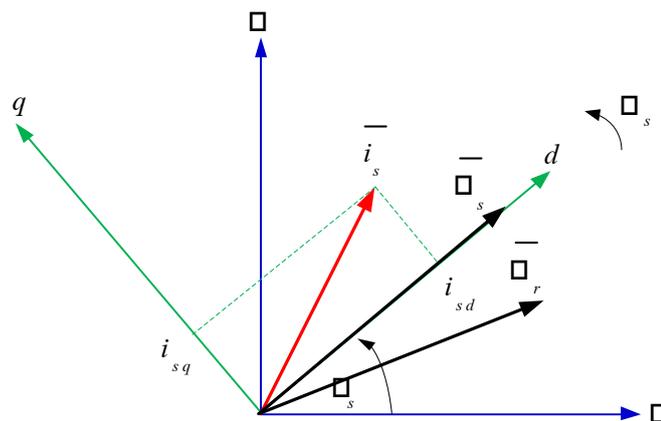
เพื่อที่จะลดการกระเพื่อมของแรงบิดซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยวิธีการสวิตช์อินเวอร์เตอร์แบบเปิดตาราง ซึ่งระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้หลักการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรง โดยใช้วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ที่ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับควบคุมแรงบิดและฟลักซ์สเตเตอร์แทนวิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งระบบควบคุมที่นำเสนอจะทำการควบคุมในลักษณะป้อนกลับทั้งแรงบิดและฟลักซ์สเตเตอร์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอจำนวน 2 ตัวที่ทำการควบคุมในลักษณะแยกอิสระต่อกัน จากบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วย อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส, ชุดโหลดสามเฟส, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ชุดตัวขับเคลื่อนกำลังซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบ

ต้นกำลัง และในส่วนของ การควบคุมที่ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ (DC voltage regulator)

การทำงานของระบบควบคุมที่ได้นำเสนอนี้ เริ่มต้นจากขั้นตอนการกระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยอาศัยแบตเตอรี่ (Battery start-up) ขนาด 12 V ที่ต่ออนุกรมอยู่กับไดโอดเพื่อทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ได้จากการสะสมพลังงานของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ เพื่อใช้กระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าแทนการใช้ชุดตัวเก็บประจุ เมื่อตัวจับต้นกำลังหมุนที่ความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัสจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาและไหลผ่านไปที่อินเวอร์เตอร์สามเฟสและถ้าต่อโหลดเพื่อนำไปใช้งานกระแสไฟฟ้าบางส่วนก็จะจ่ายให้กับโหลดซึ่งแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ได้ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะถูกส่งไปยังอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่กำลังทำงานอยู่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มาถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากมาสะสมยังตัวเก็บประจุ จะเห็นได้ว่าการที่ต่อไดโอดในส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่นั้น เพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ผ่านไปยังแบตเตอรี่นั่นเอง

4.5 หลักการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์สเตเตอร์โดยตรง

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงหลักการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์สเตเตอร์โดยตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากเวกเตอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำในรูปที่ 4.14 ซึ่งได้แสดงเวกเตอร์กระแสสเตเตอร์, ฟลักซ์สเตเตอร์และฟลักซ์โรเตอร์ในเฟรมอ้างอิงหมุน



รูปที่ 4.14 เวกเตอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ

โดยที่สมการไดนามิกของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์, แรงดันโรเตอร์และแรงบิดของเครื่องจักรกล
เหนี่ยวนำสามารถกำหนดได้คือ

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{y}_s}{dt} + j\omega_s \bar{y}_s \quad (4.32)$$

$$0 = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{y}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_m) \bar{y}_r \quad (4.33)$$

$$\bar{y}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \quad (4.34)$$

$$\bar{y}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \quad (4.35)$$

และ

$$T_e = \frac{3}{2} P y_{sd} i_{sq} \quad (4.36)$$

โดยที่ทำการแก้ไขสมการได้ใหม่คือ

$$\frac{d\bar{y}_s}{dt} = \bar{v}_s - R_s \bar{i}_s - j\omega_s \bar{y}_s \quad (4.37)$$

$$\frac{d\bar{y}_r}{dt} = -R_r \bar{i}_r - j(\omega_s - \omega_m) \bar{y}_r \quad (4.38)$$

$$\bar{i}_s = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \bar{y}_s - \frac{L_m}{L_s} \bar{i}_r \quad (4.39)$$

จากสมการที่ 4.37 ถึง 4.39 สามารถเขียนขึ้นใหม่ได้คือ

$$\frac{d\bar{y}_s}{dt} = \left(\frac{R_s}{L_s} - j\omega_s \right) \bar{y}_s + \frac{R_s L_m}{L_s L_r} \bar{i}_r + \frac{1}{L_s} \bar{v}_s \quad (4.40)$$

$$\frac{d\bar{y}_r}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_s L_r} \bar{y}_s - j(\omega_s - \omega_m) \bar{y}_r - \frac{R_r}{L_r} \bar{i}_r$$

เมื่อ

$$s = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (4.41)$$

จากสมการที่ 4.40 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ฟลักซ์สเตเตอร์และเวกเตอร์ฟลักซ์
โรเตอร์ได้คือ

$$\bar{y}_r(s) = \frac{\frac{L_m}{L_s} \bar{y}_s(s)}{s s \frac{L_r}{R_r} + j(\omega_s - \omega_m) \frac{L_r}{R_r} + 1} \quad (4.42)$$

เมื่อทราบค่าเวกเตอร์ฟลักซ์สเตเตอร์ ซึ่งกำหนดในเฟรมอ้างอิงหมุน คือ

$$\begin{aligned} \bar{y}_s &= y_{ds} + j y_{qs} \\ y_{qs} &= 0 \end{aligned} \quad (4.43)$$

ในขณะที่เวกเตอร์ฟลักซ์โรเตอร์ ในเฟรมอ้างอิงหมุน สามารถคำนวณหาได้จากสมการ คือ

$$\bar{y}_r = y_{rd} + j y_{rq} \quad (4.44)$$

ใช้สมการที่ 4.42, 4.43 และ 4.44 คำนวณหาองค์ประกอบไฟตรง dq ของเวกเตอร์ฟลักซ์โรเตอร์ได้

$$y_{rd}(s) = \frac{\frac{R_r L_m}{L_s L_r s}}{s + \frac{(w_s - w_m)^2}{s + \frac{R_r}{L_r s}} + \frac{R_r}{L_r s}} y_{sd}(s) \quad (4.45)$$

$$y_{rq}(s) = \frac{-\frac{(w_s - w_m)}{s + \frac{R_r}{L_r s}} \frac{R_r L_m}{L_s L_r s}}{s + \frac{(w_s - w_m)^2}{s + \frac{R_r}{L_r s}} + \frac{R_r}{L_r s}} y_{sd}(s) \quad (4.46)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการเวกเตอร์กระแสเดเตอร์และเวกเตอร์ฟลักซ์โรเตอร์ที่ได้กล่าวไว้ในสมการที่ 4.39 นำมาเขียนใหม่คือ

$$\bar{i}_s^* = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} [L_r - L_m \frac{w_s - w_m}{s + \frac{R_r}{L_r s}}] \bar{y}_s^* \quad (4.47)$$

โดยนำสมการที่ 4.45 และ 4.46 ไปแทนค่าลงในสมการที่ 4.47 เพื่อคำนวณหาองค์ประกอบกระแสเดเตอร์ dq ได้คือ

$$\begin{aligned} i_{sq}(s) &= \frac{(w_s - w_m)t \frac{L_m^2}{L_s^2 L_r}}{t^2 s^2 + 2t s + t^2 (w_s - w_m)^2 + 1} y_{sd}(s) \\ &= \frac{(w_s - w_m)t \frac{L_m^2}{L_s^2 L_r}}{2t s + 1} y_{sd}(s) \end{aligned} \quad (4.48)$$

เมื่อ $t = \frac{L_r}{R_r}$ โดยที่จากสมการที่ 4.48 เมื่อค่า t และ s มีค่าที่น้อยมากจึงสามารถลดรูปสมการได้

