



การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ
สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

Design and Development of an Automatic Controller for Pico Hydro Power Plant

วรรณศักดิ์ ชุมคง

Wannasak Chumkong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าแบบอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก
ผู้เขียน	นายวรรณศักดิ์ ชุมคง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าแบบอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก ขนาด 2.2 kW 380 V 50 Hz 1430 rpm 4 pole เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ต้นแบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก ขนาด 2.2 kW เป็นต้นกำลังแทนกำลังน้ำที่ใช้ขับ ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าแบบอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กใช้เทคนิคฟลักซ์คงที่ในการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองซึ่งเป็นการควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ให้มีค่าคงที่ภายใต้สภาวะของโหลดและความเร็วที่มีการเปลี่ยนแปลง ทดสอบการทำงานของระบบควบคุมโดยให้ทำงานที่ภาระและความเร็วที่แตกต่างกัน โดยการควบคุมการต่อชุดของตัวเก็บประจุเข้ากับขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลดและความเร็ว โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 79.90 เปอร์เซ็นต์ขณะมีภาระ 62.73 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าลดลงเมื่อทำงานที่ความถี่ต่ำ

คำสำคัญ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง, การควบคุม V/f, ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Thesis Title	Design and Development of an Automatic Controller for Pico Hydro Power Plant
Author	Mr. Wannasak Chumkong
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2010

ABSTRACT

This research presents the design and development of an automatic controller for a pico hydro power plant, using a 2.2 kW, 380 V, 50 Hz, 1430 rpm, 4 pole three-phase squirrel cage induction motor as a self-excited induction generator (SEIG). The prototype pico hydro power plant was constructed using a 2.2 KW variable speed three-phase squirrel cage induction motor as a prime mover. The automatic controller for the pico hydro power plant uses a constant flux technique to control the excitation in the SEIG, the ratio of voltage to frequency under various rotor speeds and loads was maintained by controlling the capacitor banks connected to the generator output terminals. The automatic controller was tested under various load and speed conditions. It is found that the prototype SEIG has a stable operation under varying loads and speeds. The maximum efficiency at 62.73 percent of the rating is 79.90 percent. However, the efficiency decreases when the SEIG operates at lower frequencies.

Keywords: Self-excited induction generator, V/f control, Performance of induction generator.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานการวิจัย.....	4
2. ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก (Pico Hydro Power Plant).....	5
2.1.1 แหล่งน้ำป้อน.....	6
2.1.2 บ่อหรืออ่างเก็บน้ำ.....	6
2.1.3 ท่อส่งน้ำ.....	6
2.1.4 ชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	6
2.1.5 ชุดควบคุม.....	6
2.1.6 ภาระทางกล.....	6
2.1.7 ระบบส่งไฟฟ้า.....	6
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	6
2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	8
2.3.1 กระบวนการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Voltage Build Up) ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	8
2.3.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ขณะไม่มีภาระ.....	8
2.3.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ขณะมีภาระ.....	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	10
2.3.4.1 การใช้งานกับต้นกำลังแบบความเร็วคงที่.....	11
2.3.4.2 การใช้งานกับต้นกำลังแบบความเร็วแปรผัน.....	11
2.3.5 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	11
2.3.5.1 ขั้นตอนในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเองโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์.....	15
2.3.6 การหาค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำ (C_{min}) ที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	16
2.3.7 เทคนิคในการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	18
3. ผลของตัวเก็บประจุต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	20
3.1 การศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	20
3.1.1 การศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ.....	21
3.1.1.1 วิธีการทดสอบ.....	21
3.1.1.2 ผลการทดสอบ.....	21
3.1.2 การศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ.....	22
3.1.2.1 วิธีการทดสอบ.....	22
3.1.2.2 ผลการทดสอบ.....	23
3.1.3 ผลการศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	24
3.2 การหาค่าพารามิเตอร์และการทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	25
3.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 1 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ.....	25
3.2.1.2 กราฟคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสถานะไร้โหลด.....	25
3.2.2 ขั้นตอนในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ กระตุ้นเองโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์.....	28
3.2.3 การทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ กระตุ้นเอง.....	28
3.2.3.1 ผลการทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเอง.....	28
3.3 การจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุที่ใช้กับระดับพลังค์ แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	34
3.3.1 ขั้นตอนในการจำลอง.....	34
3.3.2 ผลการจำลอง.....	35
3.4 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายใน ตัวเองกับตัวเก็บประจุขั้นต่ำ.....	36
3.4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	36
3.4.1.1 ตัวเก็บประจุขั้นต่ำ.....	36
3.4.2 ขั้นตอนในการจำลอง.....	37
3.4.3 ผลการจำลอง.....	37
3.5 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ กระตุ้นโดยเทคนิคพลังค์คงที่.....	39
3.5.1 ขั้นตอนในการจำลอง.....	39
3.5.2 ผลการจำลอง.....	39
3.6 การจำลองเพื่อหาค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบควบคุม.....	42
3.6.1 การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.1.1 ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	42
3.6.1.2. การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นอินพุตในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	42
3.6.2 ขั้นตอนในการจำลอง.....	43
3.6.3 ผลการจำลอง.....	43
4. การออกแบบและการทดสอบระบบควบคุม.....	44
4.1 การออกแบบระบบควบคุม.....	44
4.1.1 การเลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
4.1.1.1 การวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	44
4.1.1.2 การวัดค่าความถี่.....	46
4.1.1.3 รีเลย์ (Relay).....	47
4.1.1.4 หน่วยประมวลผล.....	47
4.1.2 ระบบที่ใช้จำลองเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดจิ๋ว.....	48
4.1.2.1 ระบบควบคุม (Control System).....	48
4.1.2.2 การทำงานของระบบควบคุม.....	53
4.2 การทดสอบระบบควบคุม.....	54
4.2.1 ขั้นตอนในการทดสอบระบบควบคุม.....	55
4.2.2 ผลการทดสอบระบบควบคุม.....	55
4.2.2.1 ผลการทดสอบการสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	55
4.2.2.2 ผลการทดสอบขณะระบบควบคุมเริ่มทำงาน.....	55
4.2.2.3 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะทำงานที่ภาระขนาดต่างๆ โดยควบคุมความเร็ว.....	56
4.2.2.4 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด.....	60
4.2.2.5 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.6 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความถี่สูง กว่าพิกัด.....	63
4.2.2.7 การทดสอบหาสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ...	64
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ กระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	66
4.3.1 ขนาดและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องต้น กำลัง.....	67
4.3.2 วิธีการหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น ภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	67
4.3.3 ขั้นตอนในการทดสอบ.....	68
4.3.4 ผลการทดสอบ.....	68
4.3.4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ แรงดันและความถี่พิกัด.....	68
4.3.4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ ความเร็วรอบต่ำ.....	69
5. สรุปผลการวิจัยปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.1.1 การศึกษาการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	72
5.1.2 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	72
5.1.3 การออกแบบระบบควบคุม.....	73
5.1.4 การสร้างเครื่องต้นแบบของระบบควบคุม.....	73
5.1.5 การทดสอบและผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุม.....	73
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	74
5.2.1 ปัญหา.....	74
5.2.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	84
ภาคผนวก ง.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	91

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3-1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	25
3-2 ข้อมูลที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	42
3-3 การออกแบบจุดทำงานสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	42
3-4 ผลการจำลองเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบควบคุม.....	43
4-1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องต้นกำลัง.....	67
4-2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันและความถี่พิกัด.....	68

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก.....	5
2-2 วงจรสมมูล 1 เฟส ของมอเตอร์เหนี่ยวนำอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์.....	7
2-3 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ.....	9
2-4 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ.....	10
2-5 ระบบที่ใช้ในการจำลอง โดย Admittance Model.....	12
2-6 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	12
2-7 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของตัวคุณลักษณะถนัด (a) และตัวคุณลักษณะเร็ว (b).....	12
2-8 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่แปลงมาจากวงจรสมมูลในภาพประกอบ 2-7.....	13
2-9 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ใช้ในการหาค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำ.....	16
2-10 การควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	19
3-1 บล็อกไดอะแกรมของการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ.....	21
3-2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็รรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระเมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าแตกต่างกัน.....	22
3-3 บล็อกไดอะแกรมของการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ.....	23
3-4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็รรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระเมื่อใช้ตัวเก็บประจุและโหลดที่มีค่าแตกต่างกัน.....	23

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-5 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต้านออกกับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระเมื่อใช้ตัวเก็บประจุและโหลดที่มีค่าแตกต่างกัน.....	24
3-6 กราฟคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด.....	26
3-7 วงจรสมมูล 1 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในสภาวะไร้โหลด.....	25
3-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ช่องอากาศ (E_p) และกระแสกระตุ้น (I_m) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด.....	26
3-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศ (E_p) กับ รีแอกแตนซ์แม่เหล็กต่อเฟส (X_m) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด.....	27
3-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=21.13\mu F$	28
3-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=21.13\mu F$	29
3-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=21.13\mu F$	29
3-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=21.13\mu F$	30
3-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=21.13\mu F$	30
3-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=21.13\mu F$	31
3-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=30.167\mu F$	31
3-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=30.167\mu F$	32

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วของ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=30.167\mu F$	32
3-19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วของ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=30.167\mu F$	33
3-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=30.167\mu F$	33
3-21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วของ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=30.167\mu F$	34
3-22 ผลการจำลองค่าตัวเก็บประจุมีผลต่อระดับฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	35
3-23 การหาค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กที่ไม่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไม่อิ่มตัว.....	36
3-24 แรงดันไฟฟ้า-ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยตัวเก็บประจุขึ้นต่ำ.....	37
3-25 ค่าตัวเก็บประจุ-ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยตัวเก็บประจุขึ้นต่ำ.....	38
3-26 อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่-ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยตัวเก็บประจุขึ้นต่ำ.....	38
3-27 อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่-ความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	40
3-28 ค่าตัวเก็บประจุ-ความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	40
3-29 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว-ความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	41
3-30 กำลังไฟฟ้า-ความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	41
4-1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7 เบอร์ LPC2138.....	47

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-2 ระบบที่ใช้จำลองเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก.....	48
4-3 ชุดควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	49
4-4 เซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า.....	49
4-5 เซ็นเซอร์วัดความถี่.....	50
4-6 บอร์ด ET-SSRAC PLUS.....	51
4-7 ชุดตัวเก็บประจุปรับค่าได้.....	51
4-8 แมกเนติกคอนแทคเตอร์.....	52
4-9 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุม.....	53
4-10 การทดสอบระบบควบคุม.....	54
4-11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะสตาร์ท.....	55
4-12 ผลการทดสอบขณะระบบควบคุมเริ่มทำงาน.....	56
4-13 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะมีภาระทางไฟฟ้า 500 โอห์ม.....	57
4-14 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะมีภาระทางไฟฟ้า 400 โอห์ม.....	58
4-15 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะมีภาระทางไฟฟ้า 350 โอห์ม.....	59
4-16 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดระหว่าง 500 โอห์มและ 400 โอห์มอย่างทันทีทันใด.....	60
4-17 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดระหว่าง 700 500 400 และ 350 โอห์มอย่างทันทีทันใด.....	61
4-18 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ.....	62
4-19 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความถี่สูงกว่าพิกัด.....	63
4-20 หน้าต่างแสดงการทำงานของระบบควบคุมขณะทดสอบหาสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ.....	64
4-21 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสขณะทดสอบหาสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ.....	65
4-22 สเปกตรัมของกระแสขณะระบบควบคุมกำลังทำงาน.....	65
4-23 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ.....	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-24 บล็อกไดอะแกรมแสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่.....	66
4-25 การควบคุมอัตราส่วนระหว่าง V/f กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทดสอบประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ.....	69
4-26 ค่าตัวเก็บประจุ (C) กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทดสอบประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ.....	70
4-27 กำลังเอาต์พุตกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทดสอบประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ.....	70
4-28 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับกำลังทำงานขณะทดสอบประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัญหาวิกฤติพลังงานเป็นปัญหาที่ทั่วโลกกำลังเผชิญ การแสวงหาพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในทุกขณะ พลังงานลมและพลังงานน้ำกล่าวได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่มีวันหมด ซึ่งต่างแหล่งพลังงานอื่น การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมและพลังงานน้ำได้มีการดำเนินการแล้วในหลายประเทศ โดยเฉพาะในประเทศที่มีพลังงานลมและพลังงานน้ำศักยภาพสูง

สำหรับพลังงานลมและพลังงานน้ำของประเทศไทยได้มีการศึกษาและวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานลมและพลังงานน้ำขนาดเล็ก จากปัญหาเกี่ยวกับความเหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและพลังงานน้ำเล็ก ซึ่งเป็นระบบแบบต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน (Variable speed prime mover) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อดีเหนือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น มีโครงสร้างที่แข็งแรง ราคาถูก การบำรุงรักษาต่ำเนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน แต่มีข้อเสียคือต้องการกำลังรีแอคทีฟสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กในแกน โรเตอร์ การติดตั้งใช้งานแบบระบบอิสระ (Stand Alone System) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะดึงกำลังรีแอคทีฟจากชุดตัวเก็บประจุที่ต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ขึ้นอยู่กับความเร็วและภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้า ประสิทธิภาพ และเสถียรภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โครงการนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของระบบควบคุมการกระตุ้น (Excitation) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) โดยวิธีการกระตุ้นภายในตัวเอง (Self-Excited Induction Generator: SEIG) ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน (Variable speed prime mover) โดยควบคุมการปรับค่าตัวเก็บประจุสำหรับกระตุ้น เพื่อให้มีการกระตุ้นที่เหมาะสมเพื่อนำมาเป็นระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 Wang et al. [1] นำเสนอการศึกษาสมรรถนะการทำงานแบบพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยมีโหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการเปรียบเทียบผลของการนำตัวเก็บประจุแบบสั้น (Shot-shut capacitor) และตัวเก็บประจุแบบยาว (Long-shut capacitor) มาต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการต่อตัวเก็บประจุแบบยาวทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation) ของแรงดันที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ส่วนการต่อแบบสั้นให้ผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ดีกว่า

1.2.2 Yaser et al. [2] นำเสนอเทคนิคการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อควบคุมให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าคงที่เพื่อให้มีการกระตุ้นที่เหมาะสมเมื่อความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง จำลองโดยใช้ MATLAB

1.2.3 Neam et al. [3] นำเสนอการศึกษาสมรรถนะการทำงานแบบพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยวิธีกระตุ้นเองที่ขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผันในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม โดยแสดงให้เห็นว่าความเร็วโรเตอร์และค่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Voltage) ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะสตาร์ท

1.2.4 Sandhu et al. [4] นำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองในสถานะอยู่ตัว ภายใต้เงื่อนไขของต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกระตุ้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วของโรเตอร์ และโหลด

1.2.5 Grantham et al. [5] นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะแบบพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งถูกขับโดยระบบพลังงานลม จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุสามารถชดเชยแรงดันที่ตกเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโหลดได้ ส่วนการเพิ่มขึ้นของโหลดส่งผลให้ความเร็วและความถี่ตก ซึ่งสามารถชดเชยได้โดยการเพิ่มความเร็วของโรเตอร์

1.2.6 Riawan et al. [6] นำเสนอเทคนิคการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก โดยวิธีการกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งกระตุ้นด้วยวิธีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานและวิธีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

ร่วมกับอนุกรม โดยใช้ตัวเก็บประจุค่าคงที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานและอนุกรมพร้อมกันนั้น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำงานได้ในช่วงของความถี่ที่มีความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงกว้างกว่าเมื่อเทียบกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานที่ขั้วเพียงอย่างเดียว

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกโดยวิธีการกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน

1.3.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกโดยวิธีการกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผันได้

1.3.3 เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของระบบควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกโดยวิธีการกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผันได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ทำการจำลองการทำงานของระบบรวมถึงการทดสอบระบบทั้งหมดภายใต้สถานะอยู่ตัว (Steady state)

1.4.2 ทำการออกแบบและพัฒนาาระบบควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกโดยวิธีการกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแบบแปรผันเพื่อให้มีการกระตุ้นที่เหมาะสมและสามารถจ่ายโหลดได้

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาศึกษาเทคนิคควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน

การศึกษาเทคนิคในการควบคุมค่าตัวเก็บประจุที่นำมาต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อควบคุมให้มีการกระตุ้นที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงเสถียรภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลัก

1.5.2 สร้างแบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน

ทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ นำมาสร้างแบบจำลองรวมถึงการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งมีการควบคุมการกระตุ้นที่เหมาะสมเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุม และการสร้างเครื่องต้นแบบของระบบควบคุม

1.5.3 สร้างเครื่องต้นแบบของระบบควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

นำผลการออกแบบในหัวข้อที่ 1.5.2 มาสร้างเป็นเครื่องต้นแบบของระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเพื่อควบคุมให้มีการกระตุ้นที่เหมาะสม

1.5.4 ทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

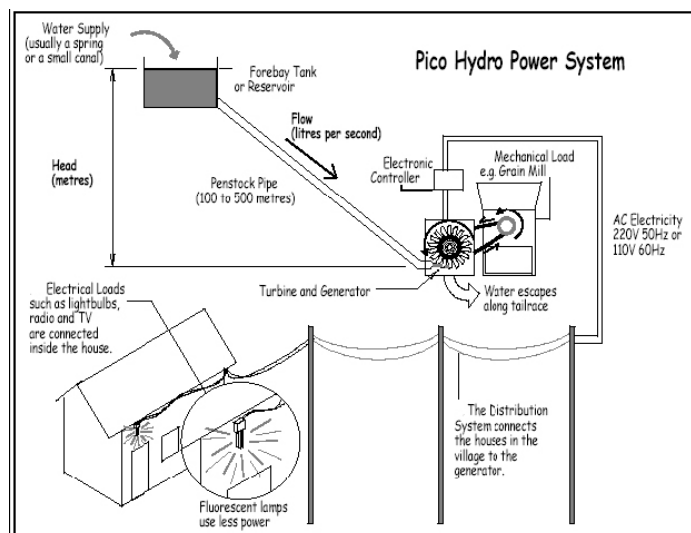
ทดสอบการทำงานของระบบควบคุม โดยทดสอบที่สภาวะโหลดและความเร็วที่แตกต่างกัน รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเมื่อทำงานร่วมกับระบบควบคุม

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก จำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับข้อมูลพื้นฐานและกระบวนการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก (Pico Hydro Power Plant)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กหมายถึงระบบผลิตไฟฟ้าที่อาศัยพลังงานน้ำมาหมุนกังหันที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งระบบมีขนาดเล็ก โดยกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์ การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้เป็นระบบแบบอิสระ (stand alone system) ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งอยู่นอกเขตบริการของการไฟฟ้า ส่วนประกอบของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กได้แก่ แหล่งน้ำป้อน (Water supply) บ่อหรืออ่างเก็บน้ำ (Reservoir) ท่อส่งน้ำ (Penstock pipe) ชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Turbine and Generator) ชุดควบคุม (Electronic controller) ภาระทางกล (Mechanical load) ระบบส่งไฟฟ้า (Distribution system) และภาระทางไฟฟ้าของระบบ (Consumer) ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 2-1



ภาพประกอบ 2-1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก [7]

2.1.1 แหล่งน้ำป้อน

แหล่งป้อนน้ำเป็นแหล่งน้ำจากธรรมชาติ เช่น น้ำตก หรือแหล่งน้ำอื่นๆ ซึ่งอยู่ในที่สูงทำหน้าที่ป้อนน้ำให้กับระบบ โดยจะผันน้ำจากน้ำตกส่วนหนึ่งไปเก็บไว้ในบ่อหรืออ่างน้ำ เป็นการแบ่งน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อระบบนิเวศ

2.1.2 บ่อหรืออ่างเก็บน้ำ

บ่อหรืออ่างเก็บน้ำส่วนมากจะทำหน้าที่กักน้ำยกสูงขึ้นมาจากพื้นที่ทำหน้าที่เก็บน้ำเพื่อจ่ายให้กับท่อส่ง ระดับของน้ำในบ่อหรืออ่างเก็บน้ำจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ไหลจากแหล่งป้อนน้ำ ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำในท่อส่ง ทำให้ระบบนี้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าแบบต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน

2.1.3 ท่อส่งน้ำ

ท่อส่งน้ำทำหน้าที่ลำเลียงน้ำไปยังชุดกังหันเพื่อจุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุน

2.1.4 ชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชุดกังหันส่วนใหญ่จะต่อตรงอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่รับพลังงานจากน้ำทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน

2.1.5 ชุดควบคุม

ชุดควบคุมทำหน้าที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้คงที่ก่อนจ่ายให้กับโหลด

2.1.6 ภาระทางกล

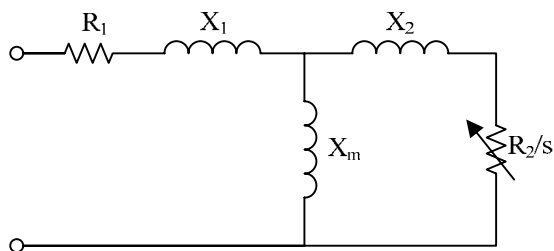
ภาระทางกลทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของชุดกังหันซึ่งต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่มีความเร็วสูงเกินไป

2.1.7 ระบบส่งไฟฟ้า

ระบบส่งไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปทางด้านสเตเตอร์ โดยสเตเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนไปเหนี่ยวนำให้โรเตอร์หมุนตามไปด้วย ทำให้ได้พลังงานกลนำไปใช้งานได้ วงจรสมมูล 1 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงดังภาพประกอบ 2-2



ภาพประกอบ 2-2 วงจรสมมูล 1 เฟส ของมอเตอร์เหนี่ยวนำอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์[8]

โดยที่ R_1 คือ ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟส (Ω)

R_2 คือ ความต้านทานทางด้านโรเตอร์ต่อเฟสอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ (Ω)

X_1 คือ รีแอกแตนซ์เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (Ω)

X_2 คือ รีแอกแตนซ์เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในขดลวดโรเตอร์ต่อเฟสอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ (Ω)

X_m คือ รีแอกแตนซ์แม่เหล็กต่อเฟสอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ (Ω)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความถี่เป็นดังสมการที่ (2-1) [8]

$$n_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (2-1)$$

โดยที่ n_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

f คือ ความถี่ (Hz)

ค่าสลิปสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2-2) [8]

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2-2)$$

โดยที่ s คือ ค่าสลิป

n_r คือ ความเร็วโรเตอร์ (rpm)

n_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

กำลังกลไฟฟ้าในระบบ 1 เฟสสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2-3) [8]

$$P_{em} = \frac{I_2^2 R_2 (1-s)}{s} \quad (2-3)$$

โดยที่ P_{em} คือ กำลังกลไฟฟ้า (Electromechanical power) (W)

I_2 คือ กระแสเสดเตอร์ (A)

ประสิทธิภาพ (Efficiency) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2-4) [8]

$$Efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-4)$$

โดยที่ P_{out} คือ กำลังเอาต์พุต (W)

P_{in} คือ กำลังอินพุต (W)

2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

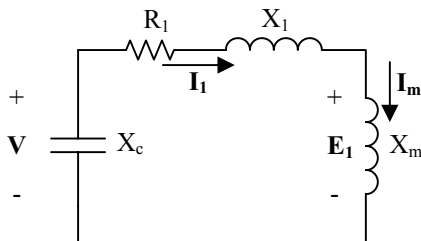
มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกสามารถนำมาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้ชุดตัวเก็บประจุขนาดเหมาะสมต่อขานานที่ขั้วสำหรับกระตุ้น ซึ่งเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

