

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

**CHARACTERISTIC ANALYSIS OF INDUCTION GENERATOR**



2/พ.  
2548  
2548

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... **62398** .....

วัน,เดือน,ปี..... **17**.....**ส.ค.**..... **2549**

11/2/2008  
b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2548

การวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
CHARACTERISTIC ANALYSIS OF INDUCTION GENERATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิเชิต ฉ่ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. พิชิต ล้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นายปรีชา ชูจิต

รศ. พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอการศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกในรูปแบบต่างๆ กล่าวคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อตรงกับเครื่องจ่าย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยกโดยโครงการนี้ใช้อินเวอร์เตอร์ตัดแปลงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายและคืนพลังงานไปสะสมในแบตเตอรี่ ซึ่งในโครงการจะประกอบด้วย ทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติ ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละรูปแบบโดยมุ่งเน้นด้านการคืนพลังงานเป็นหลัก ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางพื้นฐานในการเลือกใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CHARACTERISTIC ANALYSIS OF INDUCTION GENERATOR

Preecha Chujit

Assc.Prof. Phichit Lumyong Advisor

2005

### ABSTRACT

This thesis is to study about characteristic of squirrel cage induction generator. Which grid connected, inverter fed (the inverter is improved for regenerative power to stored in battery), and self excited induction generator are presented.

This paper is composed of theory and principle to induction generator each one types. Finally test results are presented in many relationship between electrical power output and rotor speed are illustrated and discussed compare with properties for guide line to choose the operate or control systems.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยความร่วมมือและความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่าย บุคคลแรกที่ขอขอบพระคุณเป็นพิเศษ คืออาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ท่านอาจารย์รศ. พิเชิต ล้ายอง ที่ชี้แนะแนวทางให้กับผู้จัดทำด้วยดีเสมอมาพร้อมทั้งให้โอกาสในการทำปริญญาานิพนธ์คนเดียวในปีการศึกษา ๒๕๔๘ เนื่องจากไม่สามารถจะจบพร้อมเพื่อนในปีการศึกษา ๒๕๔๗ ได้ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุก ๆ ท่าน

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโทท่านแรกคือ คุณเปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ ที่ช่วยแนะนำหลาย ๆ สิ่งหลาย ๆ อย่างให้กับผู้จัดทำเป็นอย่างมาก คุณ ประสิทธิ์ภาพ ปัญญาพันธ์ และคุณ ธนาพันธ์ แสนสุข ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ ตลอดจนคำแนะนำดี ๆ เกี่ยวกับโครงการที่เคยทำวิจัยเรื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตนเอง

ขอขอบคุณ คุณพันรบ ชินบุตร ที่ช่วยแนะนำและอนุเคราะห์ข้อมูลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อกับระบบการไฟฟ้าโดยตรงและการทดสอบมอเตอร์พิกัด 1 แรงม้าต่าง ๆ

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ที่เคยร่วมทำโครงการนี้มาด้วยกันอย่างทรหด คือ คุณ รุติพงษ์ งามถิ่น และคุณ สมบัติ ไชวงษ์ ถึงแม้ว่าจะไม่ได้จบพร้อมกัน

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ร่วมห้องเรียนและเพื่อน ๆ ในกลุ่มก็ทุก ๆ ท่านที่ให้ความทรงจำดี ๆ และบทเรียนต่าง ๆ ตลอดจนคำปรึกษาด้านการเรียนและส่วนตัว

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้โอกาสทางการศึกษาตลอดจนความรักความห่วงใยตลอดมา

ผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีและขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานของโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
2.1 โครงสร้าง	4
2.2 การทำงานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	6
2.3 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
2.4 ทิศทางการไหลของกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	9
2.5 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	10
2.6 รูปแบบและประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	11
บทที่ 3 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	13
3.1 การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากวงจรสมมูลแบบประมาณ	13
3.2 วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์	14
3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ	17
บทที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมกับเครือข่าย	19
4.1 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบต่อตรงกับเครือข่าย	19
4.2 การทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมกับเครือข่าย	20
4.3 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมต่อกับเครือข่าย	21
4.4 สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมต่อกับเครือข่าย	34
บทที่ 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	35
5.1 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	35
5.2 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุเพื่อสร้างแรงดันของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3	การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	39
5.4	ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	40
5.5	สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	48
5.6	การทดลองเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิเตอร์ตามโหลด	49
5.7	สรุปผลการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิเตอร์ตามโหลด	52
บทที่ 6	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก	53
6.1	หลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก	53
6.2	การนำเอาอินเวอร์เตอร์มาดัดแปลงใช้งาน	55
6.3	การส่งผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์กับเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	57
6.4	การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์	58
6.5	สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์	68
6.6	การทดลองที่คืนพลังงานสูงสุดทุกความถี่	69
6.7	สรุปผลการทดลองคืนพลังงานสูงสุดทุกความถี่	75
บทที่ 7	สรุป	76
7.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้ง 3 แบบ	76
7.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่นๆ	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
รูปที่ 2.2 สเตเตอร์ของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	5
รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก	5
รูปที่ 2.4 โรเตอร์พันด้วยขดลวด	6
รูปที่ 2.5 แสดงรูปตัดโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3Φ	7
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็วของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
รูปที่ 2.7 แสดงกราฟคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	9
รูปที่ 2.8 แสดงการไหลของกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	9
รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประมาณ	13
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลจากการทดสอบขณะเปิดวงจร	15
รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า	15
รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบยึดตัวโรเตอร์	16
รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (VI-Method)	17
รูปที่ 4.1 แสดงการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อตรงกับเครือข่าย	19
รูปที่ 4.2 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อการทดลองคืนพลังงานผ่าน Variac เข้าระบบการไฟฟ้า	20
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับค่าสลิปเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบสตาร์	32
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับค่าสลิป เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบเดลต้า	32
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน 50% ,100 % ของพิกัด เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเดลต้าและแบบสตาร์	33
รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากการทดลองที่ระดับ 110 V , 2.0 A และมุมเฟส $\phi = 140$ องศา ความถี่ 50 Hz	33
รูปที่ 5.1 แสดงการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	35
รูปที่ 5.2 แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	36
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก	37
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ	37
รูปที่ 5.5 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด	38
รูปที่ 5.6 แสดงรูปการทดลองและการวัดค่าต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันที่ขั้วเมื่อต่อแบบสตาร์	46
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับกระแสเมื่อต่อแบบสตาร์	46
รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันที่ขั้วเมื่อต่อแบบเดลต้า	47
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับกระแสเมื่อต่อแบบเดลต้า	47
รูปที่ 5.11 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากการทดลองที่ระดับ 215 V , 1.15 A และมุมเฟส $\phi = 91.5$ องศา ความถี่ 50 Hz	48
รูปที่ 5.12 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1258 rpm	51
รูปที่ 5.13 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1352 rpm	51
รูปที่ 5.14 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1517 rpm	52
รูปที่ 5.15 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1628 rpm	52
รูปที่ 6.1 การต่อ Induction Generator ร่วมกับ Synchronous Generator	53
รูปที่ 6.2 การต่อ Induction Generator ร่วมกับ Inverter ดัดแปลง	54
รูปที่ 6.3 แสดงวงจรและโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์โดยทั่วไป	55
รูปที่ 6.4 แสดงส่วนประกอบหลักของอินเวอร์เตอร์ทั่วไป	55
รูปที่ 6.5 แสดงการดัดแปลงอินเวอร์เตอร์ให้สามารถสะสมพลังงานเก็บเข้าแบตเตอรี่ได้	56
รูปที่ 6.6 แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ใน 4 จตุภาค (4 Quadrant)	57
รูปที่ 6.7 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อการทดลองคืนพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์ แล้วเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่	58
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสลิปกับกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบสตาร์	67
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสลิปกับกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบเดลต้า	67
รูปที่ 6.10 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากการทดลองที่ระดับ 250 V , 1.68 A และมุมเฟส $\phi = 115$ องศา ความถี่ 50 Hz	68
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สามารถคืนได้ ที่พิกัดกระแส กับความเร็วระบบเมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบสตาร์	74
รูปที่ 6.12 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สามารถคืนได้ ที่พิกัดกระแส กับความเร็วระบบเมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบเดลต้า	74
รูปที่ 6.13 กราฟแสดง เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ต่อแบบเดลต้าและแบบสตาร์	75
รูปที่ 7.1 ย่านการคืนกำลังไฟฟ้าของการต่อในแต่ละแบบ	76

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 3.1 แสดงการหาค่าความต้านทานที่ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	17
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า	18
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์	21
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเดลต้า	27
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองขณะไม่มีภาระเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 แรงม้าแบบสตาร์	40
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองขณะไม่มีภาระเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 แรงม้าแบบเดลต้า	44
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุตามภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	49
ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์ คินพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์	60
ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเดลต้า คินพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์	64
ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองคินพลังงานสูงสุดทุกความถี่โดยต่อ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์	69
ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองคินพลังงานสูงสุดทุกความถี่โดยต่อ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเดลต้า	71
ตารางที่ 7.1 สรุปการเปรียบเทียบการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแบบต่างๆ	77

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

พลังงานมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมวลมนุษย์ ในอดีตมีการพัฒนาการใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น รถลาก , รถม้า , เครื่องจักรกลไอน้ำ จนกระทั่งมีการค้นพบพลังงานไฟฟ้า ทำให้โลกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันต้องอาศัยพลังงานต้นทุนจากฟอสซิลเป็นหลักซึ่งได้แก่ ถ่านหิน , ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันปิโตรเลียมแต่ ณ.วันนี้ ความต้องการพลังงานสูงขึ้นตามภาวะเศรษฐกิจที่ขยายตัวทุกปีรวมทั้งจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่แหล่งพลังงานจากฟอสซิลมีจำนวนน้อยลงจึงมีราคาเพิ่มขึ้นแทบทุกวันตามกลไกการตลาดและคงจะหมดไปจากโลกในไม่ช้านี้ ถ้าหากจะสร้างเขื่อนเพื่อผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็จะสูญเสียป่าไม้อีกจำนวนมาก

ดังนั้นจึงต้องมีการหาพลังงานจากแหล่งอื่น ๆ มาทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง ฯลฯ ซึ่งเป็นแนวทางที่เหมาะสมเนื่องจากไม่ก่อมลพิษกับสิ่งแวดล้อมเป็นพลังงานสะอาดและไม่มีวันหมด ในประเทศที่พัฒนาแล้วมีการสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนอย่างจริงจัง เช่น เยอรมัน และ ญี่ปุ่น เป็นต้น ซึ่งมีการซื้อพลังงานไฟฟ้าคืนจากชาวบ้านที่เหลือใช้ด้วย ในประเทศไทยมีโซอยู่บ้างแต่น้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับความต้องการพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งประเทศ

ในอนาคตประเทศเราเราจะต้องนำพลังงานทดแทนมาใช้ให้มากขึ้นเนื่องจากพลังงานจากฟอสซิลที่โซอยู่ทุกวันนี้ส่วนมากจะนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีแต่จะแพงขึ้น ๆ เม็ดเงินมากมายมหาศาลจากการซื้อพลังงานเหล่านี้เป็นตัวจุดเศรษฐกิจทำให้การพัฒนาประเทศชาติเป็นไปด้วยความยากลำบาก สมควรอย่างยิ่งที่เราทุกคนต้องช่วยกันประหยัดพลังงาน และพัฒนาพลังงานทดแทนมาใช้เองโดยไม่ต้องพึ่งพาต่างชาติมากนัก ขณะนี้พลังงานที่น่าจะนำมาใช้ที่สุดคือ พลังงานแสงอาทิตย์ กับ พลังงานลม แต่เซลล์แสงอาทิตย์ยังคงมีราคาสูงอยู่ ส่วนพลังงานลมนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ง่าย ๆ โดยการใช้พลังงานลมไปหมุนกังหันลมเพื่อนำมาขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ต้องมีการสำรวจพื้นที่ ๆ จะสร้างควรมีลมแรงและสม่ำเสมอ

สำหรับโครงการนี้จะทำการศึกษาการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งโครงการที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการศึกษาและทำวิจัยมาหลายปีแล้วโดยแต่ละปี จะมีการศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ รวมทั้งการประยุกต์ใช้งานและควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ศึกษาและนำแนวคิดจากโครงการเก่า ๆ มาออกแบบการทดลองใหม่เพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลและมีแนวทางไปทางเดียวกันเพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ ข้อดี ข้อเสีย ของแต่ละชนิดได้
- 1.2.2 พิจารณาหาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการคำนวณพลังงานไฟฟ้าอย่างคร่าว ๆ รวมทั้งประสิทธิภาพและผลกระทบต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 1.2.3 เพื่อเป็นการนำเสนอแนวคิดที่จะนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติหรือเพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป
- 1.2.4 เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เหมาะสมกับต้นกำลังที่มี

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาทฤษฎีการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ รวมทั้งทดสอบหาพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะทำการทดสอบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า ที่ได้ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปแบบต่าง ๆ เป็นหลัก ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดจะบันทึกอย่างละเอียดที่สุดเพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลทางทีมงานจะทดสอบใหม่ทั้งหมดตั้งนั้นข้อมูลที่ได้จะมีแนวทางไปทางเดียวกันทำให้สะดวกในการนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบและโครงการนี้จะไม่ยุ่งเกี่ยวในส่วนระบบการควบคุมซึ่งมีโครงการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่แล้ว

สุดท้ายจึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย รวมทั้งข้อจำกัดต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ ยานการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่าง ๆ พร้อมทั้งหาประสิทธิภาพ , กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ , รวมทั้งผลกระทบจากตัวแปรต่าง ๆ

## 1.4 วิธีและขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานของโครงการ

- 1.4.1 โครงการนี้เริ่มต้นโดยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งโครงการที่เกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งหมด
- 1.4.2 ทำการประชุมรวบรวมแนวความคิดจากสมาชิกและอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อที่จะออกแบบการทดลองตลอดจนจัดหาเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องใช้
- 1.4.3 ทำการทดลองโดยแยกการทดลองตามรูปแบบการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ พร้อมทั้งทำการบันทึกค่าและรูปคลื่นที่ได้เป็นช่วง ๆ
- 1.4.4 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณวิเคราะห์เปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ ในทุก ๆ ด้าน
- 1.4.5 จัดทำปฏิญานិพนธ์ซึ่งมีเนื้อหาสาระแยกออกเป็นบทดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเริ่มจากรายละเอียดในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โหมตการทำงานที่ได้นำความสัมพันธ์แรงบิดกับความเร็วรอบมาแสดงให้เห็น ลักษณะการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานทั้ง 3 แบบ ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดในบทต่อ ๆ ไป บทที่ 3 กล่าวถึงวงจรมุมที่ใช้ในเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ บทที่ 4 การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อตรงกับระบบเครือข่าย บทที่ 5 การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นในตัวเองโดยใช้คาปาซิเตอร์ บทที่ 6 การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นแยกโดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีใช้ในท้องตลาดมาดัดแปลงเพื่อให้สามารถกินพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์และสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ บทที่ 7 เป็นบทสรุปข้อดีข้อเสียข้อจำกัดการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ

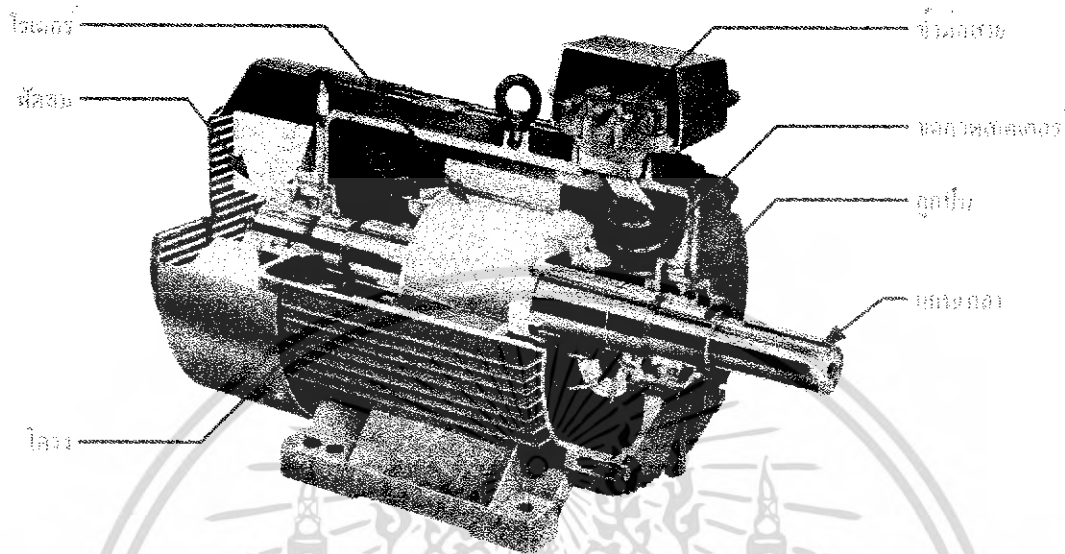


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

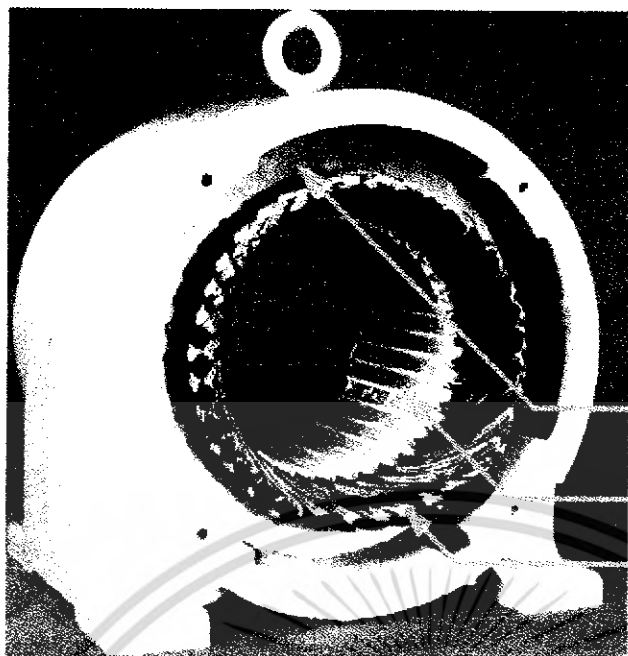
#### 2.1 โครงสร้าง



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

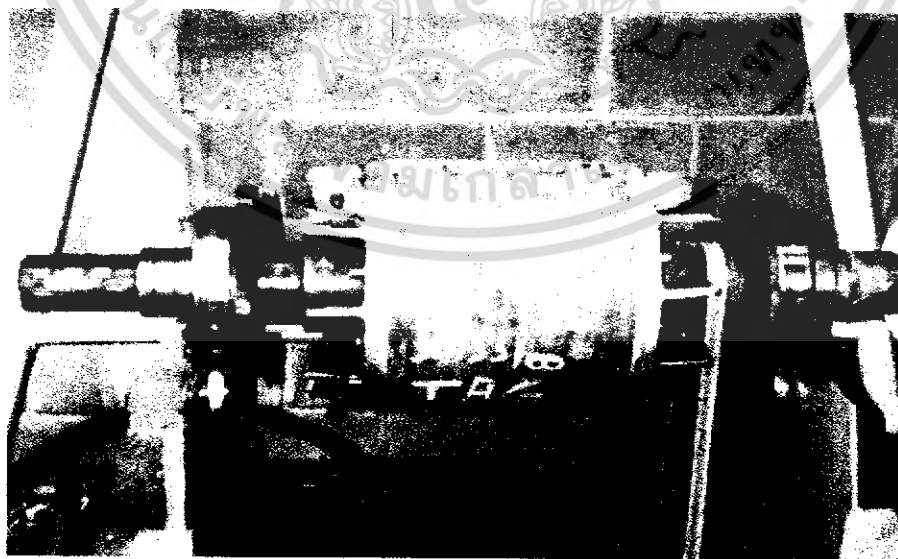
เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Machine) โดยปกติแล้วจะถูกใช้งานในสภาวะเป็นมอเตอร์ (Induction Motor) แต่ขณะเดียวกันมันก็สามารถทำงานในสภาวะที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Induction Generator) ได้ด้วย ดังนั้นโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็คืออันเดียวกันนั่นเอง โดยประกอบด้วยส่วนต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญมีอยู่สองส่วนคือ ตัวสเตเตอร์ และตัวโรเตอร์

2.1.1 สเตเตอร์ (stator) สเตเตอร์มีลักษณะเหมือนกับอาร์มาเจอร์ของเครื่องกลไฟฟ้าเชิงโครนัส คือเป็นแผ่นเหล็กบาง ๆอัดซ้อนกันอยู่ภายในโครง (frame) และมีร่องสเตเตอร์ (slot) เพื่อใช้พันขดลวดสเตเตอร์ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าภายในสเตเตอร์จะพันขดลวดไว้เป็นสามเฟส เพื่อใช้กับไฟฟ้าระบบสามเฟส จำนวนขั้วแม่เหล็กที่พันจะมีจำนวนคงที่โดยออกแบบให้เหมาะสมกับความเร็วของมอเตอร์ที่ต้องการใช้งานกระแสที่ไหลในขดลวดทั้งสามชุดจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งมีค่าคงที่หมุนไปบนสเตเตอร์ด้วยความเร็วเชิงโครนัส(synchronous speed)



รูปที่ 2.2 สเตเตอร์ของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1.2 โรเตอร์ (rotor) มีสองชนิดได้แก่ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor) และแบบพันด้วยขดลวด (wound rotor) โดยโรเตอร์แบบกรงกระรอกจะประกอบด้วยแท่งอลูมิเนียมฝังอยู่ในท่อนโรเตอร์ซึ่งเป็นเหล็กอ่อนแผ่นบาง ๆ อัดประกบซ้อนกันเป็นท่อนโดยปลายทั้งสองข้างของแท่งอลูมิเนียมจะเชื่อมเข้าด้วยกันเป็นวงแหวนดังรูปที่ 2.3 แท่งอลูมิเนียมที่ฝังอยู่ภายในท่อนโรเตอร์นี้จะวางเฉียงกับแนวแกนเพลลาเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กข้ามช่องอากาศ (air gap) จากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโรเตอร์แบบพันด้วยขดลวดบนตัวโรเตอร์จะมีร่องสลิตสำหรับพันขดลวดสามชุด เหมือนกับอาร์เมเจอร์ของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัสโดยพันให้มีจำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับ ทางด้านสเตเตอร์ปลายด้านหนึ่งของขดลวดจะต่อรวมกันเป็นจุดสตาร์และปลายที่เหลืออีกสาม ปลายจะต่อเข้ากับวงแหวนลื่น (slip ring) สามชุดซึ่งติดอยู่บนแกนเพลลาของโรเตอร์ดังรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ยังต้องมีแปรงถ่านต่อกับวงแหวนลื่นต่อไปยังตัวต้านทานแปรค่า (rheostat) ต่อแบบ สตาร์เพื่อที่จะปรับค่าความต้านทานในวงจรโรเตอร์ให้เพิ่มขึ้นในตอนเริ่มหมุนเพื่อเพิ่มแรงบิด ตอนเริ่มหมุนให้สูงขึ้น