หลังจากนั้นทำการแก้สมการที่ 4.48 ให้อยู่ในโดเมนของเวลา ซึ่งจะได้สมการองค์ประกอบกระแสเดเตอร์บนแกน q ได้ใหม่คือ

$$i_{sq}(t) = \mathcal{L}^{-1} \{ \mathcal{L} \{ i_{sq}(s) \} \} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{(w_s - w_m) t \frac{L_m^2}{L_s L_r} y_{sd}^*}{2t s + 1} \right\} \quad (4.49)$$

$$= (w_s - w_m) t \frac{L_m^2}{L_s L_r} y_{sd}^* \{ e^{-t/2t_s} \}$$

จากสมการที่ 4.49 ถ้ากำหนดให้ขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์สเตเตอร์ถูกรักษาไว้ให้คงที่อยู่ตลอดเวลา (ในแกน q) ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาแรงบิดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบฟลักซ์สเตเตอร์บนแกน d และองค์ประกอบกระแสสเตเตอร์บนแกน q โดยพิจารณาได้จากสมการที่ 4.36 และสมการที่ 4.49 ได้ดังนี้

$$T_e(t) = \frac{3}{2} P y_{sd}(t) i_{sq}(t) = \frac{3}{2} P (y_{sd}^*)^2 \frac{t L_m^2}{L_s L_r} (w_s - w_m) \{ e^{-t/2t_s} \} \quad (4.50)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาจากสมการองค์ประกอบแรงดันสเตเตอร์ (จากสมการที่ 4.32)

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{dy_{sd}}{dt} \quad (4.51)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + w_s y_{sd} \quad (4.52)$$

นำสมการที่ 4.51 และ 4.52 แทนลงในสมการที่ 4.50 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแรงดันสเตเตอร์ของแกน q และแรงบิดที่ถูกสร้างขึ้นได้คือ

$$T_e(t) = \frac{3}{2} P (y_{sd}^*)^2 \frac{t L_m^2}{L_s L_r} \{ e^{-t/2t_s} \} v_{sq} - f(w_m) \quad (4.53)$$

เมื่อ

$$f(w_m) = \frac{3}{2} P (y_{sd}^*)^2 \frac{t L_m^2}{L_s L_r} \{ e^{-t/2t_s} \} w_m \quad (4.54)$$

จากสมการที่ 4.53 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนของค่าแรงบิดของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่สามารถควบคุมได้โดยตรงจากการควบคุมองค์ประกอบของแรงดันสเตเตอร์ในแกน q ซึ่งจากสมการที่ทำการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า $f(w_m)$ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงในสมการที่ 4.54 เป็นสิ่งรบกวนของระบบขับเคลื่อนนี้ ในทำนองเดียวกันขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์สเตเตอร์สามารถรักษาให้คงที่ได้โดยการควบคุมองค์ประกอบของแรงดันสเตเตอร์ในแกน d ได้เช่นเดียวกัน จากการวิเคราะห์การทำงานทั้งหมดของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่นำมาประยุกต์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำหลักการดังกล่าวไปใช้งานในทางปฏิบัติได้จริง

สุดท้ายจากคำสั่งขององค์ประกอบแรงดันสเตเตอร์ dq ซึ่งเป็นปริมาณไฟตรง ที่อ้างอิงอยู่บนเฟรมหมุน สามารถที่จะทำให้แปลงคำสั่งแรงดันดังกล่าวให้ไปอยู่ในเทอมขององค์ประกอบ

แรงดันสเตเตอร์ $a b$ ซึ่งเป็นปริมาณไฟสลับ ที่อ้างอิงอยู่บนเฟรมนิ่ง ดังแสดงได้ตามสมการที่ 4.55 ก่อนที่จะนำคำสั่งแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลตแรงดันด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ต่อไป

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_s & -\sin q_s \\ \sin q_s & \cos q_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

เมื่อ q_s คือมุมพลิกซ์สเตเตอร์ระหว่างเฟรมอ้างอิงหมุน dq และเฟรมอ้างอิงหยุดนิ่ง $a b$ ซึ่งมุมนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 ดังนั้นคำสั่งของเวกเตอร์แรงดันอ้างอิง สามารถคำนวณได้คือ

$$\bar{v}_{ref} = v_{sa} + jv_{sb} \quad (4.56)$$

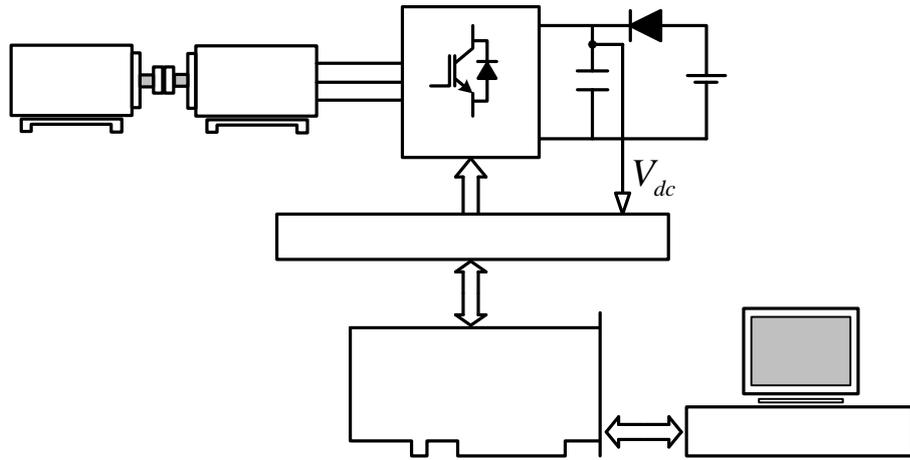
หลังจากนั้นจึงนำสมการที่ 4.56 ไปสร้างเป็นสัญญาณขับนำเกตของอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยวิธีการมอดูเลตสเปซเวกเตอร์ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3

4.6 ผลการทดสอบ

ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 0.37 kW, แรงดันไฟฟ้า 230/400 V, กระแสไฟฟ้า 1.8/1.05 A, 4 ขั้วแม่เหล็ก และมีค่าพารามิเตอร์ภายในตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังแสดงในตารางที่ 4.4 ใช้ตัวควบคุมดิจิทัล dSPACE 1104 โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการควบคุมการทำงานที่ใช้ช่วงเวลาแซมปลิง (Sampling time) เท่ากับ $100 \mu s$, ความถี่การสวิตซ์อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 5 kHz, แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400 V ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมการทดลองในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

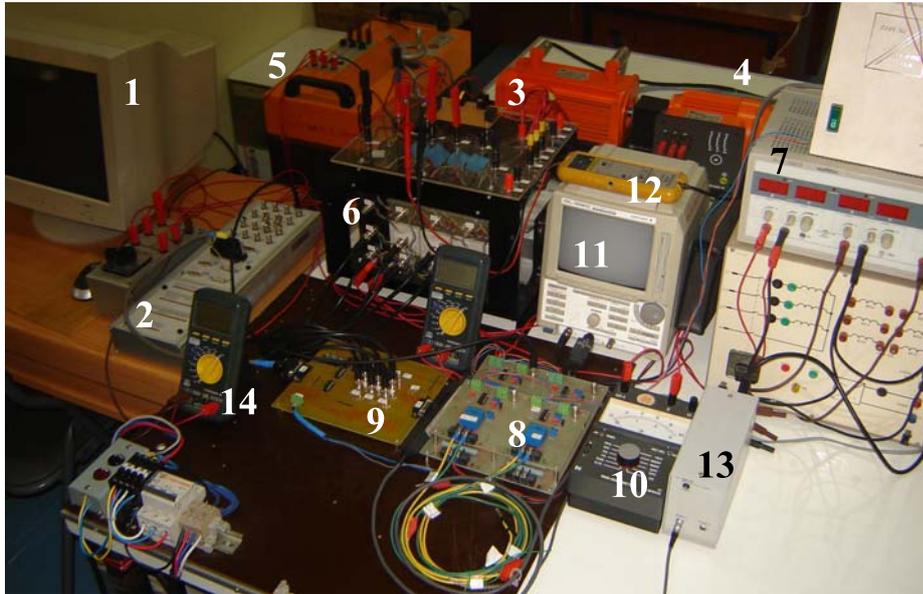
3-phase	0.75 kW	$R_s = R_r = 31.49 \text{ w}$
50 Hz	4-poles	$L_s = L_r = 1.0942 \text{ H}$
230/400 V Δ/Y	1.8/1.05 A Δ/Y	$L_m = 1 \text{ H}$,



รูปที่ 4.15 บล็อกไดอะแกรมการทดลองของระบบที่นำเสนอ



รูปที่ 4.16 ชุดตัวขับเคลื่อนกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.17 วงจรการทดลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

จากรูปที่ 4.17 ได้แสดงวงจรการทดลองซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์การทดลองดังต่อไปนี้