2.3.1 กระบวนการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Voltage Build Up) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกขับด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ในขณะที่ไม่มีภาระ ฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในโรเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf) ซึ่งมีค่าต่ำๆขึ้นที่ขดลวดเสดเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำค่าต่ำๆนี้ทำให้เกิดกระแสไหลที่ตัวเก็บประจุ ผลที่ได้คือมีการสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดเสดเตอร์และค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งถึงค่าๆหนึ่ง ซึ่งระดับของแรงดันไฟฟ้าที่สร้างจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสกระตุ้นที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุ

2.3.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ

ขณะไม่มีภาระ ความเร็วโรเตอร์จะมีขนาดเท่ากับความเร็วซิงโครนัสค่าสลิปจึงมีค่าเป็นศูนย์ วงจรทางด้านโรเตอร์จะเป็นวงจรเปิด (Open circuit) วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระแสดงดังภาพประกอบ 2-3



ภาพประกอบ 2-3 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น
ภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ[8]

โดยที่ X_c คือ รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้น (Ω)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อเฟส, เฟสเซอร์ (V)

E_1 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อเฟสที่ความถี่พิกัด, เฟสเซอร์ (V)

I_1 คือ กระแสเสตเตอร์ต่อเฟส, เฟสเซอร์ (A)

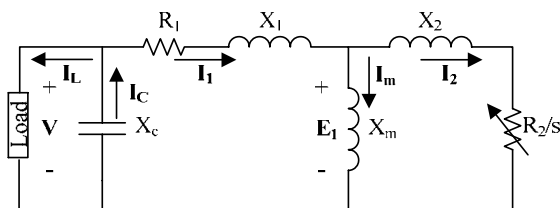
I_m คือ กระแสกระตุ้นต่อเฟส, เฟสเซอร์ (A)

ขณะไม่มีภาระ ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่จ่ายกระแสกระตุ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยขนาดของตัวเก็บประจุ (C) ที่ใช้มีความสัมพันธ์กับความถี่ (f) และค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็ก (X_m) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงดังสมการที่ (2-5) [8]

$$C = \frac{1}{2\pi f X_m} \quad (2-5)$$

2.3.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ

การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระแสดงดังภาพประกอบ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง
ขณะมีภาระ [9]

โดยที่ I_L คือ กระแสเตเตอร์ต่อเฟส, เฟสเซอร์ (A)

I_2 คือ กระแสโรเตอร์ต่อเฟส, เฟสเซอร์ (A)

I_m คือ กระแสกระตุ้น, เฟสเซอร์ (A)

I_c คือ กระแสรีแอคทีฟที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุ, เฟสเซอร์ (A)

I_L คือ กระแสโหลด, เฟสเซอร์ (A)

ขณะมีภาระ กระแสรีแอคทีฟที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุจะถูกจ่ายไปยังโหลด แกน
เหล็ก และวงจรโรเตอร์ เป็นไปดังสมการที่ (2-6) [9]

$$I_C = I_L + I_m + I_2 \quad (2-6)$$

ทำให้ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่กว่าขณะไม่มีภาระ ขนาดของกระแส
กระตุ้นที่จ่ายไปยังแกนเหล็กไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมภายใต้สภาวะโหลด
และความเร็ว แต่ต้องไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กที่แกนเหล็ก ซึ่งทำให้เกิดกำลัง
สูญเสียในรูปของความร้อนอันเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสั้นลง

2.3.4 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองมักถูกใช้งานในระบบที่มี
การติดตั้งใช้งานแบบอิสระ โดยอาศัยกำลังรีแอคทีฟจากตัวเก็บประจุที่ต่อขนานที่ขั้วของเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าในการสร้างสนามแม่เหล็กในวงจรโรเตอร์ การใช้งานขึ้นอยู่กับลักษณะของต้นกำลังที่
นำมาขับ ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภทคือต้นกำลังแบบความเร็วคงที่และต้นกำลังแบบความเร็วแปรผัน

2.3.4.1 การใช้งานกับต้นกำลังแบบความเร็วคงที่

การใช้งานในระบบนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อกับชุดตัวเก็บประจุค่าคงที่ เพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับเกียร์บล็อก ซึ่งต่อกับชุดกังหัน เช่นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมที่มีการควบคุมความเร็วของกังหันโดยใช้เกียร์บล็อก เป็นต้น

ข้อดี

- มีโครงสร้างและส่วนประกอบที่ง่าย ราคาถูก
- มีประสิทธิภาพสูงที่ความเร็วสูง (ที่พิกัด)
- แรงดันและกำลังที่สร้างในระบบนี้มีค่าคงที่

ข้อเสีย

- การทำงานถูกจำกัดอยู่ในช่วงความเร็วคงที่
- ต้องการการบำรุงรักษาสูง

2.3.4.2 การใช้งานกับต้นกำลังแบบความเร็วแปรผัน

การใช้งานในระบบนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อกับชุดควบคุมแบบ Static Var Compensator (VSC) [10] ซึ่งภายในมีทรินสเตอร์ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ต่อกับชุดตัวเก็บประจุทำหน้าที่ในการควบคุมขนาดของกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายให้กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมที่มีการใช้ตัวควบคุม VSC สำหรับคงค่าแรงดัน เป็นต้น

ข้อดี

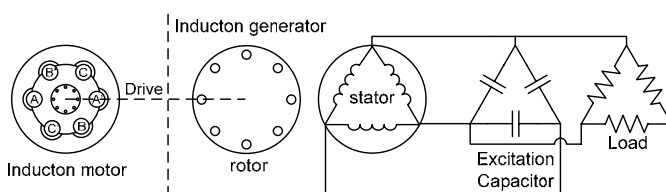
- ไม่มีจำกัดในเรื่องความเร็วสูงสุดและต่ำสุด (ต้องไม่เกินพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)
- กำลังไฟฟ้าและแรงดันที่สร้างจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น
- ควบคุมกำลังรีแอกทีฟได้

ข้อเสีย

- เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลา (dv/dt) สูงที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ต้องใช้ชุดตัวเก็บประจุขนาดใหญ่

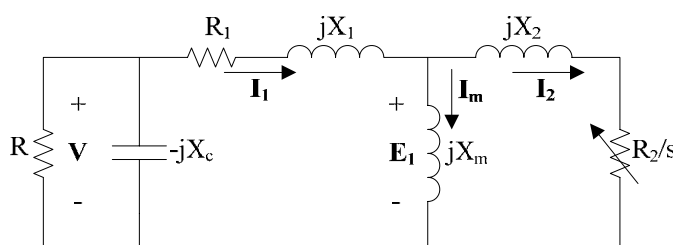
2.3.5 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (Admittance Model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการทำจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองภายใต้สภาวะอยู่ตัว ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ง่ายและมีผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับระบบจริง ระบบที่ใช้ในการจำลองแสดงดังภาพประกอบ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 ระบบที่ใช้ในการจำลองโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ [11]

วงจรสมมูล 1 เฟส ของระบบในรูปที่ 2-5 แสดงดังภาพประกอบ 2-6



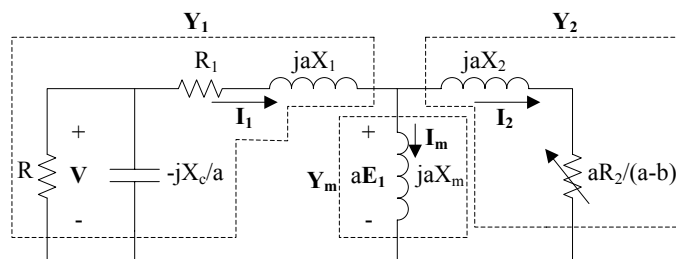
ภาพประกอบ 2-6 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง [11]

เมื่อ

R คือ ความต้านทานของรีซีสทิฟโหลดต่อเฟส

วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในภาพประกอบ 2-7 สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของตัวคูณลดความถี่ (a) และตัวคูณลดความเร็ว (b) แสดงดังภาพประกอบ 2-

7



ภาพประกอบ 2-7 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของตัวคูณลดความถี่ (a) และตัวคูณลดความเร็ว (b) [11]

เมื่อ

f_{rate} คือ ความถี่ที่กัด

f คือ ความถี่ทำงาน (operating frequency)

a คือ ตัวคูณลดความถี่ (reduce frequency), $a = \frac{f}{f_{rate}}$

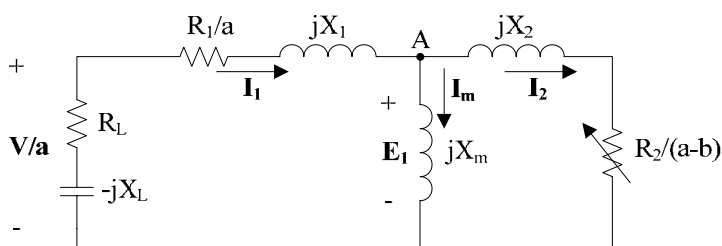
b คือ ตัวคูณลดความเร็ว (reduce speed), $b = \frac{n_r}{n_s}$

Y_1 แอดมิตแตนซ์สมมูลของสเตเตอร์ ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้น และโหลด

Y_2 แอดมิตแตนซ์สมมูลทางด้านโรเตอร์

Y_m แอดมิตแตนซ์สมมูลในแกนเหล็ก

จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ (2-7) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังภาพประกอบ 2-8



ภาพประกอบ 2-8 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่แปลงมาจากวงจรสมมูลในภาพประกอบ 2-7 [11]

เมื่อ

$$R_L = RX_C^2 / [a(a^2R^2 + X_C^2)] \quad (2-7)$$

$$X_L = R^2X_C / (a^2R^2 + X_C^2) \quad (2-8)$$

จากวงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นเอง ดังภาพประกอบ 2-8 เมื่อผลรวมของกระแสที่โหนด A มีค่าเป็นศูนย์สามารถเขียนเป็นสมการในรูปของแอดมิตแตนซ์ได้ดังสมการที่ (2-9) [11]

$$E_1 Y_1 + E_1 Y_m + E_1 Y_2 = 0 \quad (2-9)$$

เมื่อ E_1 ไม่เท่ากับศูนย์แสดงว่าผลรวมของแอดมิตแตนซ์มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงดังสมการที่ (2-10) [11]

$$Y_1 + Y_m + Y_2 = 0 \quad (2-10)$$

เมื่อจัดให้ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (2-10) เท่ากับศูนย์จะได้สมการดังสมการที่ (2-11) และ (2-12) ตามลำดับ [11]

$$\frac{(R_L + R_1/a)}{(X_1 - X_L)^2 + (R_L + R_1/a)^2} + \frac{R_2/(a-b)}{X_2^2 + (R_2/(a-b))^2} = 0 \quad (2-11)$$

$$-\frac{1}{X_m} - \frac{X_2}{X_2^2 + (R_2/(a-b))^2} - \frac{(X_1 - X_L)}{(X_1 - X_L)^2 + (R_L + R_1/a)^2} = 0 \quad (2-12)$$

จากสมการที่ (2-11) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวคูณลดความถี่ (a) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการกำลังห้าดังสมการที่ (2-13) [11]

$$Q_5 a^5 + Q_4 a^4 + Q_3 a^3 + Q_2 a^2 + Q_1 a + Q_0 = 0 \quad (2-13)$$

โดยที่

$$Q_0 = -b R_2 \left(\frac{R_3}{R}\right)^2 \quad (2-14)$$

$$Q_1 = R_2 \left(\frac{R_3}{R}\right)^2 + R_3 \left(\frac{R_2}{R}\right)^2 + b^2 R_3 \left(\frac{X_2}{R}\right)^2 \quad (2-15)$$

$$Q_2 = -2b R_3 \left(\frac{X_2}{R}\right)^2 - b R_2 \left[\left(\frac{R_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{X_1}{R}\right)^2 - 2 \left(\frac{X_1}{X_c}\right)^2 \right] \quad (2-16)$$

$$b^2 R_1 \left(\frac{X_2}{X_c}\right)^2 + Q_3 = R_2 \left[\left(\frac{X_1}{R}\right)^2 + \left(\frac{R_1}{X_c}\right)^2 - 2 \left(\frac{X_1}{X_c}\right) \right] + R_3 \left(\frac{X_2}{R}\right)^2 + R_1 \left(\frac{R_2}{X_c}\right)^2 + \quad (2-17)$$

$$Q_4 = -b \left[R_2 \left(\frac{X_1}{X_c}\right)^2 + 2R_1 \left(\frac{X_2}{X_c}\right)^2 \right] \quad (2-18)$$

$$Q_5 = R_2 \left(\frac{X_1}{X_c}\right)^2 + R_1 \left(\frac{X_2}{X_c}\right)^2 \quad (2-19)$$

$$R_3 = R_1 + R \quad (2-20)$$

จากสมการที่ (2-12) สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กต่อเฟส (X_m) ได้ดังสมการที่ (2-21) [11]

$$X_m = \frac{(R_L + R_1/a) [X_2^2 + (R_2/(a-b))^2]}{(R_2/(a-b))(X_1 - X_L) - X_2(R_L + R_1/a)} \quad (2-21)$$

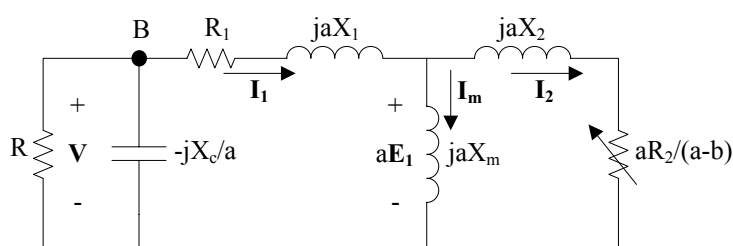
2.3.5.1 ขั้นตอนในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเองโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์

1. กำหนดพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ป้อนอินพุต ความเร็วโรเตอร์ (n) โหลด (R) และ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้น
2. คำนวณหาตัวคูณลดความเร็ว (b)
3. ใช้พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ตัวคูณลดความเร็ว (b) โหลด (R) และ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นในการคำนวณหาตัวคูณลดความเร็ว (a) โดยใช้สมการที่ (2-13)
4. คำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กต่อเฟส (X_m) ที่ความถี่พิกัดโดยใช้สมการที่ (2-21)
5. อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศ (E_1) โดยใช้ X_m จากกราฟระหว่าง $E_1 - X_m$
6. คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว กระแส กำลังไฟฟ้า และอื่นๆโดยใช้วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเอง

2.3.6 การหาค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำ (C_{\min}) ที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือขนาดของตัวเก็บประจุที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้วทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ [12]

ค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะเชื่อมต่อกับรีซีสทีฟโหลดสามารถหาได้โดยพิจารณาจากวงจรสมมูลในภาพประกอบ 2-9



ภาพประกอบ 2-9 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ใช้ในการหาค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำ

จากวงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นเอง ดังภาพประกอบ 2-9 เมื่อผลรวมของส่วนจริงและส่วนจินตภาพของแอดมิตแตนซ์ที่โหนด B มีค่าเป็นศูนย์สามารถเขียนเป็นสมการในรูปของตัวคูณลดความถี่ (a) และค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้น (X_c) ได้ดังสมการที่ (2-22) และ (2-23) ตามลำดับ

$$D_4 a^4 + D_3 a^3 + D_2 a^2 + D_1 a + D_0 = 0 \quad (2-22)$$

$$X_c = \frac{a^2 O_2}{O_3 O_4 + M_5 O_5} \quad (2-23)$$

โดยที่

$$M_1 = R_1 R_2 \quad (2-24)$$

$$M_2 = -X_1(X_2 + X_m) - X_2 X_m \quad (2-25)$$

$$M_3 = R_1(X_2 + X_m) \quad (2-26)$$

$$M_4 = (X_1 R_2) + (R_2 X_m) \quad (2-27)$$

$$M_5 = X_2 X_m \quad (2-28)$$

$$N_1 = \frac{M_2^2}{R} \quad (2-29)$$

$$N_2 = \frac{M_4^2}{R} \quad (2-30)$$

$$N_3 = \left(2M_1 \frac{M_2}{R}\right) + \left(2M_3 \frac{M_4}{R}\right) + (R_2 M_2) + (M_4 M_5) \quad (2-31)$$

$$N_4 = \left(\frac{M_3^2}{R}\right) + (M_3 M_5) \quad (2-32)$$

$$N_5 = \left(\frac{M_1^2}{R}\right) + (R_2 M_1) \quad (2-33)$$

$$O_0 = (b^2 N_4) + N_5 \quad (2-34)$$

$$O_1 = (-b N_3) - (2b N_4) \quad (2-35)$$

$$O_2 = (b^2 N_1) + N_2 N_3 N_4 \quad (2-36)$$

$$O_3 = -(2b N_1) \quad (2-37)$$

$$O_4 = N_1 \quad (2-38)$$

เมื่อ X_{\max} คือค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กที่ไม่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไม่อิมตัวมีค่าเท่ากับความชันของกราฟคุณลักษณะระหว่างกระแสและแรงดันในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งหาได้จากการทดสอบการทำงานเป็นมอเตอร์ขณะไม่มีภาระ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

เมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความเร็วโรเตอร์ และโหลดซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ป้อนอินพุต ความเร็วโรเตอร์ (n_r) โหลด (R) และให้ $X_m = X_{m_{max}}$
2. คำนวณหาตัวคูณลดความเร็ว (b)
3. ใช้พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ตัวคูณลดความเร็ว (b) โหลด (R) และค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กจากขั้นตอนที่ 1 ในการคำนวณหาตัวคูณลดความเร็ว (a) โดยใช้สมการที่ (2-22)
4. คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำโดยใช้สมการที่ (2-39) โดยใช้ค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กจากขั้นตอนที่ 1

$$C_{min} = \frac{O_3 O_4 + M_5 O_5}{100 \pi a^2 O_2} \quad (2-39)$$

2.3.7 เทคนิคในการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

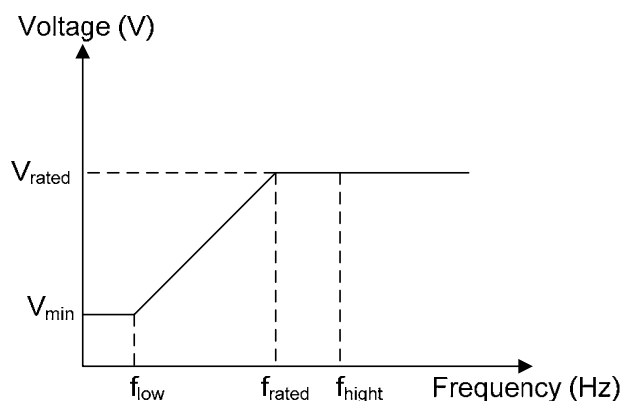
ขนาดฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องอากาศ (φ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่แสดงดังสมการที่ (2-40) [13]

$$\varphi \propto \frac{E_1}{f} \quad (2-40)$$

เมื่อไม่พิจารณาถึงแรงดันตกเนื่องจากอิมพีแดนซ์ทางด้านสเตเตอร์ สามารถประมาณค่าให้ $V \approx E_1$ จะได้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อความถี่ดังสมการที่ (2-41) [13]

$$\varphi \propto \frac{V}{f} \quad (2-41)$$

ในทางปฏิบัติขนาดของฟลักซ์มักจะถูกควบคุมให้มีขนาดคงที่เท่ากับตอนทำงานเป็นมอเตอร์ที่พิกัด ทั้งนี้เพื่อให้ได้สมรรถนะทางแรงบิดเท่ากับที่พิกัด กราฟระหว่างแรงดันและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่ แสดงดังภาพประกอบ 2-10



ภาพประกอบ 2-10 การควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่ [14]

การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่า f_{low} แรงดันตกที่ตกรวมที่อิมพีแดนซ์ทางด้านสเตเตอร์ไม่สามารถตัดทิ้งได้ การรักษาระดับของฟลักซ์แม่เหล็กให้คงที่ทำได้โดยการควบคุมให้แรงดันคงที่เท่ากับ V_{\min} ที่ความถี่สูงกว่า f_{low} จนถึง f_{rated} การควบคุมจะเป็นไปตามสมการที่ (2-41) ที่ความถี่สูงกว่า f_{rated} ขนาดของแรงดันไม่สามารถเพิ่มตามความถี่ที่สูงขึ้นได้เนื่องจากจะทำให้แรงดันที่ขั้วมีขนาดสูงกว่าแรงดันที่ค่าพิกัด ซึ่งอาจทำให้ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหาย ที่จุดนี้จะเป็นการควบคุมแบบแรงดันคงที่เท่ากับที่พิกัด

บทที่ 3

ผลของตัวเก็บประจุต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายใน ตัวเอง

หลังจากได้ศึกษาโครงสร้าง ทฤษฎีเกี่ยวกับการสร้างแรงดันไฟฟ้าและการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองในสถานะต่างๆ ทำให้รู้ว่าค่าตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับกระตุ้นขึ้นอยู่กับความเร็วและภาระทางไฟฟ้าหรือโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับในบทนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ ความเร็วและภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าส่งผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว กำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างไร และนำผลที่ได้จากการศึกษานี้ไปใช้ในการจำลองการทำงานเพื่อหาเทคนิคในการควบคุมรวมถึงการออกแบบระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นภายในตัวเองเพื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กในการติดตั้งใช้งานแบบระบบอิสระนอกเขตบริการของการไฟฟ้า

3.1 การศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กเป็นระบบแบบต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผันเนื่องจากความเร็วของกังหันน้ำที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความสูงของน้ำในบ่อหรืออ่างเก็บน้ำ แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่สร้างขึ้นในระบบนี้มีขนาดไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกำลังของน้ำ การใช้งานจึงนิยมไปประจุในแบตเตอรี่ก่อนแล้วจึงนำมาผ่านวงจรแปรผันแรงดันและความถี่เพื่อควบคุมให้มีขนาดคงที่ก่อนจ่ายให้กับโหลด ในระบบนี้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังสูญเสียในวงจรเรียงกระแสสำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง กำลังสูญเสียในวงจรแปรผันแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสตรงเพื่อควบคุมขนาดของแรงดันใช้ในการประจุแบตเตอรี่ให้คงที่ และกำลังไฟฟ้าที่ประจุในแบตเตอรี่เมื่อไม่พิจารณาถึงกำลังสูญเสีย กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีขนาดเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ประจุในแบตเตอรี่ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับระบบที่ต่ออยู่กับรีซิสทีฟโหลดแบบปรับค่าได้ ดังนั้นในงานวิจัย

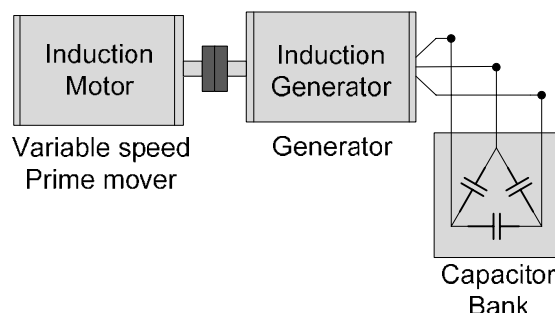
นี้จึงเลือกใช้โพลครีชีสทีฟแบบปรับค่าได้เพื่อเป็นโหลดทางไฟฟ้าสำหรับทดสอบการทำงานของระบบ

3.1.1 การศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ

จุดประสงค์ในการศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการทดลองปรับค่าตัวเก็บประจุที่ต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.1.1.1 วิธีการทดสอบ

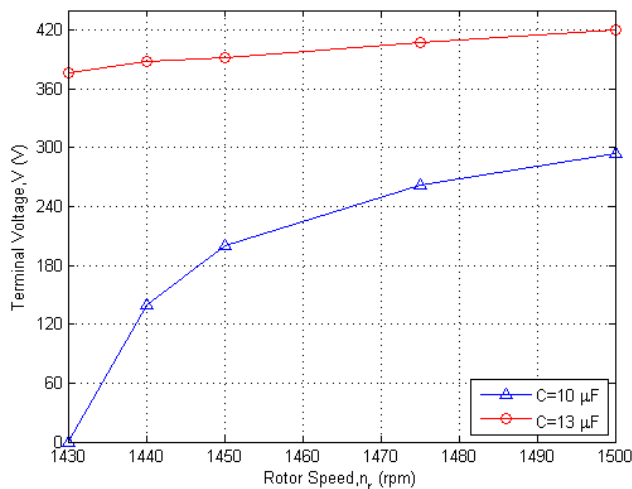
บล็อกไดอะแกรมแสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อศึกษาขนาดของตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระแสดงดังภาพประกอบที่ 3-1 โดยใช้เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2.2 kW 380-420 V 50 Hz ความเร็วพิกัด 1430 rpm 4 pole ต่อขนานกับชุดตัวเก็บประจุเพื่อสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากัน



ภาพประกอบ 3-1 บล็อกไดอะแกรมของการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ

3.1.1.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ เมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าแตกต่างกันแสดงดังภาพประกอบที่ 3-2



ภาพประกอบ 3-2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระเมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าแตกต่างกัน

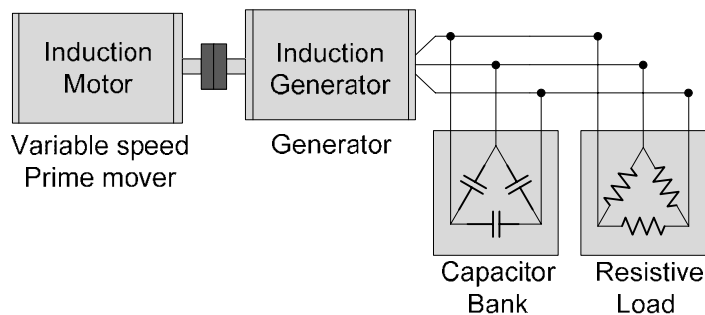
จากการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ เมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าแตกต่างกันพบว่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นกับความเร็วที่เพิ่มขึ้น เมื่อทดลองกับตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ และเมื่อทดลองที่ความเร็วเดียวกันแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเก็บประจุค่าไม่เหมาะสมจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.1.2 การศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ

จุดประสงค์ในการศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการทดลองปรับค่าตัวเก็บประจุและโหลดที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยควบคุมความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.1.2.1 วิธีการทดสอบ

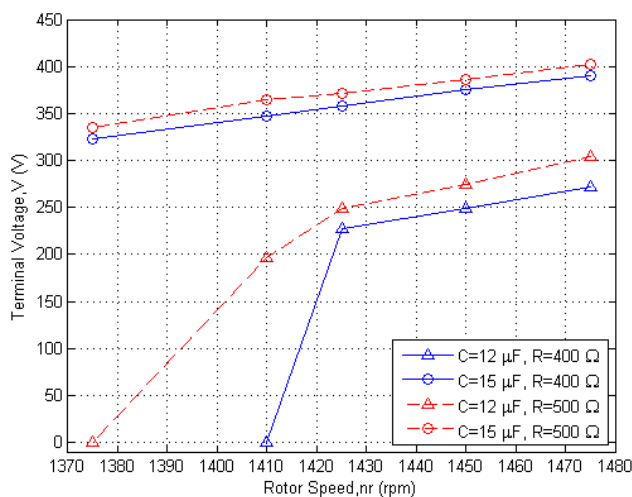
บล็อกไดอะแกรมของการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระแสดงดังภาพประกอบที่ 3-3 โดยใช้เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีขนาดเดียวกับการทดลองในขณะไม่มีภาระเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อขนานกับชุดตัวเก็บประจุเพื่อสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งขับโดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีขนาดเดียวกัน



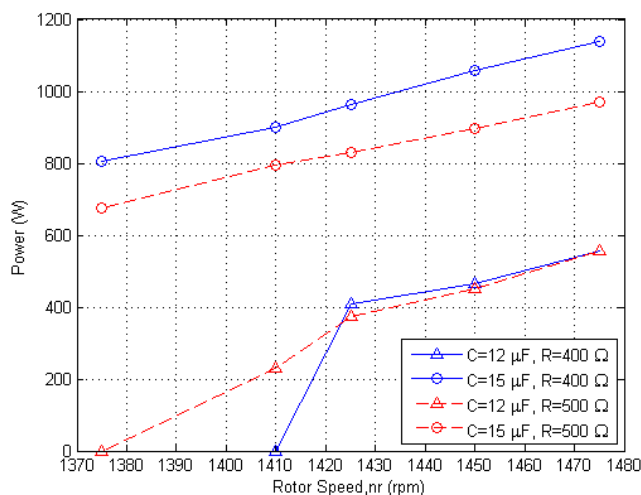
ภาพประกอบ 3-3 บล็อกไดอะแกรมของการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ

3.1.2.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็วยรอบ และกำลังไฟฟ้านำออกกับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ เมื่อใช้ตัวเก็บประจุและโหลดที่มีขนาดแตกต่างกันแสดงดังภาพประกอบที่ 3-4 และ 3-5 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระเมื่อใช้ตัวเก็บประจุและโหลดที่มีค่าแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 3-5 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านออกกับความเร็รรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระเมื่อใช้ตัวเก็บประจุและโหลดที่มีค่าแตกต่างกัน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับความเร็รรอบ และกำลังไฟฟ้าด้านออกกับความเร็รรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ เมื่อใช้ตัวเก็บประจุและโหลดที่มีค่าแตกต่างกันพบว่าแรงดันที่ขั้วและกำลังด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นกับความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อทดลองกับตัวเก็บประจุและโหลดที่มีขนาดคงที่ และเมื่อทดลองที่ความเร็วเดียวกันแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกำลังด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มภาระทางไฟฟ้า (การลดค่าความต้านทานของ โหลด) มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าด้านออกมีขนาดสูงขึ้น

3.1.3 ผลการศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

ผลการศึกษาค่าตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขณะไม่มีภาระ

ขณะไม่มีภาระกระแสกระตุ้นจะมีขนาดเท่ากับกระแสที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุ ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วดังสมการที่ (2-5) ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการออกแบบที่ความถี่พิกัด เมื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนที่ความเร็วเชิงโรตัสและใช้ตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ตามสมการที่ (2-5) (เงื่อนไขในการสตาร์ท $C=13\mu\text{F}$) จะทำให้แรงดันที่ขั้วมีค่าเท่ากับแรงดันพิกัด ซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขในการสตาร์ทสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

2. ขณะมีภาระ

การเพิ่มขึ้นของค่าตัวเก็บประจุสามารถชดเชยผลของแรงดันตกเนื่องจากความเร็วที่ลดลงและภาระทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นได้ แต่ไม่สามารถชดเชยผลของความถี่ที่ตกได้ การชดเชยความถี่สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของต้นกำลัง ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในขณะมีภาระจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 การหาค่าพารามิเตอร์และการทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

3.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง

การทำวิจัยนี้จะใช้เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2.2 kW 380-420 V 50 Hz ความเร็วพิกัด 1430 rpm 4 pole ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำตัวเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 ต่อขนานกับชุดตัวเก็บประจุเพื่อสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีการกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2.1.1

3.2.1.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 1 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

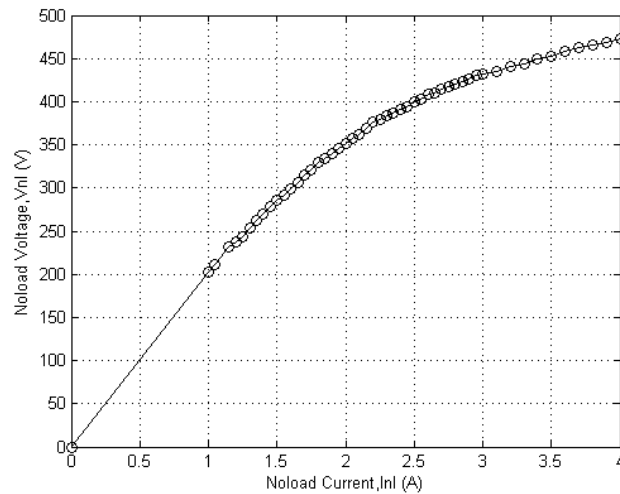
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 1 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คือ R_1 , R_2 , X_1 , X_2 และ X_m เป็นค่าพารามิเตอร์เดียวกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 1 เฟส ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งสามารถหาได้จาก การทดสอบสถานะ ไร้อโหลด การทดสอบสถานะ โรเตอร์หยุดหมุนขณะทำงานเป็นมอเตอร์และการวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดสเตเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

R_1	R_2	X_1	X_2	X_m
10.32	8.290346	12.56102	12.56102	244.1424

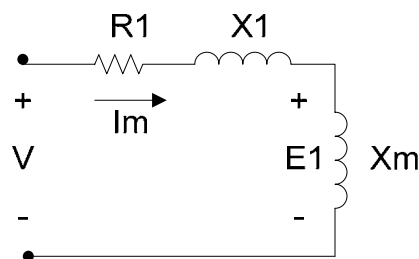
3.2.1.2 กราฟคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสถานะ ไร้อโหลด

กราฟคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสถานะ ไร้อโหลดแสดงดังภาพประกอบ 3-6



ภาพประกอบ 3-6 กราฟคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด

สามารถคำนวณหาแรงดันที่ช่องอากาศ (E_1) และกระแสกระตุ้น (I_m) ได้โดยพิจารณาจากวงจรสมมูล 1 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในสภาวะไร้โหลดดังภาพประกอบ 3-7



ภาพประกอบ 3-7 วงจรสมมูล 1 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในสภาวะไร้โหลด

สำหรับการต่อขดลวดแบบเคลตาร์ทำให้ทราบว่า

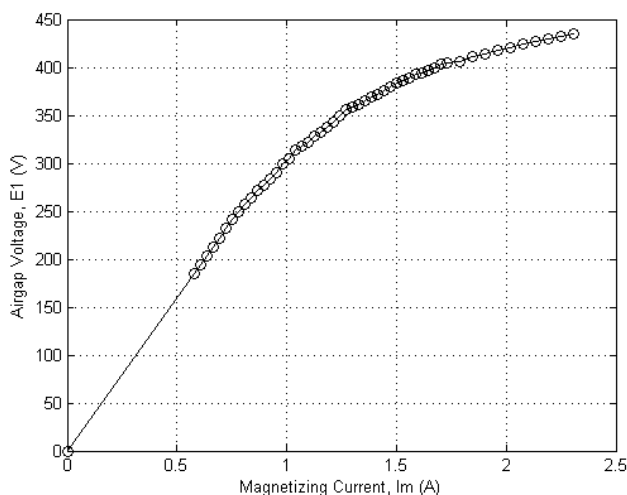
$$V = V_{nl} \quad (3-1)$$

$$I_m = \frac{I_{nl}}{\sqrt{3}} \quad (3-2)$$

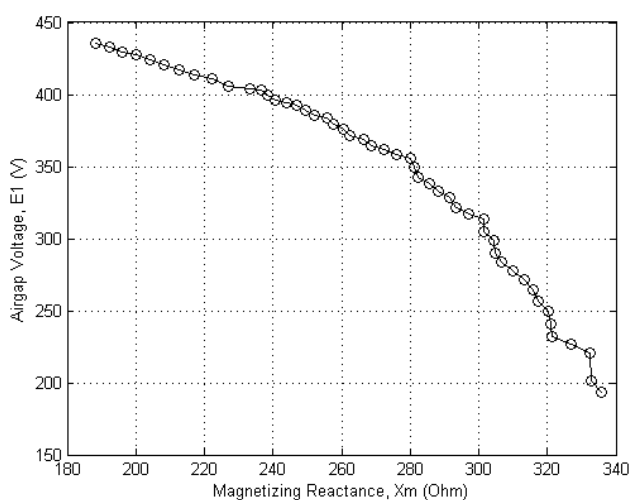
และขนาดของแรงดันที่ช่องอากาศ (E_1) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (3-3)

$$E_1 = V - I_m((R_1^2 + X_1^2)^{1/2}) \quad (3-3)$$

ดังนั้นสามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศ (E_1) กับ กระแสกระตุ้น (I_m) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศ (E_1) กับ รีแอกแตนซ์แม่เหล็กต่อเฟส (X_m) ได้ดังภาพประกอบ 3-8 และภาพประกอบ 3-9 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ช่องอากาศ (E_1) และกระแสกระตุ้น (I_m) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด



ภาพประกอบ 3-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ช่องอากาศ (E_1) กับ รีแอกแตนซ์แม่เหล็กต่อเฟส (X_m) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด

3.2.2 ขั้นตอนในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเองโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์

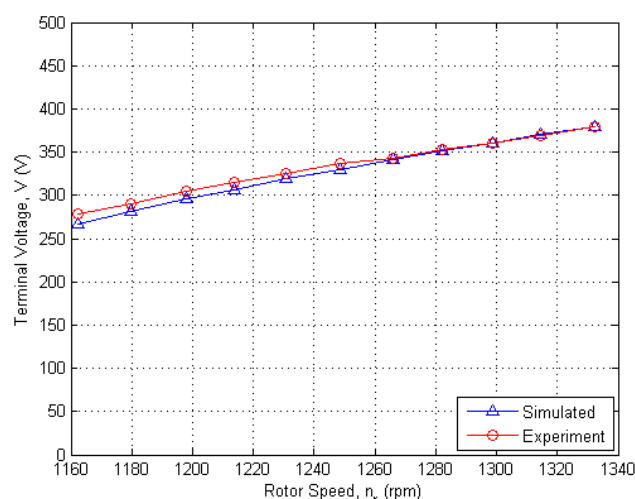
จากการศึกษาการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ในหัวข้อที่ 2.3.5 ทำให้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้า ความถี่ กำลังไฟฟ้าและพารามิเตอร์อื่นๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและป้อนอินพุต ค่าตัวเก็บประจุ โหลด และความเร็รรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2.3 การทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเอง

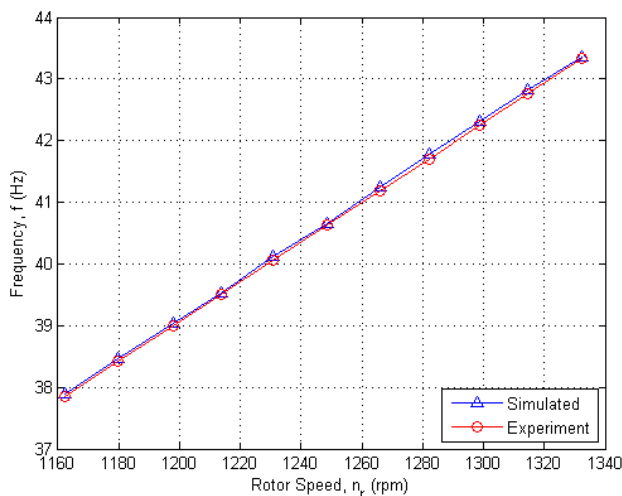
จุดประสงค์ในการทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเพื่อทดสอบความถูกต้องของการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิด, ความถี่ และ กำลังไฟฟ้า จากการจำลองกับผลจากการทดลองขับโหลดจริงโดยใช้ตัวเก็บประจุ โหลดที่มีความแตกต่างกัน และมีการควบคุมความเร็รรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2.3.1 ผลการทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเอง

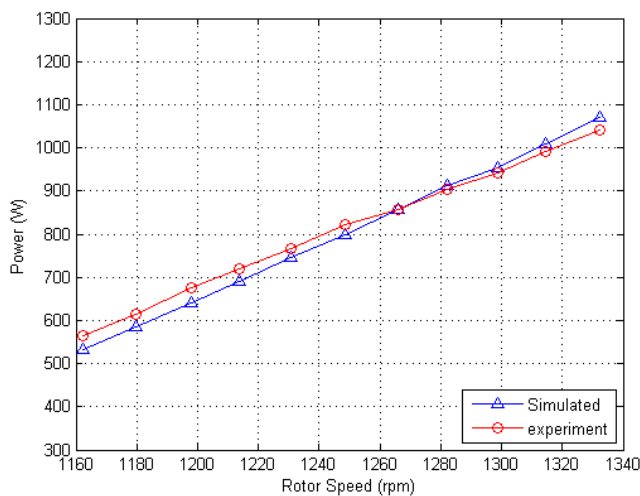
การเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความถี่ และ กำลังเอาต์พุต จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับผลจากการทดลองขับโหลดจริงโดยปรับให้โหลด $R=412.5\Omega$ และ $C=21.13\mu F$ แสดงดังภาพประกอบ 3-10 3-11 และ 3-12 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วยังของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=21.13\mu F$

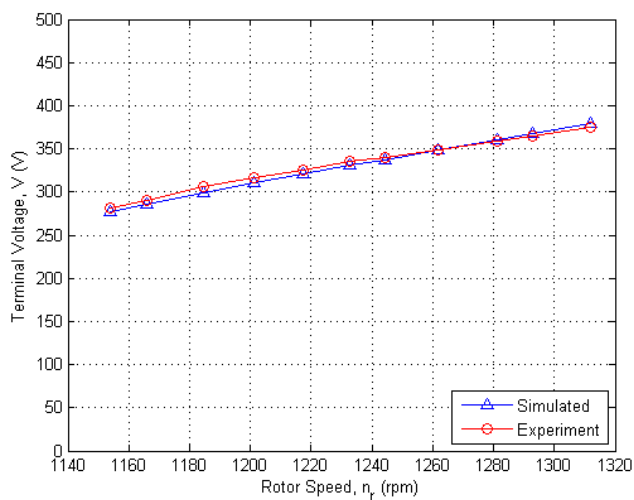


รูปที่ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=21.13\mu F$

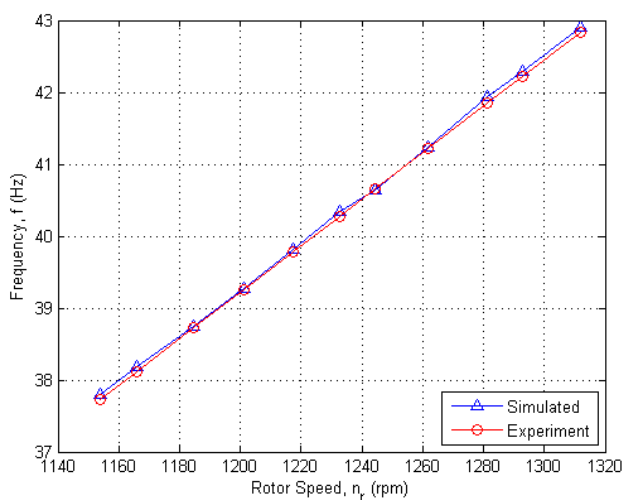


ภาพประกอบ 3-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=21.13\mu F$

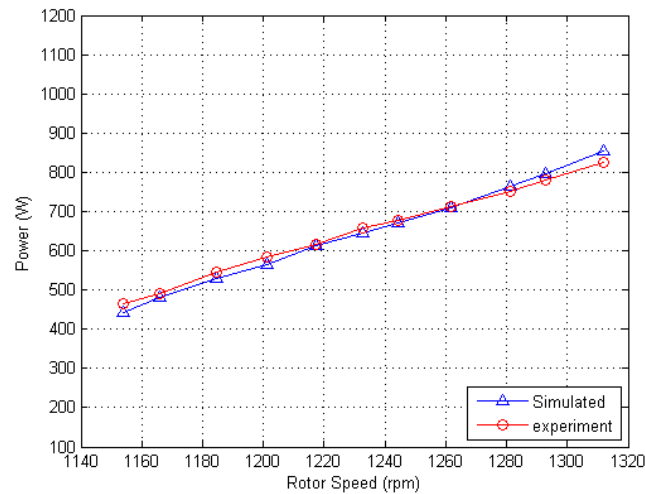
การเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความถี่ และกำลังเอาต์พุต จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับผลจากการทดลองขับโหลดจริงโดยปรับให้โหลด $R=513.2 \Omega$ และ $C=21.13\mu F$ แสดงดังภาพประกอบ 3-13 3-14 และ 3-15 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=21.13\mu F$

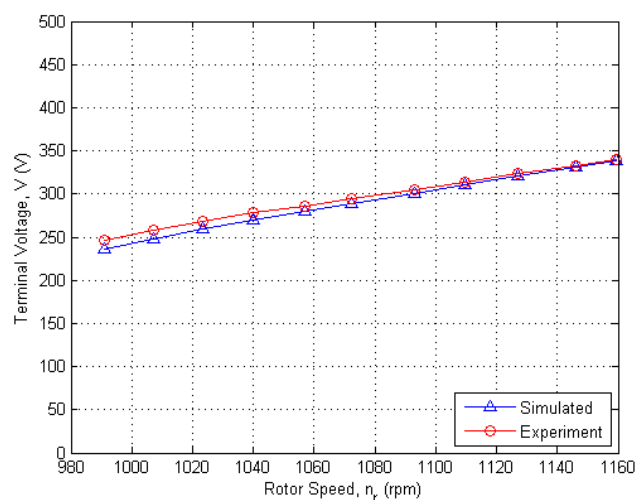


ภาพประกอบ 3-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=21.13\mu F$

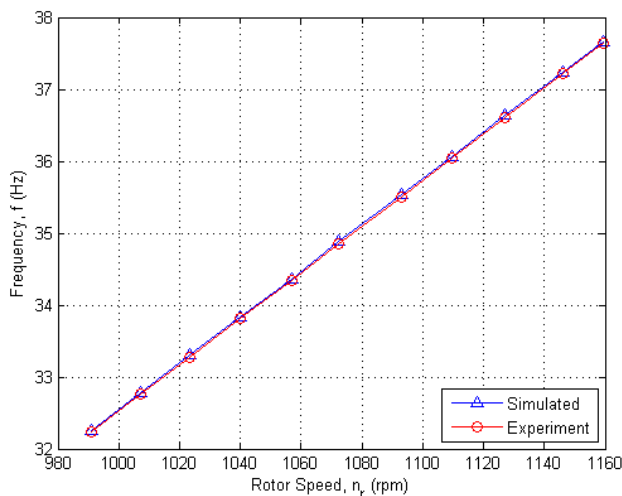


ภาพประกอบ 3-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $C=21.13\mu\text{F}$

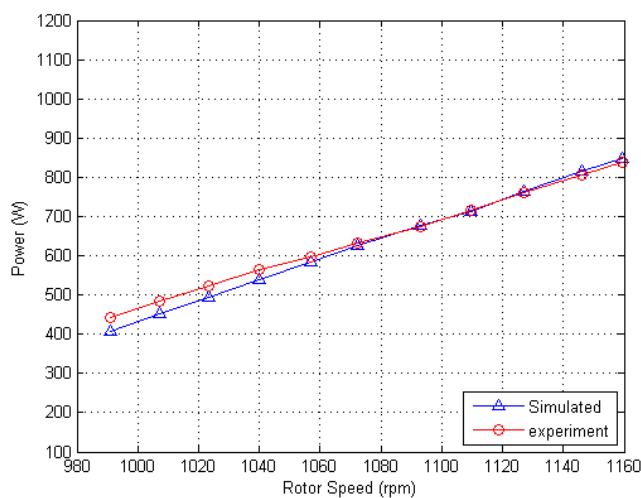
การเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิด, ความถี่ และ กำลังเอาต์พุต จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับผลจากการทดลองขั้วโหลดจริงโดยปรับให้โหลด $R=412.5\Omega$ และ $C=30.167\mu\text{F}$ แสดงดังภาพประกอบ 3-16 3-17 และ 3-18 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=30.167\mu\text{F}$