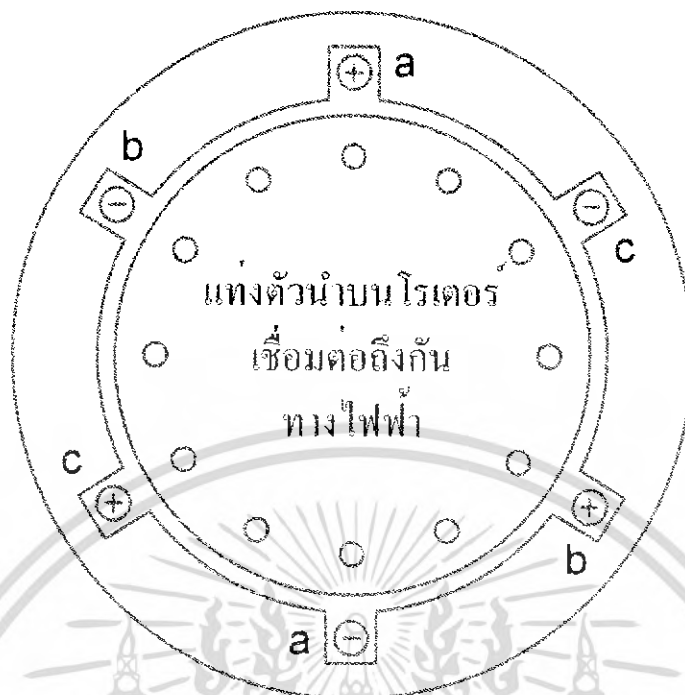


รูปที่ 2.4 โรเตอร์พันด้วยขดลวด

## 2.2 การทำงานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อขดลวดสเตเตอร์ได้รับกระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกจะเกิดการ สร้างสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในช่องอากาศของเครื่องจักรไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กหมุนจะหมุน ด้วยความเร็วซิงโครนัส  $N_s$  โดยความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าและจำนวน ขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้า จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำต่างๆที่อยู่บนโรเตอร์จะ เกิดการตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนโดยพิจารณาในลักษณะแนวเคลื่อนที่สัมพัทธ์แท่งตัวนำจะเกิด การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาซึ่งทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในแท่งตัวนำเนื่องจากแท่ง ตัวนำถูกต่อให้ครบวงจรโดยแท่งวงแหวนลื่นนิยมนำค่ากระแสที่มีผลทำให้เกิดแรงทางกลกระทำ กับแท่งตัวนำต่างๆ ในทิศทางที่ทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วย ความเร็ว  $N_r$  ถ้าหากความเร็ว  $N_r = N_s$  จะไม่เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นได้ทั้งนี้เนื่องจากแท่ง ตัวนำจะมีสภาพหยุดนิ่งอยู่กับที่เมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงรูปตัดโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3Φ

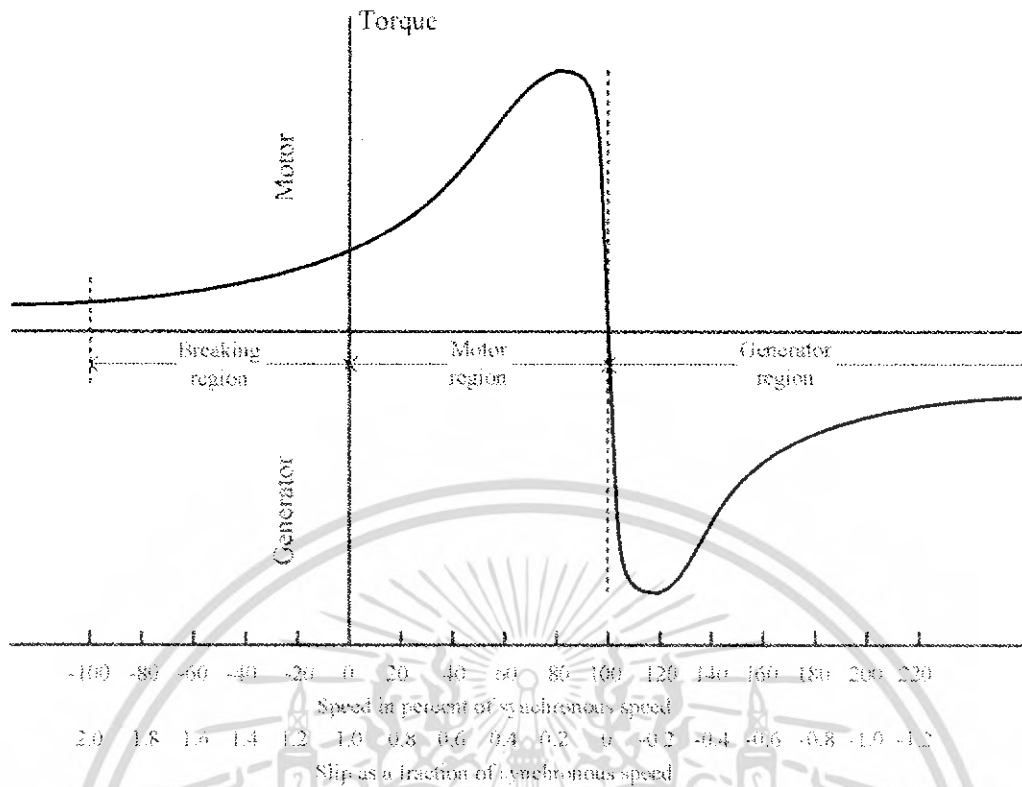
และถ้าหากโรเตอร์ถูกขับให้หมุนด้วยความเร็ว  $N_r$  มากกว่าความเร็วซิงโครนัส  $N_s$  เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานในสภาพที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการทำงานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าสลิป  $s$  (slip) ดังนี้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad \text{สมการ ( 2.1 )}$$

โดยที่

$$N_s = 120 \frac{f}{P} \quad \text{สมการ ( 2.2 )}$$

เมื่อ  $s$  เป็นค่าสลิปของเครื่องกลเหนี่ยวนำไม่มีหน่วย  $N_s$  และ  $N_r$  มีหน่วยเป็น rpm จากสมการที่ 2-1 เมื่อ  $N_r$  มากกว่า  $N_s$  ค่าสลิปจะมีค่าเป็นลบซึ่งหมายความว่าเครื่องจักรทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกลที่ทำงานเป็นมอเตอร์จะมีค่าสลิปอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยมีกราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็วซิงโครนัสในรูปที่ 2.6

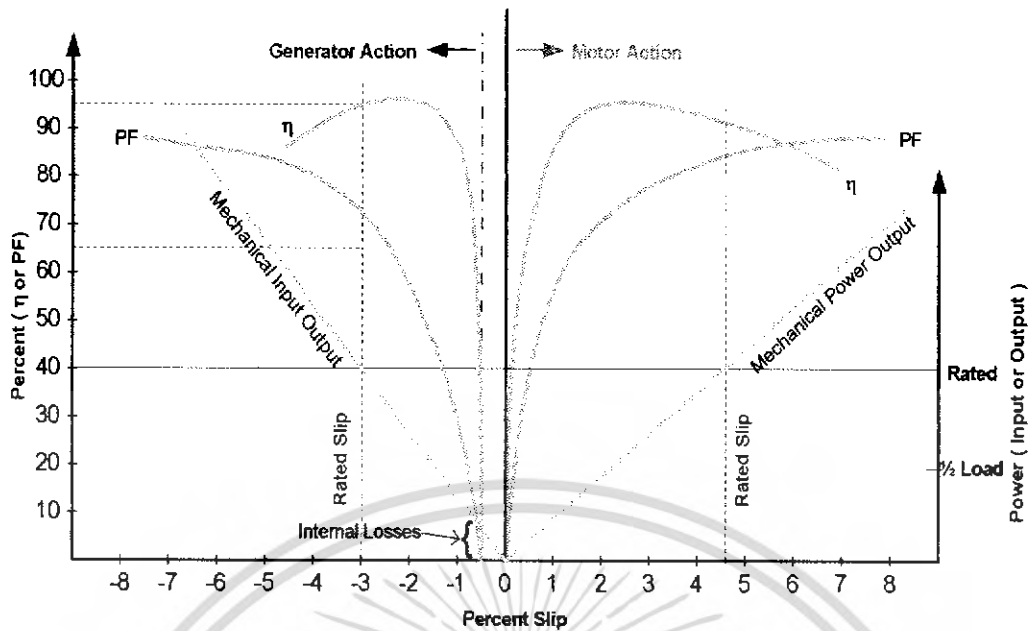


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็วของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 2.3 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

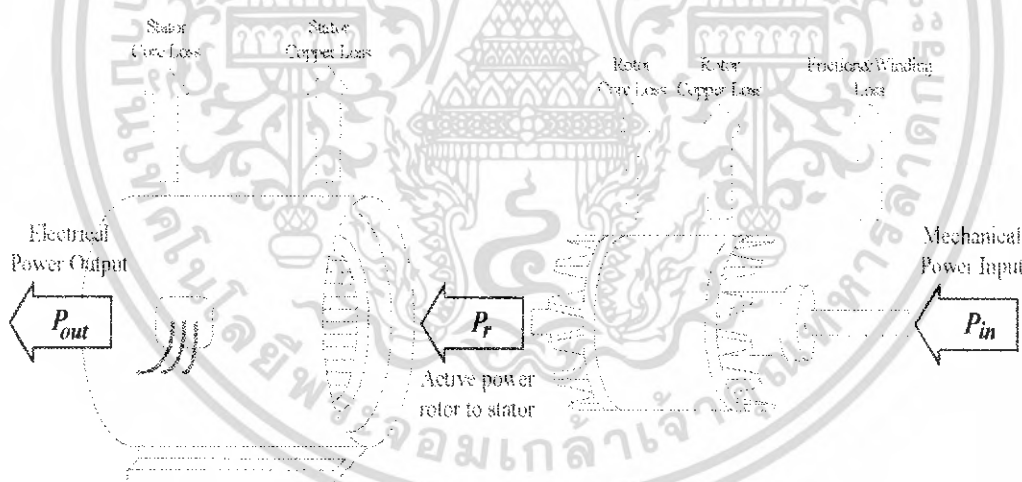
คุณลักษณะการทำงานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ จะสังเกตได้ว่ามีส่วนที่แตกต่างกันน้อยมากดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าตัวประกอบกำลัง, ประสิทธิภาพ และกำลังทางกลที่สัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์สลิปในรูปจะมีค่าสลิปเป็นบวกและลบเพื่อเปรียบเทียบการทำงานเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

คุณลักษณะต่างๆในกราฟก่อนข้างจะสมมาตร เส้นประแสดงจุดเปลี่ยนสภาวะจากมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการเพิ่มความเร็วต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอีก การเริ่มการผลิตกำลังไฟฟ้าออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายคิในระบบไฟฟ้าจะไม่เกิดขึ้นทันที จากกราฟจะเห็นได้ว่าต้องเพิ่มความเร็วต้นกำลังจนสลิปติดลบที่ค่าๆหนึ่งถึงจะมีการคินกำลังงานทั้งนี้เนื่องจากค่าสูญเสียต่างๆจะถูกชดเชยโดยกำลังทางกลของต้นกำลังและกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดผลิตได้ และเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าค่าสูญเสียทั้งหมดกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือถึงจะไหลกลับเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### 2.4 ทิศทางการไหลของกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.8 แสดงการไหลของกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การไหลของกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 มีลักษณะคล้ายๆกับลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพียงแต่มีทิศทางตรงกันข้าม โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะรับกำลังทางกลจากแหล่งพลังงานจากภายนอก ( $P_{in}$ ) มาขับให้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดให้หมุนตัดสนามแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกำลังไฟฟ้าออกที่เอาต์พุต ( $P_{out}$ ) โดยมีค่าสูญเสียต่างๆดังนี้ ค่าสูญเสียจากแรงลมและความฝืดจะถูกชดเชยโดยกำลังทางกลจากภายนอก ค่าสูญเสียจากขดลวดและแกนเหล็กที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ถูกชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างขึ้น ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะเท่ากับกำลังอินพุต ลบออกด้วยค่าสูญเสียทั้งหมด ถ้าหากอินพุตทางกลมีน้อยกว่าค่าสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำจะไม่มีกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เอาต์พุตจนกระทั่งอินพุตมีมากกว่าค่าสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำจึงจะมีกำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุต

## 2.5 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากวิธีการเดียวกับเครื่องไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ค่ากำลังงานทางกลอินพุตจะได้อาจมาจากการรวมของ ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้า ค่าความสูญเสียทางกล และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งมีรายละเอียดอธิบายได้ดังนี้

### 1 ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้า

ก. ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของขดลวดที่สเตเตอร์ (stator copper loss ;  $P_{cu,s}$ )

โดยที่ 
$$P_{cu,s} = I_s^2 R_s \quad \text{สมการ (2.3)}$$

$R_s$  เป็นความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส

$I_s$  เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส

ข. ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของขดลวดที่โรเตอร์ (rotor copper loss ;  $P_{cu,r}$ )

$$P_{cu,r} = sP_r \quad \text{สมการ (2.4)}$$

โดยที่ 
$$P_r = P_o + P_c + P_{cu,s} \quad \text{สมการ (2.5)}$$

$s$  เป็นค่าสลิป

$P_r$  เป็นกำลังงานที่ออกจากโรเตอร์

$P_o$  เป็นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

$P_c$  เป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กที่สเตเตอร์

ค. ค่าความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กที่สเตเตอร์ (stator core loss ;  $P_c$ )

ความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กที่สเตเตอร์สามารถหาได้จากการทดสอบขณะไม่มีภาระ

### 2. ค่าความสูญเสียทางกล

ค่าความสูญเสียทางกล (mechanical loss ;  $P_m$ ) เป็นผลรวมของความสูญเสียเนื่องจากความฝืดและลมที่พัดเพื่อระบายความร้อน (friction and windage loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (electrical output power ;  $P_o$ ) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$P_o = V_L I_L \cos \phi \quad \text{สมการ (2.6)}$$

โดยที่

$V_L$	เป็นแรงดันไฟฟ้าที่โหลดต่อเฟส
$I_L$	เป็นกระแสไฟฟ้าที่โหลดต่อเฟส
$\cos \phi$	เป็นตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลด

### 4. ค่ากำลังงานอินพุต

ค่ากำลังทางกลอินพุต (mechanical input power ;  $P_i$ ) คือกำลังงานทางกลที่ตัวต้นกำลัง (prime mover) ขับแกนเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_i = P_o + P_{cu,s} + P_{cu,r} + P_c + P_m \quad \text{สมการ (2.7)}$$

ดังนั้นจะหาประสิทธิภาพได้ตั้งสมการ

$$\% \text{Efficiency} = \frac{P_o}{P_i} \times 100 \quad \text{สมการ (2.8)}$$

## 2.6 รูปแบบและประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เราสามารถจำแนกประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ตามลักษณะหรือรูปแบบการเชื่อมต่อได้ดังนี้

2.6.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่ายโดยตรง (Grid-Connected Induction Generator) เมื่อเรานำเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าใดๆ ในขณะที่ยังไม่มีต้นกำลังขับเพลลาเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเครื่องกลจะแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าและรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบเครือข่ายโดยมีความเร็วที่แกนเพลลา (rotor speed) ที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) เมื่อเราใช้ต้นกำลังขับแกนเพลลาโรเตอร์ในทิศทางเดียวกันกับตอนเป็นมอเตอร์ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส  $N_r > N_s$  กำลังไฟฟ้าจะไหลกลับเข้าสู่ระบบเครือข่ายซึ่งขณะนี้เครื่องกลจะแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.6.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแยกออกจากระบบเครือข่าย (Isolated Induction Generator) รูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบนี้จะต่างกับแบบต่อเข้ากับระบบเครือข่ายโดยตรง คือจะทำงานเพียงลำพังและจ่ายโหลดเฉพาะเพียงค่า ๆ หนึ่งเท่านั้นข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้คือสามารถติดตั้งที่ใด ๆ ก็ได้โดยไม่ต้องมีไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเข้าถึง เราสามารถจำแนกออกได้เป็นสองรูปแบบคือ

2.6.2.1 แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก (Separate Excited Induction Generator) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบนี้จะมีหลักการการทำงานเหมือนกับแบบต่อตรงกับเครือข่ายกล่าวคือจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งชุดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนให้แก่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าอาจจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสหรืออินเวอร์เตอร์ก็ได้ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าใน ถ้าเป็นอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีใช้ในท้องตลาดทั่วไปจะต้องมีการดัดแปลงเพื่อให้สามารถซาร์จรประจุเพื่อสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ได้

2.6.2.2 แบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self Excited Induction Generator) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะอาศัยกระแสกระตุ้นจากตัวเก็บประจุที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเองไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกแต่จะต้องเพิ่มค่าตัวเก็บประจุมากขึ้นเมื่อโหลดมีขนาดใหญ่ขึ้น

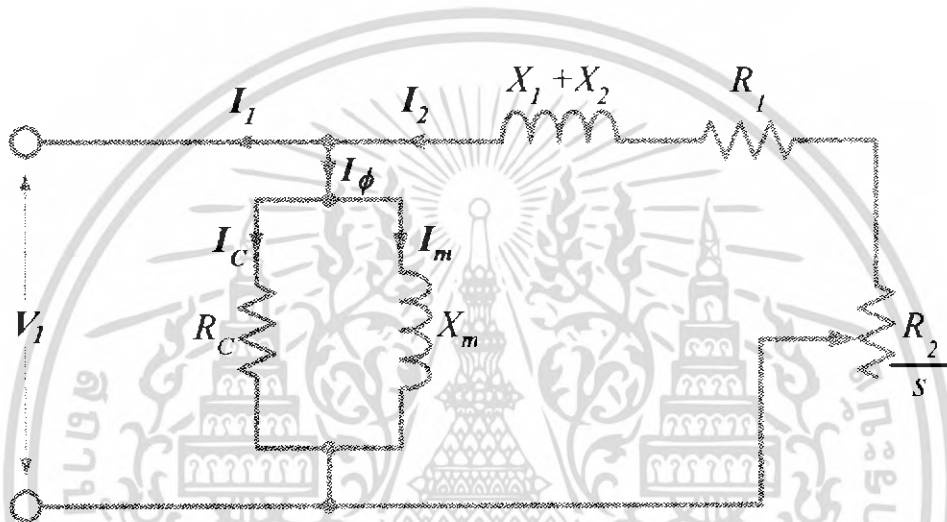
ซึ่งรายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ จะมีเนื้อหาอย่างละเอียดในบทที่ 4, บทที่ 5, และบทที่ 6 พร้อมทั้งการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปแบบต่าง ๆ ด้วย

### บทที่ 3

## วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 3.1 การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากวงจรสมมูลแบบประมาณ

ในการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำได้อย่างง่าย ๆ โดยใช้วงจรสมมูลแบบประมาณโดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้มาจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลและแบบยึดโรเตอร์ซึ่งมีรายละเอียดอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประมาณ

จากวงจรสมมูลแบบประมาณในรูปที่ 3.1 ให้

$X_1$  Stator leakage reactance

$X_2$  Rotor leakage reactance transfer to stator

$R_1$  Stator resistance

$R_2$  Rotor resistance transfer to stator

$R_c$  Fix-loss resistance

$X_m$  Magnetizing reactance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ( $N_s$ ) มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที หรือ rpm

$$N_s = \frac{120}{P} f \quad \text{สมการ (3.1)}$$

ในการคำนวณในวงจรสมมูลจะใช้ค่าสลิปเป็นตัวแทนทางด้านความเร็วซึ่งมีหน่วยเป็น per-unit ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำความเร็วตัวหมุน (Rotor speed :  $N_r$ ) จะมีค่ามากกว่าของสนามแม่เหล็กหมุน ( $N_s$ ) ซึ่งเป็นผลให้ค่าสลิปติดลบ

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad \text{สมการ (3.2)}$$

และจากวงจรสมมูลสามารถคำนวณหาค่า Output current ได้จากสมการ

$$I_1 = I_2 = I_\phi \quad \text{สมการ (3.3)}$$

ค่ากระแส  $I_2$  สามารถหาได้จากสมการ

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad \text{สมการ (3.4)}$$

และค่ากระแส  $I_\phi$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_\phi = \frac{V_1}{R_c} + \frac{V_1}{jX_m} \quad \text{สมการ (3.5)}$$

### 3.2 วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

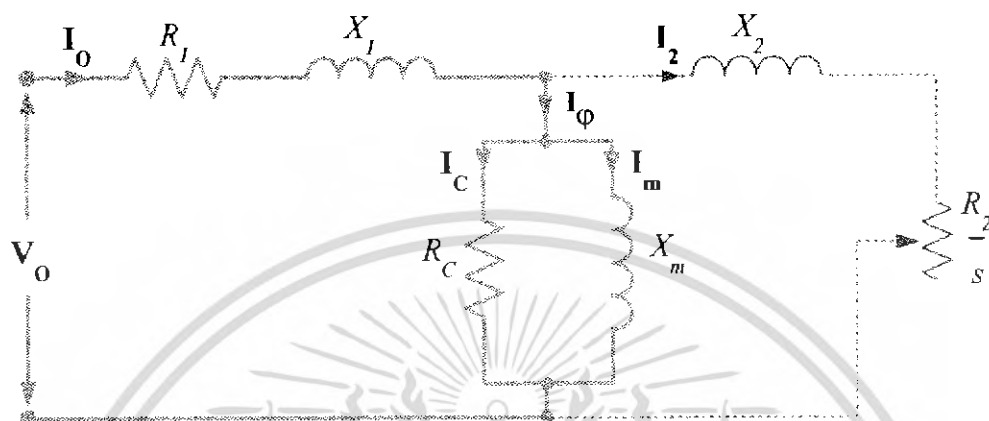
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล  $R_c, X_m, R_1, R_2, X_1$  และ  $X_2$  สามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบขณะไร้โหลด (No-Load test) การทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์ให้อยู่นิ่ง (Blocked - rotor test) และจากการวัดค่าความต้านทานไฟตรง (DC resistance) ของขดลวดสเตเตอร์

#### 3.2.1 การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล

การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกลทำได้เช่นเดียวกับการทดสอบขณะเปิดวงจร (Open circuit test) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทำให้ทราบค่ากระแสกระตุ้น (exciting current) และการสูญเสียเนื่องจากการหมุน (rotational losses)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ไม่มีภาระทางกลความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าเกือบเท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน จึงทำให้ค่าสลลิปมีค่าต่ำมากมีค่าเกือบเป็นศูนย์เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านส่วนของ  $\frac{R_2}{s}$  มีค่าน้อยมากด้วยเหตุนี้จึงสมมติให้ไม่มีกระแส  $I_2$  ไหลในวงจรดังนั้นจะไม่คิดค่ากระแสดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลจากการทดสอบขณะเปิดวงจร

รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

- ทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกล ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- จดบันทึกค่า แรงดันไฟฟ้า  $V$ , กระแสไฟฟ้า  $I$ , และกำลังไฟฟ้า  $W$  และต้องเปลี่ยนให้เป็นค่าต่อเฟส  $V_o, I_o, W_o$

$$\phi_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o} \quad \text{สมการ (3.6)}$$

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} \quad \text{สมการ (3.7)}$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} \quad \text{สมการ (3.8)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์ (The Blocked – Rotor Test)

การทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์ให้อยู่หนึ่งนั้น ทำให้เหมือนกับการทดสอบขณะลัดวงจร (Short circuit test) ในหม้อแปลง ซึ่งทำให้ทราบค่าสติกเกอจิมพีแดนซ์ (leakage impedance) โดยการทดสอบดังกล่าวนี้กระทำภายใต้เงื่อนไขของกระแสโรเตอร์และความถี่เดียวกัน สำหรับข้อกำหนด IEEE Test Procedure การทดสอบยึดโรเตอร์ควรจะทำที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดต่ำลงซึ่งทำให้เกิดค่ากระแสได้เท่ากับประมาณพิคัดและความถี่ก็ควรลดลงด้วยทั้งนี้เพราะค่า leakage reactance ของโรเตอร์จะเป็นผลมาจากค่าความถี่ของโรเตอร์ที่ต่ำกว่าความถี่ปกติ เนื่องมาจากค่าสลิปมีค่าต่ำ IEEE แนะนำให้ใช้ความถี่ที่ 25 % ของความถี่ปกติผลกระทบจากค่าความถี่ในลักษณะนี้ในบางครั้งไม่จำเป็นที่จะต้องพิจารณาก็ได้ถ้ามอเตอร์มีพิคัดต่ำกว่า 18.5 kW



รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบยึดตัวโรเตอร์

- ทดสอบที่พิคัดกระแสไฟฟ้าในขณะที่อยู่ในสภาพยึดโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- จดบันทึกค่า แรงดันไฟฟ้า  $V$ , กระแสไฟฟ้า  $I$ , และกำลังไฟฟ้า  $W$  และต้องเปลี่ยนให้เป็นค่าต่อเฟส  $V_b, I_b, W_b$

$$\phi_b = \cos^{-1} \frac{P_b}{V_b I_b} \quad \text{สมการ (3.9)}$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = R_b + jX_b \quad \text{สมการ (3.10)}$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2} \quad \text{สมการ (3.11)}$$

$$X_b = \sqrt{(Z_b)^2 - (R_b)^2} = \frac{V_b \sin \phi_b}{I_b} \quad \text{สมการ (3.12)}$$

$$R_b = R_1 + R_2 \quad \text{สมการ (3.13)}$$

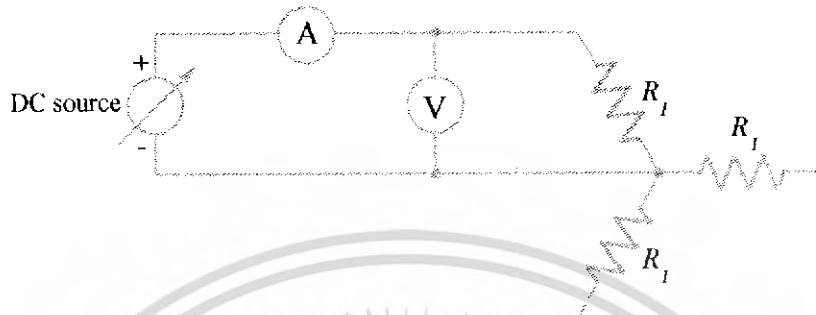
$$X_b = X_1 + X_2 \quad \text{สมการ (3.14)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

3.2.3 การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (Direct-Current test)

ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ DC source เพื่อทำการวัดกระแส Direct current ของความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์  $R$ , ด้วยการประยุกต์ใช้กฎของโอห์มการต่อวงจรขดลวดสเตเตอร์เป็นไปตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (VI-Method)

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \tag{สมการ (3.15)}$$

$$R_2 = R_b - R_1 \tag{สมการ (3.16)}$$

3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

ซึ่งได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 1 Hp, 220 V, 4 pole, 50 Hz เป็นดังนี้

No-load :  $V_o = 220.18 \text{ V}$ ,  $I_o = 1.06 \text{ A}$ ,  $\phi_o = 82.33^\circ$ ,  $P_o = 31.09 \text{ watts}$

Blocked-rotor :  $V_b = 51.99 \text{ V}$ ,  $I_b = 2.03 \text{ A}$ ,  $\phi_b = 46.89^\circ$ ,  $P_b = 72.16 \text{ watts}$

DC resistance:

ตารางที่ 3.1 แสดงการหาค่าความต้านทานที่ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

$V_{dc}$ (V)	$I_V$ (A)	$R_V$ ( $\Omega$ )	$I_W$ (A)	$R_W$ ( $\Omega$ )	$I_W$ (A)	$R_W$ ( $\Omega$ )
2.00	0.24	8.33	0.23	8.70	0.23	8.70
4.00	0.45	8.89	0.45	8.89	0.46	8.70
6.00	0.66	9.09	0.68	8.82	0.67	8.96
8.00	0.88	9.09	0.90	8.89	0.90	8.89
10.00	1.11	9.01	1.11	9.01	1.11	9.01
12.00	1.32	9.09	1.35	8.89	1.33	9.02
ค่าความต้านทาน $R$ , เฉลี่ย = 8.88 $\Omega$						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าที่ได้จากการทดสอบนำมาใช้คำนวณตามสมการข้างต้นได้ว่า

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{V_o^2}{P_o} \\
 &= \frac{220.18^2}{31.09} = 1556.31 \, \Omega \\
 X_m &= \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} \\
 &= \frac{220.18}{1.06 \times \sin 82.33^\circ} = 209.59 \, \Omega \\
 Z_b &= \frac{V_b}{I_b} = R_b + jX_b \\
 &= \frac{51.99}{2.03 \angle -46.89^\circ} = 17.52 + j18.69 \, \Omega \\
 R_2 &= \frac{R_b}{2} \\
 &= \frac{17.52}{2} = 8.76 \, \Omega \\
 X_1 &= X_2 = \frac{X_b}{2} \\
 &= \frac{18.69}{2} = 9.34 \, \Omega
 \end{aligned}$$

สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า

$R_1$	8.88 $\Omega$
$R_2$	8.76 $\Omega$
$X_1$	9.34 $\Omega$
$X_2$	9.34 $\Omega$
$R_c$	1556.31 $\Omega$
$X_m$	209.59 $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

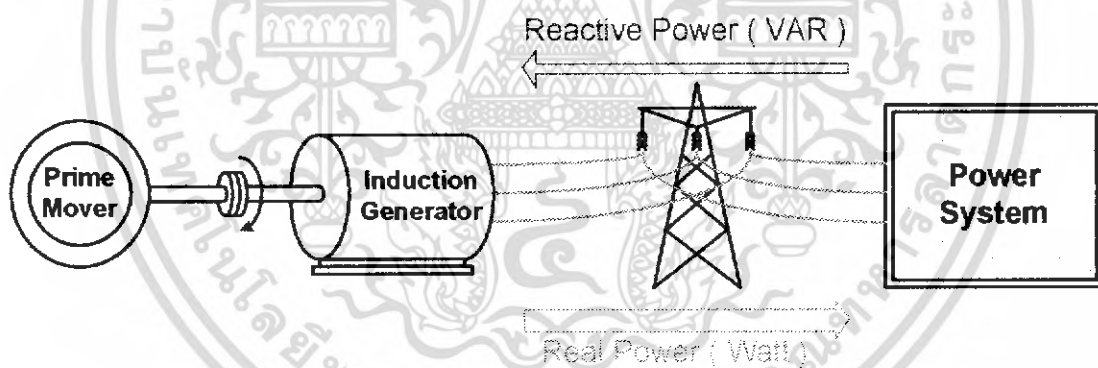
## บทที่ 4

### เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมกับเครือข่าย

#### Grid connected Induction Generator

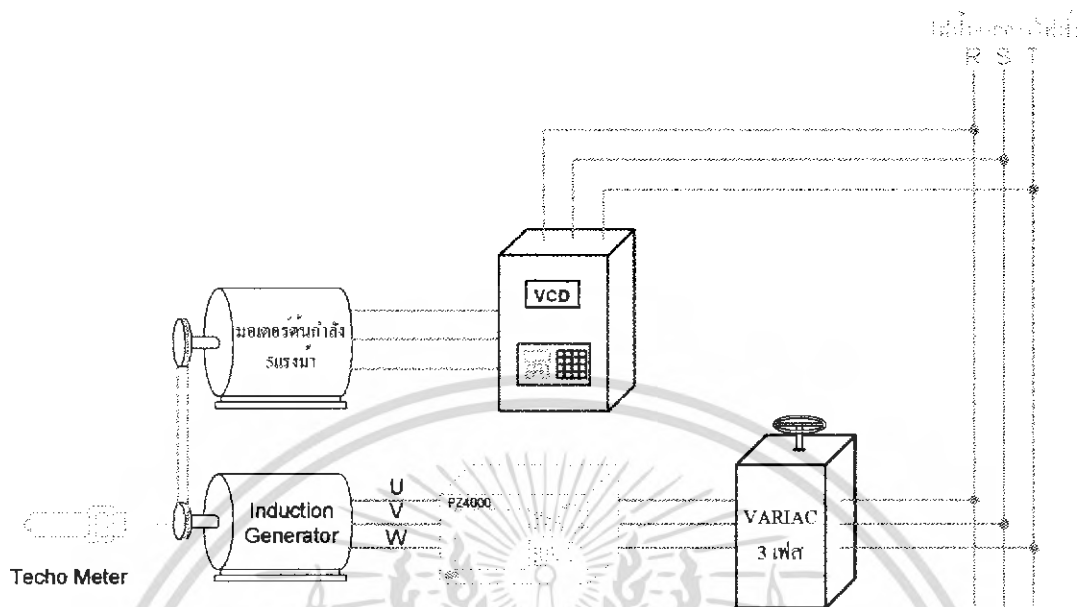
#### 4.1 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบต่อตรงกับเครือข่าย

เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีระบบอย่างง่ายในการทำงานไม่มีอุปกรณ์เสริมเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดอื่นๆ กล่าวคือต่อเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยในตอนแรกเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานในโหมดมอเตอร์ กำลังไฟฟ้าจริง (real power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (reactive power) จะไหลจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยกำลังงานเอาต์พุตจะเป็นกำลังงานทางกลขับแกนเพลลาให้หมุน และเมื่อเราขับแกนเพลลาในทิศทางเดียวกับตอนเป็นมอเตอร์โดยขับให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังระบบไฟฟ้า แต่กำลังไฟฟ้าเสมือนยังคงไหลจากระบบไฟฟ้าเข้ามายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อตรงกับเครือข่าย

## 4.2 การทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมกับเครือข่าย



รูปที่ 4.2 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อการทดลองกินพลังงานผ่าน Variac เข้าสู่ระบบการไฟฟ้า

### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- |                                                                        |         |
|------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1. แท่นทดสอบปรับความเร็วต้นกำเนิดและตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ     | 1 ชุด   |
| 2. ตัวต้นกำเนิด มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 5 แรงม้า                         | 1 ตัว   |
| 3. เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 4 โพล 50 เฮิรตซ์ 220/380 โวลท์ | 1 ตัว   |
| 4. อินเวอร์เตอร์ใช้ปรับความเร็วรอบต้นกำเนิด (VCD 3-phase)              | 1 ตัว   |
| 5. Variac 3 เฟส                                                        | 1 ตัว   |
| 6. Tachometer                                                          | 1 ตัว   |
| 7. DC Ampmeter                                                         | 1 ตัว   |
| 8. DC Voltmeter                                                        | 1 ตัว   |
| 9. สายไฟ                                                               | 40 เส้น |
| 10. Wattmeter PZ4000                                                   | 1 ตัว   |

### 4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อบริการทดลองโดยต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทดสอบเป็นแบบสตาร์
2. ตรวจสอบทิศทางหมุนของต้นกำเนิดและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน
3. ปรับอินเวอร์เตอร์ที่ขับเคลื่อนต้นกำเนิดให้เกิดความเร็วรอบที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำประมาณ 1,500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ Variac ให้มีแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ 10% ของพิกัด แล้วจดบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, มุมเฟส และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ เพิ่มความเร็วรอบขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น จนกว่ากระแสที่เครื่องกำเนิดจะถึงพิกัด 2 A หรือจนกว่าความเร็วรอบ โรเตอร์ที่ไม่สูงเกินไป
5. ทดลองซ้ำจากข้อ 3 และข้อ 4 อีกครั้ง และเพิ่มแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ Variac เป็น 20 % ของพิกัดแรงดันไฟฟ้าจนถึง 110 % ของพิกัดแรงดันไฟฟ้า
6. ทดลองซ้ำทั้งหมดโดยเปลี่ยนการต่อวงจรของเครื่องจักรทดสอบเป็นแบบเดลต้า

#### 4.3 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมต่อกับเครือข่าย

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์

แรงดันไฟฟ้า 22V ( 10% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	21.82	0.1	84.03	0.71
1550	-0.033	22.03	0.15	108.03	-2.97
1599	-0.066	22.1	0.21	118.58	-6.66
1650	-0.1	22.27	0.3	122.14	-10.66
1701	-0.134	22.27	0.36	121.81	-12.78
1751	-0.167	22.27	0.44	120.2	-14.79
1801	-0.201	22.37	0.5	118.78	-16.19
1852	-0.235	22.35	0.56	116.48	-16.59
1900	-0.267	22.34	0.6	114.36	-16.64
1950	-0.3	22.25	0.65	111.91	-16.07
2000	-0.333	22.17	0.68	109.47	-15.1
2050	-0.367	22.16	0.72	107.33	-14.22
2101	-0.401	22.2	0.75	105.38	-13.16
2200	-0.467	22.04	0.78	101.8	-10.57
2302	-0.535	22.11	0.82	98.72	-8.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 44V ( 20% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	44.09	0.19	82.96	3.19
1602	-0.068	44.67	0.43	128.61	-35.96
1700	-0.133	44.24	0.79	133.96	-72.69
1802	-0.201	44.27	1.15	130.59	-98.94
1902	-0.268	44.3	1.46	125.21	-111.95
2000	-0.333	44.19	1.7	119.91	-112.38
2100	-0.4	44.17	1.91	114.49	-105.08
2162	-0.441	44.12	2	111.68	-97.84

แรงดันไฟฟ้า 66V ( 30% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	66.94	0.28	84.94	5.04
1550	-0.033	66.34	0.42	121.09	-42.96
1602	-0.068	66.33	0.63	133.13	-85.57
1652	-0.101	66.42	0.9	137.3	-131.5
1700	-0.133	66.48	1.17	137.89	-172.52
1751	-0.167	66.49	1.46	136.88	-211.84
1802	-0.201	66.31	1.72	134.97	-241.25
1850	-0.233	66.31	1.97	132.62	-265.5
1872	-0.248	66.33	2	132.16	-267.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 88V ( 40% ของพิกัด )					
$n_r$	$slip$	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	88.3	0.35	83.19	10.99
1526	-0.017	88.41	0.41	106.22	-30.6
1552	-0.035	88.56	0.55	122.94	-79.75
1576	-0.051	88.72	0.65	129.47	-110.48
1601	-0.067	88.71	0.84	134.94	-157.16
1626	-0.084	88.59	1.02	137.77	-200.14
1652	-0.101	88.61	1.2	139.32	-241.71
1676	-0.117	88.5	1.38	139.94	-281.24
1700	-0.133	88.68	1.51	140.07	-308.46
1725	-0.15	88.58	1.73	139.61	-349.75
1752	-0.168	88.76	1.86	139.45	-375.73
1776	-0.184	88.8	2.04	138.51	-407.69

แรงดันไฟฟ้า 110V ( 50% ของพิกัด )					
$n_r$	$slip$	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	109.77	0.43	85.32	11.74
1525	-0.017	110.93	0.53	109.47	-59.12
1552	-0.035	111.05	0.67	123.3	-122.91
1575	-0.05	110.99	0.83	130.71	-179.6
1602	-0.068	111.03	1.02	135.58	-242.66
1625	-0.083	111.28	1.23	138.33	-305.73
1651	-0.101	111.29	1.44	140.39	-370.9
1676	-0.117	111.16	1.66	141.09	-429.72
1702	-0.135	111.25	1.88	141.33	-490.15
1716	-0.144	111.18	2.01	141.2	-523.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 132V ( 60% ของพิกัด )					
$n_r$	$slip$	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	132.53	0.66	86.62	15.47
1527	-0.018	132.62	0.66	111.93	-98.52
1550	-0.033	132.78	0.79	122.2	-167.69
1575	-0.05	133.1	1.02	131.19	-266.91
1601	-0.067	133.02	1.24	136.19	-357.38
1625	-0.083	133.28	1.45	138.91	-438.16
1651	-0.101	133.06	1.74	140.85	-538.64
1674	-0.116	133.13	2.01	141.46	-627.91

แรงดันไฟฟ้า 154V ( 70% ของพิกัด )					
$n_r$	$slip$	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	154.01	0.63	84.64	27.19
1526	-0.017	154.22	0.75	109.44	-115.18
1552	-0.035	154.86	0.96	123.73	-247.14
1577	-0.051	154.73	1.21	131.86	-373.88
1600	-0.067	154.98	1.43	135.88	-477.96
1625	-0.083	154.83	1.75	139.07	-614.12
1652	-0.101	154.99	1.97	140.35	-704.92
1658	-0.105	154.76	2.06	140.94	-743.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 176V ( 80% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	176.12	0.75	87.43	17.76
1510	-0.007	176.47	0.78	92.63	-18.85
1522	-0.015	176.56	0.85	103.81	-106.84
1530	-0.02	176.97	0.92	110.11	-167.02
1541	-0.027	177.01	0.98	114.43	-215.01
1552	-0.035	177.38	1.05	119.17	-272.33
1562	-0.041	177.33	1.14	123.61	-334.23
1570	-0.047	177.55	1.26	126.33	-398.24
1580	-0.053	177.48	1.35	129.15	-452.8
1590	-0.06	177.66	1.5	131.85	-534.81
1600	-0.067	177.52	1.63	134.12	-603.95
1610	-0.073	177.3	1.72	134.91	-646.64
1621	-0.081	177.16	1.86	136.75	-718.1
1631	-0.087	177.25	1.99	137.37	-778.55

แรงดันไฟฟ้า 198V ( 90% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	197.72	0.89	86.76	29.83
1512	-0.008	198.21	0.95	95.57	-54.71
1522	-0.015	198.22	1	102.39	-127.98
1530	-0.02	198.27	1.07	106.95	-184.68
1540	-0.027	197.87	1.15	113.25	-269.94
1550	-0.033	198.03	1.22	117.01	-329.97
1560	-0.04	197.63	1.35	121.77	-421.11
1570	-0.047	197.43	1.46	124.74	-492.78
1581	-0.054	198.18	1.61	128.25	-593.34
1590	-0.06	198.09	1.79	130.66	-692.71
1600	-0.067	198.05	1.91	132.36	-765.03
1610	-0.073	197.4	2.01	133.55	-820.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 220V ( 100% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	220.64	1.12	88.38	20.95
1510	-0.007	220.7	1.16	93.77	-50.63
1521	-0.014	220.18	1.22	99.65	-134.75
1530	-0.02	220.82	1.33	107.02	-257.7
1539	-0.026	221.08	1.39	109.41	-306.15
1550	-0.033	221.59	1.53	114.72	-426.17
1560	-0.04	220.98	1.65	119.07	-531.16
1570	-0.047	220.71	1.81	121.93	-632.09
1580	-0.053	220.85	1.91	123.83	-705.63
1586	-0.057	221.01	2.06	125.76	-796.25

แรงดันไฟฟ้า 242V ( 110% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	242.67	1.47	87.52	46.31
1512	-0.008	242.69	1.51	92.4	-46.07
1521	-0.014	242.39	1.61	98.7	-176.87
1531	-0.021	241.66	1.69	104.81	-313.92
1542	-0.028	243.76	1.83	107.65	-406.2
1551	-0.034	244.5	1.96	110.68	-507.45
1556	-0.037	243.5	2.04	113.05	-582.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเตลต้า

แรงดันไฟฟ้า 22V ( 10% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	22.82	0.12	79.15	1.57
1551	-0.034	23.31	0.17	107.53	-3.58
1601	-0.067	23.67	0.26	117.96	-8.49
1652	-0.101	23.91	0.32	120.56	-11.6
1702	-0.135	24.05	0.42	121.06	-15.56
1750	-0.167	24.01	0.49	120.03	-17.59
1800	-0.2	24.03	0.55	118.62	-18.99
1851	-0.234	23.96	0.61	116.32	-19.44
1901	-0.267	23.88	0.68	114.2	-19.88
1951	-0.301	23.72	0.72	111.42	-18.69
2002	-0.335	23.65	0.75	109.37	-17.74
2052	-0.368	23.56	0.79	107.03	-16.29
2100	-0.4	23.46	0.81	105.4	-15.06
2151	-0.434	23.44	0.83	103.3	-13.46
2200	-0.467	23.37	0.85	101.69	-12.05
2301	-0.534	23.23	0.88	98.34	-8.87
2402	-0.601	23.16	0.9	95.69	-6.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 44V ( 20% ของพิกัด )					
$n_r$	$slip$	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	43.85	0.2	84.26	2.57
1551	-0.034	44.69	0.29	119.22	-19.18
1600	-0.067	45	0.43	129.95	-37.01
1650	-0.1	45.31	0.64	134.1	-60.16
1701	-0.134	45.36	0.8	134.42	-75.72
1750	-0.167	45.4	0.99	133.12	-92.26
1800	-0.2	45.48	1.15	131.57	-104.2
1850	-0.233	45.3	1.31	129.05	-112.16
1901	-0.267	45.32	1.49	126.11	-119.15
1950	-0.3	45.14	1.6	123.65	-120.06
2002	-0.335	45	1.73	120.6	-118.54
2052	-0.368	44.87	1.84	117.86	-115.56
2103	-0.402	44.77	1.93	115.43	-111.31
2152	-0.435	44.62	2.01	112.75	-104.05

แรงดันไฟฟ้า 66V ( 30% ของพิกัด )					
$n_r$	$slip$	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	65.86	0.28	78.94	10.46
1553	-0.035	66.53	0.41	121.69	-42.88
1602	-0.068	66.69	0.62	133.98	-85.86
1651	-0.101	67	0.89	138.34	-133.35
1700	-0.133	67.03	1.18	138.75	-177.65
1750	-0.167	66.88	1.45	137.91	-215.43
1800	-0.2	67.05	1.71	135.78	-246.65
1850	-0.233	66.99	1.99	133.35	-274.53
1857	-0.238	66.89	2.03	132.94	-277.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 88V ( 40% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	87.79	0.35	82.04	12.87
1525	-0.017	88.22	0.43	110.53	-39.91
1551	-0.034	88.73	0.53	122.76	-75.77
1577	-0.051	88.88	0.67	131.66	-118.22
1602	-0.068	89.21	0.84	136.4	-162.8
1625	-0.083	89.47	1	139.03	-201.65
1650	-0.1	89.49	1.23	140.57	-254.44
1676	-0.117	89.6	1.39	141.16	-291.65
1701	-0.134	89.47	1.62	140.9	-336.4
1726	-0.151	89.2	1.74	141.04	-362.69
1752	-0.168	89.57	1.93	140.31	-398.04
1765	-0.177	89.52	2.03	139.73	-415.36

แรงดันไฟฟ้า 110V ( 50% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	110.92	0.44	80.7	23.82
1525	-0.017	110.58	0.51	110.01	-58.35
1550	-0.033	110.9	0.62	122.4	-110.88
1575	-0.05	111.56	0.8	131.66	-177.97
1600	-0.067	111.74	1.07	137.9	-266.63
1624	-0.083	111.4	1.27	140.41	-326.56
1652	-0.101	112.05	1.46	141.86	-385.74
1676	-0.117	111.91	1.69	142.54	-451.18
1702	-0.135	111.85	1.93	142.55	-513.06
1711	-0.141	111.66	2.05	142.42	-545.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 132V ( 60% ของพิกัด )					
$n_r$	<i>slip</i>	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	132.32	0.53	85.19	17.71
1524	-0.016	131.99	0.58	104.39	-56.68
1552	-0.035	132.4	0.78	124.1	-172.8
1575	-0.05	132.65	1	134.07	-277.62
1600	-0.067	132.48	1.23	138.76	-367.3
1626	-0.084	132.65	1.51	141.73	-472.4
1650	-0.1	132.4	1.76	143.12	-557.6
1675	-0.117	131.88	2.09	143.65	-664.71

แรงดันไฟฟ้า 154V ( 70% ของพิกัด )					
$n_r$	<i>slip</i>	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	153.86	0.64	83.48	33.33
1526	-0.017	155.23	0.7	107.98	-100.34
1552	-0.035	155.86	0.96	127.21	-272.02
1575	-0.05	156.02	1.13	133.06	-360.48
1601	-0.067	156.29	1.51	138.94	-534.55
1625	-0.083	155.98	1.83	141.76	-670.75
1650	-0.1	156.15	2.12	142.9	-790.97

แรงดันไฟฟ้า 176V ( 80% ของพิกัด )					
$n_r$	<i>slip</i>	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	175.53	0.74	84.88	34.54
1525	-0.017	176.33	0.85	109.99	-153.17
1549	-0.033	175.64	1.04	123.43	-301.61
1574	-0.049	176.91	1.31	131.72	-463.04
1602	-0.068	177.42	1.73	138.17	-687.71
1625	-0.083	176.9	2.05	140.7	-839.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