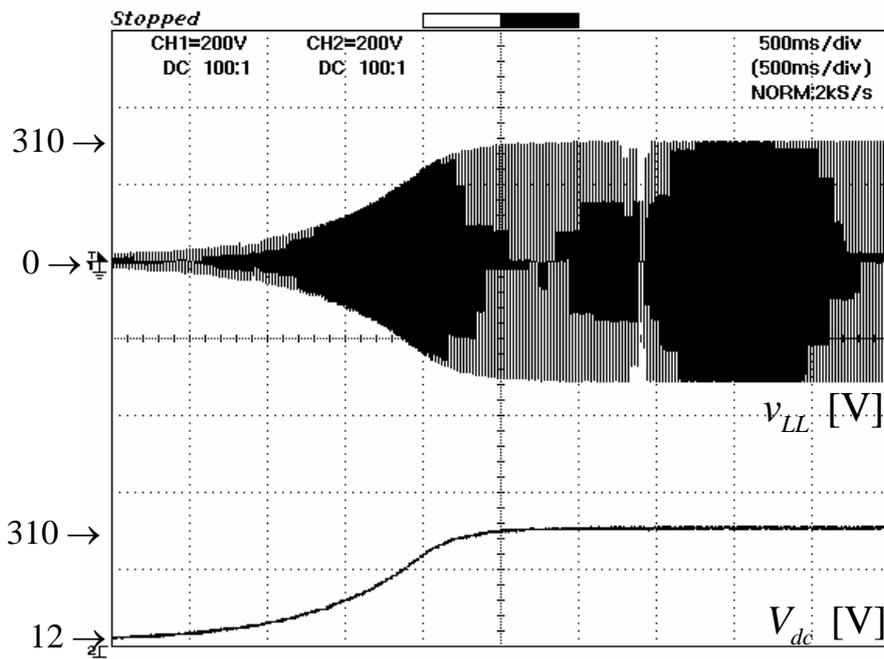
1. คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน
2. ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล dSPACE 1104
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
4. ตัวขับเคลื่อนกำลัง (เซอร์โวมอเตอร์)
5. ชุดโพลสามเฟส
6. อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส
7. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
8. ชุดตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า
9. ชุดอินเตอร์เฟสสัญญาณขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์
10. เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า
11. ดิจิตอลออสซิลอสโคป
12. โพรบวัดดิฟเฟอเรนเชียล (Differential probe)
13. โพรบวัดกระแสไฟฟ้า (Current probe)
14. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

จากหลักการควบคุมเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่นำเสนอ สามารถแสดงผลการทดสอบทั้งในสภาวะพลวัตและสภาวะคงที่ที่ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ได้ดังต่อไปนี้ จากรูปที่ 4.17 คือการทดสอบในสภาวะพลวัตขณะเริ่มการทำงาน จากการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถกระตุ้นตัวเองได้โดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าจ่ายแบตเตอรี่ขนาด 12 V ที่จ่ายออกมาและสะสมพลังงานอยู่ในตัวเก็บประจุ ดังนั้นเมื่อตัวขับเคลื่อนกำลังที่ความเร็วเท่ากับ 1650 rpm ในสภาวะไร้โหลดเป็นผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงดันไฟฟ้าสามเฟสออกมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์ (v_{LL}) เริ่มต้นที่ 12 V มาเป็นค่าประมาณ 310 V และแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันในการสร้างแรงดันไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) และจากรูปที่ 4.18 ได้แสดงให้เห็นถึงการควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมค่าความถี่ของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์ที่ค่าเท่ากับ 50 Hz ในพิกัดแรงดันไฟฟ้าประมาณ 310 V ขณะที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ จากรูปที่ 4.19 ได้แสดงถึงสภาวะพลวัตขณะตัวขับเคลื่อนกำลังทำงานคงที่ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm, จากรูปที่ 4.20 แสดงการทดสอบขณะเริ่มการทำงานของคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์ (i_{inv}) เปรียบเทียบกับแรงบิด (T_e) ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงบิดจะมีเริ่มต้นที่ 0 Nm มาเป็นค่าลบ (ทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ที่มีค่าเท่ากับ -2.8 Nm และจากคลื่นแรงบิดแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ที่ที่นำเสนอ นั้น หลักการควบคุมดังกล่าวจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในแกนอากาศมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่จึงทำให้แรงบิดต่อกระแสไฟฟ้ามียุคตามพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และแสดงให้เห็นว่าสามารถรักษาความถี่ของกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 50 Hz ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

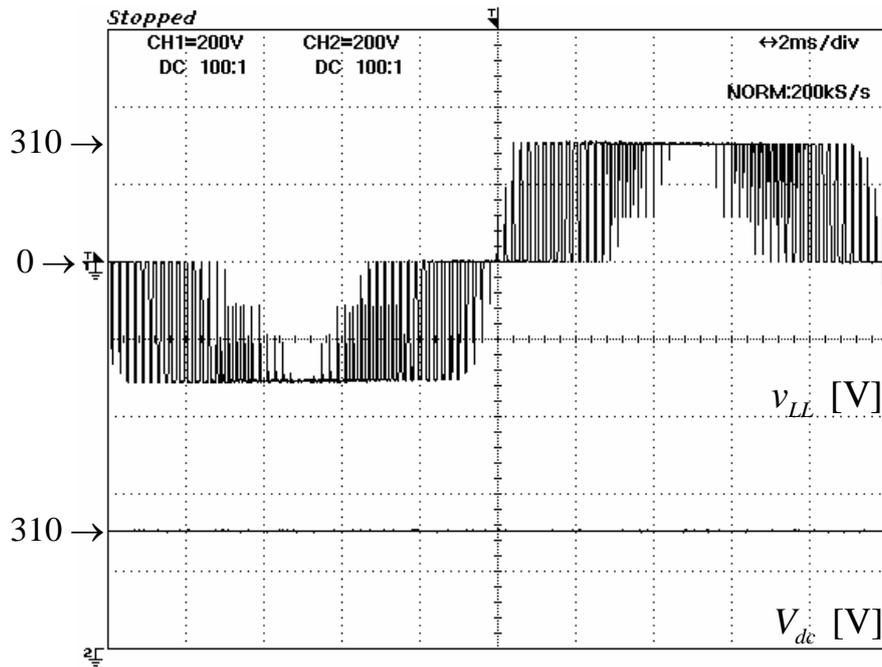
จากรูปที่ 4.22 แสดงการทดสอบในสภาวะคงตัว เมื่อทำการต่อชุดโหลดสามเฟสสมดุลที่พิกัด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ และเมื่อวิเคราะห์คลื่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ทำการเปรียบเทียบจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (i_{gen}) จะมีค่าประมาณ 1.8 A ที่พิกัด เมื่อทำการต่อชุดโหลดเข้าไปจะทำให้กระแสไฟฟ้าบางส่วนไหลไปยังชุดโหลด (i_{load}) มีค่าประมาณ 0.8 A และทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่อินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 1 A ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อต่อชุดโหลดเข้าไปในระบบควบคุมสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้คงที่ได้

ได้ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อนกำลังจากเดิมที่ความเร็วรอบมากกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ 1650 rpm ที่ให้ความถี่ 50 Hz มาเป็นที่ความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสที่ค่าเท่ากับ 750 rpm จะสังเกตเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้และมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของคลื่นแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแรกที่ความเร็วรอบ

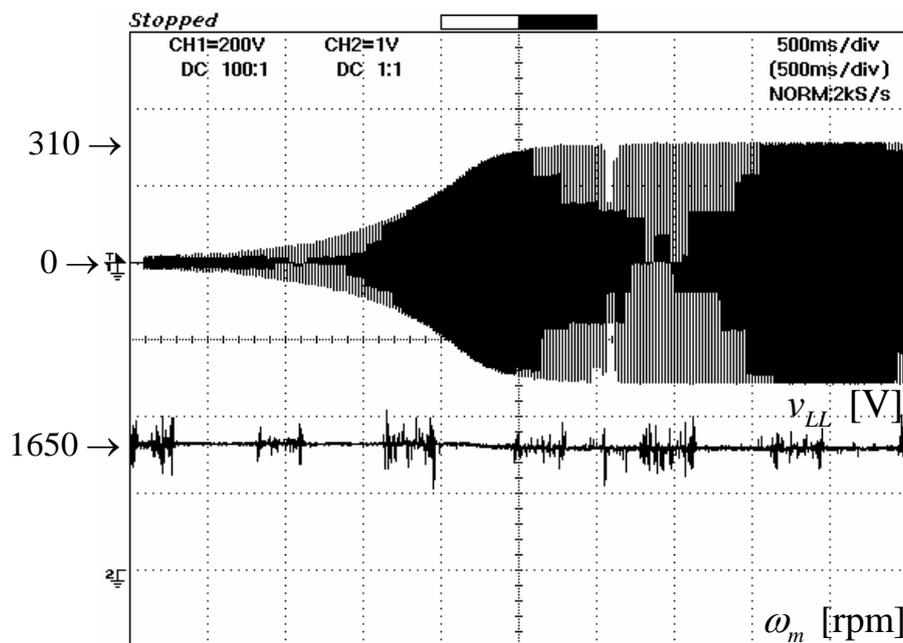
1650 rpm ว่าความถี่จะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งเท่ากับ 25 Hz ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วรอบที่ตัวขับเคลื่อนกำลังลดลง แต่ยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้เท่ากับ 310 V ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และในรูปที่ 4.24 ได้แสดงคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ขั้วต่ออินเวอร์เตอร์กับคลื่นแรงบิดที่มีค่าเท่าเดิมที่ -2.8 เป็นผลจากการควบคุมแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่ และจากรูปที่ 4.25 แสดงการทดสอบในสภาวะคงตัว เมื่อทำการต่อชุดโหลดสามเฟสสมดุลที่พิกัด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ดีและเมื่อวิเคราะห์คลื่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ทำการเปรียบเทียบดังรูปว่า กระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (i_{gen}) จะมีค่าประมาณ 1.8 A ที่พิกัด เมื่อทำการต่อชุดโหลดเข้าไปจะทำให้กระแสไฟฟ้าบางส่วนไหลไปยังชุดโหลด (i_{load}) มีค่าประมาณ 0.8 A และทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่อินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 1 A ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อต่อชุดโหลดเข้าไปในระบบระบบควบคุมสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้คงที่ได้ เหมือนกับการทดลองที่ความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังที่ 1650 rpm