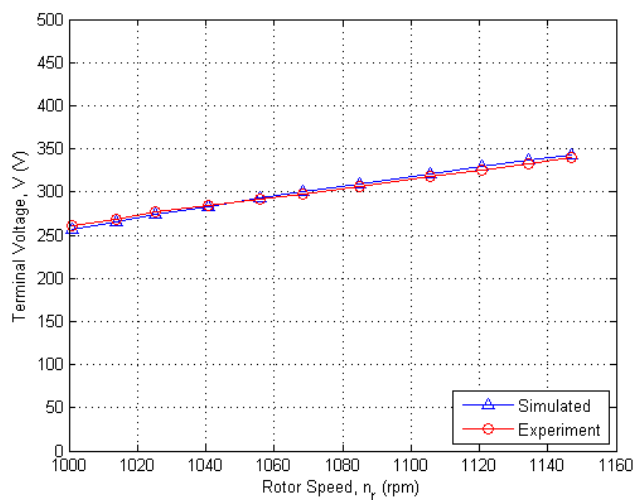


ภาพประกอบ 3-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=30.167\mu F$

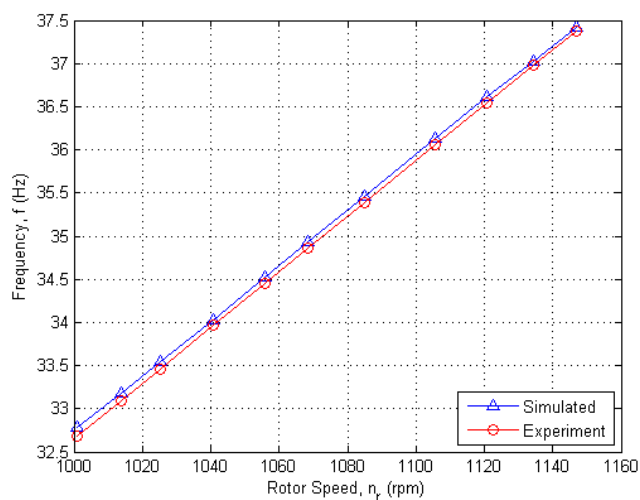


ภาพประกอบ 3-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=412.5\Omega$ $C=30.167\mu F$

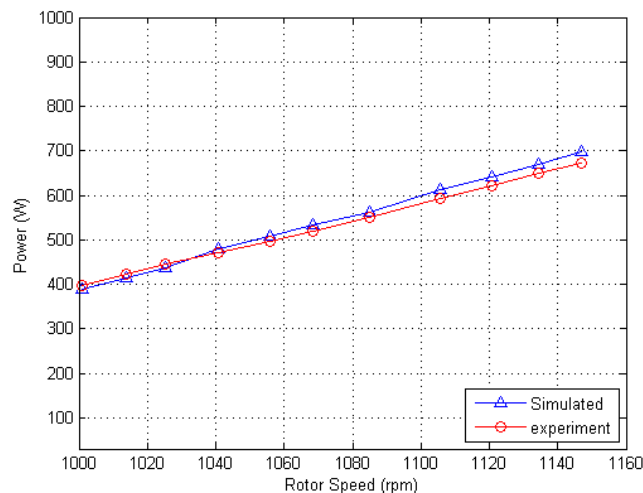
การเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิด, ความถี่ และ กำลังเอาต์พุต จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับผลจากการทดลองขับโหลดจริงโดยปรับให้โหลด $R=513.2\Omega$ และ $C=30.167\mu F$ แสดงดังภาพประกอบ 3-19 3-20 และ 3-21 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $c=30.167\mu\text{F}$



ภาพประกอบ 3-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\Omega$ $c=30.167\mu\text{F}$



ภาพประกอบ 3-21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ $R=513.2\ \Omega$ $C=30.167\ \mu\text{F}$

ผลจากการทดสอบการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวเก็บประจุและโหลดที่แตกต่างกันคือ $C=21.13\ \mu\text{F}$ และ $30.167\ \mu\text{F}$ $R=412.5\ \Omega$ และ $513.2\ \Omega$ ผลการทดลองที่ได้มีการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการจำลอง ซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีความสอดคล้องกัน

3.3 การจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุที่ใช้กับระดับฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

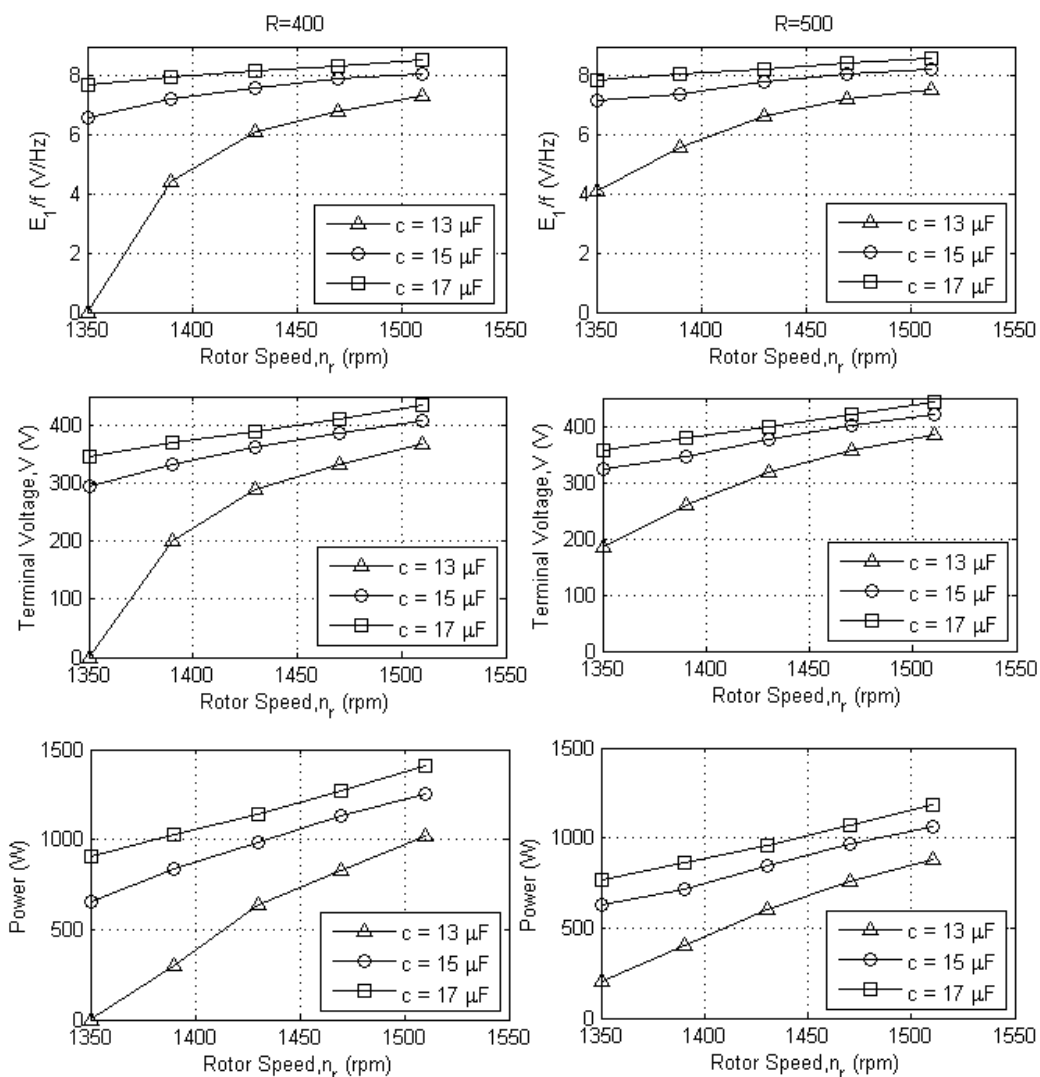
จุดประสงค์ในการจำลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บที่ใช้ในการกระตุ้นกับระดับของฟลักซ์แม่เหล็กจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าแตกต่างกันในการกระตุ้นและควบคุมขนาดของโหลดและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.3.1 ขั้นตอนในการจำลอง

การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นเองโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.5 ซึ่งสามารถหาขนาดของแรงดันไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าและอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและป้อนอินพุตค่าตัวเก็บประจุ โหลด และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.3.2 ผลการจำลอง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุและอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่กับความเร็ว แรงดันไฟฟ้ากับความเร็ว และกำลังไฟฟ้ากับความเร็ว ที่ได้จากการจำลองแสดงดังภาพประกอบที่ 3-22



ภาพประกอบที่ 3-22 ผลการจำลองค่าตัวเก็บประจุมีผลต่อระดับฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่าตัวเก็บประจุมีผลให้ระดับฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าเมื่อระดับฟลักซ์แม่เหล็กสูงขึ้นมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วย

3.4 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองกับตัวเก็บประจุชั้นต่ำ

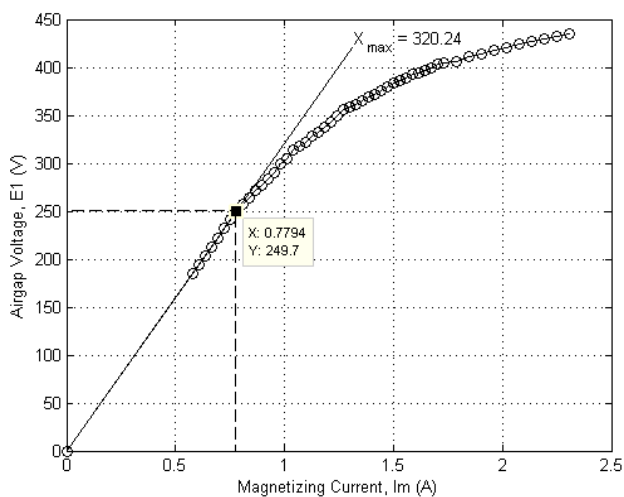
จุดประสงค์ในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองกับตัวเก็บประจุชั้นต่ำ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกกระตุ้นด้วยตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุชั้นต่ำ โดยมีการควบคุมขนาดของโหลดและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

3.4.1.1 ตัวเก็บประจุชั้นต่ำ

ตัวเก็บประจุชั้นต่ำที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือค่าตัวเก็บประจุที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้วทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ การหาค่าตัวเก็บประจุชั้นต่ำที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองมีการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.6

การหาค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กที่ไม่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (X_{max}) ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุชั้นต่ำสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในช่วงที่เป็นเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งได้จากการทดสอบการทำงานเป็นมอเตอร์ในสถานะไร้อัดแสดงดังภาพประกอบ 3-23



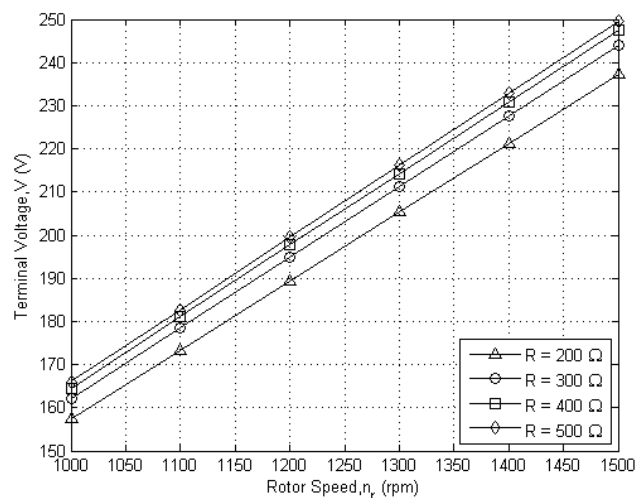
ภาพประกอบ 3-23 การหาค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กที่ไม่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไม่อิ่มตัว

3.4.2 ขั้นตอนในการจำลอง

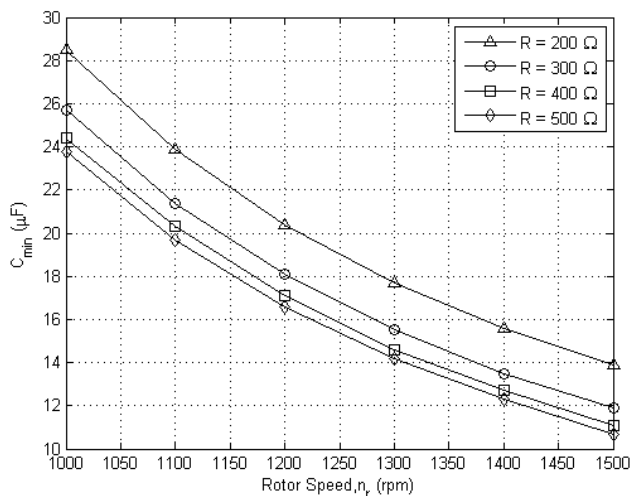
เมื่อรู้ค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำสามารถจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.5 โดยใช้โปรแกรม MATLAB เมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและป้อนอินพุต ค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุขั้นต่ำ โหลด และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในการจำลอง

3.4.3 ผลการจำลอง

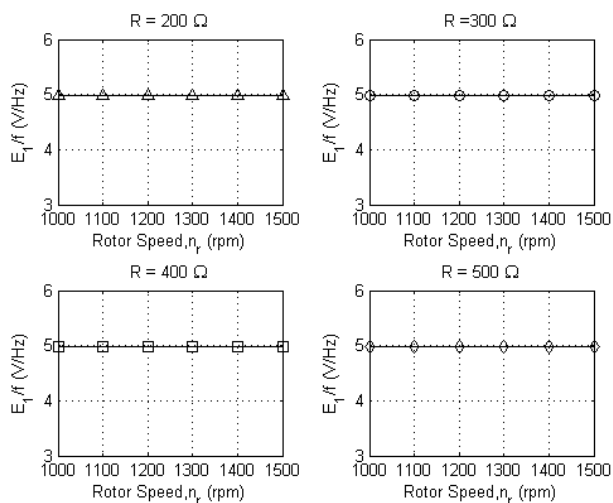
ผลของแรงดันไฟฟ้ากับความเร็ว ค่าตัวเก็บประจุกับความเร็ว และอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่กับความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุขั้นต่ำโดยมีการควบคุมขนาดของโหลดและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังภาพประกอบที่ 3-24 ถึง 3-26



ภาพประกอบที่ 3-24 แรงดันไฟฟ้า-ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยตัวเก็บประจุขั้นต่ำ



ภาพประกอบที่ 3-25 ค่าตัวเก็บประจุ-ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยตัวเก็บประจุขั้นต่ำ



ภาพประกอบที่ 3-26 อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่-ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยตัวเก็บประจุขั้นต่ำ

ผลการจำลองการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุขั้นต่ำพบว่าฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่ทุกๆการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่มีค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 V/Hz ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงเสถียรภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลักจึงควรควบคุมให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ให้มีค่าสูงกว่า 5 V/Hz ซึ่งเป็นค่าขั้นต่ำ

3.5 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่

จุดประสงค์ในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่ เพื่อควบคุมระดับของฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ ซึ่งมีขนาดเท่ากับพิกัดคอนทำงานเป็นมอเตอร์ ทั้งนี้เพื่อให้ได้สมรรถนะทางแรงบิดเท่ากับที่พิกัด โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยระดับของฟลักซ์แม่เหล็กที่ลดลงเนื่องจากการลดลงของความเร็วและการเพิ่มขึ้นของโหลด

3.5.1 ขั้นตอนในการจำลอง

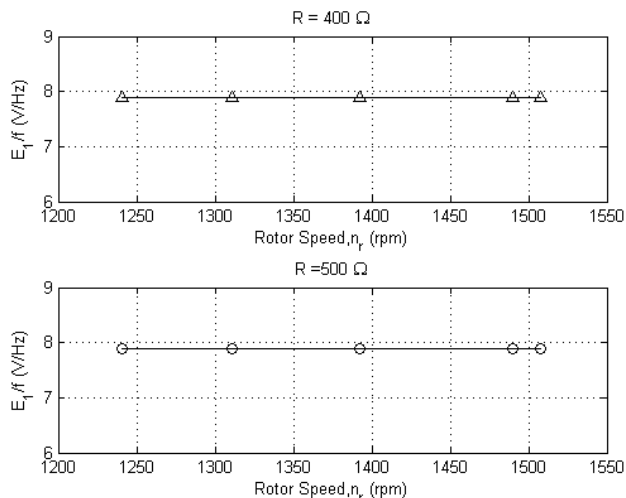
1. กำหนดหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เพื่อควบคุมให้ฟลักซ์แม่เหล็กคงที่ ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนในหัวข้อที่ 3.4 เพียงแต่ใช้ X_m ที่มีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กในวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้

2. เมื่อรู้ค่าตัวเก็บประจุใช้สามารถจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.5 โดยใช้โปรแกรม MATLAB เมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและป้อนอินพุตค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งได้จากข้อ 1 โหลด และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในการจำลอง

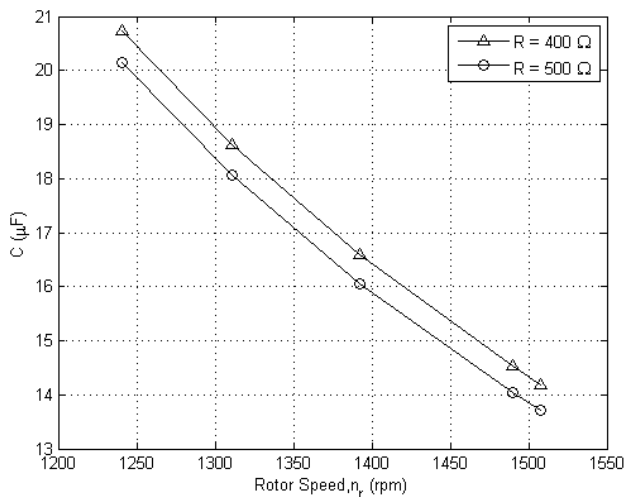
3. ทำการทดลองในข้อ 1 และ 2 ซ้ำเพื่อจำลองการทำงานที่จุดทำงานอื่นๆ

3.5.2 ผลการจำลอง

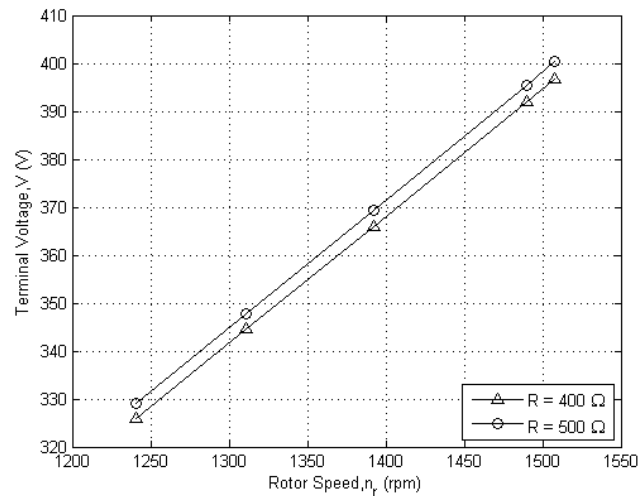
ผลของอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศกับความถี่-ความเร็ว ตัวเก็บประจุ-ความเร็ว แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว-ความเร็ว และกำลังไฟฟ้า-ความเร็ว ที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่ โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยระดับของฟลักซ์แม่เหล็กที่ลดลงเนื่องจากการลดลงของความเร็วและการเพิ่มขึ้นของโหลดแสดงดังภาพประกอบที่ 3-27 ถึง 3-30 ตามลำดับ



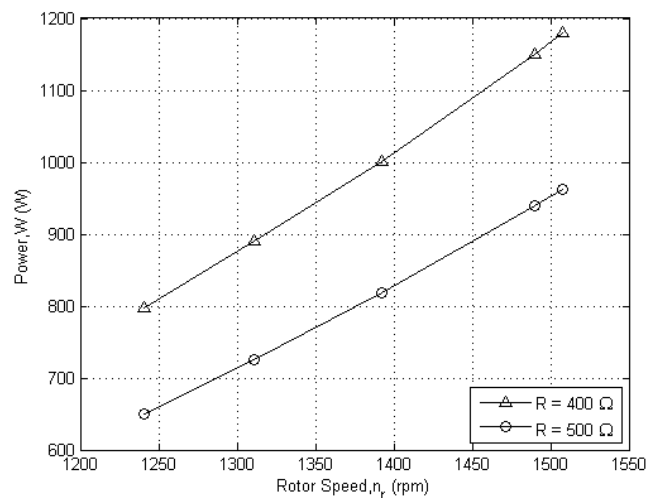
ภาพประกอบ 3-27 อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่-ความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่



ภาพประกอบ 3-28 ค่าตัวเก็บประจุ-ความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่



ภาพประกอบ 3-29 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว-ความเร็วเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยเทคนิคฟลักซ์คงที่



ภาพประกอบ 3-30 กำลังไฟฟ้า-ความเร็วที่ได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยเทคนิคฟลักซ์คงที่

ผลการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้น โดยเทคนิคฟลักซ์คงที่แสดงให้เห็นว่าค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อควบคุมให้ฟลักซ์มีขนาดคงที่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำงานที่ความเร็วต่ำ และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วเดียวกันค่าตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีค่าสูงกว่าเมื่อมีภาระทางไฟฟ้าสูง (ความต้านทานของโหลดต่ำ) แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นนอกจากนั้นแล้วการควบคุมการกระตุ้น โดยเทคนิคฟลักซ์คงที่นี้ทำให้สามารถออกแบบความเร็วสูงสุดและต่ำสุดในการทำงานของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อีกด้วยโดยการกำหนดค่าตัวเก็บประจุสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.6 การจำลองเพื่อหาค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบควบคุม

3.6.1 การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

3.6.1.1 ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีขนาด 2.2 kW 400 V 50 Hz ความเร็วพิกัด 1430 rpm 4 pole

เมื่อควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยควบคุมให้ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กและค่าสลลิปมีค่าเท่ากับพิกัดมอเตอร์แต่มีค่าเป็นลบ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และความถี่ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างขึ้นจะมีค่าเท่ากับพิกัดมอเตอร์ ซึ่งเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานที่พิกัดจะได้ข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

V (V)	f (Hz)	Pout (W)	T (N-m)	s	nr (rpm)
400	50	2200	7.002817	-0.00467	1570

3.6.1.2. การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นอินพุตในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นอินพุตในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ R และ n_p ซึ่งเป็นจุดที่ต้องการจำลอง และจากการควบคุมโดยใช้เทคนิคฟลักซ์คงที่ทำให้รู้ว่าทอร์คและสลลิปมีค่าคงที่ทุกๆจุดทำงาน เมื่อออกแบบให้ความถี่ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในช่วง 30-50 Hz สามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้านำออก ความเร็วรอบ และขนาดโพลที่ใช้เมื่อรู้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้านำออกได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 การออกแบบจุดทำงานสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จุดทำงาน	V (V)	f (Hz)	Pout (W)	T (N-m)	s	nr (rpm)	R (ohm)
จุดสูงสุด	400	50	2200	7.002817	-0.00467	1570	218.1818
จุดต่ำสุด	240	30	1320	7.002817	-0.00467	942	130.9091

3.6.2 ขั้นตอนในการจำลอง

1. คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เพื่อควบคุมให้ฟลักซ์แม่เหล็กคงที่ ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนในหัวข้อที่ 3.4 เพียงแต่ใช้ X_m ที่มีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็กในวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ ป้อนความเร็วโรเตอร์ (n_r) และ โหลด (R) ณ จุดทำงานที่ต้องการจำลอง ซึ่งแสดงในตารางที่ 3-3

2. เมื่อรู้ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้สามารถจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.5 โดยใช้โปรแกรม MATLAB เมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและป้อนอินพุต ค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งได้จากข้อ 1 ความเร็วโรเตอร์ และ โหลดที่ใช้ในข้อ 1

3. ทำการทดลองในข้อ 1 และ 2 ซ้ำเพื่อจำลองการทำงานที่จุดทำงานอื่นๆ

3.6.3 ผลการจำลอง

ผลการจำลองเพื่อหาขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบควบคุมแสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ผลการจำลองเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบควบคุม

จุดทำงาน	C (μ F)	n_r (rpm)	V (V)	f (Hz)	Pout (W)	E_f/f (V/Hz)
จุดสูงสุด	15.563	1570	398.9264	50.1870	2.1882	7.8802
จุดต่ำสุด	48.492	942	225.4300	29.2923	1.1646	7.8802