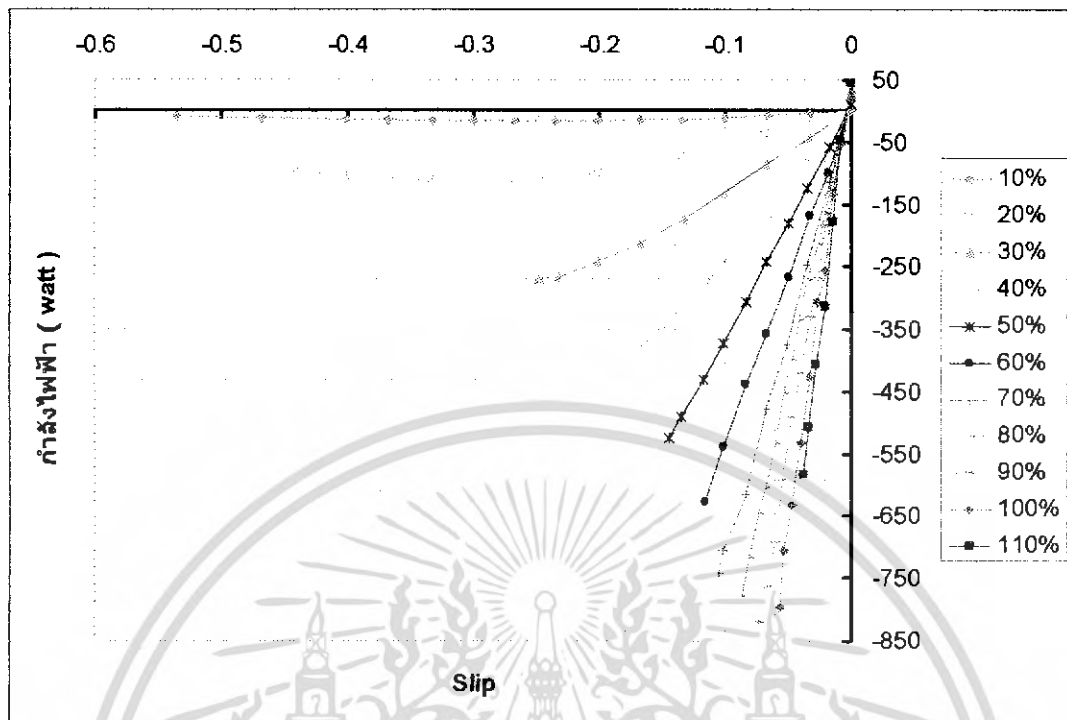
แรงดันไฟฟ้า 198V ( 90% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	198.53	0.89	84.58	49.96
1524	-0.016	198.46	0.96	103.83	-137.2
1550	-0.033	199.51	1.24	120.92	-381.36
1577	-0.051	198.42	1.62	130.95	-633.58
1600	-0.067	199.03	1.87	134.59	-784.28
1607	-0.071	199.39	2.05	136	-882.52

แรงดันไฟฟ้า 220V ( 100% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	219.86	1.06	82.55	90.57
1525	-0.017	220.02	1.22	105.4	-213.32
1549	-0.033	220.59	1.48	117.7	-456.51
1575	-0.05	220.7	1.81	126.21	-707.56
1600	-0.067	220.39	2.25	131.86	-990.95

แรงดันไฟฟ้า 242V ( 110% ของพิกัด )					
$n_r$	slip	$V_{Phase}$	$I_{Phase}$	มุม $\theta$	$P_{3\phi}$
1500	0	242.33	1.36	83.79	106.64
1526	-0.017	242.85	1.56	102	-235.54
1551	-0.034	242.9	1.79	112.02	-489.32
1570	-0.047	243.61	2.09	118.61	-731.75

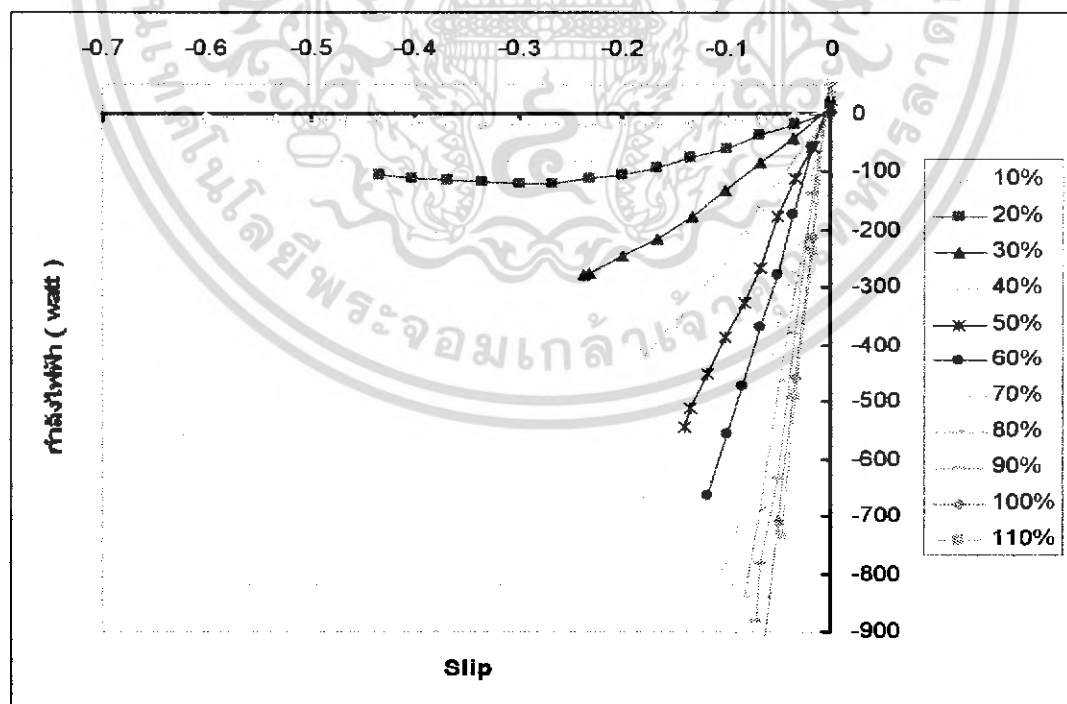
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาผลการทดลองมาทำการแสดงเป็นกราฟจะได้รูปดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับค่าสลิป เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

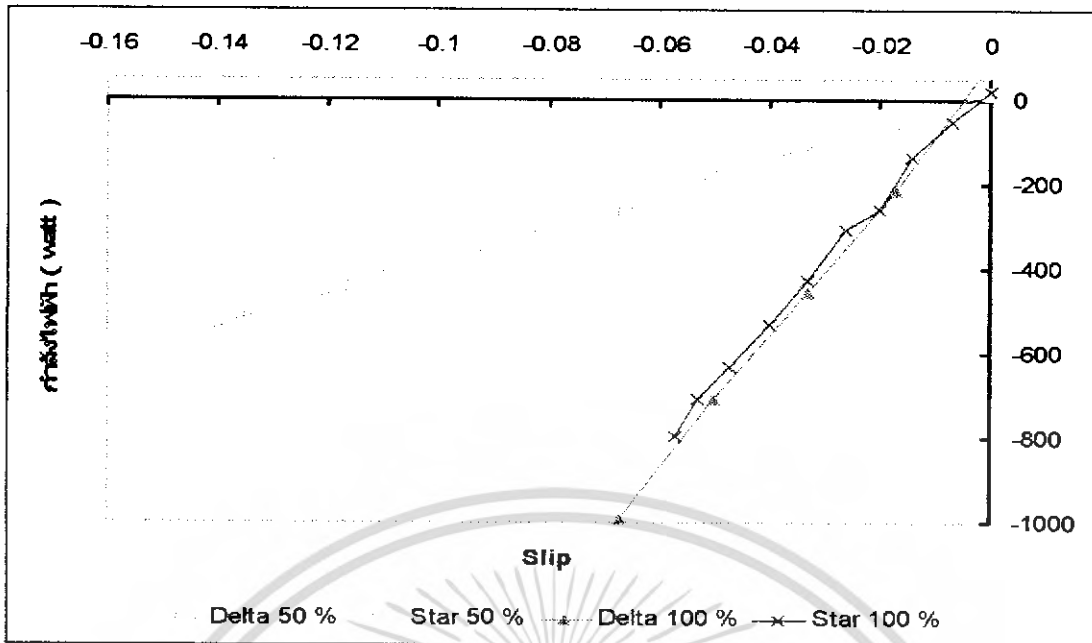
แบบสตาร์



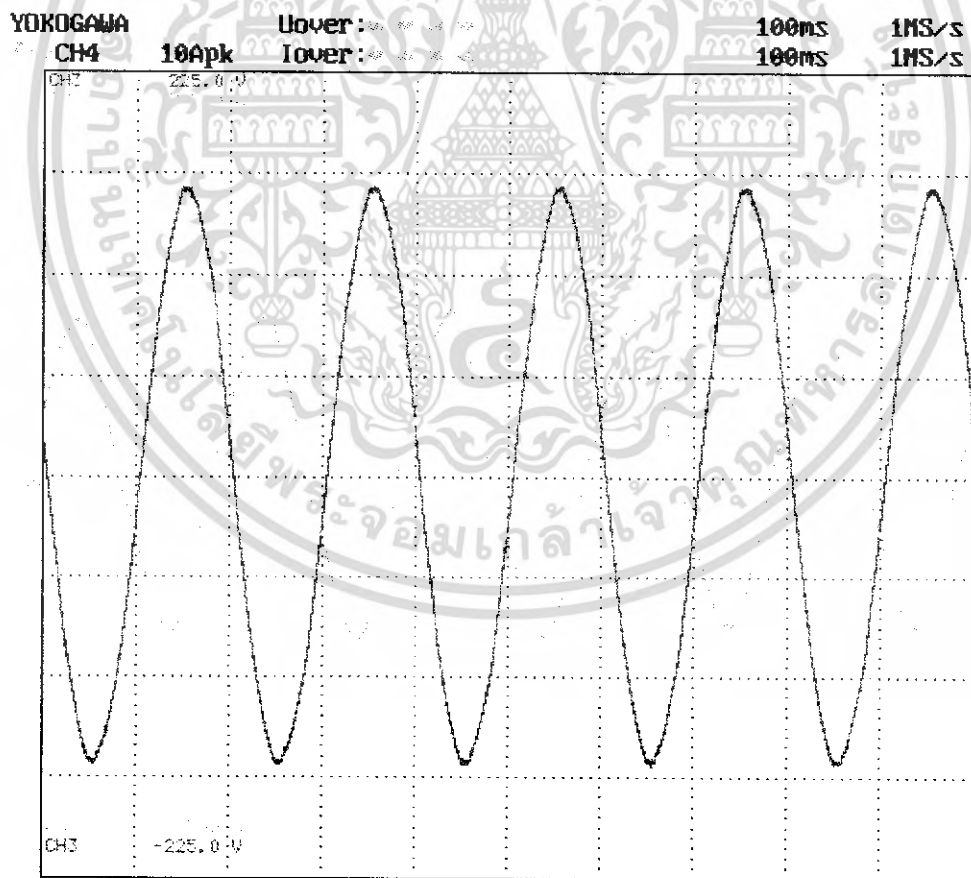
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับค่าสลิป เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แบบเดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน 50% ,100 % ของพิกัด เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเดลต้าและแบบสตาร์



รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากการทดลองที่ระดับ 110 V , 2.0 A และ

มุมเฟส  $\phi = 140$  องศา ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมต่อกับเครือข่าย

จากตารางการผลทดสอบ โดยความสัมพันธ์ของกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายคืนให้กับระบบเครือข่าย สามารถกล่าวได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายคืนจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่ออยู่และค่ากระแสไฟฟ้าจะแปรผันตามความเร็วโรเตอร์ เมื่อความเร็วโรเตอร์มากขึ้นกำลังไฟฟ้าจะมากขึ้นด้วย และเมื่อเราปรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงพิกัดเราจะสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่กระแสพิกัด ซึ่งในความเป็นจริงเรายังสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้นแต่ไม่ควรกระทำเนื่องจากจะทำให้กระแสเกินพิกัด มีผลทำให้เกิดความร้อนสะสมและฉนวนของขดลวดจะเสื่อมสภาพเร็วหรืออายุการใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสั้นลง

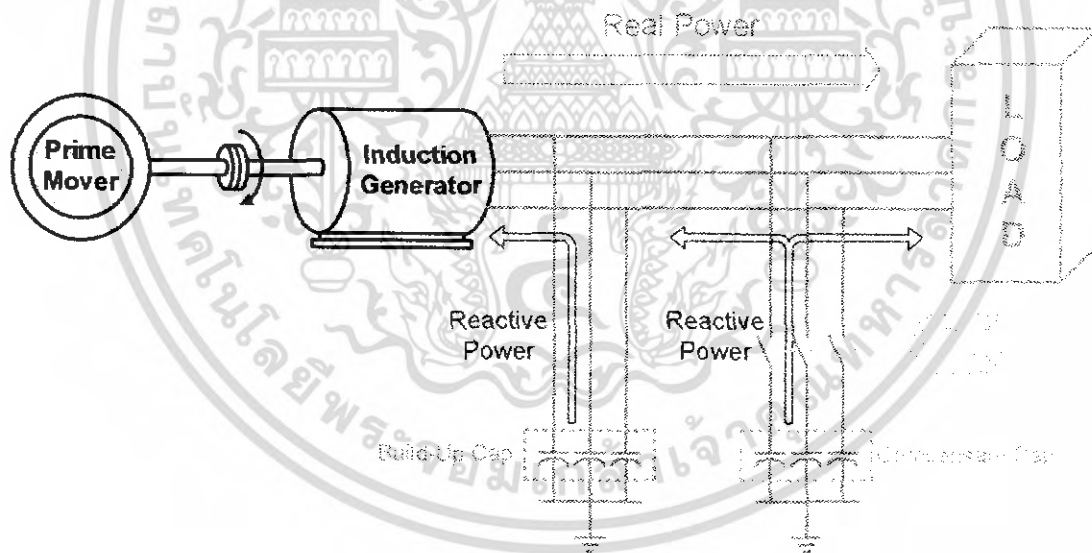
จากรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่คืนสู่ระบบที่พิกัดแรงดันและที่ 50 % ของพิกัดแรงดันเมื่อสังเกตดูที่ค่าสลิปเดียวกันจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดแรงดันจะมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ 50 % ของพิกัดอยู่ประมาณ 75 % ทั้งนี้เพราะเป็นไปตามคุณสมบัติของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำกล่าวคือกำลังไฟฟ้า (P) จะแปรผันตามแรงดัน (V) กำลังสอง

## บทที่ 5

## เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง Self-Excited Induction Generator

### 5.1 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบนี้จะได้รับกระแสกระตุ้นจากตัวเก็บประจุ โดยมีหลักการคล้ายกับการรีโซแนนซ์ ในกรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอกโดยมีทิศทางการไหลของพลังงานดังรูปที่ 5.1 คือชุด Build-Up Capacitor จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อสร้างแรงดันในระบบส่วนชุด Compensate Capacitor จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้กับโหลดที่เป็นแบบเหนี่ยวนำในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงให้กับภาระทางไฟฟ้าโดยที่ชุด Compensate Capacitor จะต้องมีขนาดพิกัดให้เพียงพอกับขนาดภาระทางไฟฟ้าของระบบที่เป็นแบบเหนี่ยวนำซึ่งถ้าหากมีภาระที่เป็นแบบเหนี่ยวนำมากเกินไปกว่าขนาดพิกัดของชุด Compensate Capacitor จะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลงเนื่องจากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กลดลงนั่นเอง

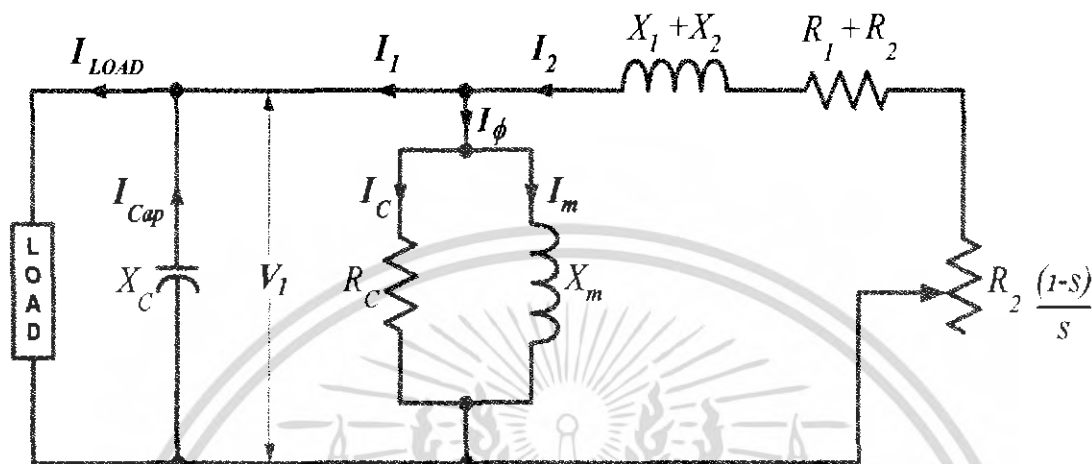


รูปที่ 5.1 แสดงการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

หลักการทำงานจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ซึ่งจะอาศัยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของเครื่องจักรคือการมีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ภายในวงจรแม่เหล็กของเครื่องจักรสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5.2 ปรากฏการณ์ในการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เกิดจากเมื่อเราให้ตัวต้นกำลังไปขับที่เพลลาของเครื่องจักรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำทำให้เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างที่อยู่ภายในวงจรแม่เหล็กของส่วนหมุนวิ่งตัดผ่านขดลวดอาร์มเจอร์ของส่วนที่อยู่กับที่และจะเกิดแรงดันเริ่มต้นค่าหนึ่งที่ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



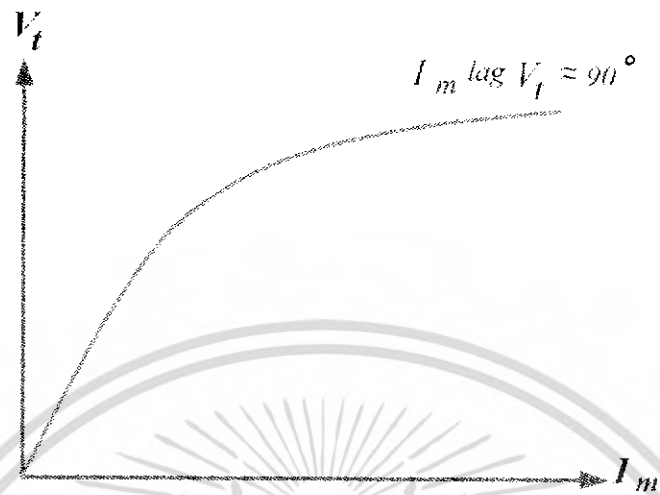
รูปที่ 5.2 แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

ขณะเดียวกันแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะไปตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุทำให้เกิดกระแสเนื่องจากตัวเก็บประจุ กระแสนี้เองจึงเป็นส่วนที่เพิ่มกระแสในการสร้างสนามแม่เหล็กของส่วนกระตุ้นให้กับเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นและกระแสเนื่องมาจากตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ตกคร่อมซึ่งจะไปมีผลทำให้กระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสมดุลหรือเรียกว่า **Built-Up Point** และจะไม่มี การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไปอีกใน ส่วนของความเร็วซึ่งไครน์สนั้นจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วของส่วนที่หมุนทำให้สลิปที่ได้มีค่าเป็นลบซึ่งเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและถ้าพิจารณาในส่วน ของความถี่ทางไฟฟ้าของระบบจะพบว่า จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบของส่วนที่หมุนอีก ด้วย

## 5.2 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุเพื่อสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหาขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสามารถหาได้แบบคร่าวๆ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดทางกลสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_1$  กับ  $I_m$  ดังนั้นกระแสสร้างสนามแม่เหล็กหาได้จากสมการที่ (5.1)

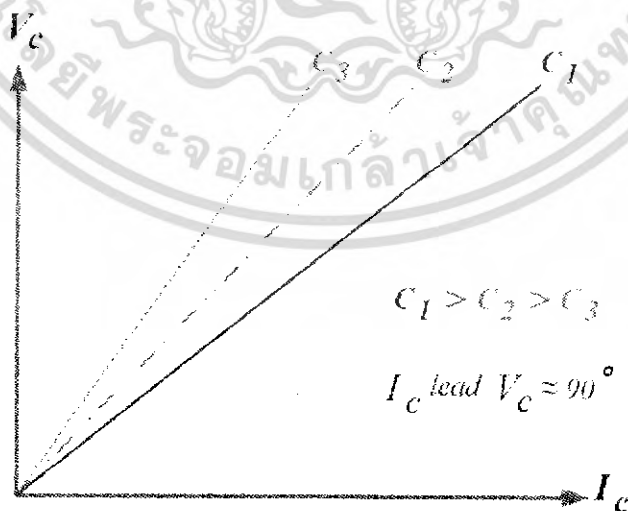
$$I_m = \frac{V_t}{X_m} \quad \text{สมการ (5.1)}$$



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก

เมื่อนำตัวเก็บประจุ 3 เฟสต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.4 ดังนั้นกระแสคาปาซิเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (5.2)

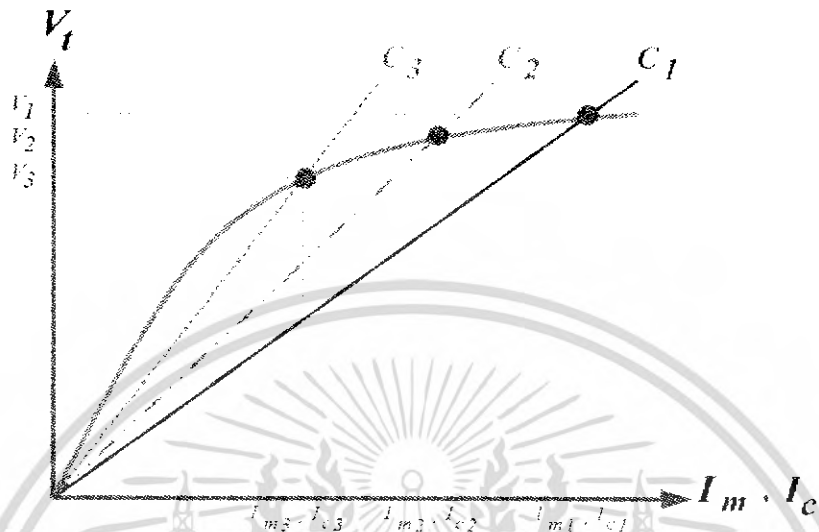
$$I_c = \frac{V_c}{X_c} \quad \text{สมการ (5.2)}$$



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 ทำให้สามารถหาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระได้จากจุดตัดของกราฟรูปที่ 5.3 กับ 5.4 วางซ้อนกันโดยจุดตัดนี้เรียกว่า Built – Up Point ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

เมื่อให้

$$V_t = V_c \quad \text{สมการ (5.3)}$$

ดังนั้น

$$I_m X_m = I_c X_c \quad \text{สมการ (5.4)}$$

จากรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาจุดตัดที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.5)

$$V_t = I_m X_c \quad \text{สมการ (5.5)}$$

เมื่อ

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{สมการ (5.6)}$$

$$X_m = \omega L = 2\pi f L \quad \text{สมการ (5.7)}$$

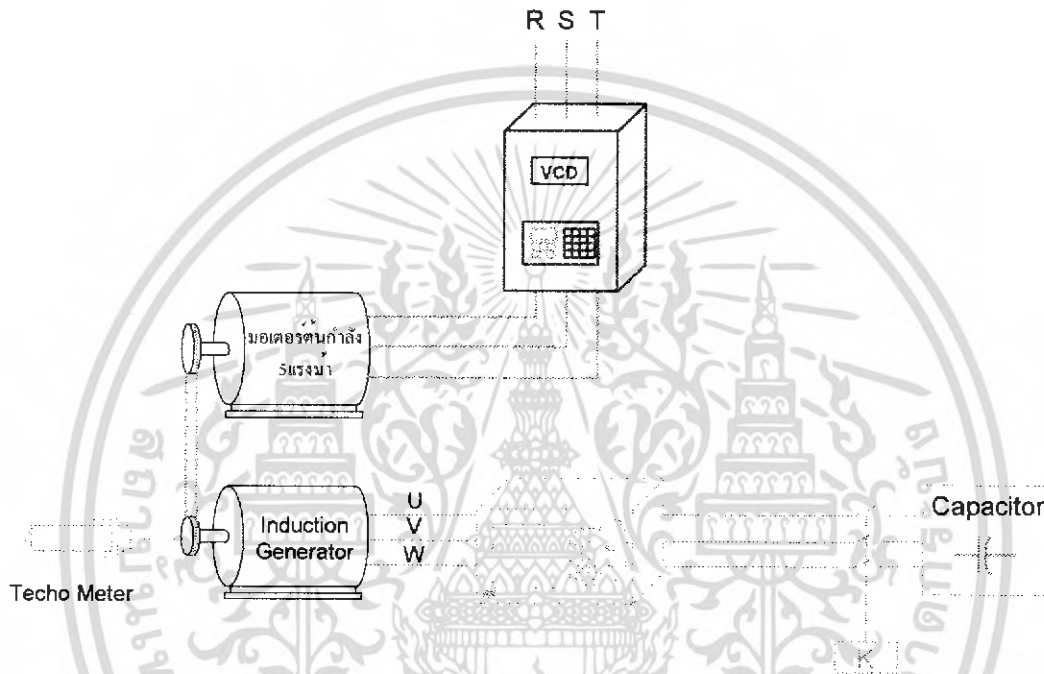
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการ (5.8) และ (5.9)

$$\frac{V_1}{2\pi fL} = 2\pi fCV_1 \quad \text{สมการ (5.8)}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \quad \text{สมการ (5.9)}$$