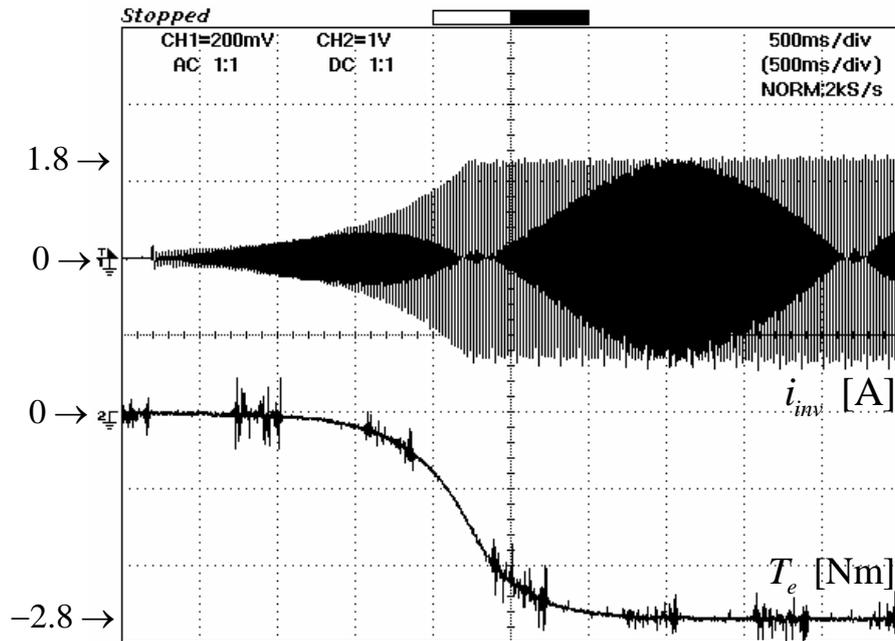
รูปที่ 4.18 การทดสอบในสภาวะพลวัตขณะเริ่มการทำงานของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm



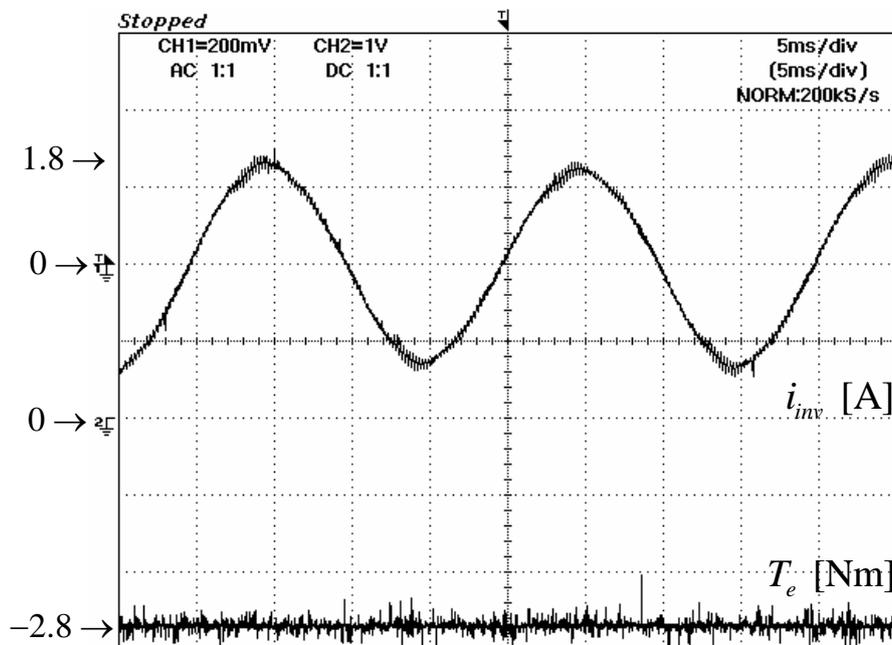
รูปที่ 4.19 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm



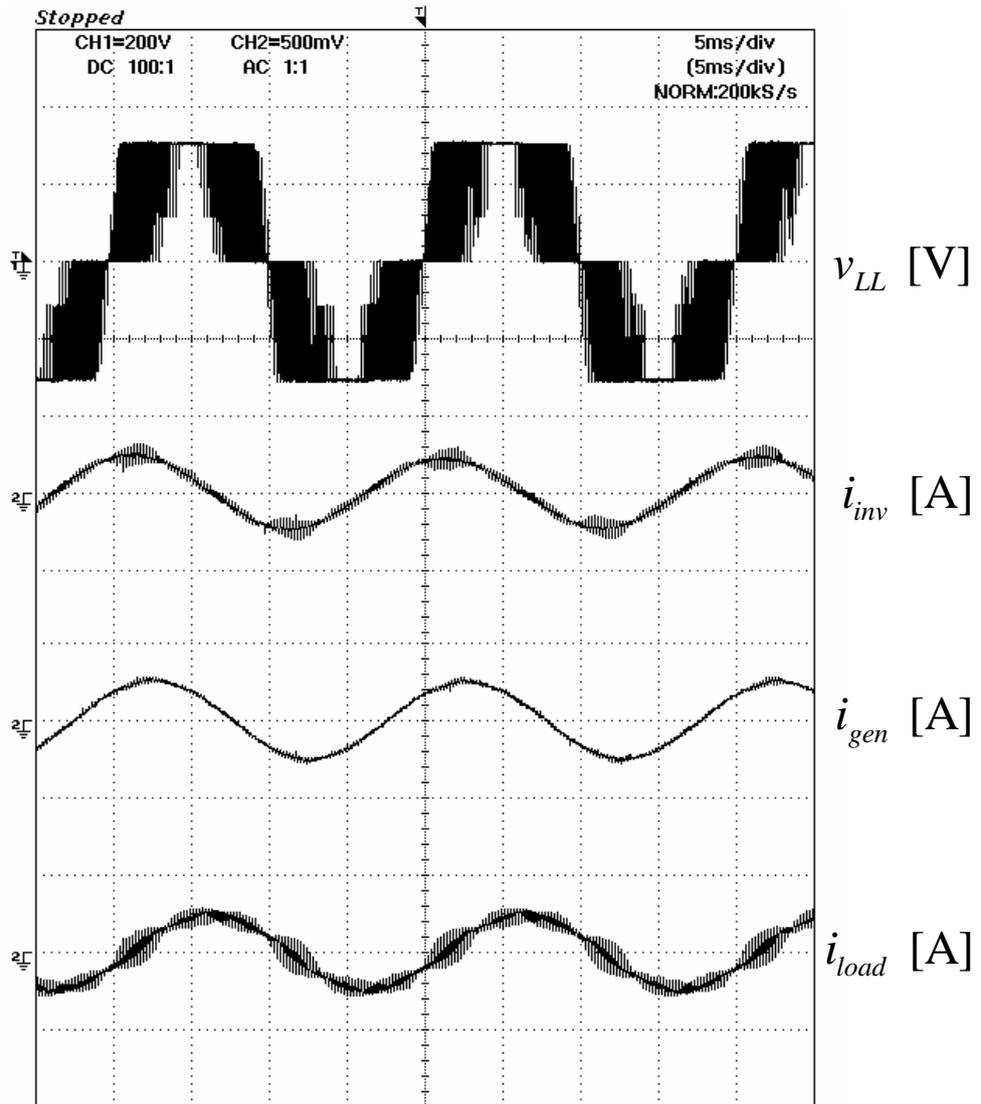
รูปที่ 4.20 การทดสอบในสภาวะพลวัตขณะเริ่มการทำงานของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์ และความเร็วรอบจากตัวจับต้นกำลังที่ 1650 rpm