จากการจำลองสามารถออกแบบจุดทำงานที่ความเร็วสูงสุดและความเร็วต่ำสุดได้ และทำให้รู้ค่าตัวเก็บประจุที่ต้องใช้ในการควบคุม ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการออกแบบระบบควบคุมที่จะมีการกล่าวถึงในบทที่ 4

บทที่ 4

การออกแบบและการทดสอบระบบควบคุม

หลังจากได้ทำการทดลองเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองกับระดับฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการจำลองการทำงานของระบบควบคุมการกระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่ในบทที่ 3 ทำให้รู้วิธีการควบคุมและค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุม สำหรับในบทนี้เป็นการออกแบบระบบควบคุมเพื่อใช้ในการควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยจะกล่าวถึงข้อพิจารณาในการออกแบบระบบ การเลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์รวมถึงการทดสอบระบบควบคุม

4.1 การออกแบบระบบควบคุม

4.1.1 การเลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์

การเลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการเลือกใช้เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ อุปกรณ์สวิตช์ และหน่วยประมวลผล เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียในการนำมาใช้งาน

4.1.1.1 การวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เทคนิคในการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับนำมาใช้เป็นเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าในระบบควบคุม การวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะอยู่ในรูปของ Root mean square หรือค่าแรงดันไฟฟ้ายังผล (V_{rms}) ซึ่งมีกระบวนการในการวัดได้หลายวิธีดังนี้

1. การวัดค่าแรงดันไฟฟ้ายังผลโดยตรง

มาตรวัดที่ใช้วัดค่าแรงดันยังผลของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีหลักการเหมือนมาตรวัดแรงดันกระแสตรงโดยจะต่อตัวต้านทานที่เรียกว่าตัวคูณ (Multiplier resistor) เพื่อแบ่งแรงดัน แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นไปดังสมการที่ (4-1)

$$V_{rms} = I_M(R_P + R_M) \quad (4-1)$$

เมื่อ V_{rms} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ายังผล (V)

I_M คือ กระแส (A)

R_M คือ ความต้านทานภายใน (Ω)

R_p คือ ตัวต้านทานแบ่งแรงดันที่เรียกว่าตัวคูณ (Ω)

2. การวัดค่ายอดของแรงแรงดันไฟฟ้า

เมื่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสลับมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ เมื่อรู้ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้ายังผลได้ดังสมการที่ (4-2)

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (4-2)$$

เมื่อ V_{rms} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ายังผล (V)

V_m คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้า (V)

3. การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของรูปคลื่นสัญญาณในหนึ่งหน่วยเวลาแสดงดังสมการที่ (4-3)

$$V_{av} = \int_0^T v(t) dt \quad (4-3)$$

เมื่อ V_{av} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (V)

V_m คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

เมื่อสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์จะ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยดังสมการที่ (4-4) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาค่าแรงดันยังผลได้โดยใช้สมการที่ (4-2)

$$V_{av} = 0.636V_m \quad (4-4)$$

ในการนำมาใช้งานเพื่อเป็นเซนเซอร์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์จะเลือกใช้เทคนิคการวัดค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่เป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ซึ่ง

วิธีการคำนวณมีความสลับซับซ้อนมากกว่า และไม่จำเป็นต้องมีส่วนของวงจรถอดอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเพิ่มเติมเหมือนกับการวัดค่าแรงดันไฟฟ้ายังผลโดยตรง

4.1.1.2 การวัดค่าความถี่

เทคนิคในการวัดความถี่สำหรับนำมาใช้เป็นเซนเซอร์วัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าในระบบควบคุม การวัดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ามีเทคนิคในการวัดดังต่อไปนี้

1. การวัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าโดยการวัดคาบของรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้า การวัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าโดยการวัดคาบของรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าโดยตรงทำได้โดยการวัดเวลาในหนึ่งคาบของสัญญาณและนำมาคำนวณหาความถี่ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (4-5)

$$f = \frac{1}{T} \quad (4-5)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Hz)

T คือ คาบของสัญญาณไฟฟ้า (s)

2. การวัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าโดยการใช้เซนเซอร์

การวัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าโดยการใช้เซนเซอร์เป็นการวัดสัญญาณของความถี่ไฟฟ้าโดยการประมาณค่าจากความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่

- การใช้พรีอิกซิมิตีเซนเซอร์ (Proximity sensor)

การใช้พรีอิกซิมิตีเซนเซอร์เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจจับการเคลื่อนไหวของวัตถุที่อยู่ใกล้โดยไม่ต้องสัมผัสในการวัดความถี่จะติดพรีอิกซิมิตีเซนเซอร์ไว้ที่ตัวกับปลั๊กที่ติดกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีการเจาะรูไว้เพื่อให้พรีอิกซิมิตีเซนเซอร์ตรวจจับเมื่อเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนผ่านรูที่เจาะไว้พรีอิกซิมิตีเซนเซอร์ตรวจจับทำให้ได้คาบสัญญาณและนำไปใช้หาความถี่

- การใช้เซนเซอร์แสง (Optical Sensor)

หลักการของการใช้เซนเซอร์แสงในการวัดความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือการยิงแสงไปยังวัสดุสะท้อนแสงที่ติดอยู่ที่เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเพลลาหมุนจนทำให้แสงตกกระทบบนวัสดุสะท้อนแสงทำให้แสงสะท้อนไปยังโฟโตทรานซิสเตอร์เพื่อหาคาบสัญญาณและนำไปใช้คำนวณหาความถี่ต่อไป

ในการนำไปใช้งานเพื่อเป็นเซนเซอร์สำหรับวัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่สร้างขึ้น โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์จะเลือกใช้วิธีการวัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าโดยการวัดคาบของรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งมีความถี่ต้องมากกว่าการวัดสัญญาณของความถี่ไฟฟ้า โดยการประมาณค่าจากความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกจากนั้นยังไม่จำเป็นต้องใช้เซนเซอร์อีกด้วย

4.1.1.3 รีเลย์ (Relay)

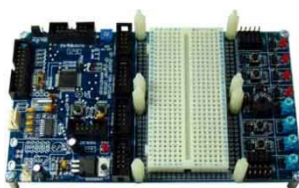
รีเลย์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่ควบคุมการทำงานด้วยไฟฟ้าแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้ 2 ประเภทคือ

1. รีเลย์กำลัง (Power Relay) หรือมักเรียกกันว่าคอนแทคเตอร์ (Contactor or Magnetic Contactor) ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่กว่ารีเลย์ธรรมดา
2. รีเลย์ควบคุม (Control Relay) มีขนาดเล็กและกำลังไฟฟ้าต่ำใช้ในวงจรควบคุมทั่วไปที่มีกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก

การเลือกใช้งานอุปกรณ์สวิตช์จะเลือกใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ที่มีหน้าสัมผัสมากกว่าและสามารถใช้กับวงจรที่มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่ารีเลย์แบบธรรมดา

4.1.1.4 หน่วยประมวลผล

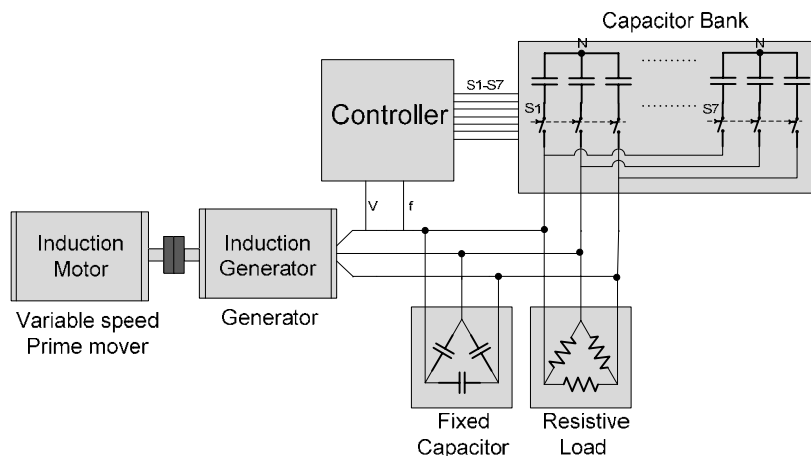
หน่วยประมวลผลจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีให้เลือกใช้อยู่หลายตระกูล เช่น PIC, MSP430, ARM7 เป็นต้น PIC และ MSP430 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เน้นในเรื่องของการประหยัดพลังงาน ซึ่งมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความเร็วในการทำงาน และขนาดของโปรแกรม ดังนั้นในการใช้งานจะเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7 เบอร์ LPC2138 เพื่อใช้ในการประมวลผลและควบคุม โดยมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 58.982MHz ขนาดของหน่วยความจำ FLASH 512KB RAM 32KB จำนวนพอร์ตเท่ากับ PORT 47 I/O PIN ต่อกับระบบไฟ 5 โวลต์ มี A/D ขนาด 10 บิต 8 ช่องสัญญาณ D/A ขนาด 10 บิต 1 ช่องสัญญาณ UART 2 ช่องสัญญาณและมี TIMER 32 บิต จำนวน 4 ช่องสัญญาณสำหรับให้เลือกใช้งาน



ภาพประกอบ 4-1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7 เบอร์ LPC2138

4.1.2 ระบบที่ใช้จำลองเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก*

ระบบที่ใช้จำลองเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแสดงผังภาพประกอบ 4-2



ภาพประกอบ 4-2 ระบบที่ใช้จำลองเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก*

ระบบดังกล่าวประกอบไปด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2.2 kW 380-420 V 50 Hz ความเร็วพิกัด 1430 rpm 4 pole ใช้จำลองเป็นต้นกำลังแทนกำลังจากน้ำที่ใช้ในการดูดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุน โดยต่อตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดเดียวกัน ซึ่งมีชุดตัวเก็บประจุขนาดคงที่ (Fixed Capacitor) และโหลดตัวต้านทาน (Resistive load) ต่อขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเคลด้า ชุดตัวเก็บประจุขนาดคงที่นี้มีขนาดเท่ากับ $13\mu\text{F}$ ทำหน้าที่ในการสร้างแรงดันขณะสตาร์ท นอกจากนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังมีชุดควบคุม (Controller) ซึ่งทำหน้าที่ปรับขนาดของชุดตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Capacitor Bank) ที่ต่อแบบสตาร์เพื่อควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ให้มีขนาดคงที่ เมื่อโหลดและความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง

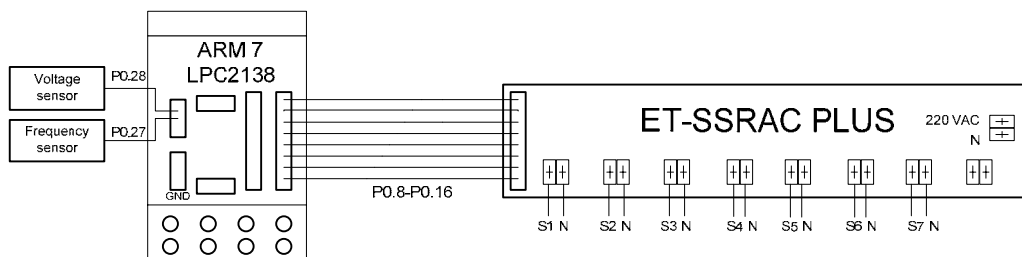
4.1.2.1 ระบบควบคุม (Control System)

ระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองประกอบไปด้วยชุดควบคุมและชุดตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ ซึ่งหน้าที่และส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. ชุดควบคุม

ชุดควบคุมประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7 เบอร์ LPC2138 ต่ออยู่กับเซนเซอร์วัดความถี่และเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าทางพอร์ต P0.27 และ P0.28 ตามลำดับเพื่อรับสัญญาณแรงดัน (V) และความถี่ (f) เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่และ

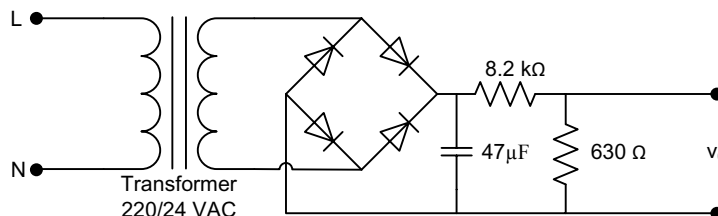
คอยควบคุมให้มีค่าคงที่ โดยการปรับค่าของชุดตัวเก็บประจุปรับค่าได้ผ่านทางพอร์ต P0.8-P0.16 ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมในการสั่ง ON/OFF ให้กับบอร์ด ET-SSRAC PLUS ที่ทำหน้าที่เหมือนเป็นสวิตช์เปิดเพื่อแยกส่วนควบคุมและส่วนโหลด ซึ่งต่อกับไฟ 220 VAC ออกจากกัน ส่วนโหลดของบอร์ด ET-SSRAC PLUS คือ S1-S7 จะเป็นแรงดัน 220 VAC ซึ่งจ่ายเป็นสัญญาณควบคุมในการสั่ง ON/OFF หน้าสัมผัสของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ที่ต่ออยู่กับชุดตัวเก็บประจุ ทั้ง 7 ชุด ชุดควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงดังภาพประกอบ 4-3



ภาพประกอบ 4-3 ชุดควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

- เซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage sensor)

เซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีการต่อชุดขดลวดทางด้านสเตเตอร์แบบเดลต้า โดยการนำแรงดันเฟสที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งต่อแบบสตาร์มาลดระดับแรงดัน โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าและต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อแปลงสัญญาณที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลดการกระเพื่อมของสัญญาณ โดยต่อเข้ากับตัวเก็บประจุแล้วปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมก่อนเข้า A/D Converter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถรับอินพุตของแรงดันได้ในช่วง 0-3.3 โวลต์ ผ่านทางพอร์ต P0.28 เพื่ออ่านค่า วงจรที่ใช้สำหรับเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าแสดงดังภาพประกอบ 4-4



ภาพประกอบ 4-4 เซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า

ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (4-6) เมื่อรู้ค่าความต้านทานที่ใช้สำหรับลดค่าแรงดันไฟฟ้างดังแสดงในภาพประกอบ 4-4

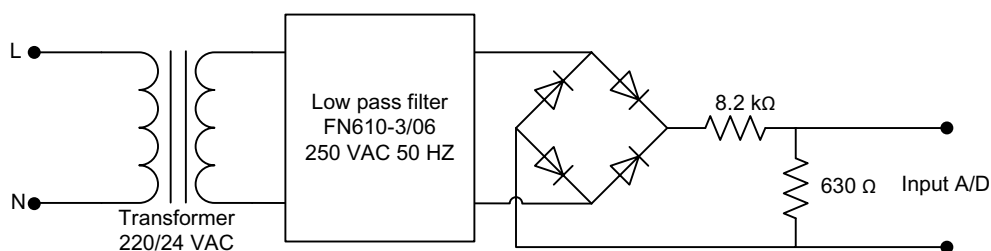
$$V = \sqrt{3} \times \left(\frac{8200+630}{630} \right) v_o \quad (4-6)$$

เมื่อ V คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

v_o คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

- เซ็นเซอร์วัดความถี่ (Frequency sensor)

เซ็นเซอร์วัดความถี่ทำหน้าที่วัดสัญญาณความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการนำแรงดันเฟสที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งต่อแบบสตาร์มาลดระดับแรงดัน โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกโดยต่อกับ Low pass filter ซึ่งมี cut off frequency เท่ากับ 60 Hz และต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อเพิ่มความเร็วในการอ่านสัญญาณความถี่แล้วปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมก่อนเข้า A/D Converter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ต P0.27 และใช้ Timer เพื่ออ่านคาบของสัญญาณและคำนวณหาความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า วงจรที่ใช้สำหรับเป็นเซ็นเซอร์วัดความถี่แสดงดังภาพประกอบ 4-5



ภาพประกอบ 4-5 เซ็นเซอร์วัดความถี่

- ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลและควบคุม โดยมีอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ซึ่งใช้ในการหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่เพื่อใช้เงื่อนไขในการควบคุมการ ON/OFF ให้กับบอร์ด ET-SSRAC PLUS ผ่านทางพอร์ต P0.8-P0.16 เพื่อควบคุมขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้น

- บอร์ด ET-SSRAC PLUS

บอร์ด ET-SSRAC PLUS เป็นบอร์ดเอาต์พุตแบบ Solid state relay ควบคุมเปิดปิดไฟ 220 VAC จำนวน 8 เอาต์พุต สามารถต่อเข้าร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยขั้วมาตรฐาน ETT 34 PIN I/O เพื่อใช้ควบคุมการเปิดปิดไฟ 220 VAC จำนวน 8 เอาต์พุต การทำงานของบอร์ดจะเป็นแบบ Opto isolator triac driver output แยกสัญญาณระหว่างบอร์ดและอุปกรณ์ไฟฟ้า 220 VAC ออกจากกันโดยเด็ดขาดพร้อมทั้งการทำงานเป็นแบบ Zero crossing ลดสัญญาณรบกวนในการเปิดปิด ภาพของบอร์ด ET-SSRAC PLUS แสดงดังภาพประกอบ 4-6

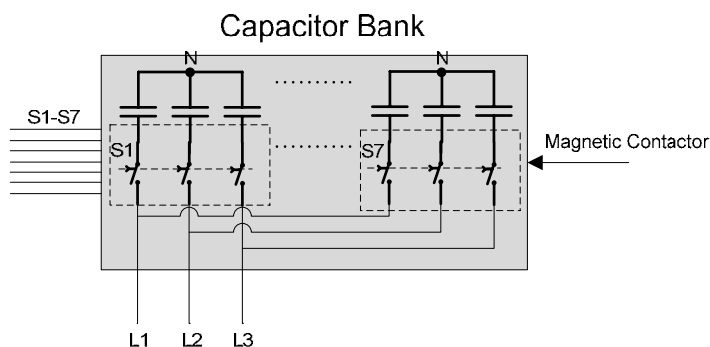


ภาพประกอบ 4-6 บอร์ด ET-SSRAC PLUS

การทำงานจะรับอินพุตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสั่ง ON/OFF โหลด 220 VAC จำนวน 7 ชุด ซึ่งใช้เป็นไฟฟ้าเลี้ยงขดลวด (Coil) ให้กับหน้าแมกเนติกคอนแทคเตอร์

2. ชุดตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Capacitor Bank)

ส่วนประกอบของชุดตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4-7



ภาพประกอบ 4-7 ชุดตัวเก็บประจุปรับค่าได้

ชุดตัวเก็บประจุปรับค่าได้ภายในประกอบไปด้วยหน้าสัมผัสแมกเนติกคอนแทคเตอร์ 3 เฟส จำนวน 7 ชุดซึ่งต่ออยู่กับตัวเก็บประจุขนาด $1\mu\text{F}$ $2\mu\text{F}$ $4\mu\text{F}$ $8\mu\text{F}$ $16\mu\text{F}$ $32\mu\text{F}$ และ $64\mu\text{F}$ ตามลำดับ เมื่อมีสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นไฟ 220 VAC จากบอร์ด ET-SSRAC PLUS ป้อนเข้ามาควบคุมหน้าสัมผัสแมกเนติกคอนแทคเตอร์หน้าสัมผัสใด หน้าสัมผัสนั้นก็ทำหน้าที่ ON โดยการปรับขนาดของตัวเก็บประจุเป็นเลขฐานสองจำนวน 7 บิต ซึ่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ $0\mu\text{F}$ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ $127\mu\text{F}$ ซึ่งถูกควบคุมโดยชุดคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์

ค่าตัวเก็บประจุสูงสุดที่ใช้นี้ได้จากการจำลองการทำงานเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบควบคุม ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.6 โดยค่าตัวเก็บประจุสูงสุดที่ได้จากการจำลองการทำงานที่จุดต่ำสุดมีความเร็วเท่ากับ 942 rpm ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ประมาณ $147\mu\text{F}$ (ต่อแบบสตาร์) และตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ที่ออกแบบไว้มีค่าสูงสุดเท่ากับ $127\mu\text{F}$ (ต่อแบบสตาร์) เมื่อรวมกับชุดตัวเก็บประจุขนาดคงที่ ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับระบบมีขนาดเท่ากับ $13\mu\text{F}$ (ต่อแบบเดลต้า) เมื่อนำค่าตัวเก็บประจุที่ต่อแบบเดลต้ามาแปลงเป็นการต่อแบบสตาร์ชุดตัวเก็บประจุขนาดคงที่จะมีค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $39\mu\text{F}$ (ต่อแบบสตาร์) ทำให้มีค่าตัวเก็บประจุสูงสุดที่ใช้ในระบบควบคุมมีขนาดเท่ากับ $166\mu\text{F}$ (ต่อแบบสตาร์) ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้ทำให้มีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่พอสำหรับการควบคุม

- แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor)

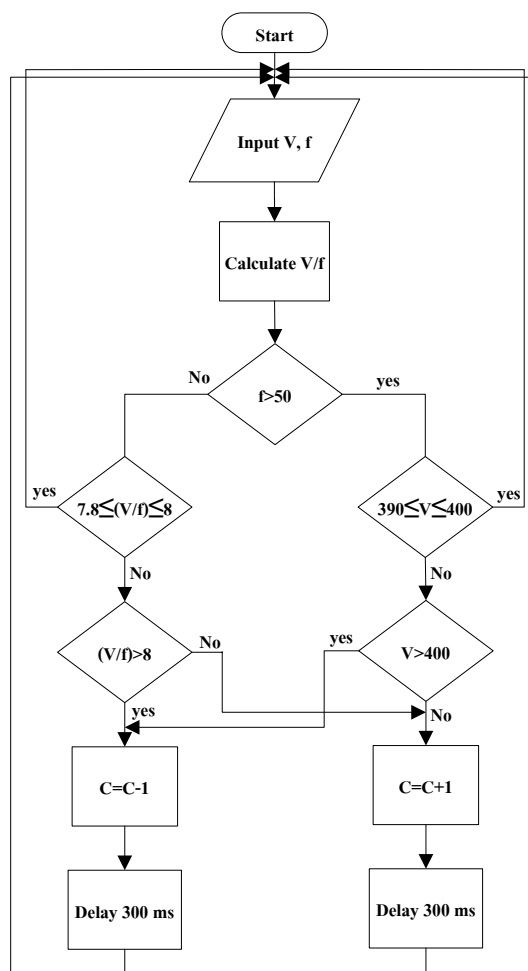
แมกเนติกคอนแทคเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยอำนาจแม่เหล็กในการเปิดปิดหน้าสัมผัสในการควบคุม ซึ่งใช้กับแรงดันสูง โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวด (Coil) ซึ่งทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อดึงชุดหน้าสัมผัสให้เคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกัน



ภาพประกอบที่ 4-8 แมกเนติกคอนแทคเตอร์

4.1.2.2 การทำงานของระบบควบคุม

แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองแสดงดังภาพประกอบ 4-9



ภาพประกอบที่ 4-9 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุม

การทำงานของระบบควบคุมมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ดังนี้

1. เริ่มต้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับสัญญาณอินพุตแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V) และความถี่ (f) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ามาเพื่อคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่ (V/f)

2. ตรวจสอบว่าความถี่ (f) ทำงานสูงกว่า 50 Hz หรือไม่

2.1 ถ้าใช่ ตรวจสอบต่อไปว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 390 หรือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 400 โวลต์ หรือไม่

2.1.1 ถ้าใช้กลับไปทำงานในหัวข้อที่ 1 ใหม่

2.1.2 ถ้าไม่ ตรวจสอบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่ามากกว่า 400 โวลต์หรือไม่ ถ้าใช่ให้ลดค่าตัวเก็บประจุ (C) เท่ากับ $1\mu\text{F}$ ถ้าไม่ใช่ให้เพิ่มค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $1\mu\text{F}$ หนึ่งเวลาเท่ากับ 300 ms และกลับไปทำงานในหัวข้อที่ 1

2.2 ถ้าไม่ ตรวจสอบว่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 7.8 หรือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8 หรือไม่