### 5.3 การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง



รูปที่ 5.6 แสดงรูปการทดลองและการวัดค่าต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### 5.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- |                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| 1. แทนทดสอบติดตั้งต้นกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 1 ตัว     |
| 2. Inverter (VCD 3)                             | 1 ตัว     |
| 4. Junction Box                                 | 1 ตัว     |
| 5. Watt Meter                                   | 1 ตัว     |
| 6. AC Amp Meter                                 | 1 ตัว     |
| 7. AC Volt Meter                                | 1 ตัว     |
| 8. สายไฟ                                        | 40 เส้น   |
| 9. Capacitor                                    | ขนาดต่างๆ |
| 10. Watt Meter PZ4000                           | 1 ตัว     |
| 11. Magnetic contactor                          | 1 ตัว     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบทิศทางการหมุนของมอเตอร์ต้นกำลังกับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีทิศทางเดียวกันก่อน

2. กำหนดค่าคาปาซิเตอร์มาหนึ่งค่า

3. On Magnetic contactor

4. ทำการเดินเครื่องต้นกำลังด้วยขั้ว และปรับให้ความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ที่ทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขึ้นไปเรื่อยๆจนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างแรงดันได้จดบันทึกค่า

5. ปรับความเร็วต้นกำลังให้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วมากขึ้นเป็นลำดับ และจดบันทึกค่า

6. เปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ให้มากขึ้นแล้วทำการทดลองซ้ำอีกและค่ากระแสไม่ควรเกินพิกัดมอเตอร์

### 5.4 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองขณะไม่มีภาระเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 แรงม้าแบบสตาร์

C 12.5 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,082	3	0.00	0.00	0	0
1,401	6	0.00	0.00	0	0
1,498	8	0.00	0.00	0	0
1,613	12	0.00	52.00	1,560	-0.0340
1,648	15	0.00	54.10	1,623	-0.0154
1,688	248	1.00	56.10	1,683	-0.0030
1,725	262	1.10	57.40	1,722	-0.0017
1,774	280	1.20	58.90	1,767	-0.0040
1,828	299	1.30	60.90	1,827	-0.0005

C 15 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,414	6	0.00	0.00	0	0
1,484	8	0.00	0.00	0	0
1,490	15	0.00	49.50	1,485	-0.0034
1,538	228	1.00	51.20	1,536	-0.0013
1,565	240	1.10	52.00	1,560	-0.0032
1,618	259	1.20	53.60	1,608	-0.0062
1,644	267	1.30	54.50	1,635	-0.0055
1,677	279	1.40	55.70	1,671	-0.0036
1,724	294	1.50	57.30	1,719	-0.0029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C 17.5 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
972	3	0.00	0.00	0	0
1,253	6	0.00	0.00	0	0
1,296	8	0.00	0.00	0	0
1,351	10	0.00	45.00	1,350	-0.0007
1,396	14	0.00	45.50	1,365	-0.0227
1,422	208	1.00	47.20	1,416	-0.0042
1,458	222	1.10	48.40	1,452	-0.0041
1,520	244	1.20	50.40	1,512	-0.0053
1,548	253	1.30	51.40	1,542	-0.0039
1,567	260	1.40	52.00	1,560	-0.0045
1,603	272	1.50	53.20	1,596	-0.0044
1,663	292	1.60	55.20	1,656	-0.0042

C 20 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,156	6	0.00	0.00	0	0
1,226	8	0.00	0.00	0	0
1,276	11	0.00	42.00	1,260	-0.0127
1,290	13	0.00	42.20	1,266	-0.0190
1,301	14	0.00	42.40	1,272	-0.0228
1,329	196	1.00	44.10	1,323	-0.0045
1,368	211	1.10	45.40	1,362	-0.0044
1,416	228	1.20	47.00	1,410	-0.0043
1,446	238	1.30	47.90	1,437	-0.0063
1,459	234	1.40	48.40	1,452	-0.0048
1,488	253	1.50	49.30	1,479	-0.0061
1,528	265	1.60	50.60	1,518	-0.0066

C 22.5 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,112	6	0.00	0.00	0	0
1,174	8	0.00	0.00	0	0
1,202	10	0.00	40.00	1,200	-0.0017
1,212	11	0.00	40.10	1,203	-0.0075
1,231	13	0.00	40.30	1,209	-0.0182
1,280	193	1.00	42.30	1,269	-0.0087
1,296	200	1.10	43.00	1,290	-0.0047
1,327	211	1.20	44.00	1,320	-0.0053
1,373	227	1.30	45.50	1,365	-0.0059
1,395	234	1.40	46.20	1,386	-0.0065
1,415	241	1.50	47.00	1,410	-0.0035
1,448	251	1.60	48.00	1,440	-0.0056
1,477	261	1.70	49.00	1,470	-0.0048
1,516	273	1.80	50.10	1,503	-0.0086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C 25 $\mu F$					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,165	8	0.00	0.00	0	0
1,193	11	0.00	39.70	1,191	-0.0017
1,205	181	1.00	39.90	1,197	-0.0067
1,231	191	1.10	40.80	1,224	-0.0057
1,257	201	1.20	41.60	1,248	-0.0072
1,282	209	1.30	42.60	1,278	-0.0031
1,305	217	1.40	43.30	1,299	-0.0046
1,331	226	1.50	44.00	1,320	-0.0083
1,382	242	1.60	45.70	1,371	-0.0080
1,397	247	1.70	46.20	1,386	-0.0079
1,425	256	1.80	47.10	1,413	-0.0085
1,461	267	1.90	48.40	1,452	-0.0062
1,486	275	2.00	49.30	1,479	-0.0047

C 27.5 $\mu F$					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,014	6	0.00	0.00	0	0
1,067	8	0.00	0.00	0	0
1,100	10	0.00	36.40	1,092	-0.0073
1,110	11	1.00	36.50	1,095	-0.0137
1,170	181	1.10	38.80	1,164	-0.0052
1,198	191	1.20	39.70	1,191	-0.0059
1,226	200	1.30	40.60	1,218	-0.0066
1,260	212	1.40	41.60	1,248	-0.0096
1,281	219	1.50	42.40	1,272	-0.0071
1,300	225	1.60	42.90	1,287	-0.0101
1,330	235	1.70	44.00	1,320	-0.0076
1,371	248	1.80	45.20	1,356	-0.0111
1,383	251	1.90	45.70	1,371	-0.0088
1,422	263	2.00	47.00	1,410	-0.0085

C 30 $\mu F$					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,024	8	0.00	0.00	0	0
1,051	10	0.00	35.00	1,050	-0.0010
1,060	11	1.00	35.10	1,053	-0.0066
1,118	173	1.10	37.00	1,110	-0.0072
1,140	180	1.20	37.70	1,131	-0.0080
1,177	194	1.30	38.90	1,167	-0.0086
1,185	197	1.40	39.20	1,176	-0.0077
1,217	207	1.50	40.20	1,206	-0.0091
1,248	217	1.60	41.30	1,239	-0.0073
1,274	225	1.70	42.10	1,263	-0.0087
1,297	233	1.80	42.80	1,284	-0.0101
1,326	243	1.90	43.80	1,314	-0.0091
1,345	248	2.00	44.30	1,329	-0.0120
1,370	256	2.10	45.10	1,353	-0.0126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C 32.5 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,000	8	0.00	0.00	0	0
1,032	11	0.00	34.30	1,029	-0.0029
1,080	167	1.10	35.70	1,071	-0.0084
1,115	179	1.20	36.80	1,104	-0.0100
1,135	186	1.30	37.40	1,122	-0.0116
1,156	194	1.40	38.20	1,146	-0.0087
1,187	204	1.50	39.30	1,179	-0.0068
1,208	210	1.60	40.00	1,200	-0.0067
1,227	217	1.70	40.50	1,215	-0.0099
1,260	227	1.80	41.60	1,248	-0.0096
1,280	234	1.90	42.30	1,269	-0.0087
1,305	241	2.00	43.00	1,290	-0.0116
1,325	248	2.10	43.80	1,314	-0.0084
1,350	256	2.20	44.50	1,335	-0.0112

C 35 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
957	8	0.00	0.00	0	0
982	10	0.00	32.10	963	-0.0197
1,040	160	1.10	34.40	1,032	-0.0078
1,060	168	1.20	35.00	1,050	-0.0095
1,080	176	1.30	35.70	1,071	-0.0084
1,114	187	1.40	36.80	1,104	-0.0091
1,138	195	1.50	37.60	1,128	-0.0089
1,148	198	1.60	37.90	1,137	-0.0097
1,175	208	1.70	38.80	1,164	-0.0095
1,200	216	1.80	39.70	1,191	-0.0076
1,237	227	1.90	40.90	1,227	-0.0081
1,256	233	2.00	41.40	1,242	-0.0113
1,267	237	2.10	41.80	1,254	-0.0104
1,290	243	2.20	42.50	1,275	-0.0118

C 40 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
946	11	0.00	0.00	0	0
1001	157	1.20	33.10	993	-0.0080
1032	167	1.30	34.00	1020	-0.0117
1053	175	1.40	34.80	1044	-0.0086
1073	182	1.50	35.40	1062	-0.0104
1110	194	1.60	36.60	1098	-0.0109
1120	197	1.70	37.00	1110	-0.0090
1160	209	1.80	38.20	1146	-0.0122
1181	216	1.90	38.90	1167	-0.0120
1200	222	2.00	39.50	1185	-0.0126
1217	227	2.10	40.00	1200	-0.0141
1245	237	2.20	40.90	1227	-0.0146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C 42.5 $\mu F$					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
725	3	0.00	0.00	0	0
840	6	0.00	0.00	0	0
884	8	0.00	0.00	0	0
900	10	0.00	29.90	897	-0.0033
930	140	1.00	30.50	915	-0.0163
952	148	1.10	31.40	942	-0.0106
972	155	1.20	32.10	963	-0.0093
984	160	1.30	32.50	975	-0.0092
1004	166	1.40	33.10	993	-0.0110
1037	177	1.50	34.10	1023	-0.0136
1049	181	1.60	34.60	1038	-0.0106
1068	188	1.70	35.30	1059	-0.0080
1100	198	1.80	36.30	1089	-0.0100
1125	206	1.90	37.00	1110	-0.0135
1134	209	2.00	37.20	1116	-0.0161
1156	215	2.10	37.80	1134	-0.0190
1178	233	2.20	38.70	1161	-0.0146

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองขณะไม่มีภาระเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 แรงม้าแบบเดลต้า

C 5 $\mu F$					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1,289	6	0	0	0	0
1,376	7	0	45.00	1,350	-0.0192
1,395	8	0	45.20	1,356	-0.0287
1,435	9	0	45.40	1,362	-0.0536
1,473	12	0	49.00	1,470	-0.0020
1,487	13	0	49.20	1,476	-0.0074
1,548	228	1.00	51.40	1,542	-0.0038
1,578	241	1.10	52.40	1,572	-0.0038
1,616	255	1.20	53.80	1,614	-0.0012

C 7.5 $\mu F$					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1135	6	0	0	0	0
1165	8	0	0	0	0
1210	10	0	40.20	1206	-0.0033
1244	14	0	41.40	1242	-0.0016
1276	195	1.10	42.30	1269	-0.0055
1297	202	1.10	42.90	1287	-0.0077
1311	207	1.20	43.50	1305	-0.0046
1333	215	1.30	44.10	1323	-0.0075
1350	221	1.30	44.80	1344	-0.0044
1374	229	1.40	45.60	1368	-0.0043
1402	238	1.50	46.40	1392	-0.0071
1427	246	1.60	47.30	1419	-0.0056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

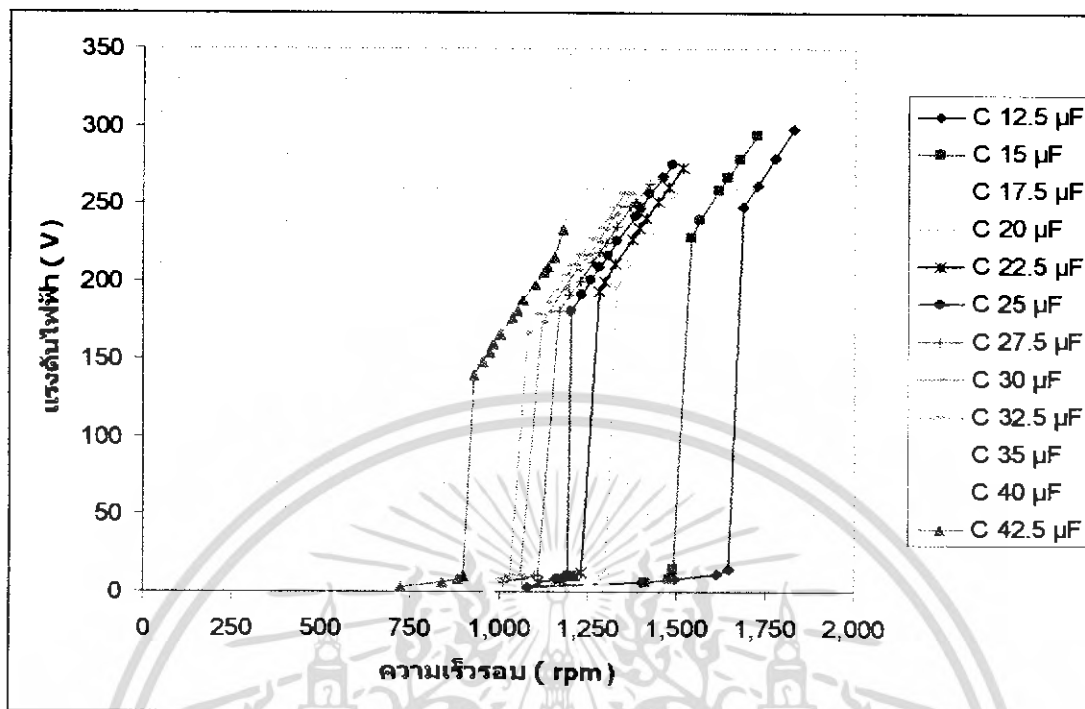
C 10 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
1048	9	0	0	0	0
1060	10	0	35.30	1059	-0.0009
1073	12	0	35.60	1068	-0.0046
1082	13	0	36.00	1080	-0.0018
1110	168	1.00	36.80	1104	-0.0054
1133	176	1.10	37.50	1125	-0.0071
1167	190	1.20	38.60	1158	-0.0077
1199	200	1.40	39.70	1191	-0.0067
1226	208	1.50	40.60	1218	-0.0065
1247	215	1.60	41.00	1230	-0.0138
1260	220	1.60	41.80	1254	-0.0047
1277	225	1.70	42.20	1266	-0.0086
1300	233	1.80	43.00	1290	-0.0077
1321	239	1.80	43.70	1311	-0.0076
1333	243	1.90	44.00	1320	-0.0098
1351	249	2.00	44.80	1344	-0.0052

C 12.5 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
929	8	0	0	0	0
962	11	0.00	32.00	960	-0.0020
981	144	1.00	32.40	972	-0.0092
1000	152	1.10	33.10	993	-0.0070
1028	163	1.20	34.00	1020	-0.0078
1084	182	1.40	35.80	1074	-0.0093
1114	192	1.50	36.80	1104	-0.0090
1173	211	1.80	38.70	1161	-0.0103
1204	220	1.90	39.70	1191	-0.0109
1229	228	2.00	40.60	1218	-0.0090
1241	232	2.10	40.90	1227	-0.0114
1263	239	2.20	41.60	1248	-0.0120

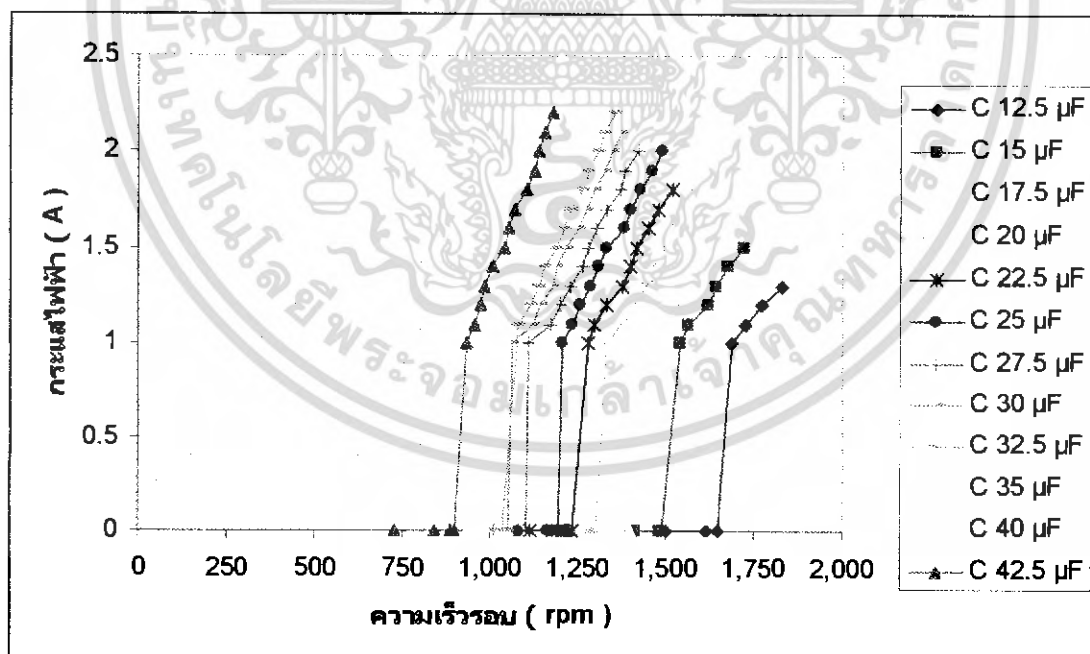
C 15 $\mu$ F					
$N_r$ (rpm)	$V_{phase}$	$I_{phase}$	$f$ (Hz)	$N_s$ (rpm)	$S$
848	7	0	0	0	0
876	9	0.00	29	873	-0.0034
907	137	1.10	30	897	-0.0111
954	155	1.30	32	945	-0.0095
984	164	1.40	32	972	-0.0123
1,011	174	1.50	33	999	-0.0120
1,039	183	1.70	34	1,029	-0.0097
1,048	186	1.70	35	1,035	-0.0125
1,084	197	1.90	36	1,071	-0.0121
1,115	207	2.10	37	1,098	-0.0154
1,143	216	2.20	38	1,125	-0.0160
1,157	220	2.30	38	1,137	-0.0175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาผลการทดลองมาทำการแสดงเป็นกราฟจะได้รูปดังต่อไปนี้

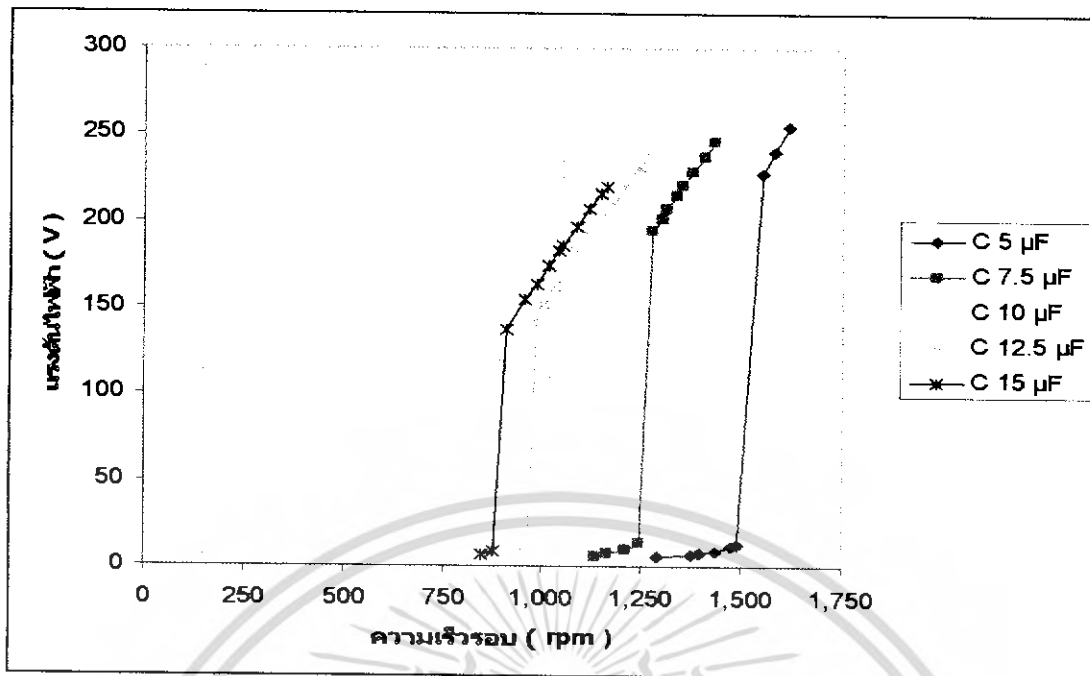


รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันที่ขั้วเมื่อต่อแบบสตาร์

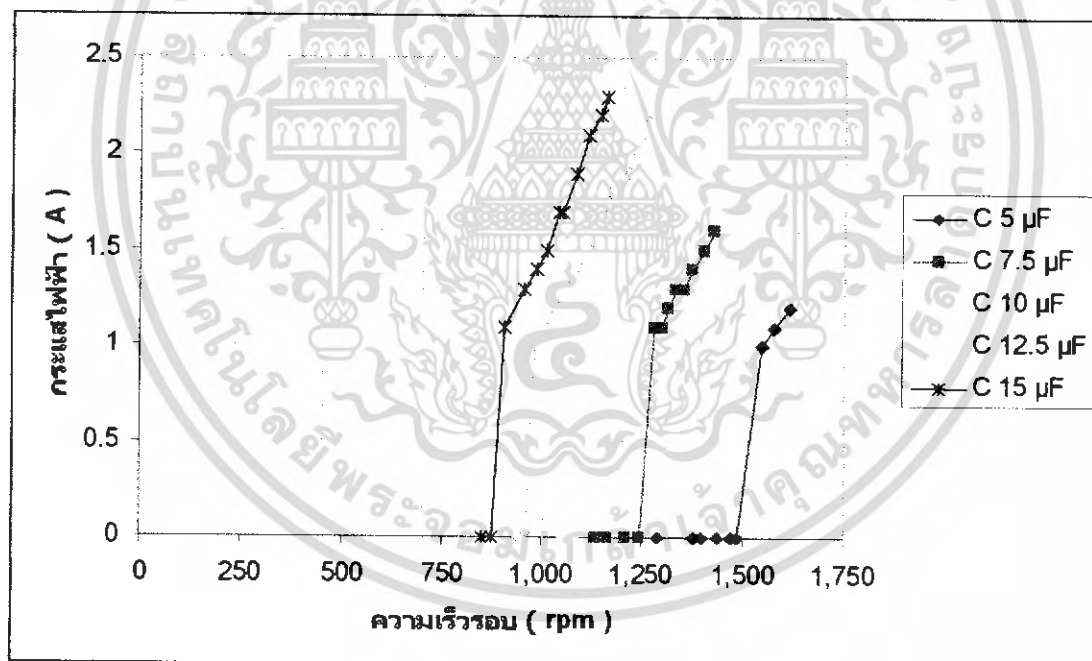


รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับกระแสเมื่อต่อแบบสตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