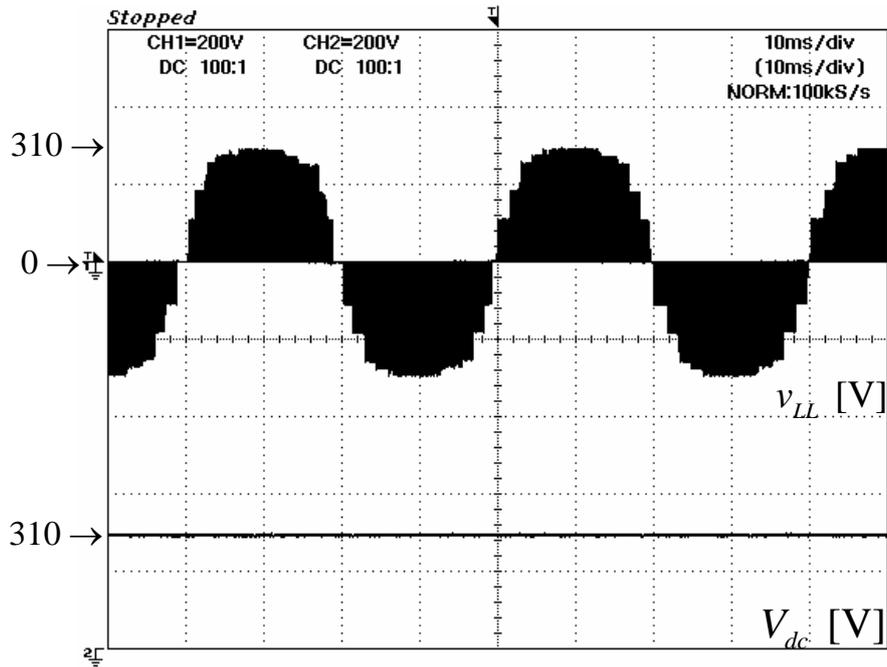
รูปที่ 4.21 การทดสอบในสภาวะพลวัตขณะเริ่มทำงานของคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อเฟส
ที่อินเวอร์เตอร์และแรงบิด ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm



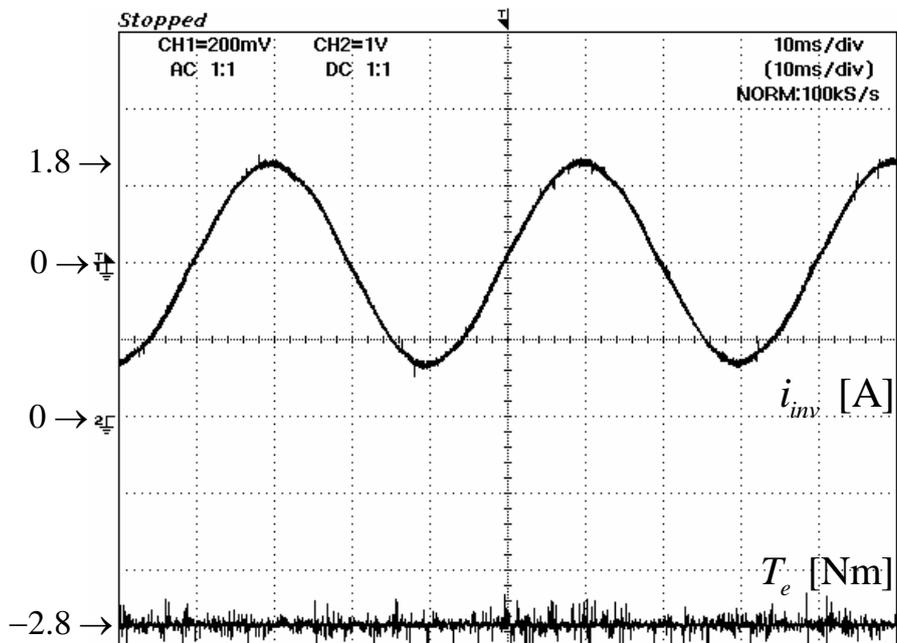
รูปที่ 4.22 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อเฟส
ที่อินเวอร์เตอร์และแรงบิด ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1650 rpm



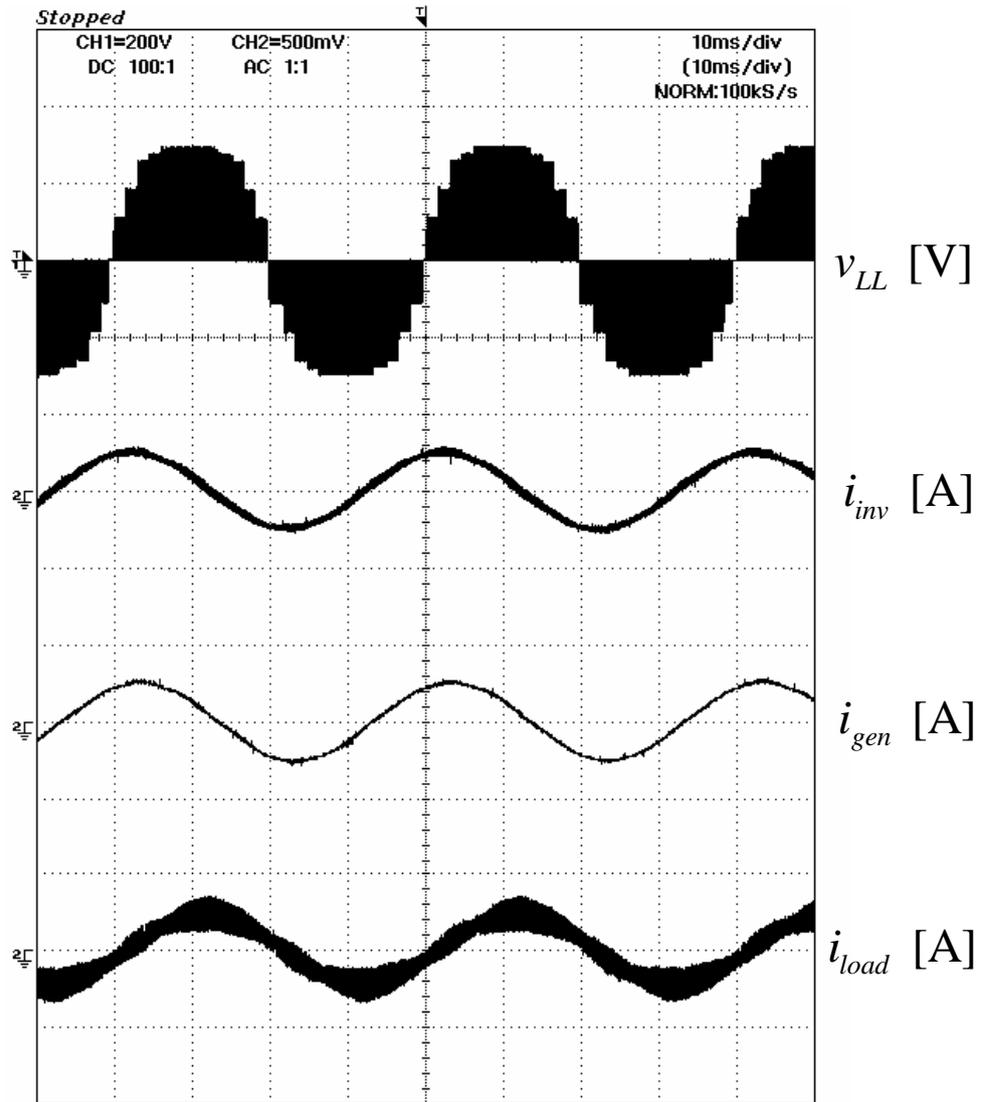
รูปที่ 4.23 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และคลื่นกระแสต่อเฟสที่โหลด



รูปที่ 4.24 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 900 rpm



รูปที่ 4.25 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อเฟส ที่อินเวอร์เตอร์และแรงบิด ขณะที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 900 rpm



รูปที่ 4.26 การทดสอบในสภาวะคงตัวของคลื่นแรงดันไฟฟ้าไลน์ต่อไลน์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่อินเวอร์เตอร์, คลื่นกระแสต่อเฟสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และคลื่นกระแสต่อเฟสที่โหลด