2.2.1 ถ้าใช้กลับไปทำงานในหัวข้อที่ 1 ใหม่

2.2.2 ถ้าไม่ ตรวจสอบว่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่มีค่ามากกว่า 8 หรือไม่ ถ้าใช่ให้ลดค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $1\mu\text{F}$ ถ้าไม่ใช่ให้เพิ่มค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $1\mu\text{F}$ หนึ่งเวลาเท่ากับ 300 ms และกลับไปทำงานในหัวข้อที่ 1

4.2 การทดสอบระบบควบคุม

หลังจากได้ออกแบบระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองแล้ว ลำดับต่อไปจะเป็นการทดสอบการทำงานของระบบควบคุม โดยการควบคุมความเร็วของต้นกำลังที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในลักษณะต่างๆเพื่อทดสอบการทำงานของระบบควบคุม แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อของระบบที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังภาพประกอบ 4-2 โดยอุปกรณ์ที่ใช้และการเชื่อมต่อมีการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2 ผลของความเร็วรอบ ข้อมูลจากเซนเซอร์ อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่และขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการควบคุมจะถูกส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ออกทาง Hyper Terminal ผ่านทาง RS232 รูปของระบบที่ใช้ในการทดสอบจริงแสดงดังภาพประกอบ 4-10



ภาพประกอบ 4-10 การทดสอบระบบควบคุม

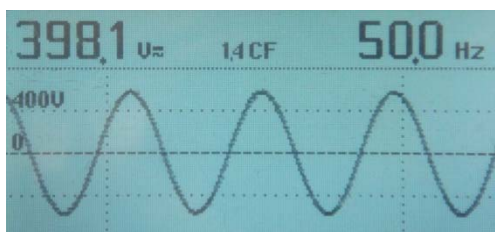
4.2.1 ขั้นตอนในการทดสอบระบบควบคุม

1. สตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยใช้ Inverter ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งต่อตรงอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุนที่ความเร็วเชิงโรตัส
2. เมื่อสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปให้ต่อโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเปิดสวิทช์ให้ระบบควบคุมทำงาน
3. ควบคุมความเร็วโดยการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำและปรับขนาดของโหลด
4. บันทึกผลการทดสอบที่แสดงออกมาทาง Hyper Terminal โดยการบันทึกเป็นไฟล์เป็นนามสกุล .txt

4.2.2 ผลการทดสอบระบบควบคุม

4.2.2.1 ผลการทดสอบการสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

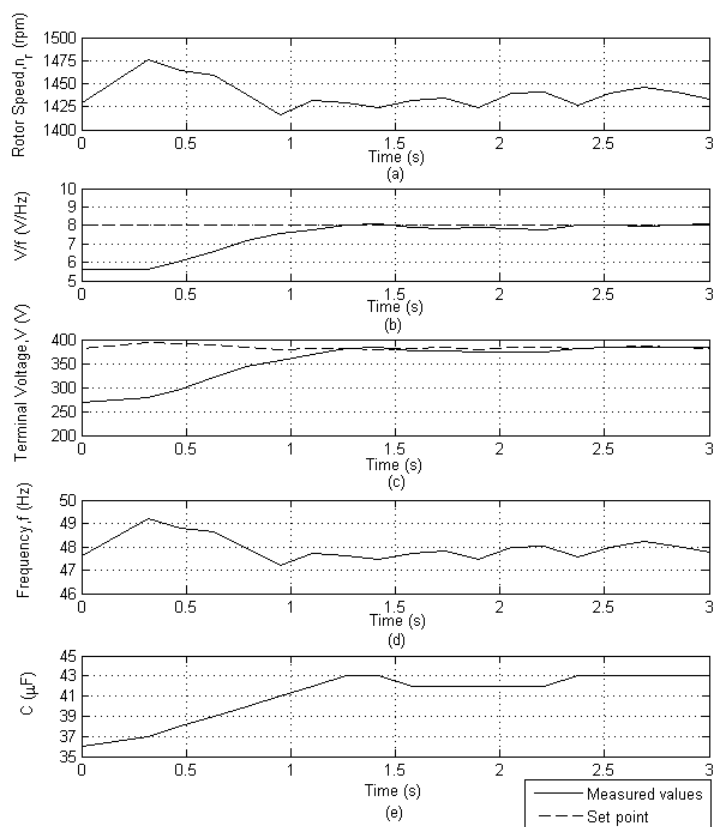
เมื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับชุดตัวเก็บประจุขนาดคงที่ขนาด $13\mu\text{F}$ แบบเดลต้าให้หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส (1500 rpm) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่วัดได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4-11



ภาพประกอบ 4-11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะสตาร์ท

4.2.2.2 ผลการทดสอบขณะระบบควบคุมเริ่มทำงาน

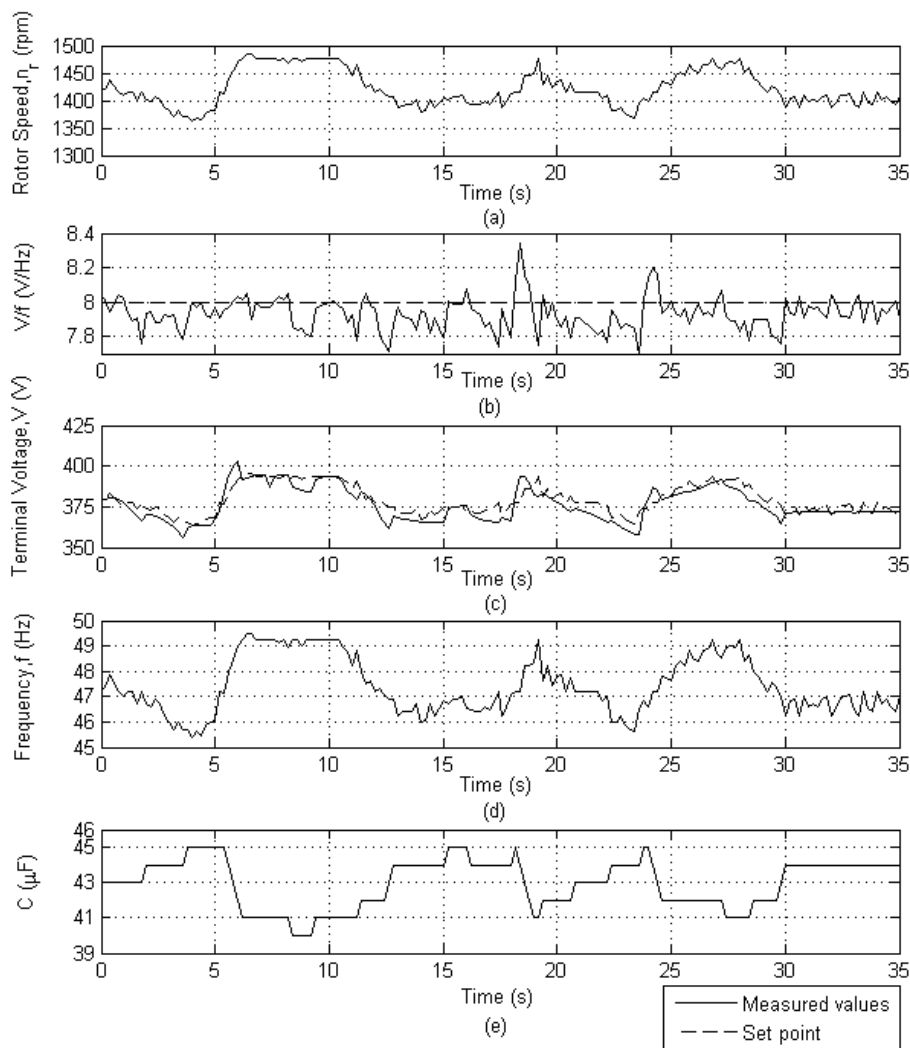
หลังจากสตาร์ทแล้วต่อโหลดขนาด 500 โอห์ม (แบบเดลต้า) ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเปิดสวิทช์ให้ระบบควบคุมทำงาน ผลการทำงานของระบบควบคุมแสดงดังภาพประกอบที่ 4-12 ซึ่งเห็นได้ว่าขณะที่ระบบควบคุมเริ่มทำงานอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่มีค่าต่ำ ระบบควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการปรับค่าตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่มีค่าเท่ากับที่จุดเซตพอยต์ (Set point)



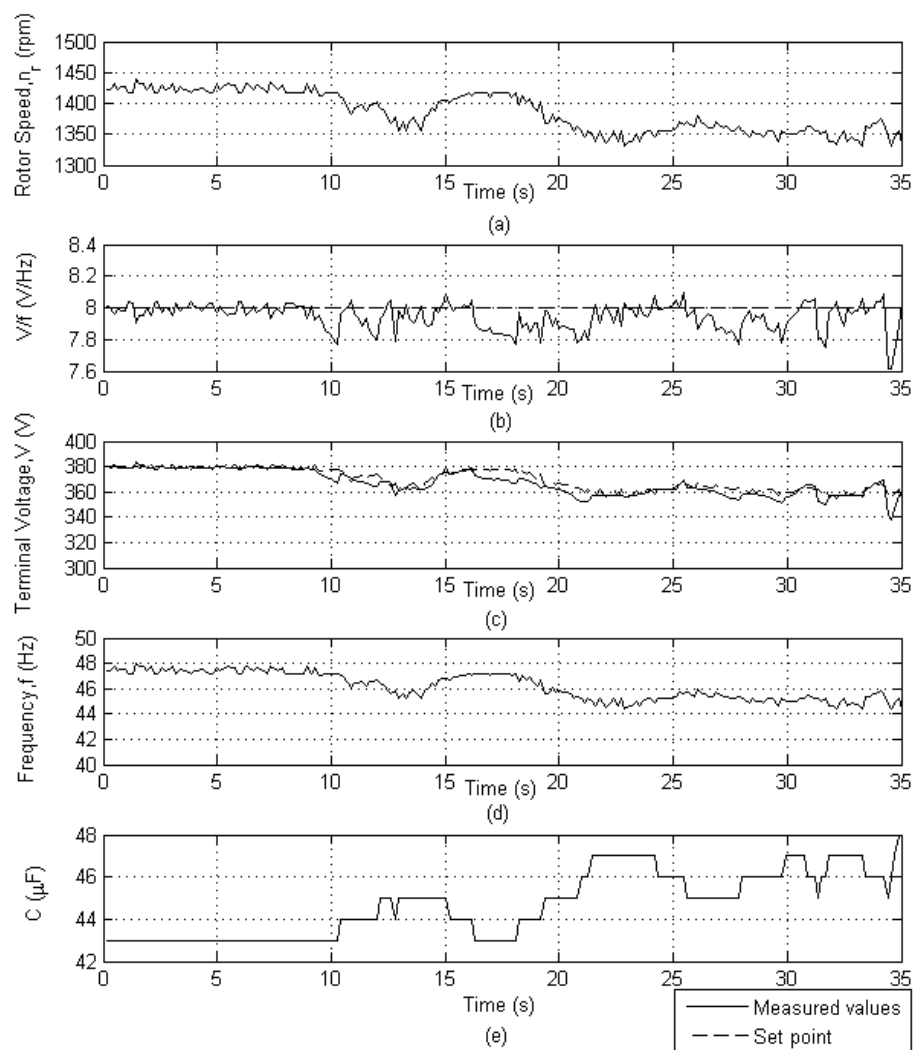
ภาพประกอบ 4-12 ผลการทดสอบขณะระบบควบคุมเริ่มทำงาน

4.2.2.3 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะทำงานที่ภาระขนาดต่างๆโดยควบคุมความเร็ว

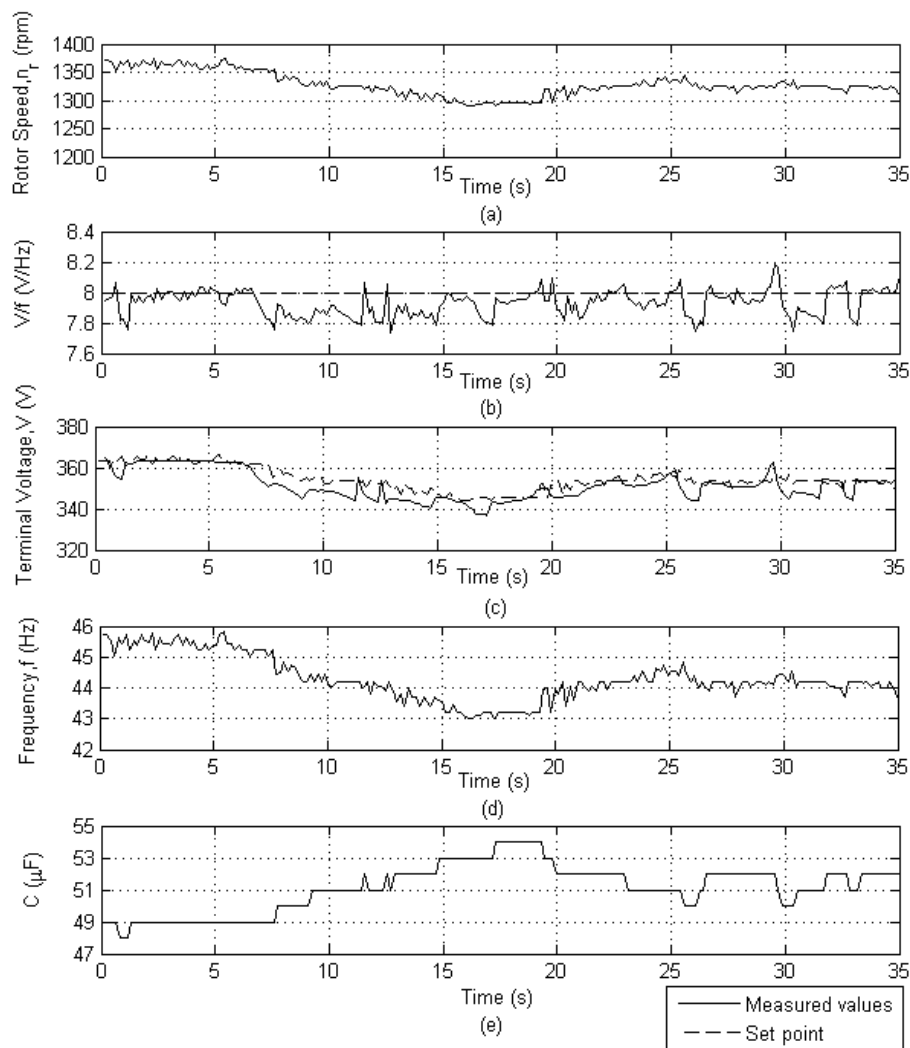
เมื่อทำสอบการทำงานของระบบควบคุม โดยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อกับ โหลดขนาด 500 400 และ 350 โอห์มและควบคุมความเร็วแสดงดังภาพประกอบที่ 4-13 (a) 4-14 (a) และ 4-15 (a) ผลการทำงานของระบบควบคุมแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่-เวลา แรงดันไฟฟ้า-เวลา ความถี่-เวลา และค่าตัวเก็บประจุ-เวลาแสดงดังภาพประกอบ 4-13 (b) ถึง 4-13 (e) 4-14 (b) ถึง 4-14 (e) และ 4-15 (b) ถึง 4-15 (e) ที่โหลดเท่ากับ 500 400 และ 350 โอห์มตามลำดับ



ภาพประกอบ 4-13 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะมีภาระทางไฟฟ้า 500 โหลด



ภาพประกอบ 4-14 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะมีภาระทางไฟฟ้า 400 โหลด

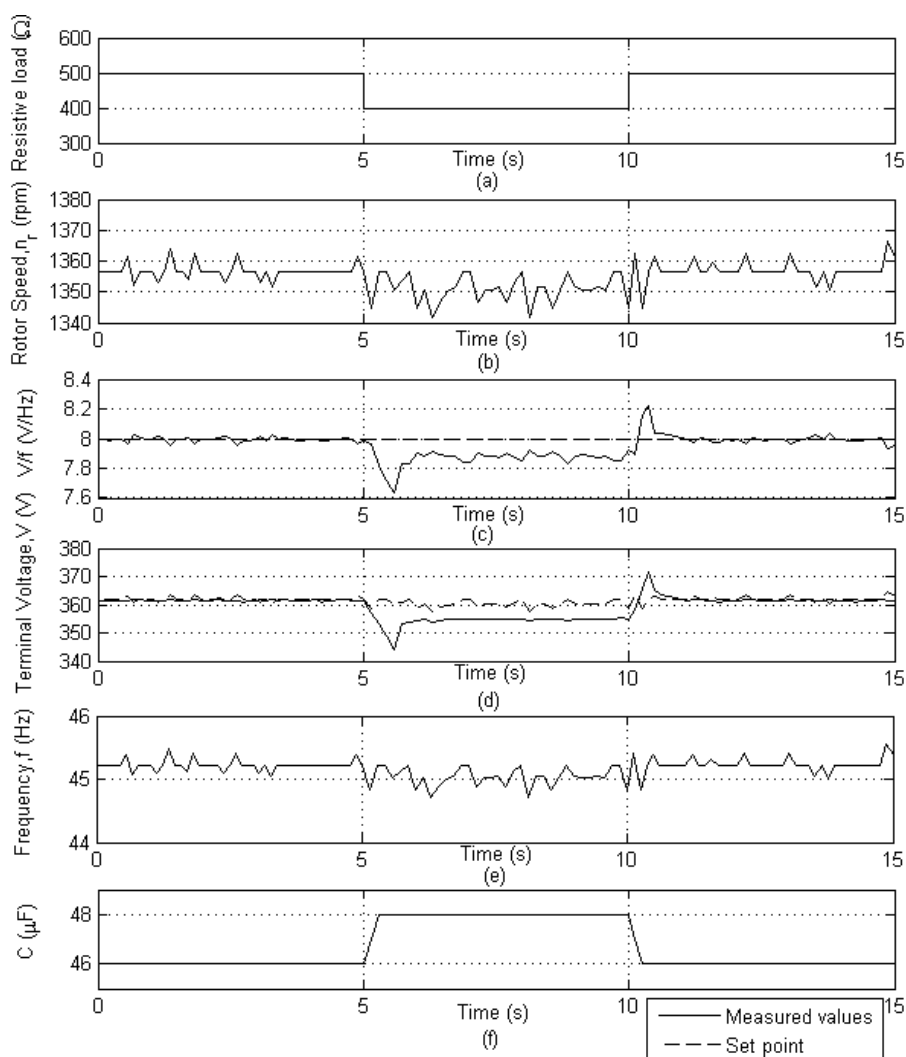


ภาพประกอบ 4-15 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะมีภาระทางไฟฟ้า 350 โหลด

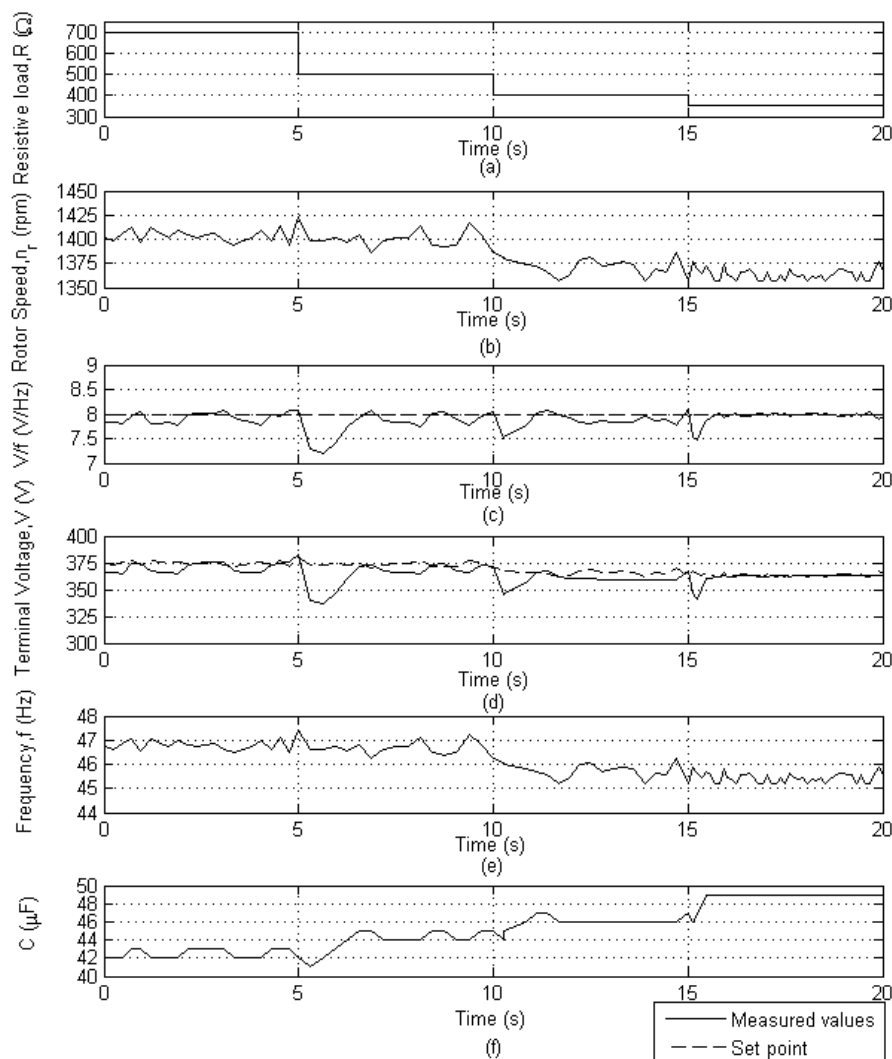
จากผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะทำงานที่ภาระขนาดต่างๆ โดยควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วจะทำให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการปรับค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อควบคุมให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่มีค่าคงที่เท่ากับที่จุดเซตพอยต์ เมื่อรู้ความถี่ทำงานและอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ที่จุดเซตพอยต์ทำให้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดเซตพอยต์ได้ ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถเห็นได้ชัดว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกับจุดเซตพอยต์ โดยค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำงานที่ความถี่ต่ำ

4.2.2.4 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด

เมื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานที่ความเร็วคงที่และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใดดังภาพประกอบ 4-16 (a) และ 4-17 (a) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว-เวลา อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่-เวลา แรงดันไฟฟ้า-เวลา ความถี่-เวลา และค่าตัวเก็บประจุ-เวลา แสดงดังภาพประกอบที่ 4-16 (b) ถึง 4-16 (f) และ 4-17 (b) ถึง 4-17 (f) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4-16 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดระหว่าง 500 โอห์มและ 400 โอห์มอย่างทันทีทันใด

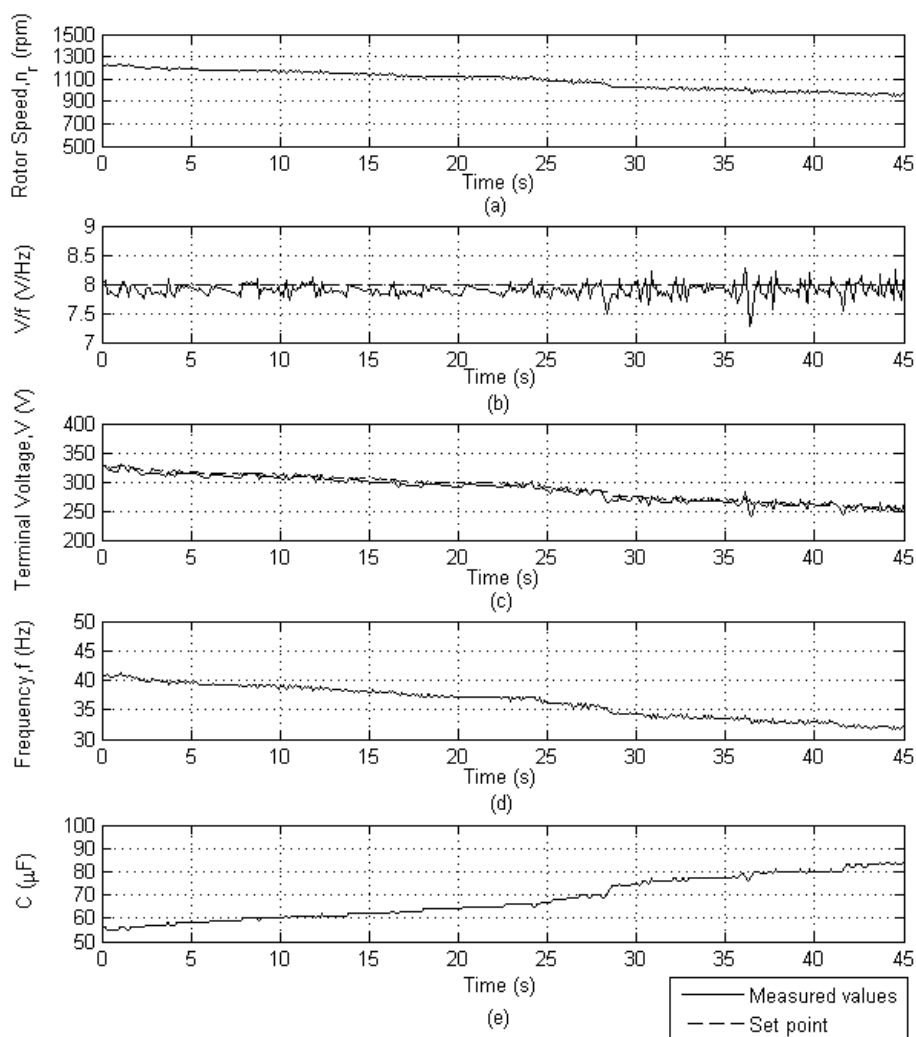


ภาพประกอบ 4-17 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดระหว่าง 700 500 400 และ 350 โอห์ม
อย่างทันทีทันใด

ผลจากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใดเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีการเพิ่มภาระให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (การลดความต้านทานของโหลด) หรือเมื่อมีการลดภาระให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (การเพิ่มความต้านทานของโหลด) อย่างทันทีทันใดจะมีผลทำให้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำลง หรือสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากจุดเซตพอยต์ ระบบควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการปรับค่าตัวเก็บประจุเพื่อให้จุดทำงานกลับมาอยู่ที่จุดเซตพอยต์อีกครั้ง โดยค่าตัวเก็บประจุที่ใช้จะขึ้นอยู่กับสถานะของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปถ้าโหลดมีค่าสูงจะใช้ตัวเก็บประจุค่าต่ำกว่าในสถานะที่โหลดมีค่าต่ำ

4.2.2.5 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ

การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ โดยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อกับโหลดขนาด 500 โอห์มและควบคุมความเร็วแสดงดังภาพประกอบที่ 4-18 (a) ผลการทำงานของระบบควบคุมแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่-เวลา แรงดันไฟฟ้า-เวลา ความถี่-เวลา และค่าตัวเก็บประจุ-เวลาแสดงดังภาพประกอบ 4-18 (b) ถึง 4-18 (e) ตามลำดับ

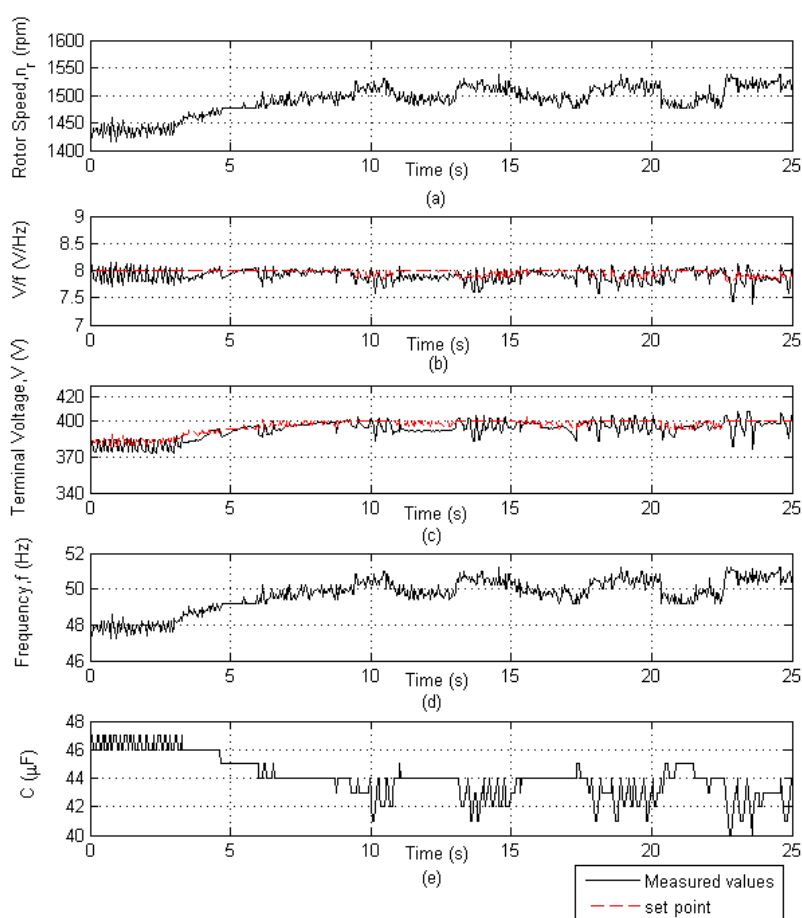


ภาพประกอบ 4-18 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ

จากผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบต่ำเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและสามารถทำงาน

ได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่และขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าใกล้เคียงกับที่จุดเซตพอยต์ ทั้งนี้เป็นเพราะระบบควบคุมทำหน้าที่ควบคุมระดับฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ โดยการควบคุมการปรับค่าตัวเก็บประจุเพื่อให้จุดทำงานอยู่ที่จุดเซตพอยต์นั่นเอง นอกจากนี้เห็นได้ชัดว่าที่ความเร็วรอบต่ำค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นจะมีค่าสูงขึ้น

4.2.2.6 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความถี่สูงกว่าพิกัด



ภาพประกอบ 4-19 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อทำงานที่ความถี่สูงกว่าพิกัด

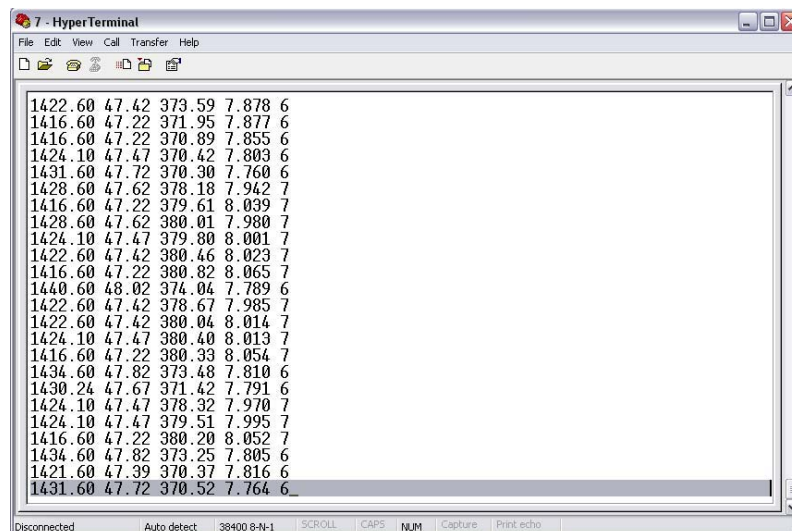
ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเมื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อกับโหลดขนาด 400 โอห์มและควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดภาพประกอบ 4-18 (a) เพื่อให้ทำงานที่ความถี่สูงกว่าพิกัด ผลการทำงานของระบบควบคุมแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลง

ของอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่-เวลา แรงดันไฟฟ้า-เวลา ความถี่-เวลา และค่าตัวเก็บประจุ-เวลาแสดงดังภาพประกอบ 4-18 (b) ถึง 4-18 (e) ตามลำดับ

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานที่ความถี่สูงกว่าพิกัด ระบบควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมขนาดของแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่เท่ากับที่พิกัด ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเกินพิกัด

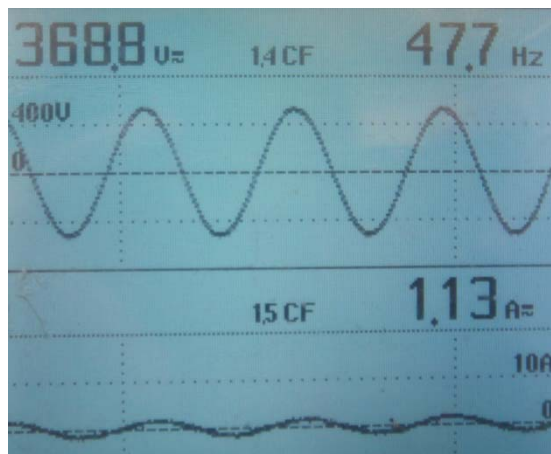
4.2.2.7 การทดสอบหาสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ

การทดสอบหาสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดจากการทำงานของระบบควบคุมขณะปรับค่าตัวเก็บประจุ โดยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อกับโหลดขนาด 500 โอห์มและทำงานที่ความเร็วรอบ ความถี่ แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่และค่าตัวเก็บประจุที่ใช้แสดงดังภาพประกอบ 4-20



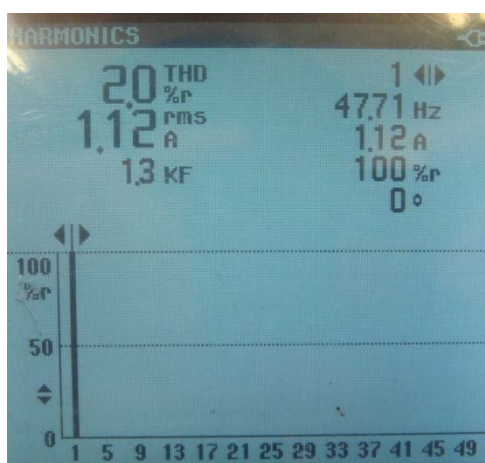
ภาพประกอบ 4-20 หน้าต่างแสดงการทำงานของระบบควบคุมขณะทดสอบหาสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ

เพื่อควบคุมให้จุดทำงานอยู่ที่จุดเซตพอยต์ ระบบควบคุมจะทำหน้าที่ปรับค่าตัวเก็บประจุ เมื่อใช้มัลติมิเตอร์วัดรูปคลื่นของแรงดันและกระแสขณะที่ระบบควบคุมกำลังทำงาน ซึ่งจะได้รูปคลื่นสัญญาณแสดงดังภาพประกอบ 4-21



ภาพประกอบที่ 4-21 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสขณะทดสอบหาสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ

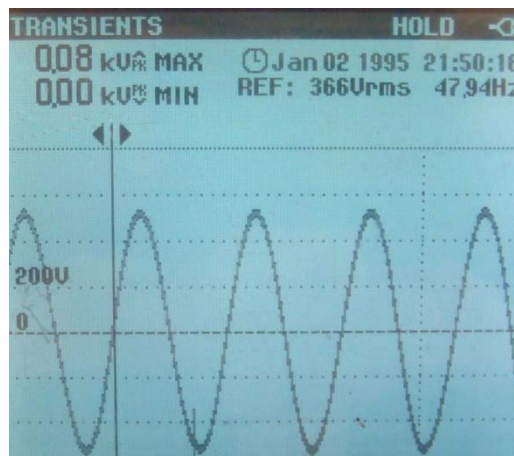
เมื่อใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าสเปกตรัมของกระแสขณะที่ระบบควบคุมกำลังทำงาน แสดงดังภาพประกอบที่ 4-22



ภาพประกอบ 4-22 สเปกตรัมของกระแสขณะระบบควบคุมกำลังทำงาน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมโดยวิธีนี้ไม่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ซึ่งสังเกตได้ว่าไม่มีฮาร์มอนิกของกระแส

รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่ตรวจจับได้โดยใช้มัลติมิเตอร์แสดงดังภาพประกอบที่ 4-23

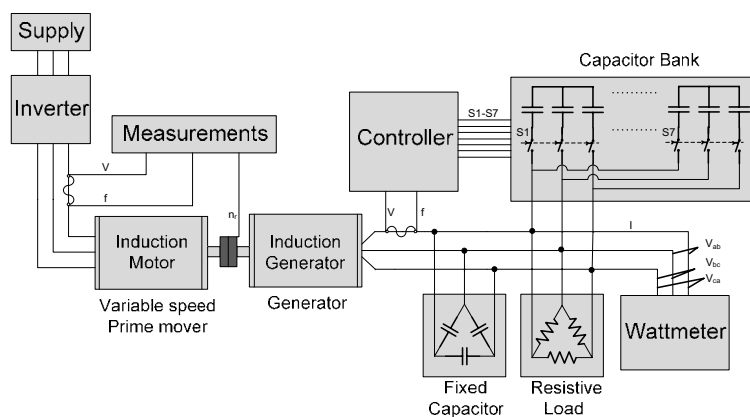


ภาพประกอบ 4-23 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ

จากรูปแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่สุ่มวัดได้มีลักษณะเป็นแรงดันยอดแหลมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 80 โวลต์ และมีค่าต่ำสุดที่ 0 โวลต์ ตามลำดับ

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่

หลังจากได้ทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่แล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองถูกกระตุ้นโดยใช้ระบบควบคุมดังกล่าว โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังภาพประกอบ 4-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่แสดงดังภาพประกอบ 4-24



ภาพประกอบ 4-24 บล็อกไดอะแกรมแสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่

4.3.1 ขนาดและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องต้นกำลัง

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่นำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องต้นกำลังมีขนาด 2.2 kW 380-420 V 50 Hz ความเร็วพิกัด 1430 rpm 4 pole ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล 1 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องต้นกำลัง ซึ่งได้จากการทดสอบสถานะไร้อโหลด การทดสอบสถานะโรเตอร์หยุดหมุนขณะทำงานเป็นมอเตอร์และการวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดสเตเตอร์แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องต้นกำลัง

พารามิเตอร์	เครื่องต้นกำลัง	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
R_1 (Ω)	10.23	10.32
R_2 (Ω)	8.14	8.29
$X_1=X_2$ (Ω)	11.07	12.56
X_m (Ω)	238.71	244.14

4.3.2 วิธีการหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (4-7)

$$efficiency = \frac{P_{out,IG}}{P_{shaft}} \times 100 \quad (4-7)$$

เมื่อ

P_{shaft} คือ กำลังที่เพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (W)

$P_{out,IG}$ คือ กำลังเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (W)

เมื่อไม่พิจารณาถึงผลของกำลังสูญเสียในแกน ผลของแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ สามารถประมาณกำลังที่เพลของมอเตอร์ที่ใช้เป็นเครื่องต้นกำลังให้มีค่าเท่ากับกำลังกลที่มอเตอร์สร้างขึ้น ซึ่งเป็นกำลังอินพุตที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การคำนวณหากำลังที่เพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (P_{shaft}) ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งสามารถหาได้เมื่อรู้แรงดันที่ขั้ว ความถี่ และความเร็วยุโรปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.3.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

1. สตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยใช้ Inverter ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งต่อตรงอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุนที่ความเร็วเชิงโรตัส

2. เมื่อสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปให้ต่อโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเปิดสวิตช์ให้ระบบควบคุมทำงาน

3. ควบคุมความเร็วโดยการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำและปรับขนาดของโหลดดังนี้

3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานที่แรงดันและความถี่พิกัดโดยการปรับขนาดของโหลดเพื่อควบคุมขนาดภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานที่ความเร็วรอบต่ำโดยการปรับขนาดของโหลดเป็น 270 Ω และ 410 Ω ซึ่งมีภาระเท่ากับ 75 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดเมื่อทดสอบที่ความถี่พิกัด

4. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และความเร็วรอบของเครื่องต้นกำลังและกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดโดยใช้วัตต์มิเตอร์ต่อทางด้านโหลด

5. คำนวณหากำลังไฟฟ้าที่เพลลาและคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระขนาดต่างๆ โดยใช้สมการที่ (4-7)

4.3.4 ผลการทดสอบ

4.3.4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันและความถี่พิกัด

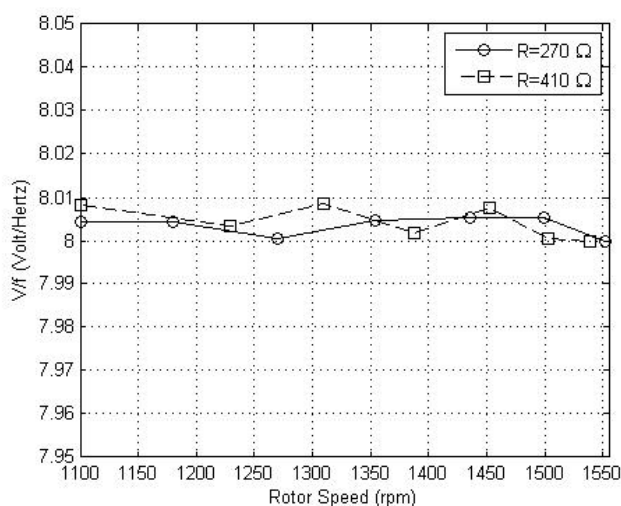
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันและความถี่พิกัด

ภาระงาน (%)	N_r (rpm)	V (V)	f (Hz)	C (μ F)	P_{shaft} (kW)	$P_{out,IG}$ (kW)	Efficiency (%)
85.91	1555	387.5	50	16.86	2.54	1.89	73.63
76.36	1548	386	50	15.86	2.12	1.68	79.17
62.73	1542	386	49.92	15.2	1.73	1.38	79.9
54.55	1540	385.1	50.11	14.53	1.27	1.2	79.18
50	1539	400	50	14.2	1.4	1.1	78.78
36.82	1522.7	385	50.12	13.86	1.09	0.81	74.19
25	1517	400	50	12.53	0.91	0.55	60.74

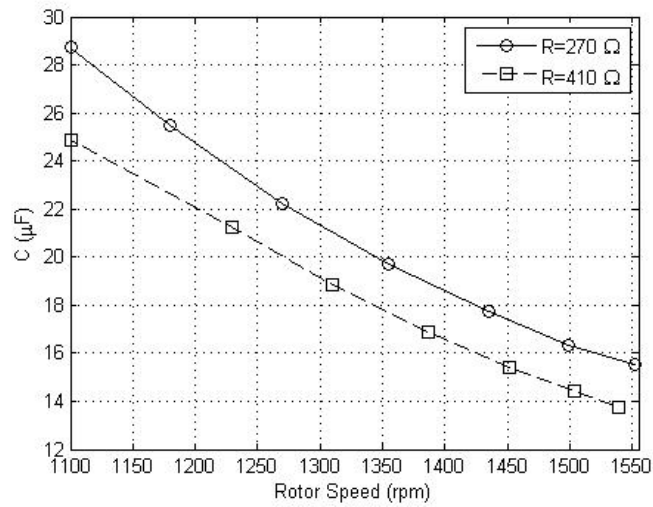
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่กระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่ ซึ่งควบคุมโดยระบบควบคุมที่ทำการออกแบบ เมื่อทดสอบที่แรงดันและความถี่พิกัด ขณะมีภาระในช่วง 25 ถึง 85.91 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ผลการทดสอบประสิทธิภาพแสดงดังตารางที่ 4-2 จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดอยู่ที่ภาระเท่ากับ 62.73 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 79.90 %

4.3.4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบต่ำ

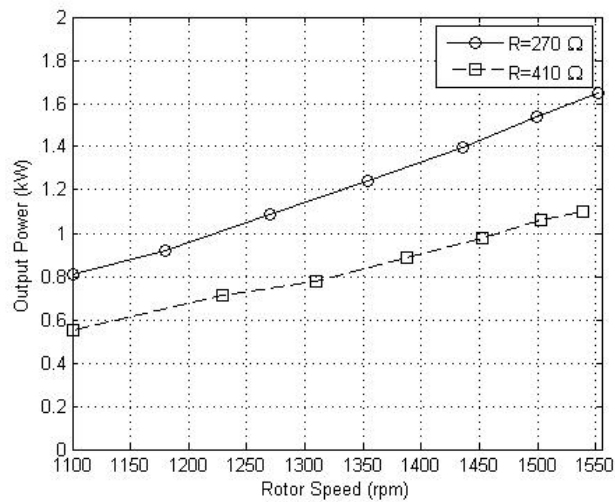
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นการควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่-ความเร็ว ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้-ความเร็ว กำลังเอาต์พุต-ความเร็ว และประสิทธิภาพในการทำงานกับความถี่ดังกล่าวประกอบ 4-25 ถึง 4-28 ตามลำดับ



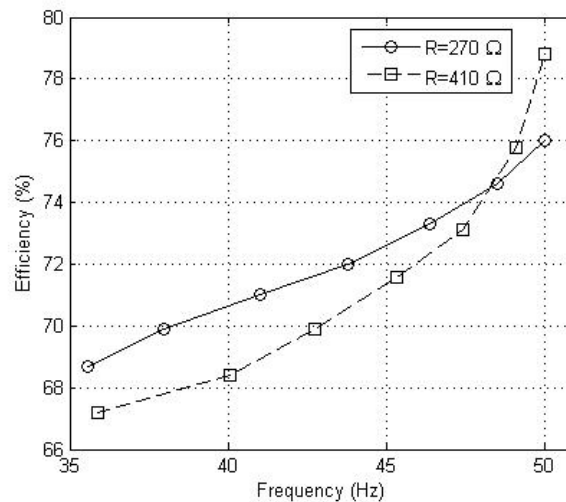
ภาพประกอบ 4-25 การควบคุมอัตราส่วนระหว่าง V/f กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทดสอบประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ



ภาพประกอบ 4-26 ค่าตัวเก็บประจุ (C) กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทดสอบประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ



ภาพประกอบ 4-27 กำลังเอาต์พุตกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทดสอบประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ



ภาพประกอบ 4-28 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับความถี่ทำงานขณะทดสอบ ประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบต่ำ

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าสูงขึ้นที่ความเร็วรอบต่ำ การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งกระตุ้นโดยเทคนิคฟลักซ์คงที่ แรงบิดที่ได้จะเป็นแรงบิดคงที่ นั่นคือกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะแปรผันตรงกับความเร็วรอบ โดยที่ความเร็วรอบสูงจะสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ นอกจากนั้นแล้วยังขึ้นอยู่กับค่าของโหลดและตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นอีกด้วย

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับความถี่และโหลด โดยมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อทำงานที่ความถี่ต่ำ และการมีภาระที่สูงเกินไปเป็นผลให้ค่าสลิปสูงขึ้น ค่าสลิปที่สูงขึ้นก่อให้เกิดกำลังสูญเสียในรูปของความร้อนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการทำงานต่ำลงนั่นเอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยปัญหาและข้อเสนอแนะ

หลังจากได้ทำการศึกษา ทดสอบและนำเสนอผลการทดสอบในบทที่แล้ว ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงบทสรุปเกี่ยวกับงานวิจัย ปัญหาและอุปสรรค วิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าแบบอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวข้อง

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากการศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการกำลังรีแอกทีฟสำหรับกระตุ้นการสร้างสนามแม่เหล็กในวงจรโรเตอร์ การติดตั้งใช้งานมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายและแบบระบบอิสระ การติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะดึงกำลังรีแอกทีฟจากระบบจำหน่าย ส่วนในการติดตั้งใช้งานแบบระบบอิสระเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะดึงกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่นำมาต่อขนานที่ขั้วสำหรับกระตุ้น ซึ่งเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ขึ้นอยู่กับสถานะโหลดและความเร็วโดยจะส่งผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5.1.2 การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นกับสถานะโหลดและความเร็วที่แตกต่างกัน โดยการจำลองการทำงานโดยใช้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ทำให้รู้ว่าระดับฟลักซ์แม่เหล็กที่ลดลงเนื่องจากความเร็วที่ลดลงหรือสถานะโหลดที่เพิ่มขึ้นสามารถชดเชยได้โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นให้มีขนาดที่เหมาะสม ซึ่งในทางปฏิบัติระดับฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกควบคุมให้มีขนาดคงที่เท่ากับที่พิกัดตอนทำงานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งนี้เพื่อรักษาสมรรถนะทางแรงบิดให้คงที่เท่ากับที่พิกัด การทำงานภายใต้เทคนิคนี้สลิปจะมีค่าต่ำทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของต้นกำลังที่ขับ นอกจากนี้จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยใช้เทคนิคฟลักซ์คงที่ โดยการควบคุมค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการ