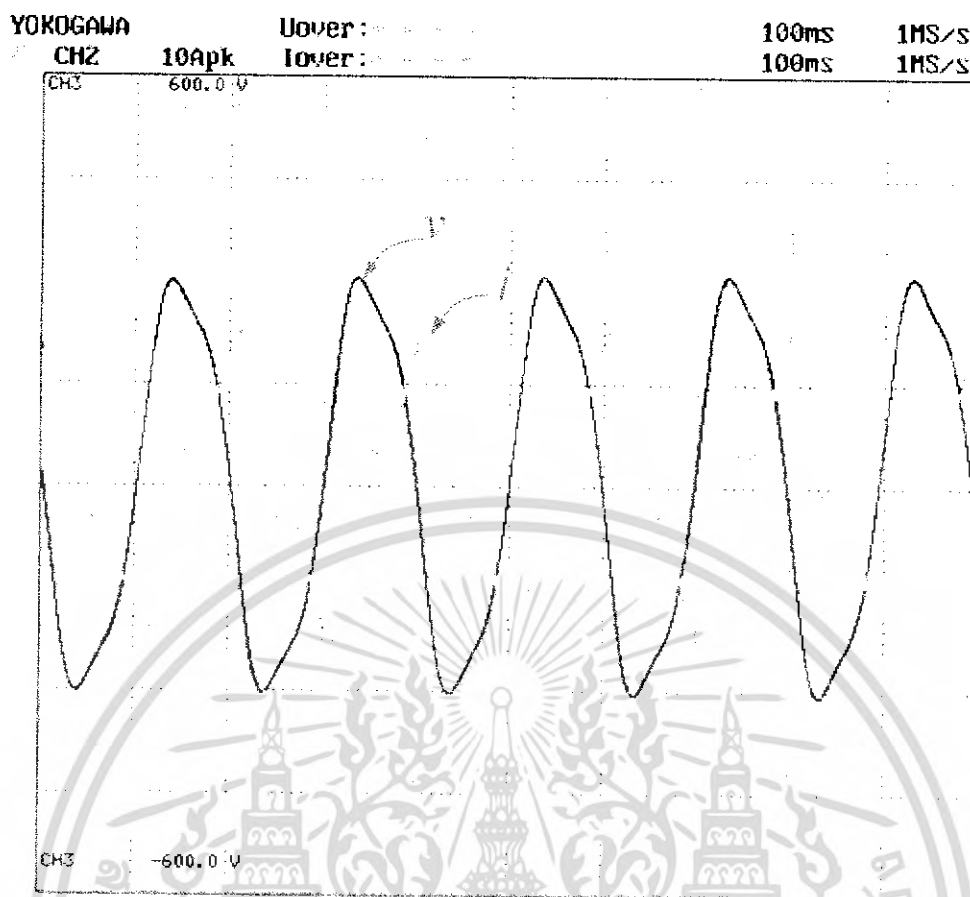


รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันที่ขั้วเมื่อต่อแบบเดลต้า



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับกระแสเมื่อต่อแบบเดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากการทดลองที่ระดับ 215 V , 1.15 A  
และมุมเฟส  $\phi = 91.5$  องศา ความถี่ 50 Hz

### 5.5 สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

จากกราฟถ้าหากเราใส่คาปาซิเตอร์มีค่าน้อย จุด built up แรงดันจะอยู่สูงคือจะต้องขับโรเตอร์ให้มีความเร็วรอบสูงจึงจะสร้างแรงดันได้ และเมื่อเราเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์ให้มีค่ามากขึ้น ความเร็วรอบโรเตอร์ที่จะสร้างแรงดันก็จะน้อยลงตามลำดับดังกราฟ และเมื่อเปรียบเทียบการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสตาร์กับแบบเดลต้าจะเห็นได้ว่าการต่อแบบเดลต้าจะใช้คาปาซิเตอร์ในการ built up แรงดันที่มีค่าน้อยกว่าแบบสตาร์ที่พิกัดความเร็วโรเตอร์เดียวกันทั้งนี้เนื่องจากแรงดันต่อเฟสของการต่อแบบเดลต้ามีค่า  $\sqrt{3}$  เท่าของการต่อแบบสตาร์ ในส่วนของรูปคลื่นแรงดันและกระแสจะมีลักษณะของรูปคลื่นไซน์ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากร่องสลิตและขดลวด

## 5.6 การทดลองเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิเตอร์ตามโหลด

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุตามภาระของ  
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1258 rpm								
C	Load Rated	$V_T$	$I_T$	$I_L$	f	$N_s$	S	P
	(watt)	(volt)	(amp)	(amp)	(Hz)	(rpm)	(p.u.)	(watt)
30 $\mu F$	no load	220	1.76	0	41	1,230	-0.0228	0
	20	215	1.73	0.11	41	1,230	-0.0228	23.65
	40	213	1.71	0.18	41	1,230	-0.0228	38.34
	60	209	1.68	0.25	41	1,230	-0.0228	52.25
	80	204	1.65	0.36	41	1,230	-0.0228	73.44
	100	198	1.63	0.46	41	1,230	-0.0228	91.08
	120	192	1.61	0.52	40	1,200	-0.0483	99.84
	140	188	1.6	0.62	40	1,200	-0.0483	116.56
32.5 $\mu F$	40	219	1.86	0.18	41	1,230	-0.0228	39.42
	60	215	1.85	0.25	41	1,230	-0.0228	53.75
	80	210	1.81	0.37	41	1,230	-0.0228	77.7
	100	205	1.79	0.47	41	1,230	-0.0228	96.35
	120	200	1.78	0.58	40	1,200	-0.0483	116
	140	196	1.76	0.63	40	1,200	-0.0483	123.48
35 $\mu F$	160	192	1.75	0.69	40	1,200	-0.0483	132.48
	180	186	1.74	0.78	40	1,200	-0.0483	145.08
35 $\mu F$	60	221	2.05	0.26	41	1,230	-0.0228	57.46

1352 rpm								
C	Load Rated	$V_T$	$I_T$	$I_L$	f	$N_s$	S	P
	(watt)	(volt)	(amp)	(amp)	(Hz)	(rpm)	(p.u.)	(watt)
22.5 $\mu F$	no load	220	1.4	0	45	1,350	-0.0015	0
	20	215	1.36	0.11	45	1,350	-0.0015	23.65
	40	210	1.35	0.18	44	1,320	-0.0242	37.8
	60	205	1.32	0.25	44	1,320	-0.0242	51.25
	80	199	1.3	0.35	44	1,320	-0.0242	69.65
	100	191	1.27	0.44	44	1,320	-0.0242	84.04
	120	181	1.25	0.54	43	1,290	-0.0481	97.74
25 $\mu F$	60	219	1.57	0.3	44	1,320	-0.0242	65.7
	80	215	1.56	0.37	44	1,320	-0.0242	79.55
	100	208	1.54	0.47	44	1,320	-0.0242	97.76
	120	202	1.53	0.58	43	1,290	-0.0481	117.16
	140	198	1.52	0.64	43	1,290	-0.0481	126.72
	160	190	1.51	0.73	43	1,290	-0.0481	138.7
27.5 $\mu F$	180	183	1.5	0.78	43	1,290	-0.0481	142.74
	100	219	1.75	0.49	43	1,320	-0.0242	107.31
	120	214	1.74	0.59	43	1,290	-0.0481	126.26
	140	209	1.73	0.66	43	1,290	-0.0481	137.94
	160	203	1.73	0.76	43	1,290	-0.0481	154.28
	180	198	1.71	0.81	43	1,290	-0.0481	160.38
	200	191	1.7	0.89	43	1,290	-0.0481	169.99
220	182	1.69	0.97	42	1,260	-0.073	176.54	

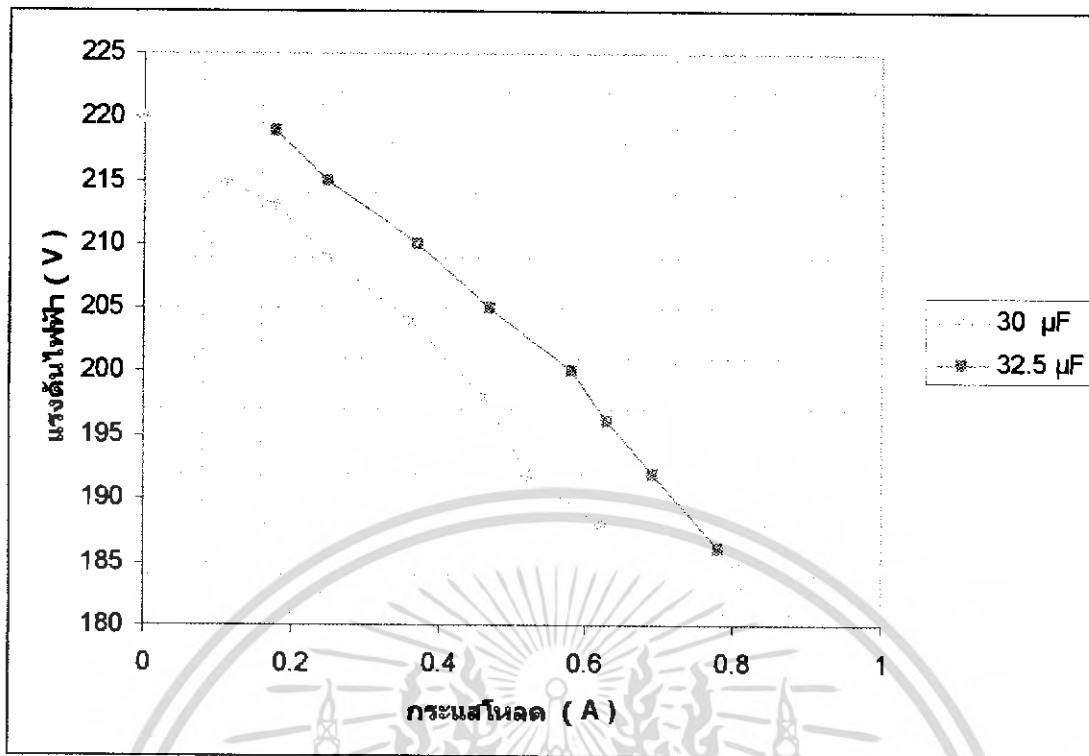
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30 $\mu F$	140	220	1.94	0.66	43	1,290	-0.0481	145.2
	160	215	1.94	0.72	43	1,290	-0.0481	154.8
	180	210	1.93	0.82	43	1,290	-0.0481	172.2
	200	203	1.92	0.92	43	1,290	-0.0481	186.76
	220	196	1.91	1.02	42	1,260	-0.073	199.92
	240	191	1.91	1.06	42	1,260	-0.073	202.46
32.5 $\mu F$	260	186	1.9	1.1	42	1,260	-0.073	204.6
	160	222	2.1	0.73	43	1,290	-0.0481	162.06

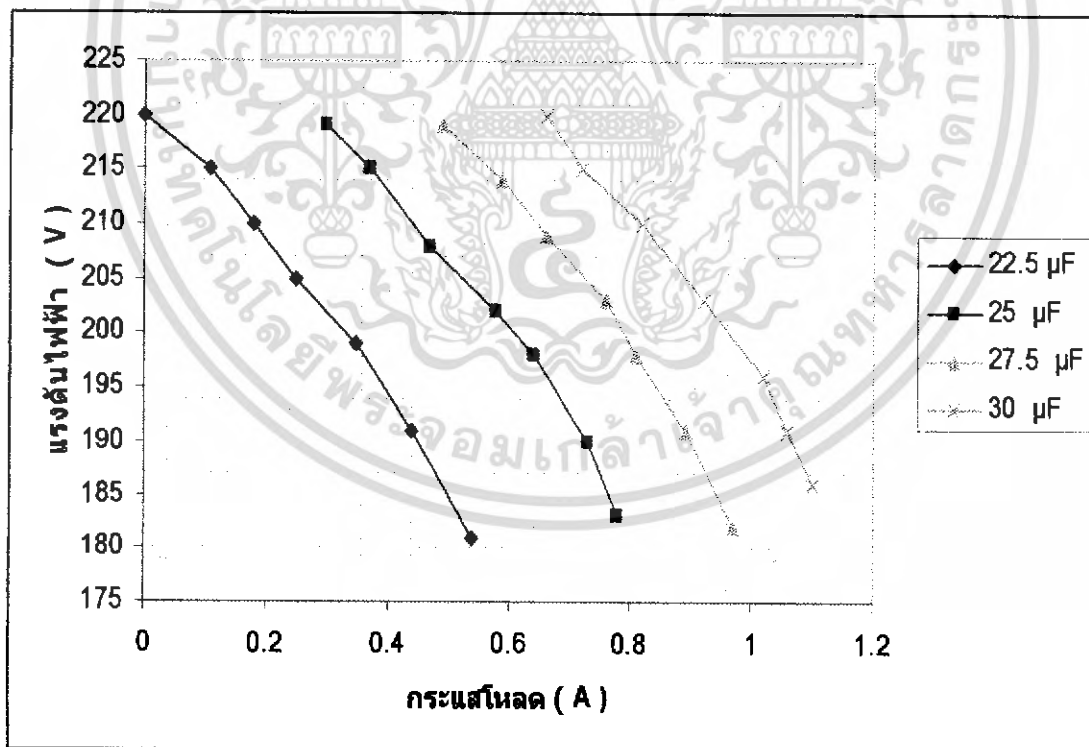
1517 rpm								
C	Load Rated	$V_T$	$I_T$	$I_L$	$f$	$N_s$	$S$	$P$
	(watt)	(volt)	(amp)	(amp)	(Hz)	(rpm)	(p.u.)	(watt)
15 $\mu F$	no load	220	1.1	0	50.4	1,512	-0.0033	0
	20	212	1.05	0.11	50.2	1,506	-0.0073	23.32
	40	205	1.03	0.18	50	1,500	-0.0113	36.9
	60	196	1	0.24	49.7	1,491	-0.0174	47.04
	80	179	0.9	0.34	49.6	1,488	-0.0195	60.86
17.5 $\mu F$	80	221	1.3	0.37	49.6	1,488	-0.0195	81.77
	100	211	1.25	0.48	49.3	1,479	-0.0257	101.28
	120	199	1.25	0.58	49	1,470	-0.032	115.42
	140	189	1.2	0.62	49	1,470	-0.032	117.18
20 $\mu F$	160	173	1.15	0.66	49	1,470	-0.032	114.18
	160	220	1.56	0.75	48	1,440	-0.0535	163.9
	180	211	1.55	0.84	48	1,440	-0.0535	177.24
	200	198	1.54	0.91	48	1,440	-0.0535	180.18
22.5 $\mu F$	220	182	1.5	0.95	48	1,440	-0.0535	177.45
	200	219	1.8	0.97	48	1,440	-0.0535	211.34
	220	212	1.8	1.06	48	1,440	-0.0535	224.72
	240	204	1.78	1.1	48	1,440	-0.0535	224.4
	260	194	1.75	1.14	47	1,410	-0.0759	220.19
25 $\mu F$	280	168	1.6	1.15	47	1,410	-0.0759	193.2
	260	220	2.1	1.21	47	1,410	-0.0759	266.2

1628 rpm								
C	Load Rated	$V_T$	$I_T$	$I_L$	$f$	$N_s$	$S$	$P$
	(watt)	(volt)	(amp)	(amp)	(Hz)	(rpm)	(p.u.)	(watt)
12.5 $\mu F$	no load	220	0.95	0	54	1,620	-0.0049	0
	20	208	0.9	0.11	54	1,620	-0.0049	22.88
	40	195	0.85	0.18	54	1,620	-0.0049	35.1
	60	174	0.8	0.23	53	1,590	-0.0239	40.02
15 $\mu F$	120	216	1.25	0.6	52	1,560	-0.0436	129.6
	140	204	1.2	0.65	52	1,560	-0.0436	132.6
	160	185	1.16	0.68	52	1,560	-0.0436	125.8
17.5 $\mu F$	180	224	1.55	0.86	52	1,560	-0.0436	192.64
	200	210	1.54	0.94	52	1,560	-0.0436	197.4
	220	187	1.46	1	52	1,560	-0.0436	187
20 $\mu F$	260	220	1.9	1.21	51	1,530	-0.0641	266.2
	280	204	1.86	1.28	51	1,530	-0.0641	261.12
22.5 $\mu F$	300	222	2.12	1.43	50	1,500	-0.0853	317.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

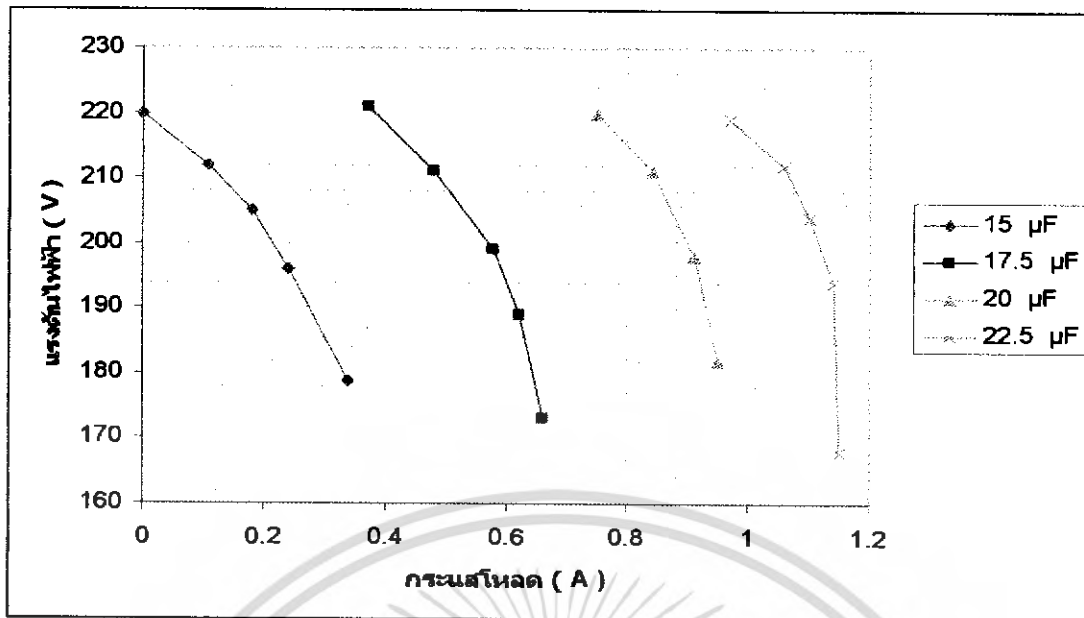


รูปที่ 5.12 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1258 rpm

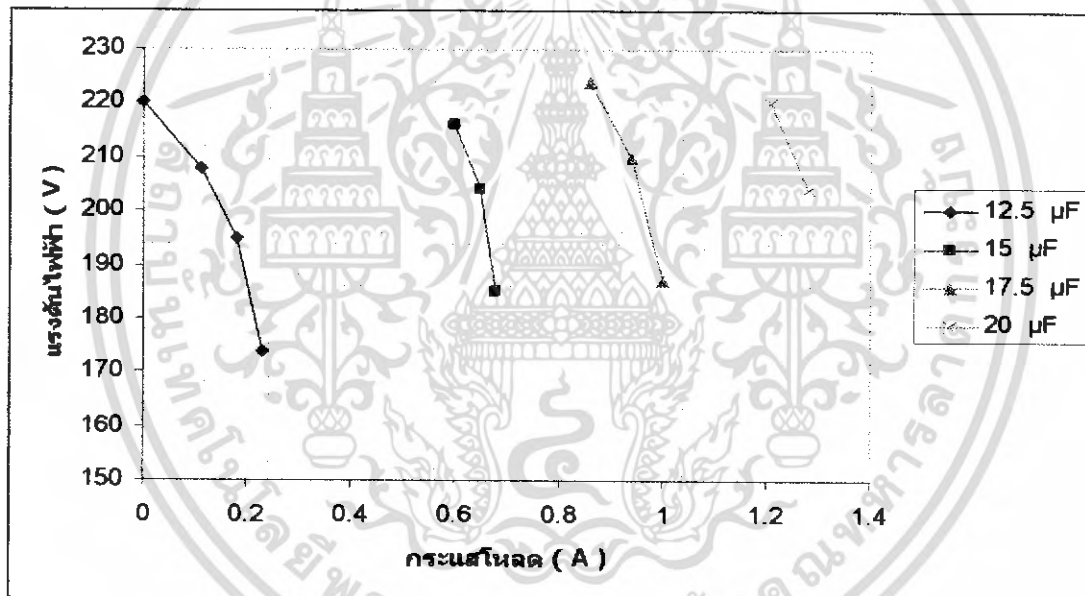


รูปที่ 5.13 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1352 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1517 rpm



รูปที่ 5.15 กราฟการเปลี่ยนค่า C ตาม Load ที่ความเร็ว 1628 rpm

### 5.7 สรุปผลการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิเตอร์ตามโหลด

ความถี่ของระบบจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าความเร็วรอบของโรเตอร์มาก ความถี่ก็จะมากตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วโรเตอร์เดียวกันแล้วเมื่อค่าคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้นจะมีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้มากขึ้น และถ้าหากในระบบมีโหลดมากแต่ยังไม่เพิ่มค่าคาปาซิเตอร์จะทำให้แรงดันในระบบลดลง สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์ให้มีค่าเปลี่ยนตามภาระไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะสามารถรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

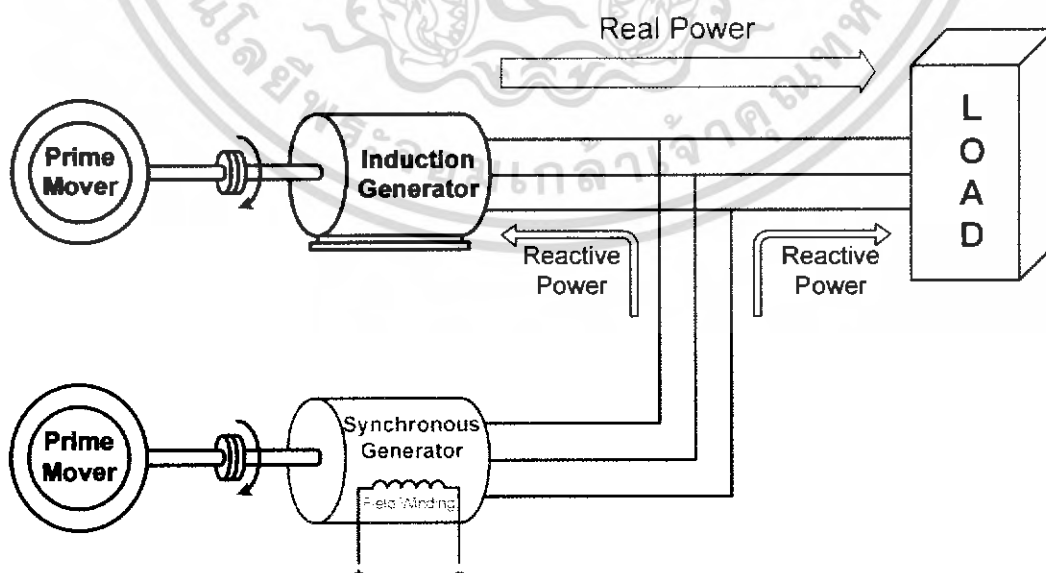
## บทที่ 6

### เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก

#### Separate Excited Induction Generator

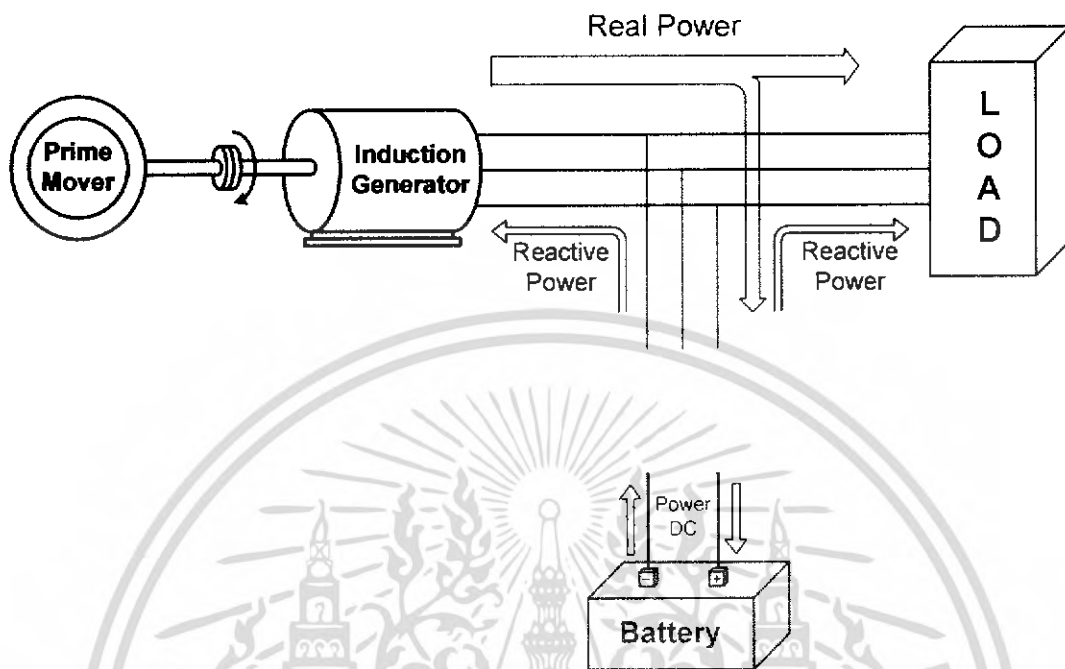
##### 6.1 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแบบนี้จะต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกระตุ้นการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนในตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำและถ้าหากมีต้นกำลังขับเคลื่อนเหนี่ยวนำให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนแล้ว ( $N_r > N_s$ ) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะสามารถจ่ายพลังงานไปยังโหลดได้โดยแหล่งจ่าย (Source) ที่ใช้อาจเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส หรือ อินเวอร์เตอร์ก็ได้ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 โดยรูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นพื้นที่ที่มีไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเข้าถึงแต่มีข้อจำกัดคือสามารถจ่ายโหลดได้เพียงแต่ค่าๆหนึ่งเท่านั้นโดยไม่เกินพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนอกจากนี้ยังสามารถปรับความเร็วสลิป  $N_s$  ได้โดยการปรับเปลี่ยนความถี่ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 6.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและโหลดที่เป็นแบบเหนี่ยวนำในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงให้กับภาระทางไฟฟ้าโดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะต้องมีขนาดทางพิกัดให้เพียงพอกับขนาดภาระทางไฟฟ้าของระบบที่เป็นแบบเหนี่ยวนำซึ่งถ้าหากมีภาระที่เป็นแบบเหนี่ยวนำมากเกินไปขนาดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลงเนื่องจากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กลดลงนั่นเองในขณะที่ความถี่ของระบบจะขึ้นอยู่กับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