4.7 สรุป

จากผลการทดสอบการรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองในสภาวะโหลดหรือความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง ด้วยหลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดีบีลยูเอ็มด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่ จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบในสภาวะพลวัตและสภาวะคงตัวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความสามารถในการรักษาแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองให้คงที่ได้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้หลักการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงด้วยเทคนิคแรงดันต่อความถี่คงที่ ที่ใช้การตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนพื้นฐานการใช้ตัวควบคุมดิจิทัล DS1104 โดยทำการทดสอบในเงื่อนไขสถานะความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังมีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบทั้งในสถานะพลวัตและสถานะคงตัวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความสามารถในการรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้คงที่ได้ ทั้งนี้หลักการควบคุมที่นำเสนอมีโครงสร้างการควบคุมที่ง่ายไม่ซับซ้อน และใช้การตรวจวัดสัญญาณเพียงตัวเดียวเพื่อวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ทำการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่สามารถใช้งานได้จริง สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ขนาด 0.37 kW, 220/380 V, 50 Hz, 4 ขั้วแม่เหล็ก
2. จากผลการทดสอบและวิเคราะห์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง สามารถควบคุมและรักษาแรงดันไฟฟ้าได้แม้ความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อนกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งความเร็วรอบต่ำและสูงกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน
3. หลักการรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่นำเสนอ เป็นหลักการที่ง่ายไม่ซับซ้อน เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นการศึกษาและนำไปประยุกต์สู่งานจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งในการทดสอบจะใช้กับโหลดชนิดสมดุล แต่ถ้ากรณีที่ต้องการทดสอบกับโหลดชนิดไม่สมดุลหรือชนิดอื่นๆ ควรออกแบบ, วิเคราะห์ และพิจารณาผลกระทบจากการทดสอบ โดยพิจารณาถึงสมรรถนะและความสามารถของระบบที่ได้ทำการทดสอบ

2. เนื่องจากเป็นหลักการควบคุมที่ง่ายไม่ซับซ้อน ดังนั้นสามารถที่จะตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบอื่นๆ ควบคุมการทำงาน เพื่อลดค่าใช้จ่าย
3. ในการควบคุมที่ต้องการความถี่ในการสวิตช์ที่สูง ควรเลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีความเร็วสูง เพื่อให้การควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีผลตอบสนองที่เร็วยิ่งขึ้น
4. ระบบควบคุมที่นำเสนอเป็นระบบควบคุมที่ง่าย สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังสามารถที่จะใช้การควบคุมที่ซับซ้อนมากขึ้นเพื่อสมรรถนะที่ดี ซึ่งสามารถใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ หรือหลักการควบคุมแรงบิด โดยตรงมาควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานที่มากกว่าเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.C. Bansal, "Three-Phase Self-Excited Induction Generator: An Overview," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 292-299, June 2005.
- [2] S.S. Murthy, C. Nagmani, and V.V. Satyanarayana, "Studies of the Use of Conventional Induction Motors as Self Excited Induction Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 4, pp. 182-184, December 1998.
- [3] R. Chaturvedi, S.S. Murthy, "Use of Conventional Induction motor as a Wind Driven Self Excited Induction Generator for Autonomous Operation," *IEEE Conference on Energy Conversion*, vol. 4, pp. 2051-2055, August 1989.
- [4] L. Wang, J.Y. Su, "Dynamic Performances of an Isolated Self Excited Induction Generator Under Various Loading Conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 1, pp. 93-100, March 1999.
- [5] T. Ahmed, O. Noro, E. Hiraki, and M. Nakaoka, "Terminal Voltage Regulation Characteristics by Static Var Compensator for a Three-Phase Self-Excited Induction Generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 4, pp. 978-988, July/August 2005.
- [6] D. Seyoum, C. Grantham, and M. F. Rahman, "The Dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 936-944, July/August 2003.
- [7] J.L. Bhattacharya, J.L. Woodward, "Excitation Balancing of a Self Excited Induction Generator for Maximum Power Output," *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, vol. 135, no. 2, pp. 88-97, Mar 1988.
- [8] R.J. Harrington, F.M.M. Bassiouny, "New Approach to Determine the Critical Capacitance for Self Excited Induction Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 3, pp. 244-249, September 1998.
- [9] M.B. Brennen and A. Abbondanti, "Static Exciters for Induction Generators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-13, no. 5, pp. 422-428, September/October 1977.

- [10] N.H. Malik, A.H. Al-Bahrani, "Influence of the Terminal Capacitor on the Performance Characteristics of SEIG," *IEE Proceedings of Institution of Electrical Engineering, Part C*, vol. 137, no. 2 pp. 168-173, March 1990.
- [11] G.V. Jayaramaiah and B.G. Fernandes, "Novel Voltage Controller for Stand-alone Induction Generator using PWM-VSI," *IEEE Conference on Industry Applications*, vol. 1, pp. 204-208, October 2006.
- [12] D.W. Novotny, D.J. Gritter, and G.H. Studtmann, "Self-Excitation in Inverter Driven Induction Machines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, vol. PAS-96, no. 4, pp. 1117-1125, July/August 1977.
- [13] E. Muljadi and T.A. Lipo, "Series Compensated PWM Inverter with Battery Supply Applied to an Isolated Induction Generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 4, pp. 1073-1081, July/August 1994.
- [14] L. Sridhar, B. Singh, and C.S. Jha, "Transient Performance of the Self Regulated Short Shunt Self Excited Induction Generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 2, pp. 261-267, June 1995.
- [15] S.K. Jain, J.D. Sharma, and S.P. Singh, "Transient Performance of Three-Phase Self-Excited Induction Generator during Balanced and Unbalanced Faults," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, no. 1, pp. 50-57, January 2002.
- [16] T. Senjyu, N. Sueyoshi, K.Uezato, H. Fujita, and T. Funabashi, "Transient Stability Analysis of Induction Generator Using Torque-Time Characteristics," *IEEE Conference on Power Electronics and Drive Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 760-765, November 2003.
- [17] G.R. Slemon, "Modelling of Induction Machines for Electric Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 6, pp. 1126-1131, November/December 1989.
- [18] E.G. Marra, J.A. Pomilio, "Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bidirectional Converter for Rural Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 4, pp. 1073-1081, July/August 1999.
- [19] S.S. Wekhande, V. Agarwal, "Simple Control for a Wind Driven Induction Generator," *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 44-53, March/April 2001.

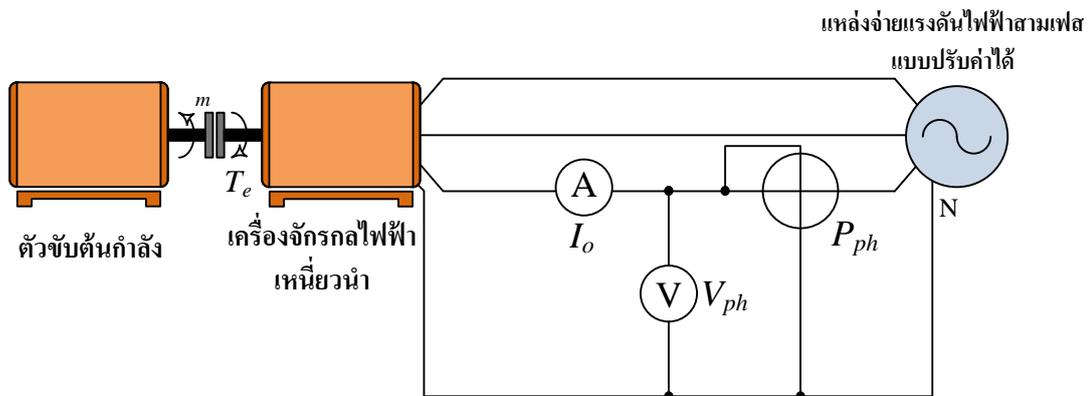
- [20] O. Ojo, I.E. Davidson, "PWM-VSI Inverter-Assisted Stand-Alone Dual Stator Winding Induction Generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 1604-1610, November/December 2000.
- [21] S.C. Kuo, L. Wang, "Analysis of Voltage Control for a Self-Excited Induction Generator using a Current Controlled Voltage Source Inverter (CC-VSI)," *IEE Proceedings Generation Transission and Distribtion*, vol. 148, no. 5, pp. 431-438, September 2001.
- [22] Ned Mohan and et.al., "Power Electronics Converter Applications and Design", 2nd Edition, John Wiley and Son.
- [23] B.K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR, 2001.
- [24] R. Krishnan, *Electric Motor Drives Modeling Analysis and Control*, Prentice Hall.
- [25] P.C. Sen, *Principles of Electric Machines & Power Electronics*, Wiley, 1999.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับค่ากระแสกระตุ้น

จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ว่าค่าความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) และค่ากระแสกระตุ้น (I_m) จะไม่สามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่ได้เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานในสภาวะมอเตอร์ เนื่องจากการทำงานในสภาวะที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับค่ากระแสกระตุ้นที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยที่ความเหนี่ยวนำร่วมภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีช่วงที่เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก อันจะส่งผลต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงได้ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับค่ากระแสกระตุ้น โดยจะอาศัยหลักการทดสอบแบบไร้โหลด (No-load test) [24] ,[25]



รูปที่ ก.1 โดอะแกรมการทดสอบแบบไร้โหลด

วิธีการทดสอบแบบไร้โหลดนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า (Open circuit test on a transformer) การทดสอบสามารถทำได้จากการต่อตัวขับเคลื่อนกำลังหมุนเข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำและต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสที่ปรับค่าได้ทางด้านขดลวดเสเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และต่อเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, และกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ก.1