กระตุ้นเพื่อให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ช่องอากาศต่อความถี่มีค่าคงที่ทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการออกแบบขอบเขตในการทำงานเกี่ยวกับความเร็วสูงสุด ความเร็วต่ำสุด และค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อนำมาออกแบบระบบควบคุมการกระตุ้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดจืดต่อไป

5.1.3 การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมการกระตุ้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดจืด เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำไม่มีความผันผวนมากเหมือนกับความเร็วม การออกแบบจึงไม่ต้องคำนึงถึงความเร็วของระบบควบคุมมากนัก แต่ต้องคำนึงถึง ความง่าย ราคา และความแข็งแรง ที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดจืด และการเตรียมการเพื่อพัฒนาระบบควบคุมต่อไปในอนาคต

5.1.4 การสร้างเครื่องต้นแบบของระบบควบคุม

เครื่องต้นแบบของระบบควบคุมการกระตุ้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดจืด ประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7 เบอร์ LPC2138 ทำหน้าที่รับค่าแรงดันไฟฟ้าและความถี่จากเซนเซอร์เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่และคอยควบคุมให้มีขนาดคงที่เท่ากับพิกัดตอนทำงานเป็นมอเตอร์ โดยการส่งสัญญาณไปควบคุมบอร์ด ET-SSRAC PLUS ให้จ่ายไฟให้กับขดลวดของหน้าสัมผัสแม่เหล็กคอนแทกเตอร์เพื่อควบคุมการปรับค่าของชุดตัวเก็บประจุปรับค่าได้

5.1.5 การทดสอบและผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุม

เมื่อทดสอบการทำงานที่ภาระและความเร็วที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมโดยระบบนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลดและความเร็ว โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 79.90 เปอร์เซ็นต์ขณะมีภาระ 62.73 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด และมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อทำงานที่ความถี่ต่ำ

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัญหา

1. ความล่าช้าและอันตรายที่อาจจะเกิดกับผู้วิจัย ซึ่งทดสอบระบบโดยปราศจากอุปกรณ์ป้องกันเนื่องจากอุปกรณ์ป้องกัน เช่น อุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินพิกัด (Over voltage) หรือ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัด (over current) มีราคาค่อนข้างสูง

2. ข้อมูลการวิจัยเกี่ยวกับการไหลของน้ำยังมีน้อย โดยส่วนใหญ่ระบบที่ใช้กันจะเป็นระบบแบบความเร็วคงที่ ซึ่งข้อมูลส่วนนี้มีความสำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบขีดความสามารถทางด้านความเร็วของระบบควบคุมให้มีความเหมาะสม
3. ความแม่นยำในการควบคุมยังมีน้อยเนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการควบคุม
4. ข้อจำกัดเกี่ยวกับความเร็วในการสวิตช์ของหน้าสัมผัสแมกเนติกคอนแทคเตอร์เนื่องจากกลไกในการ ON/OFF เป็นกลไกทางแมคคานิกและมีขนาดค่อนข้างใหญ่
5. ตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่
6. ขนาดของมอเตอร์ที่ใช้จำลองเป็นต้นกำลังมีขนาดเล็กเกินไปทำให้ไม่สามารถทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่พิกัดได้

5.2.2 ข้อเสนอแนะ

1. ออกแบบอุปกรณ์สำหรับทำเป็นระบบป้องกัน โดยใช้วัสดุที่มีราคาถูกแทน
2. ใช้ข้อมูลการวิจัยเกี่ยวกับ Pattern ของลมแทน ซึ่งสามารถใช้ในการออกแบบขีดความสามารถทางด้านความเร็วของระบบควบคุมในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้เนื่องจากความเร็วลมมีความผันผวนสูงกว่าอัตราการไหลของน้ำ
3. การใช้ Current source inverter (CSI) ซึ่งเป็นการควบคุมขนาดของกระแสกระตุ้นโดยตรงโดยการควบคุมมุมจุดฉนวนของตัวเรียงกระแสควบคุมทำให้มีความแม่นยำในการควบคุมสูง
4. เลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่มีการควบคุมการ ON/OFF ด้วยไฟฟ้าแทนกลไกทางแมคคานิก ซึ่งมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความเร็วในการสวิตช์ เช่น การใช้โซลิดสเตตรีเลย์ที่มีลักษณะการทำงาน คือเมื่อมีสัญญาณ Input ตามย่านของแรงดันควบคุม Output จะ Turn on ภายในประกอบด้วย Semiconductor ไม่มีหน้าคอนแทคจึงทำให้ไม่มีการเกิดประกายไฟเหมาะสมกับงานที่มีการ ON/OFF บ่อยๆ เป็นต้น
5. การนำไปใช้งานกับโหลดแบบไม่เชิงเส้นควรมีการออกแบบเป็นพิเศษ เนื่องจากในการนำไปใช้งานกับโหลดแบบไม่เชิงเส้นนี้จะทำให้มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดค่าความถี่ไม่สามารถตรวจวัดได้ นอกจากนั้นค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกระตุ้นจะมีค่าสูงกว่าการใช้งานกับโหลดแบบเชิงเส้น
6. ควรใช้มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับจำลองเป็นต้นกำลังให้มีพิกัดกำลังสูงกว่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้สามารถทดสอบการทำงานที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

7. ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะมีภาระเท่ากับ 50 ถึง 76.36 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 78.78 ถึง 79.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าผลต่างเท่ากับ 1.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อทำงานที่ภาระสูงกว่า 76.36 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ค่าประสิทธิภาพในการทำงานมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นในการออกแบบพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการนำไปใช้งานควรเลือกให้ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดมอเตอร์ที่นำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บรรณานุกรม

- [1] Wang, L. and C.H. Lee. 2000. Long-shunt and short-shunt connections on dynamic performance of a SEIG feeding an induction motor load. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 15(1): 1-7.
- [2] Yaser, N. et al. 2003. Teaching the self-excited induction generator using Matlab. *International Journal of Electrical Engineering Education*. 40(1): 55-65.
- [3] Neam, M.M. et al. 2007. The dynamic performance of an isolated self-excited induction generator drives by a variable-speed wind turbine. *International Conference on Clean Electrical Power*. 7(1): 536-543.
- [4] Sandhu, K.S. and S.P. Jain. 2008. Steady state operation of self-excited induction generator with varying wind speed. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2(1): 26-33.
- [5] Grantham, C. and D. Seyoum. 2008. The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine. *International Conference on Electrical Machines and Systems*: 2351-2356.
- [6] Riawan, D.C. and C.V. Nayar. 2009. Improved power transfer capability of SEIG in variable speed wind turbine generation system. *Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009. Australasian Universities* : 1-5.
- [7] Zainuddin, H. et al. 2009. Design and development of pico-hydro generation system for energy storage using consuming water distributed to houses. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 59(1): 154-159.
- [8] Kothari, D.P. and I.J. Nagrath. 2004. *Electric Machines*. 3rd edition. New York: Tata McGraw-Hill.
- [9] Patel, M.R. 1999. *Wind and Solar Power Systems*. New York: RCR Press.
- [10] Ahmed, T. et al. 2000. Terminal voltage regulation characteristics by static var compensator for a three-phase self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 40(4): 978-988.
- [11] Ouazene, L. and G. Mcpherson. 1983. *Analysis of the isolated induction generator*. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-102(8): 2793 – 2798.

- [12] Eltamaly, A.M. 2002. New formula to determine the minimum capacitance required for self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Power Electronics Specialists Conference*. 33(1): 106-110.
- [13] ปรีพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์.2548. เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ. พิมพ์ครั้งที่ 2.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [14] Yu, Z. and D. Figoli. 1998. AC Induction motor control using constant V/Hz principle and space vector PWM technique with TMS320C240. *Application Report: SPRA284A*.
- [15] ปรีพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์. 2549. การแปลงพลังงานกลไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 5.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลทางด้านเทคนิคของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ก1.รายละเอียดเกี่ยวกับประสิทธิภาพและพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Output kw	Type	Product	Speed r/min	Efficiency		Power factor cosφ	Current		Torque			Moment of inertia $J = GD^2/4$ kgm ²	Weight kg	Sound pressure level Lp dB(A)
	designation	code		Full load 100%	3/4 load 75%		I_N A	I_S I_N	T_N Nm	T_S T_N	T_{MAX} T_N			
1500 r/min = 4 poles							400V 50Hz		Basic design					
2.2	100L4A	102501-	1430	81.5	82.4	0.805	4.85	6.0	14.69	2.3	2.2	0.00679	32	53

ภาพประกอบ ก-1 รายละเอียดเกี่ยวกับประสิทธิภาพและพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ภาคผนวก ข โฉมแบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น
ภายในตัวเองโดยใช้ โปรแกรม MATLAB


```

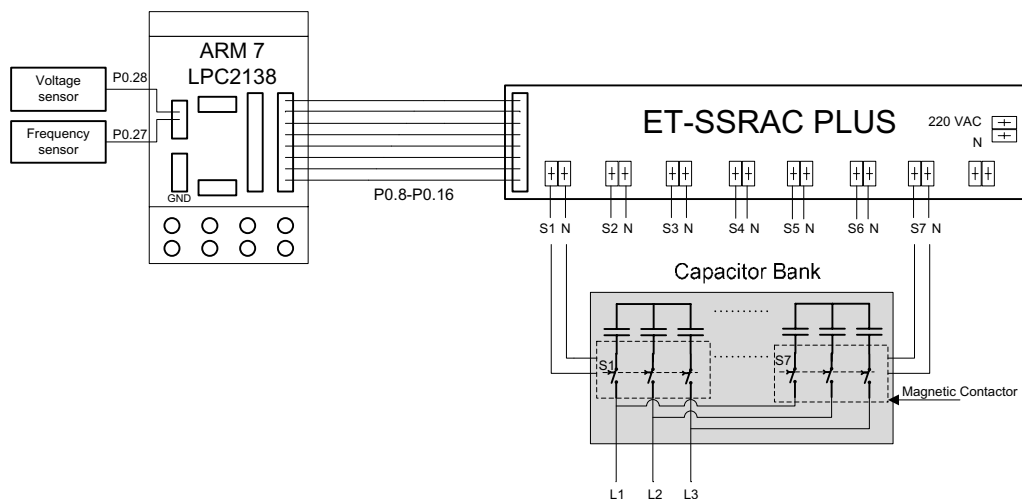
47      %7.compute Load
48      RL=(R*Xc^2)/(a*((a^2)*(R^2)+(Xc^2)));
49      XL=(R*R*Xc)/(((a^2)*(R^2)+(Xc^2));
50      %-----
51      %8. Compute Xm.
52      Zs=(RL+(R1/a)+(j*(X1-XL)));
53      Zr=(R2/(a-b)+(j*X2);
54      Ys=1/Zs;
55      Yr=1/Zr;
56      Ym=-(Ys+Yr);
57      Xm=-1/(imag(Ym));
58      Ym_1=1/(j*Xm);
59      Y=Ys+Yr+Ym_1;
60      %-----
61      % 9.Read value of E1 using Xm from the magnetization curve.
62      if (Xm>188.3417608|Xm==188.3417608)&(Xm<335.6093807|Xm==335.6093807)
63      data = importdata('spi.txt');
64      E_1=(data(:,1))';
65      X_m=(data(:,2))';
66      pp=spline(X_m,E_1);E1=ppval(pp,Xm);
67      else
68          E1=0;
69      end
70      %-----
71      % 10.Compute Terminal Voltage
72      T=(RL-(j*XL))/((RL+(R1/a)+(j*(X1-XL)));
73      T1=abs(T);
74      Vt=T1*a*E1;
75      Vt
76      %-----
77      %11.display
78      Vt
79      f=50*a
80      Pout=3*Vt*Vt/R

```

ภาพประกอบ ข-2 ได้แบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายใน
ตัวเองโดยใช้ โปรแกรม MATLAB (ต่อ)

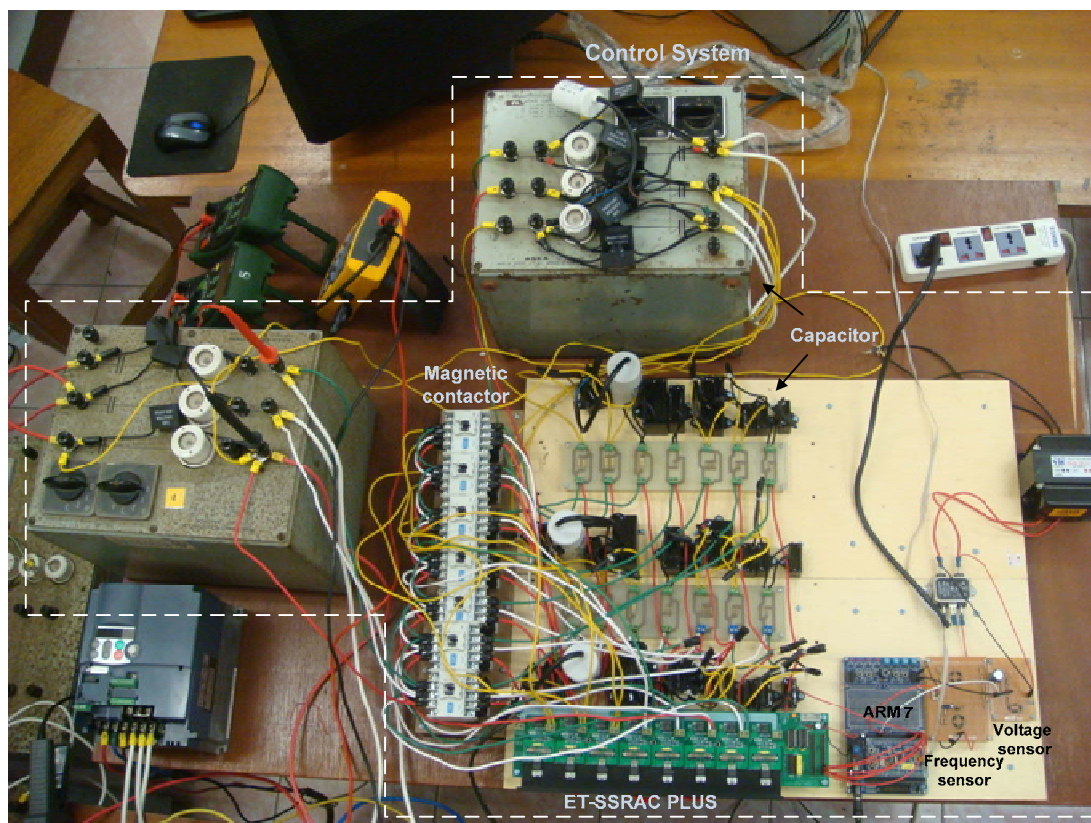
ภาคผนวก ค รายละเอียดของวงจรและภาพรวมของการออกแบบระบบ

ค3. ภาพรวมของการออกแบบระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



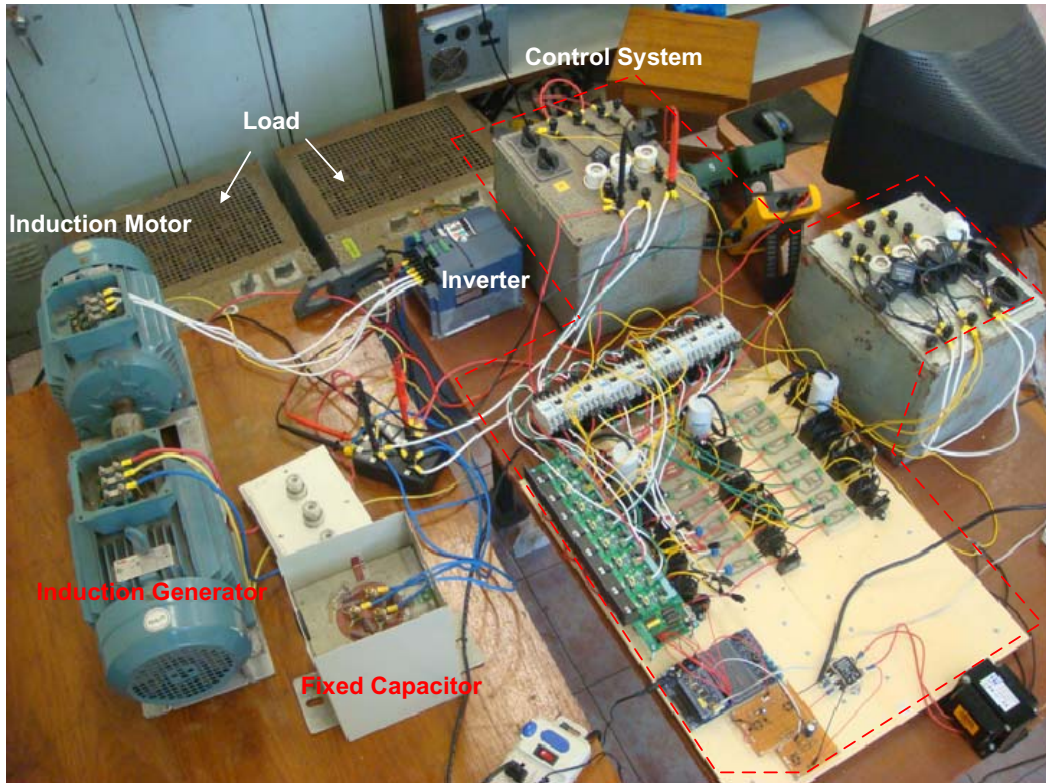
ภาพประกอบ ค-3 ภาพรวมของการออกแบบระบบควบคุม

ค4. ภาพรวมของเครื่องต้นแบบของระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ภาพประกอบ ค-4 เครื่องต้นแบบของระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ค5. ภาพรวมของเครื่องต้นแบบของระบบที่ใช้จำลองเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก



ภาพประกอบ ค-5 เครื่องต้นแบบของระบบที่ใช้เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

**ภาคผนวก ง รายละเอียดและคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ Fuji รุ่น FRENIC-Mini
Model: FRN3. 7C1S-4A**

ง1. ข้อมูลทางด้านเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ Fuji รุ่น FRENIC-Mini Model: FRN3. 7C1S-4A

■ Three-phase series

Item		Specifications															
Input power source		Three-phase 200V						Three-phase 400V									
Type (FRN□□□C1E-□A)		FRN0.1 C1E-2A	FRN0.2 C1E-2A	FRN0.4 C1E-2A	FRN0.75 C1E-2A	FRN1.5 C1E-2A	FRN2.2 C1E-2A	FRN3.7 C1E-2A	FRN0.4 C1E-4A	FRN0.75 C1E-4A	FRN1.5 C1E-4A	FRN2.2 C1E-4A	FRN3.7 C1E-4A				
Applicable motor rating *1)		kW		0.1	0.2	0.4	0.75	1.5	2.2	3.7	0.4	0.75	1.5	2.2	3.7		
Output ratings	Rated capacity *2)	kVA		0.3	0.57	1.1	1.9	3.0	4.2	6.5	1.1	1.9	2.8	4.1	6.8		
	Rated voltage *3)	V Three-phase, 200V/50Hz, 200, 220, 230V/60Hz															
	Rated current *4)	A		0.8 (0.7)	1.5 (1.4)	3.0 (2.5)	5.0 (4.2)	8.0 (7.0)	11.0 (10.0)	17.0 (16.5)	1.5	2.5	3.7	5.5	9.0		
	Overload capability	150% of rated current for 1min, 200% of rated current for 0.5s															
Rated frequency		50, 60Hz															
Phases, voltage, frequency		Three-phase, 200 to 240V, 50/60Hz						Three-phase, 380 to 480V, 50/60Hz									
Voltage/frequency variations		Voltage: +10 to -15% (Voltage unbalance *10) : 2% or less						Frequency: +5 to -5%									
Momentary voltage dip capability *5)		When the input voltage is 165V or more, the inverter continues operation. If it drops below 165V, the inverter operates for 15ms.						When the input voltage is 300V or more, the inverter continues operation. If it drops below 300V, the inverter operates for 15ms.									
Input ratings	Rated current *6)	A		(with DCR)		0.57	0.93	1.6	3.0	5.7	8.3	14.0	0.85	1.6	3.0	4.4	7.3
	(without DCR)		1.1	1.8	3.1	5.3	9.5	13.2	22.2	1.7	3.1	5.9	8.2	13.0			
	Required power supply capacity *7)		kVA		0.2	0.3	0.6	1.1	2.0	2.9	4.9	0.6	1.1	2.0	2.9	4.9	
Braking	Torque *8)	%		150		100		50		30		100		50		30	
	Torque *9)	%		—		150		150		150		150		150		150	
	DC injection braking	Starting frequency: 0.0 to 60.0Hz Braking time: 0.0 to 30.0s Braking level: 0 to 100% of rated current															
Enclosure (IEC 60529)		IP20, UL open type *11)															
Cooling method		Natural cooling						Fan cooling			Natural cooling		Fan cooling				
Weight / Mass		kg		0.7	0.7	0.7	0.8	2.4	2.4	2.9	1.5	1.6	2.5	2.5	3.0		

■ Single-phase series

Item		Specifications									
Input power source		Single-phase 200V									
Type (FRN□□□C1E-7A)		FRN0.1 C1E-7A	FRN0.2 C1E-7A	FRN0.4 C1E-7A	FRN0.75 C1E-7A	FRN1.5 C1E-7A	FRN2.2 C1E-7A				
Applicable motor rating *1)		kW		0.1	0.2	0.4	0.75	1.5	2.2		
Output ratings	Rated capacity *2)	kVA		0.3	0.57	1.1	1.9	3.0	4.1		
	Rated voltage *3)	Three-phase, 200V/50Hz, 200, 220, 230V/60Hz									
	Rated current *4)	A		0.8 (0.7)	1.5 (1.4)	3.0 (2.5)	5.0 (4.2)	8.0 (7.0)	11.0 (10.0)		
	Overload capability	150% of rated current for 1min, 200% of rated current for 0.5s									
Rated frequency		50, 60Hz									
Phases, voltage, frequency		Single-phase, 200 to 240V, 50/60Hz									
Voltage/frequency variations		Voltage: +10 to -10%, Frequency: +5 to -5%									
Momentary voltage dip capability *5)		When the input voltage is 165V or more, the inverter continues operation. If it drops below 165V, the inverter operates for 15ms.									
Input ratings	Rated current *6)	A		(with DCR)		1.1	2.0	3.5	6.4	11.6	17.5
	(without DCR)		1.8	3.3	5.4	9.7	16.4	24.8			
	Required power supply capacity *7)		kVA		0.3	0.4	0.7	1.3	2.4	3.5	
Braking	Torque *8)	%		150		100		50		30	
	Torque *9)	%		—		150		150		150	
	DC injection braking	Starting frequency: 0.0 to 60.0Hz Braking time: 0.0 to 30.0s Braking level: 0 to 100% of rated current									
Enclosure (IEC 60529)		IP20, UL open type *11)									
Cooling method		Natural cooling					Fan cooling				
Weight / Mass		kg		0.7	0.7	0.7	1.2	2.4	2.9		

ภาพประกอบ ค-1 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ Fuji รุ่น FRENIC-Mini Model: FRN3.

7C1S-4A

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายวรรณศักดิ์ ชุมคง		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120089		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษากันกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วรรณศักดิ์ ชุมคง, เกริกชัย ทองหนู, กุศุมาลย์ เฉลิมยานนท์, อนุวัตร ประเสริฐสุทธิ, และ ปริพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์. 2554. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองกับเทคนิคฟลักซ์คงที่ในการประยุกต์ใช้งานกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบต้นกำลังที่มีความเร็วแปรผัน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 9(1).