รูปที่ 6.1 การต่อ Induction Generator ร่วมกับ Synchronous Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

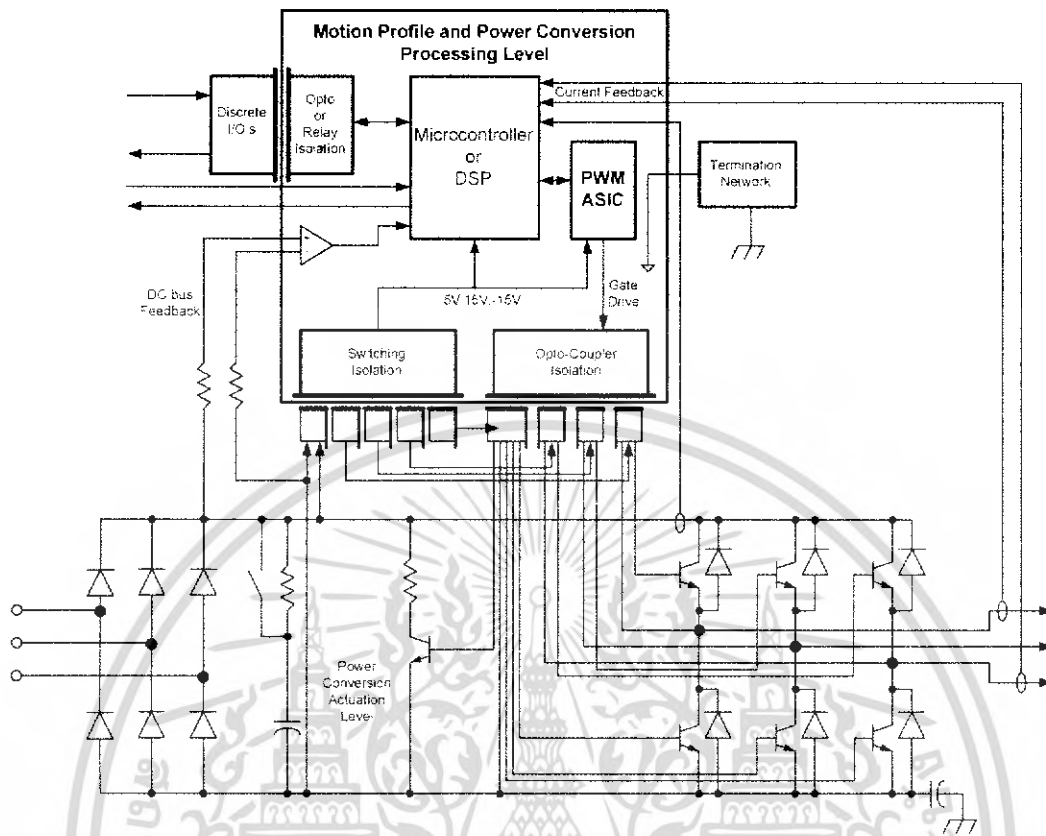


รูปที่ 6.2 การต่อ Induction Generator ร่วมกับ Inverter คัดแปลง

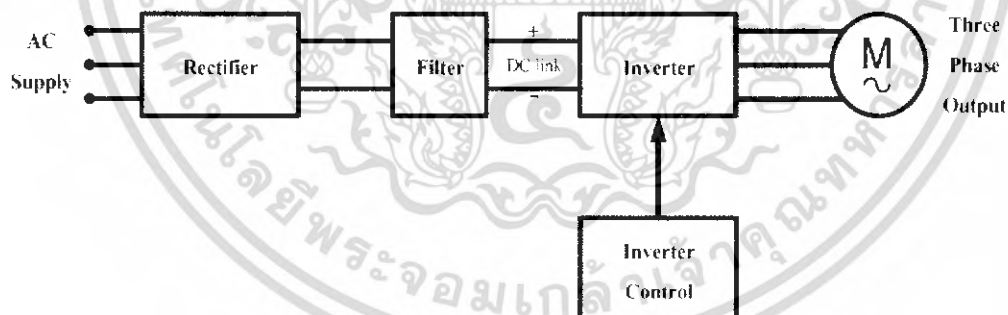
ในรูปที่ 6.2 ชุดอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยจะเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและโหลดที่เป็นแบบเหนี่ยวนำ ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะจ่ายโหลดเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงให้กับภาระทางไฟฟ้าและมีส่วนหนึ่งจ่ายคืนให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะถูกแปลงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปสะสมที่แบตเตอรี่โดยที่แบตเตอรี่จะต้องมีขนาดให้เพียงพอกับขนาดภาระทางไฟฟ้าของระบบที่เป็นแบบเหนี่ยวนำและเพียงพอต่อการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยโดยความถี่ของระบบจะขึ้นอยู่กับ การปรับตั้งที่อินเวอร์เตอร์

ในโครงการที่ได้ทำการศึกษานี้จะทำการทดสอบเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อร่วมกับอินเวอร์เตอร์เท่านั้นเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีคุณลักษณะเหมือนกับแบบต่อเข้ากับระบบโดยตรงทางกลุ่มโครงการได้ใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดมาดัดแปลงเพื่อให้สามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ได้

## 6.2 การนำเอาอินเวอร์เตอร์มาดัดแปลงใช้งาน



รูปที่ 6.3 แสดงวงจรและโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์โดยทั่วไป



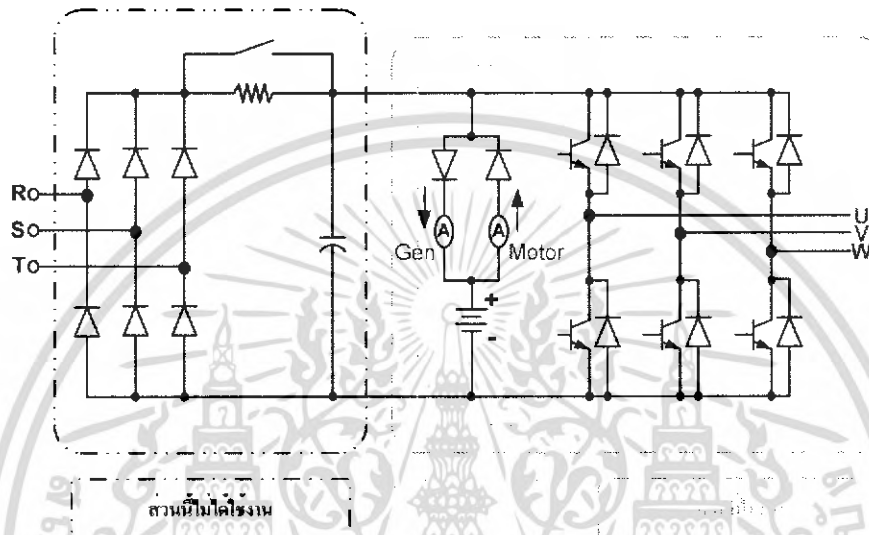
Block Diagram Of Basic Inverter

รูปที่ 6.4 แสดงส่วนประกอบหลักของอินเวอร์เตอร์ทั่วไป

จากรูปที่ 6.3 และ รูปที่ 6.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไปอินพุตของอินเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสหรือหนึ่งเฟสเมื่อเข้ามาที่อินเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยชุดเรียงกระแส (Rectifier) เมื่อเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกกรองกระแสให้เรียบมีน้อยโดยชุดกรองกระแส (Filter) เข้าสู่ส่วนดีซีลิงค์ (DC Link) จากไฟฟ้ากระแสตรงจะถูก

เปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่สามารถแปรขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยมีวงจรควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์อีกที

ถ้าหากต้องการให้มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยให้พลังงานที่ได้นั้นเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ จะต้องทำการดัดแปลงอินเวอร์เตอร์โดยการต่อแอมป์มิเตอร์อนุกรมกับไดโอดจำนวน 2 ชุด แล้วนำมาต่อขนานกันโดยให้ไดโอดต่อสลับขั้วกัน แล้วต่อเข้ากับส่วน DC Link ของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 แสดงการดัดแปลงอินเวอร์เตอร์ให้สามารถสะสมพลังงานเก็บเข้าแบตเตอรี่ได้

จากรูปที่ 6.5 ส่วนที่เป็นวงจรเรียงกระแส จะไม่มีการใช้งาน แรงดันในส่วน DC Link จะได้จากแบตเตอรี่แทนและจะมีแอมป์มิเตอร์เป็นตัวบอกสภาวะการทำงานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำว่าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ ถ้าหากแสดงสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์จะทำงานในย่านการคืนพลังงาน (Regenerative) มาสะสมไว้ในแบตเตอรี่ ซึ่งถ้าหากแบตเตอรี่เต็มจะไม่สามารถชาร์จกระแสเข้าไปได้อีกทำให้แรงดันไฟตรงที่ขั้วมีค่ามากขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่งจะทำให้อินเวอร์เตอร์หยุดทำงานเนื่องจากชุดป้องกันการทำงานภายในตัวอินเวอร์เตอร์เอง

หน้าที่หลักๆของอินเวอร์เตอร์ในโครงการที่ได้ศึกษานี้คือเป็นตัวกำหนดความถี่และควบคุมการสร้างสนามแม่เหล็ก(Excited) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยค่ากระแสกระตุ้นนี้เป็นตัวทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กและอินเวอร์เตอร์ยังมีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกด้วย ส่วนความสามารถในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าสลิปและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งจะเปลี่ยนไปตามความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่เราทำการปรับเปลี่ยนซึ่งเป็นไปตามหลักการควบคุมแรงดันต่อความถี่ ( $v/f$ ) คงที่ และในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จะกำหนดขนาดกระแสจะต้องไม่เกินพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับตัวเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 การส่งผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์กับเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



**รูปที่ 6.6** แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ใน 4 จุดภาค (4 Quadrant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### โหมดที่ 1 อินเวอร์เตอร์

( $v_o$ ) เป็นบวก ( $i_o$ ) เป็นบวก ( $P_o$ ) เป็นบวก คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งมาจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $v_o$ ) ออกไปทางกระแสสลับเอาต์พุต ( $v_o$ )

### โหมดที่ 2 เรียงกระแส

( $v_o$ ) เป็นลบ ( $i_o$ ) เป็นบวก ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านจากทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $v_o$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $v_o$ )

### โหมดที่ 3 อินเวอร์เตอร์

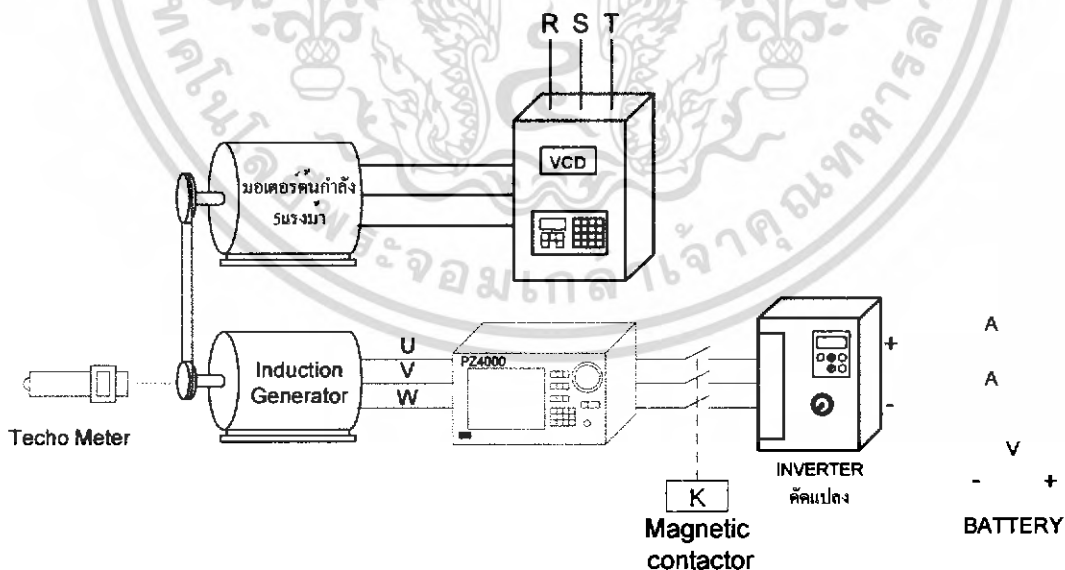
( $v_o$ ) เป็นลบ ( $i_o$ ) เป็นลบ ( $P_o$ ) เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งมาจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $v_o$ ) ออกไปทางกระแสสลับเอาต์พุต ( $v_o$ )

### โหมดที่ 4 เรียงกระแส

( $v_o$ ) เป็นบวก ( $i_o$ ) เป็นลบ ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านจากทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $v_o$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $v_o$ )

โดยจากรูปที่ 6.6 (ข) จะเห็นได้ว่าช่วงการทำงานโหมด 1 กับ 3 จะมีช่วงกว้างกว่าช่วงโหมด 2 กับ 4 นั้นแสดงว่ากำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านจากแบตเตอรี่ไปยังเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าและในรูปที่ 6.6 (ค) จะสังเกตเห็นว่าช่วงการทำงานโหมด 2 กับ 4 กว้างกว่าโหมด 1 กับ 3 แสดงว่ากำลังไฟฟ้าส่วนมากถูกส่งผ่านจากเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ ซึ่งถ้าหาก ( $i_o$ ) ล้าหลัง ( $v_o$ ) เป็นมุม ( $90^\circ$ ) พอดี จะทำให้ช่วงโหมด 1 กับ 3 มีช่วงกว้างกว่า 2 กับ 4 จะไม่มีการส่งผ่านพลังงานเกิดขึ้นหรือกำลังไฟฟ้าเป็นศูนย์

## 6.4 การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 6.7 แสดงการต่ออุปกรณ์เพื่อการทดลองคืนพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์แล้วเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1 แทนติดตั้งต้นกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	1 ตัว
2 Inverter (VCD 3Φ)	1 ตัว
3 Techo Meter	1 ตัว
4 Inverter (ที่ตัดแปลงแล้ว)	1 ตัว
5 Diode	2 ตัว
6 DC Amp Meter	2 ตัว
7 DC Volt Meter	1 ตัว
8 Lead-Acid Battery 12 V	20 ลูก
9 สายไฟ	40 เส้น
10 Watt Meter PZ4000	1 ตัว
11 Magnetic contactor	1 ตัว
12 Junction Box	1 ตัว

#### 6.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบทิศทางการหมุนของมอเตอร์ต้นกำลังกับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีทิศทางเดียวกันก่อน
2. ปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ตัวที่ตัดแปลงไปที่ 10 Hz
3. ทำการเดินเครื่องต้นกำลังตัวขับและปรับให้ความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ที่ทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 300 rpm (เท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่ 10 Hz)
4. On Magnetic contactor
5. ปรับความเร็วต้นกำลังให้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วมากกว่าสนามแม่เหล็กหมุนตามลำดับ
6. ทำการวัดและบันทึกค่าต่าง ๆ ตามโดยพิจารณากระแสไม่ควรเกินกระแสพิิกัด(2 A)
7. ปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ตัวที่ตัดแปลงเพิ่มขึ้นตามลำดับและทดสอบซ้ำตามข้อ 3

#### 6.4.3 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์

แสดงให้เห็นว่าการคืนพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยควบคุมจากอินเวอร์เตอร์จะคืนกำลังงานมากขึ้นขึ้นอยู่กับความถี่ที่เราปรับ ค่าสลิป และค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะแปรผันตามความถี่ในลักษณะ (V/f) คงที่ตามคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์โดยทำการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสตาร์และแบบเดลต้า

ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์คั้นพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์

ที่ความถี่ = 10 Hz $N_s = 300$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
302	-0.0067	58.16	0.49	84.57	8.09	261	0	0	-8.09
326	-0.0867	59.75	0.63	92.67	-5.27	261.1	0	0	5.27
351	-0.17	61.2	0.91	98.86	-25.59	261.3	0.07	18.29	7.3
375	-0.25	61.85	1.23	101.48	-45.39	261.5	0.14	36.6	8.79
400	-0.3333	62.24	1.66	101.98	-64.3	262	0.2	52.4	11.9
426	-0.42	62.33	2.17	100.82	-76.28	262.4	0.23	60.35	15.93

ที่ความถี่ = 20 Hz $N_s = 600$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
603	-0.005	78.51	0.45	84.14	10.8	261.3	0	0	-10.8
624	-0.04	80.42	0.56	96.93	-16.36	261.4	0.03	7.84	8.52
650	-0.0833	81.78	0.77	106.62	-53.68	261.7	0.16	41.87	11.81
676	-0.1267	82.73	1	110.94	-88.88	262.9	0.3	78.87	10.01
698	-0.1633	83.44	1.22	112.99	-119.08	264	0.42	110.46	8.62
725	-0.2083	84.14	1.55	114.31	-161.17	265	0.56	148.4	12.77
750	-0.25	84.69	1.92	114.61	-203.25	266.4	0.7	186.48	16.77

ที่ความถี่ = 30 Hz $N_s = 900$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
902	-0.0022	95.08	0.45	87.04	6.67	262.1	0	0	-6.67
927	-0.03	96.58	0.52	99.84	-25.7	262.2	0.08	20.98	4.72
949	-0.0544	97.88	0.66	109.84	-65.68	262.7	0.22	57.79	7.88
975	-0.0833	98.89	0.87	116.41	-114.67	263.5	0.4	105.4	9.27
1001	-0.1122	99.95	1.12	119.68	-165.55	265	0.59	156.35	9.2
1024	-0.1378	100.5	1.36	121.21	-212.95	265.8	0.75	199.35	13.6
1050	-0.1667	101.27	1.64	122	-264.02	267.4	0.94	251.36	12.67
1074	-0.1933	101.83	1.94	122.35	-317.28	268.4	1.1	295.24	22.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ = 40 Hz $N_s = 1200$ RPM									
$N_r$	$s$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
1203	-0.0025	108.18	0.45	88.02	5.05	260.6	0	0	-5.05
1225	-0.0208	109.84	0.51	101.14	-32.15	261	0.1	26.1	6.05
1252	-0.0433	111.61	0.65	113.95	-88.35	262.2	0.23	60.31	28.04
1276	-0.0633	112.76	0.83	120.95	-144.05	263.9	0.44	116.12	27.93
1300	-0.0833	114.03	1.1	124.76	-213.95	266	0.74	196.84	17.11
1326	-0.105	115.3	1.32	127.2	-276.05	267.7	0.98	262.35	13.71
1352	-0.1267	116.3	1.58	128.34	-341.75	269.8	1.21	326.46	15.29
1375	-0.1458	117.47	1.81	128.73	-399.29	272.1	1.4	380.94	18.35
1402	-0.1683	119.85	2.13	128.77	-478.67	277.4	1.65	457.71	20.96
1426	-0.1883	123.94	2.39	128.01	-547	285	1.88	535.8	11.2

ที่ความถี่ = 50 Hz $N_s = 1500$ RPM									
$N_r$	$s$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
1503	-0.002	119.99	0.44	88.28	4.74	260	0	0	-4.74
1527	-0.018	121.68	0.54	107.65	-59.21	260.7	0.18	46.93	12.29
1550	-0.0333	122.91	0.66	118.06	-114.3	262	0.4	104.8	9.5
1575	-0.05	124.13	0.87	127.09	-194.93	264	0.68	179.52	15.41
1600	-0.0667	125.4	1.06	130.27	-258.01	266	0.93	247.38	10.63
1627	-0.0847	126.44	1.3	132.91	-335.74	268	1.2	321.6	14.14
1653	-0.102	127.52	1.54	134.15	-409.03	270	1.48	399.6	9.43
1675	-0.116	129.37	1.75	134.56	-476.29	273.5	1.7	464.95	11.34
1701	-0.134	131.51	2.04	134.68	-565.64	277.5	1.96	543.9	21.74
1726	-0.1507	134.9	2.31	134.58	-656.18	284	2.18	619.12	37.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ = 60 Hz $N_s = 1800$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
1801	-0.0006	119.65	0.37	85.27	10.83	260	0	0	-10.83
1826	-0.0144	121.81	0.44	105.95	-43.78	260.6	0.14	36.48	7.3
1852	-0.0289	123.18	0.52	117	-87.91	262.5	0.28	73.5	14.41
1876	-0.0422	124.37	0.71	125.84	-154.45	264.6	0.56	148.18	6.28
1902	-0.0567	125.83	0.89	130.09	-215.87	267	0.78	208.26	7.61
1927	-0.0706	127.27	1.08	132.52	-277.91	269.9	1	269.9	8.01
1951	-0.0839	129.12	1.27	133.67	-340.23	272.9	1.2	327.48	12.75
1974	-0.0967	134.16	1.49	134.45	-420.52	280	1.42	397.6	22.92
2001	-0.1117	139.97	1.78	134.79	-526.58	295.9	1.72	508.95	17.63
2025	-0.125	144.14	2.01	134.8	-613.05	304	1.96	595.84	17.21