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการบังคับให้ตัวขับเคลื่อนกำลังหมุนด้วยความเร็วเชิงโคจรที่ที่พิกัดความเร็วรอบเพื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนตามการทำงานของตัวขับเคลื่อนกำลัง จากนั้นให้จ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยปรับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-120% ของพิกัดเครื่องจักรกล

ไฟฟ้าและทำการบันทึกค่าที่ได้จากการอ่านเครื่องมือวัดและนำค่าที่ได้ในแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับค่ากระแสกระตุ้น ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\cos \theta_o = \frac{P_{ph}}{V_{ph} I_o} \quad (ก.1)$$

$$\theta_o = \cos^{-1} \left(\frac{P_{ph}}{V_{ph} I_o} \right) \quad (ก.2)$$

$$I_m = I_o \sin \theta_o \quad (ก.3)$$

$$L_m = \frac{V_{ph}}{2\pi f i_m} \quad (ก.4)$$

สมการ (ก.1) และ (ก.2) เป็นการคำนวณหาค่ามุม θ_o ที่ได้จากการอ่านค่าที่เครื่องมือวัดในแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และจะนำค่ามุม θ_o ที่ได้มาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่ากระแสกระตุ้นในสมการที่ (ก.3) และ (ก.4) ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบได้แสดงผลการทดลองในตารางที่ ก.1 และจะนำค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่ากระแสกระตุ้นที่ได้จากคำนวณทั้งหมด มาเขียนกราฟเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 3.8 ของบทที่ 3

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่ากระแสกระตุ้น

ค่าที่ได้จากการทดสอบ			ค่าที่ได้จากการคำนวณ	
V_{ph} [V]	I_o [A]	P_{ph} [W]	I_m [A]	L_m [H]
2.156	0.012	0.011667	0.010710664	0.640740985
5.06	0.021	0.043333	0.019174452	0.839996889
10.07	0.039	0.14	0.03643783	0.879684809
15.07	0.049	0.363333	0.042658198	1.124503657
20.09	0.063	0.608333	0.055245788	1.157526366

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่ากระแสกระตุ้น (ต่อ)

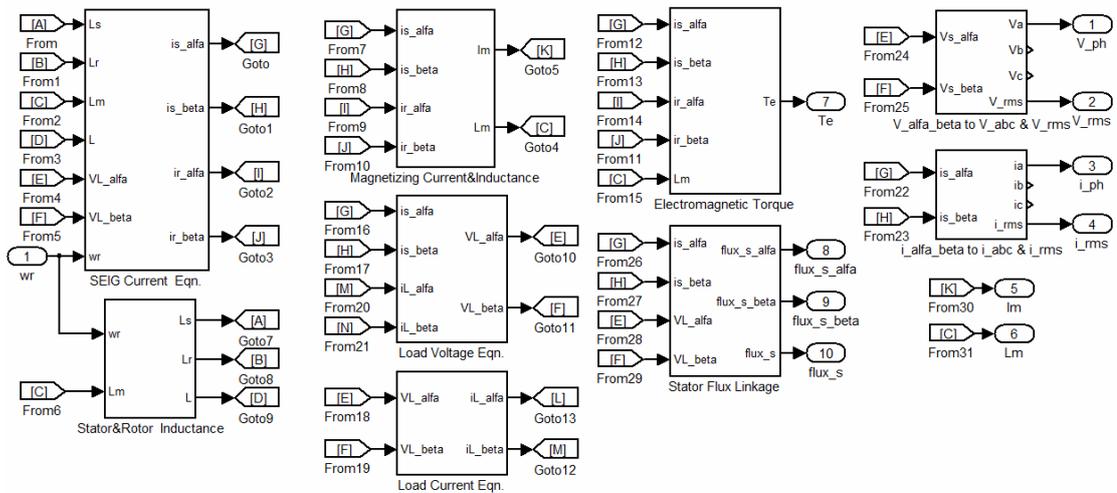
ค่าที่ได้จากการทดสอบ			ค่าที่ได้จากการคำนวณ	
V_{ph} [V]	I_o [A]	P_{ph} [W]	I_m [A]	L_m [H]
25.03	0.075	0.933333	0.065073507	1.224353328
30.29	0.089	1.416667	0.075720253	1.273319367
35.11	0.102	1.956667	0.085429564	1.308195851
40.4	0.114	2.683333	0.092652564	1.387950734
45	0.127	3.116667	0.106452595	1.345570285
50	0.139	3.893333	0.115142443	1.382243929
55.1	0.15	4.833333	0.121677133	1.441427348
60	0.163	5.666667	0.132850468	1.437600742
65.2	0.173	6.8	0.138027757	1.503596451
70.2	0.188	7.833333	0.151302931	1.47686194
75.5	0.201	8.866667	0.163122691	1.473271208
80.2	0.211	10.33333	0.16709303	1.527798791
85.1	0.221	10.33333	0.184653138	1.46697595
90.2	0.238	13.16667	0.187979255	1.52737874
95.6	0.249	15	0.193344791	1.573894229
100.1	0.261	16.26667	0.204238579	1.560078402
105.1	0.275	17.95	0.215536239	1.552145906
110.3	0.287	19.86667	0.223444949	1.571285486
115.3	0.301	22.1	0.232082137	1.581385382
120.2	0.311	24.06667	0.237975229	1.607766002
125.4	0.329	26.4	0.252823398	1.578811934
130.6	0.344	28.43333	0.266340004	1.560834665
135.1	0.355	30.56667	0.273559793	1.572002416
140.2	0.37	33.33333	0.283500054	1.574145944
145.1	0.381	36.56667	0.285747975	1.616346167
150.5	0.398	40	0.296250912	1.617062965
155.1	0.411	42.66667	0.305361679	1.616766827
160.4	0.432	47	0.317434671	1.60842247

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่ากระแสกระตุ้น (ต่อ)

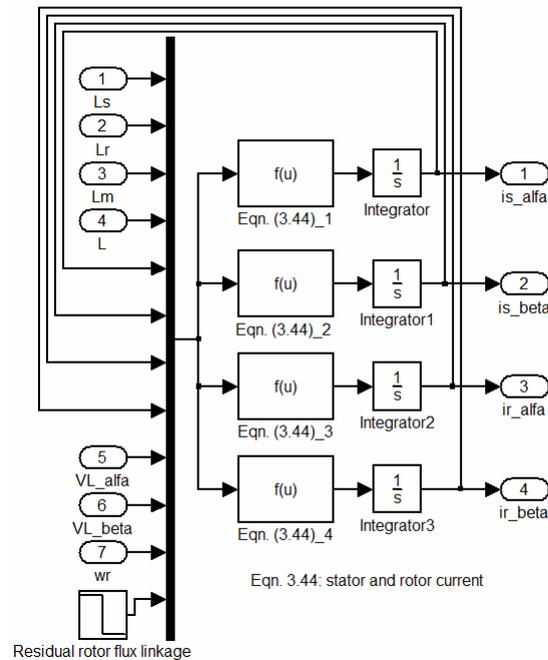
ค่าที่ได้จากการทดสอบ			ค่าที่ได้จากการคำนวณ	
V_{ph} [V]	I_o [A]	P_{ph} [W]	I_m [A]	L_m [H]
165.1	0.443	49	0.328884174	1.597917027
170	0.461	52	0.344901415	1.568931824
175.3	0.483	56.16667	0.361428889	1.543864499
180	0.496	59.33333	0.370621515	1.545937762
185.1	0.512	62.66667	0.38408855	1.533999386
190	0.531	66.66667	0.398555135	1.517453248
195.5	0.544	70.66667	0.406544088	1.530697029
200.8	0.568	76.66667	0.420533108	1.519895197
205.7	0.59	79.66667	0.445086803	1.471091552
210.3	0.605	84	0.454401986	1.473157492
215.5	0.629	90.66667	0.467578655	1.467042598
220	0.652	94.66667	0.489840078	1.429613012
225	0.681	99.66667	0.517247343	1.384632041
230.2	0.702	106	0.529879378	1.382860682
235.1	0.73	111.3333	0.555556869	1.347020591
240.6	0.765	119	0.583608571	1.312272683
245.3	0.796	126.3333	0.606938962	1.286478871
250.4	0.832	133.6667	0.638175637	1.248947639
255.7	0.867	142.3333	0.664709559	1.224472205
260.9	0.921	156	0.700514401	1.185515232
265.5	0.964	164.6667	0.737991393	1.14515258
270.8	1.022	178.3333	0.781540567	1.102928253
275.7	1.067	188.3333	0.819664683	1.070657764
278.5	1.11	195.6667	0.859354842	1.031579726

ภาคผนวก ข

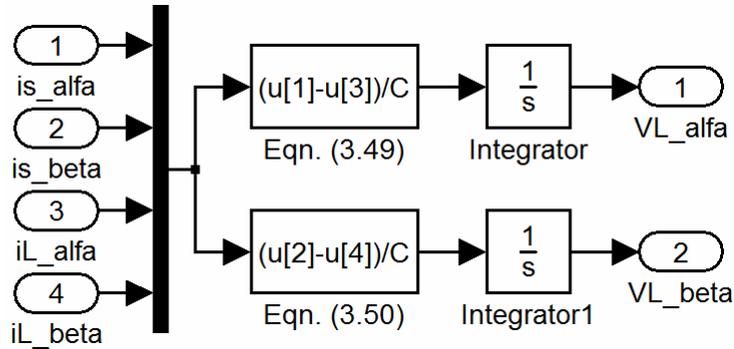
รายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง



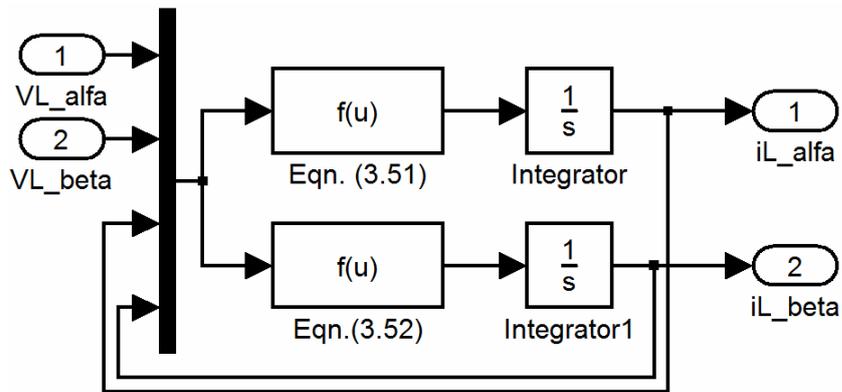
รูปที่ ข.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



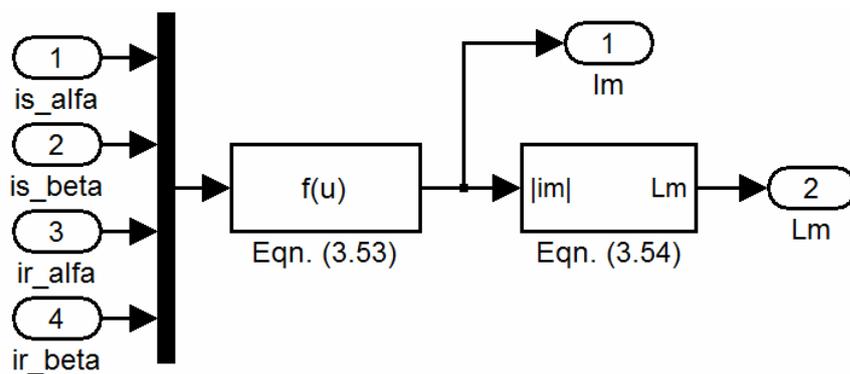
รูปที่ ข.2 แบบจำลองย่อยกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์



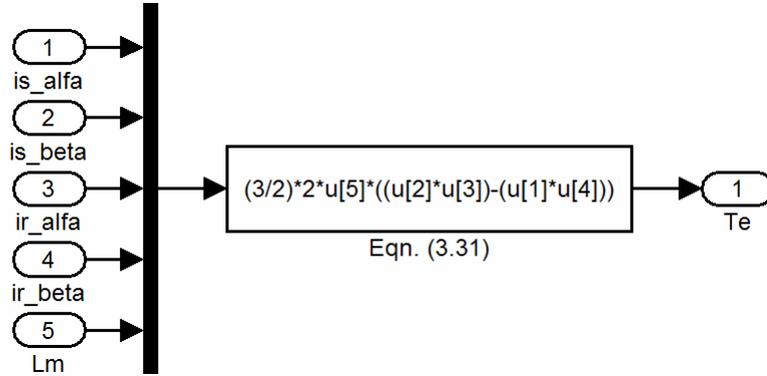
รูปที่ ข.3 แบบจำลองย่อยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด



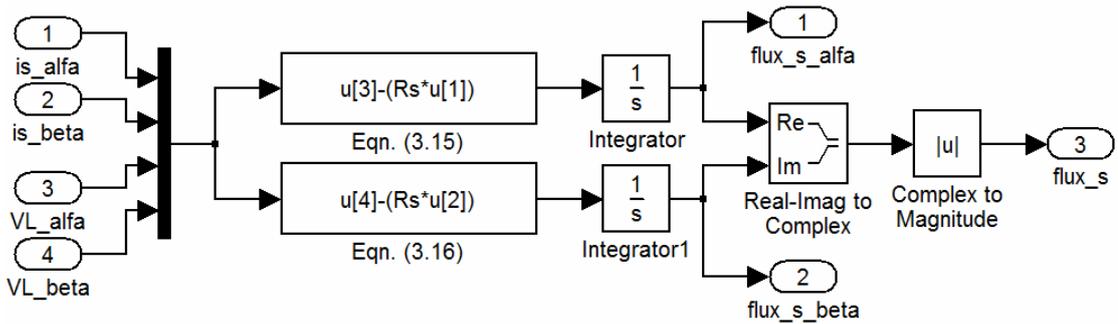
รูปที่ ข.4 แบบจำลองย่อยกระแสไฟฟ้าที่ไหล



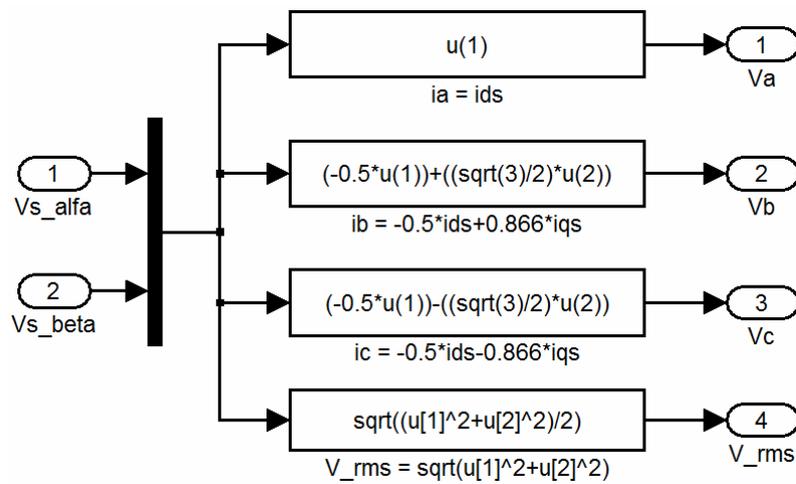
รูปที่ ข.5 แบบจำลองย่อยความเหนี่ยวนำร่วมและกระแสกระตุ้น



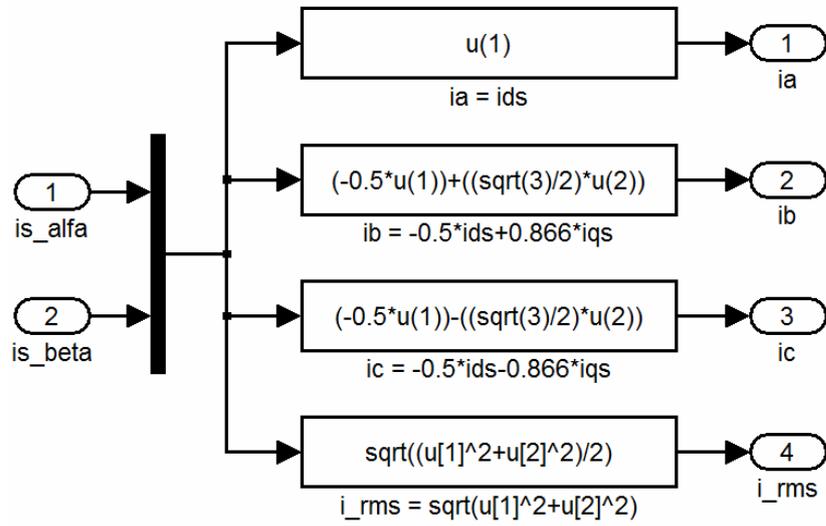
รูปที่ ข.6 แบบจำลองย่อยแรงบิดทางไฟฟ้า



รูปที่ ข.7 แบบจำลองย่อยฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ ข.8 แบบจำลองย่อยการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากสองเฟส ($\alpha\beta$) เป็นสามเฟส (abc)



รูปที่ ข.9 แบบจำลองการแปลงกระแสไฟฟ้าจากสองเฟส ($\alpha\beta$) เป็นสามเฟส (abc)