ที่ความถี่ = 70 Hz $N_s = 2100$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	loss (Inverter)
2101	-0.0005	123.31	0.32	86.38	7.57	263.7	0	0	-7.57
2126	-0.0124	124.25	0.36	102.54	-28.73	263.9	0.1	26.39	2.34
2153	-0.0252	124.84	0.51	120.89	-98.44	264.9	0.3	79.47	18.97
2178	-0.0371	126.12	0.63	123.64	-132.89	266.2	0.48	127.78	5.11
2200	-0.0476	127.13	0.73	129.94	-178.49	267.8	0.61	163.36	15.14
2228	-0.061	129.12	0.92	130.06	-228.11	269.7	0.81	218.46	9.65
2251	-0.0719	130.26	1.07	131.8	-277.4	271.4	0.98	265.97	11.43
2276	-0.0838	131.11	1.18	135	-327.63	273.5	1.15	314.53	13.11
2300	-0.0952	132.79	1.4	132.57	-377.29	276.5	1.3	359.45	17.84
2324	-0.1067	135.08	1.58	134.85	-450.42	287.9	1.53	440.49	9.93
2348	-0.1181	139.93	1.8	135.19	-536.97	296.7	1.73	513.29	23.68
2373	-0.13	143.45	2	133.6	-593.85	304.2	1.91	581.02	12.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ = 80 Hz $N_s = 2400$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
2401	-0.0004	119.31	0.3	86.89	5.83	262.5	0	0	-5.83
2426	-0.0108	122.14	0.35	105.57	-34.23	263.2	0.09	23.69	10.54
2452	-0.0217	122.44	0.41	118.8	-73.08	264.4	0.14	63.46	9.63
2477	-0.0321	124.31	0.53	125.88	-116.72	265.7	0.4	106.28	10.44
2502	-0.0425	128.09	0.63	130.14	-155.32	267.2	0.55	146.96	8.36
2527	-0.0529	126.67	0.84	131.96	-212.92	268.9	0.7	188.23	24.69
2550	-0.0625	128.42	0.92	132.6	-239.65	270.8	0.84	227.47	12.18
2576	-0.0733	130.49	1.07	133.84	-291.22	272.6	0.99	269.87	21.34
2600	-0.0833	129.92	1.26	133.92	-340.38	274.8	1.12	307.78	32.61
2625	-0.0938	133.83	1.36	133.45	-375.24	279.5	1.24	346.58	28.66
2649	-0.1038	139.59	1.58	134.61	-465.25	291.2	1.45	422.24	43.01
2675	-0.1146	142.98	1.76	134.48	-528.95	298.4	1.62	483.41	45.54
2700	-0.125	144.37	1.94	133.38	-575.61	305.3	1.78	543.43	32.18

ที่ความถี่ = 90 Hz $N_s = 2700$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
2702	-0.0007	122.06	0.26	85.22	7.81	263.6	0	0	-7.81
2724	-0.0089	122.71	0.29	100.14	-18.86	264	0.06	15.84	3.02
2750	-0.0185	123.14	0.35	115.83	-56.82	264.8	0.2	52.96	3.86
2802	-0.0378	126.79	0.56	128.14	-131.08	267.2	0.47	125.58	5.5
2827	-0.047	128.07	0.67	129.34	-164.16	269.1	0.6	161.46	2.7
2851	-0.0559	129.32	0.79	131.11	-200.24	270.6	0.73	197.54	2.7
2876	-0.0652	130.76	0.94	131.11	-242.97	272.3	0.86	234.18	8.79
2900	-0.0741	132.55	1.07	131.3	-281.08	273.9	0.97	265.68	15.4
2923	-0.0826	135.18	1.14	131.75	-306.5	276.4	1.09	301.28	5.22
2950	-0.0926	136.43	1.32	133.1	-370.27	286.2	1.24	354.89	15.38
2975	-0.1019	138.6	1.47	132.79	-414.37	291.1	1.36	395.9	18.47
3002	-0.1119	141.98	1.64	132.66	-472.5	298.9	1.5	448.35	24.15
3025	-0.1204	144.87	1.78	132.09	-518.25	303.1	1.6	484.96	33.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเตลต่ำคืนพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์

ที่ความถี่ = 10 Hz $N_s = 300$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
301	-0.0033	97.44	0.91	77.44	57.91	254	0	0	-57.91
326	-0.0867	92.24	1.18	92.13	-12.12	254	0	0	12.12
351	-0.17	97.37	1.4	93.66	-26.18	254	0.06	16	10.18
375	-0.25	103.36	2.46	94.5	-59.9	254	0.09	24.64	35.26
401	-0.3367	107.13	2.61	97.46	-108.86	254	0.09	24.89	83.97

ที่ความถี่ = 20 Hz $N_s = 600$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
601	-0.0017	125.48	0.83	88.37	8.86	254	0	0	-8.86
625	-0.0417	132.11	1.13	96.9	-53.9	254	0.12	30.48	23.42
650	-0.0833	142.89	1.42	104.11	-147.97	255	0.45	114.75	33.22
676	-0.1267	147.75	1.7	109.53	-251.31	256	0.79	202.24	49.07
700	-0.1667	148.09	2.22	110.84	-351.19	258	1.08	278.64	72.55

ที่ความถี่ = 30 Hz $N_s = 900$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
901	-0.0011	158.44	0.79	85.15	31.71	256	0	0	-31.71
926	-0.0289	161.85	0.95	99.77	-78.03	256	0.24	63.49	14.54
950	-0.0556	164.5	1.21	109.08	-195.2	258	0.70	182.66	12.53
975	-0.0833	166.92	1.56	114.59	-324.44	259	1.18	306.66	17.79
1000	-0.1111	168.97	2.02	116.31	-452.94	260	1.67	435.76	17.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ = 40 Hz $N_s = 1200$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
1200	0	182.28	0.77	82.51	54.96	256	0	0	-54.96
1225	-0.0208	186.22	0.91	101.38	-100.31	257	0.36	92.52	7.79
1251	-0.0425	189.24	1.17	113.32	-262.73	260	0.95	247	15.73
1274	-0.0617	192.05	1.48	119.38	-418.9	261	1.52	398.81	20.09
1299	-0.0825	194.62	1.86	122.43	-582.37	264	2.13	564.7	17.67
1323	-0.1025	196.78	2.25	123.94	-742.25	265	2.71	720.54	21.72

ที่ความถี่ = 50 Hz $N_s = 1500$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
1500	0	204.06	0.77	83.65	51.93	258	0	0	-51.93
1527	-0.018	208.14	0.9	102.91	-125.14	259	0.49	126.91	-1.77
1552	-0.0347	211.61	1.18	117.28	-344.51	261	1.21	315.81	28.7
1575	-0.05	213.88	1.45	123.48	-512.88	263	1.89	497.07	15.81
1600	-0.0667	216.25	1.79	127.76	-709.91	266	2.59	688.94	20.97
1626	-0.084	218.87	2.17	129.97	-915.73	269	3.33	895.77	19.96

ที่ความถี่ = 60 Hz $N_s = 1800$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
1801	-0.0006	205.72	0.62	85.23	31.87	260	0	0	-31.87
1826	-0.0144	208.93	0.72	105.39	-119.27	260	0.39	101.4	17.87
1850	-0.0278	211.6	0.9	117.27	-260.9	261	0.96	252.91	7.99
1874	-0.0411	213.94	1.13	124.81	-414.38	264	1.53	405.5	8.88
1900	-0.0556	216.33	1.41	129.68	-584.28	266	2.17	577.75	6.53
1926	-0.07	218.37	1.71	132.54	-759.18	267	2.78	742.26	16.92
1950	-0.0833	220.23	2.03	133.83	-927.9	270	3.36	907.2	20.7
1976	-0.0978	222.46	2.42	134.84	-1136.48	272	3.96	1077.12	59.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

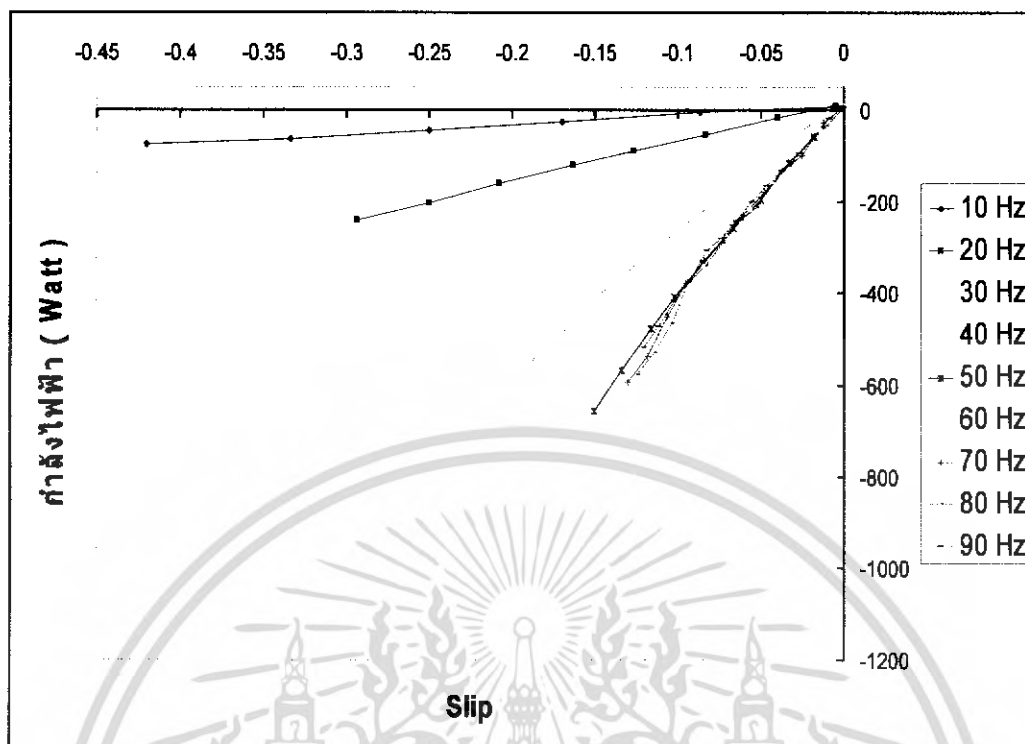
ที่ความถี่ = 70 Hz $N_s = 2100$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
2101	-0.0005	206.22	0.53	85.08	27.86	260	0	0	-27.86
2124	-0.0114	209.06	0.6	102.32	-79.63	260	0.29	75.66	3.97
2176	-0.0362	214.07	0.97	125.46	-359.9	264	1.33	351.12	8.78
2200	-0.0476	215.85	1.17	130.33	-491.58	266	1.81	481.46	10.12
2226	-0.06	217.84	1.46	133.11	-650.29	268	2.38	637.84	12.45
2250	-0.0714	219.68	1.7	134.67	-785.34	270	2.85	769.5	15.84
2276	-0.0838	221.72	1.96	135.4	-927.34	271	3.35	907.85	19.49

ที่ความถี่ = 80 Hz $N_s = 2400$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
2402	-0.0008	207.02	0.49	84.25	30.49	261	0	0	-30.49
2449	-0.0204	212.11	0.66	116.44	-186.15	262	0.66	172.92	13.23
2474	-0.0308	214.31	0.81	124.24	-294.1	264	1.09	287.76	6.34
2500	-0.0417	216.01	1.04	130.18	-433.56	265	1.56	413.4	20.16
2526	-0.0525	218.08	1.27	132.87	-563.5	268	2.05	549.4	14.1
2551	-0.0629	220.33	1.53	134.48	-709.5	270	2.54	685.8	23.7
2601	-0.0838	223.35	1.9	135.78	-912.85	273	3.29	898.17	14.68
2626	-0.0942	225.78	2.13	135.91	-1036.25	276	3.7	1021.2	15.05

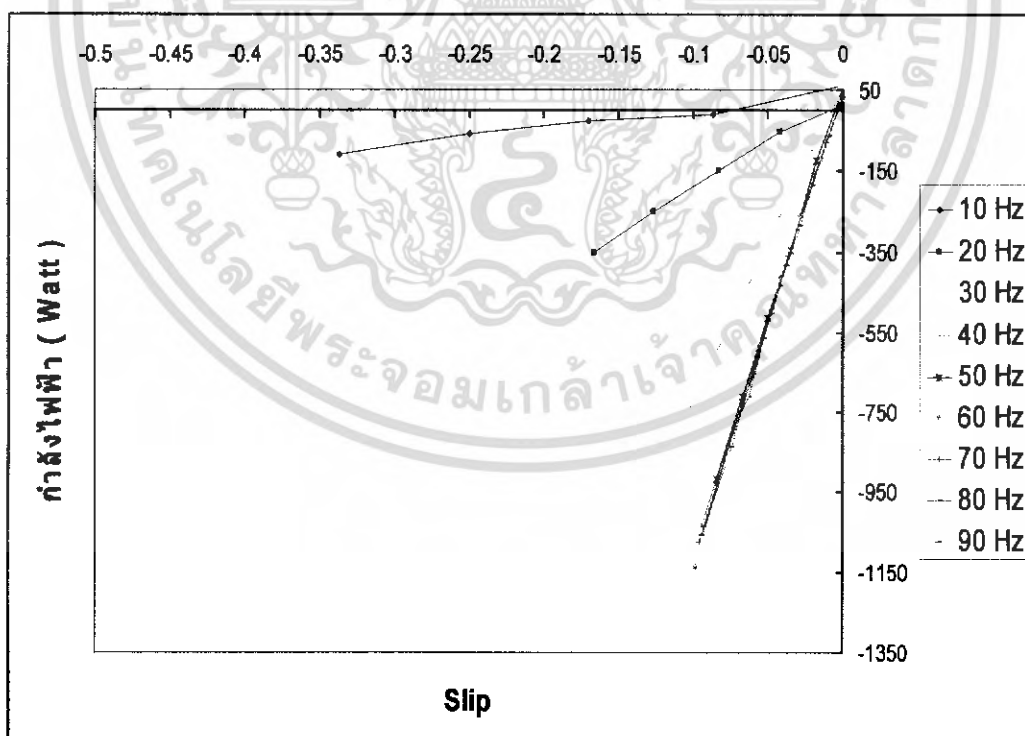
ที่ความถี่ = 90 Hz $N_s = 2700$ RPM									
$N_r$	$S$	$V_U$	$I_U$	$\theta_U$	$P_{3\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	Loss (Inverter)
2700	0	207.35	0.41	82.87	31.58	262	0	0	-31.58
2725	-0.0093	210.39	0.46	102.44	-62.95	262	0.24	62.88	0.07
2751	-0.0189	212.24	0.57	115.5	-157.34	263	0.56	147.28	10.06
2776	-0.0281	214.95	0.76	125.51	-285.03	264	1.03	271.92	13.11
2851	-0.0559	219.53	1.29	134.46	-595.06	270	2.19	591.3	3.76
2900	-0.0741	223.77	1.75	135.48	-837.14	274	2.95	808.3	28.84
2953	-0.0937	228.45	2.16	135.63	-1057.24	280	3.66	1024.8	32.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาผลการทดลองมาทำการแสดงเป็นกราฟจะได้รูปดังต่อไปนี้

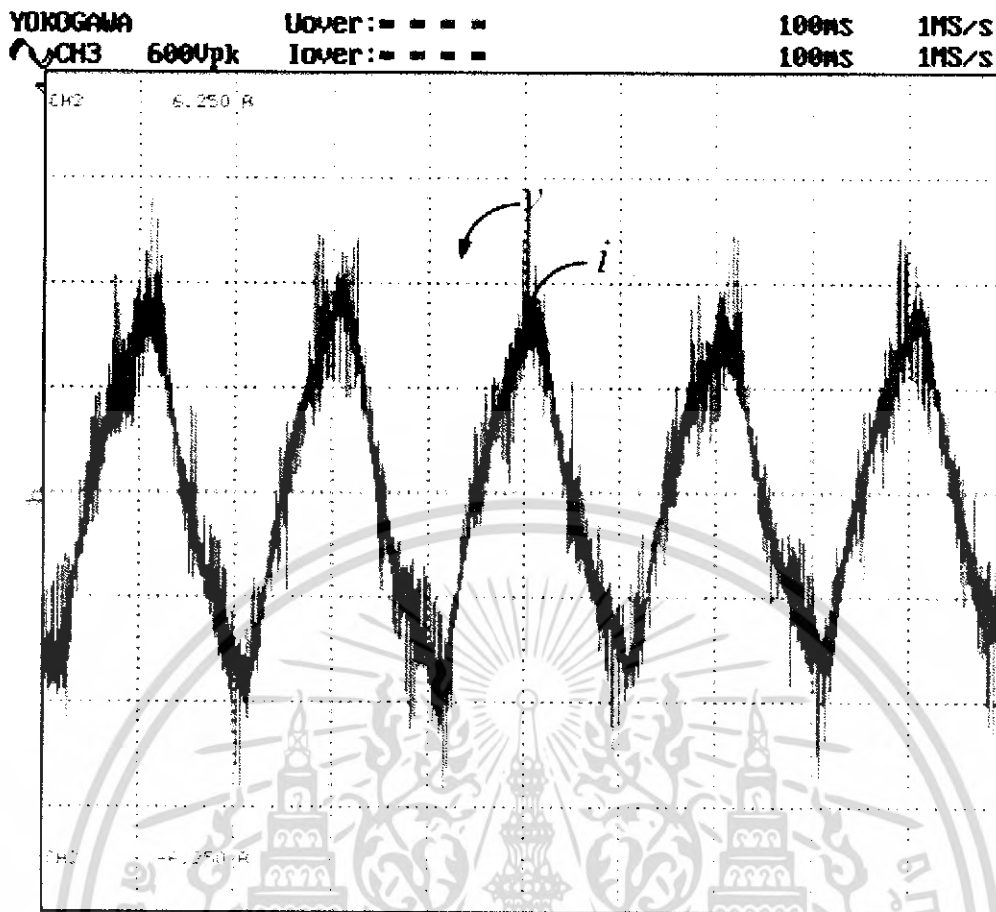


รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสลิปกับกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ  
เมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบสตาร์



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสลิปกับกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ  
เมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบเดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากการทดลองที่ระดับ 250 V , 1.68 A  
และมุมเฟส  $\phi = 115$  องศา ความถี่ 50 Hz

### 6.5 สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายพลังงานผ่านอินเวอร์เตอร์

จากรูปกราฟทั้งสองที่ความถี่ต่ำจะกินกำลังงานได้น้อยลงเป็นอัตราส่วนตามความถี่นั้น ซึ่งเป็นผลมาจากอินเวอร์เตอร์ปรับลดแรงดันตามอัตราส่วน  $V/f$  จึงทำให้การสร้างกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้น้อยลงตามระดับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่ความถี่ตั้งแต่ 50 – 90 Hz การกินกำลังงานจะมีค่าใกล้เคียงกันสังเกตได้จากกราฟซึ่งเส้นกราฟจะทับกันที่เป็นเช่นนี้เพราะอินเวอร์เตอร์จะทำงานในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ เมื่อเปรียบเทียบที่ความถี่เดียวกันถ้าสลิปติดลบมากขึ้นหรือความเร็วรอบโรเตอร์มากกว่าสนามแม่เหล็กหมุนมากขึ้นกำลังไฟฟ้าที่คืนได้จะสูงขึ้นด้วยในส่วนของมุมเฟสเมื่อเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสจะล่าหลังแรงดันเป็นมุมมากกว่า 90 องศาและจะล่าหลังมากขึ้นเมื่อความเร็วรอบโรเตอร์มากขึ้นกว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนหรือค่าสลิปติดลบมากขึ้น ในส่วนของรูปคลื่นแรงดันและกระแสมีลักษณะเป็นรูปไซน์ที่มีฮาร์มอนิกส์ปะปนเยอะมากทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์และผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากร่องสลิตและขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.6 การทดลองที่คืนพลังงานสูงสุดทุกความถี่

แสดงให้เห็นว่าการคืนพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยควบคุมจากอินเวอร์เตอร์ โดยจะคืนกำลังงานที่พิกัดกระแสซึ่งจะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ในที่นี้จะปรับความถี่ทุก ๆ 1 Hz และมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ สตาร์ และแบบเดลต้า

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองคืนพลังงานสูงสุดทุกความถี่โดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์

$f$	$N_s$	$N_r$	$S$	$V_v$	$I_v$	$\theta_v$	$P_{\phi}$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	loss (Inverter)
10	300	413	-0.376	63.48	1.99	103.65	-89.43	254	0.24	60.96	28.47
11	330	452	-0.369	64.33	1.98	106.56	-108.91	255	0.3	76.5	32.41
12	360	487	-0.352	65.44	2.07	105.37	-107.71	255	0.35	89.25	18.46
13	390	521	-0.335	67.52	2.08	106.48	-119.52	256	0.41	104.96	14.56
14	420	556	-0.323	69.26	2.08	107.34	-128.81	257	0.45	115.65	13.16
15	450	588	-0.306	70.75	2.08	108.27	-138.4	257	0.49	125.93	12.47
16	480	622	-0.295	72.91	2.05	109.36	-148.64	258	0.53	136.74	11.9
17	510	658	-0.290	75.47	2.06	110.25	-161.43	258	0.59	152.22	9.21
18	540	696	-0.288	80.2	1.98	111.16	-171.96	259	0.64	165.76	6.2
19	570	730	-0.280	82.31	2.08	112.12	-193.4	259	0.7	181.3	12.1
20	600	764	-0.273	85.6	2.01	113.3	-204.17	260	0.73	189.8	14.37
21	630	796	-0.263	86.95	2.01	114.72	-219.26	260	0.77	200.2	19.06
22	660	831	-0.259	87.4	2.08	114.58	-226.86	261	0.81	211.41	15.45
23	690	863	-0.250	86.75	2.01	117.29	-239.84	261	0.85	221.85	17.99
24	720	898	-0.247	89.82	2.01	118.39	-257.52	262	0.9	235.8	21.72
25	750	929	-0.238	91.11	1.99	118.45	-259.12	262	0.94	246.28	12.84
26	780	964	-0.235	93.44	2.01	118.97	-272.9	263	0.99	260.37	12.53
27	810	993	-0.225	94.6	2.01	118.96	-276.21	263	1	263	13.21
28	840	1028	-0.223	95.82	1.99	119.97	-285.76	264	1.05	277.2	8.56
29	870	1060	-0.218	96.61	2.04	119.96	-295.27	264	1.09	287.76	7.51
30	900	1091	-0.212	97.59	2.09	120.26	-308.35	264	1.12	295.68	12.67
31	930	1123	-0.207	98.95	2	123.06	-323.87	264	1.15	303.6	20.27
32	960	1159	-0.207	99.88	2.02	124.41	-342.05	265	1.21	320.65	21.4
33	990	1189	-0.201	103.15	1.97	125.23	-351.66	265	1.24	328.6	23.06
34	1020	1220	-0.196	106.83	1.98	125.59	-369.31	265	1.28	339.2	30.11
35	1050	1253	-0.193	107.51	2	126.43	-383.06	265	1.31	347.15	35.91
36	1080	1287	-0.191	107.07	2.07	126.6	-396.43	266	1.37	364.42	32.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37	1110	1322	-0.191	109.43	2.04	127.28	-405.65	266	1.42	377.72	27.93
38	1140	1353	-0.186	111.4	1.98	127.89	-406.39	266	1.46	388.36	18.03
39	1170	1387	-0.185	114.03	1.99	128.57	-424.43	267	1.51	403.17	21.26
40	1200	1422	-0.185	116.02	2.02	129.86	-450.61	267	1.57	419.19	31.42
41	1230	1454	-0.182	118.32	2	130.63	-462.28	267	1.6	427.2	35.08
42	1260	1484	-0.177	120.2	1.99	131.66	-476.99	268	1.64	439.52	37.47
43	1290	1516	-0.175	120.32	2.02	131.87	-486.66	268	1.68	450.24	36.42
44	1320	1547	-0.172	122.9	1.99	131.98	-490.76	269	1.71	459.99	30.77
45	1350	1579	-0.169	123.19	1.98	132.47	-494.08	269	1.75	470.75	23.33
46	1380	1610	-0.166	125.16	2.01	132.54	-510.27	270	1.79	483.3	26.97
47	1410	1642	-0.164	124.82	2.07	133.28	-531.4	270	1.83	494.1	37.3
48	1440	1674	-0.162	126.81	2.05	133.57	-537.53	270	1.87	504.9	32.63
49	1470	1707	-0.161	126.53	2.03	134.72	-542.2	271	1.92	520.32	21.88
50	1500	1742	-0.161	129.39	2.02	135.04	-554.83	272	1.97	535.84	18.99
51	1530	1779	-0.162	129.87	1.99	135.68	-554.7	272	1.96	533.12	21.58
52	1560	1814	-0.162	129.92	2.01	135.03	-554.25	272	1.96	533.12	21.13
53	1590	1850	-0.163	130.49	1.98	135.83	-555.97	273	1.95	532.35	23.62
54	1620	1885	-0.163	130.67	2.02	134.1	-551.07	273	1.95	532.35	18.72
55	1650	1924	-0.166	130.68	2.04	134.4	-559.56	274	1.96	537.04	22.52
56	1680	1960	-0.166	131.65	2	135.41	-562.53	274	1.96	537.04	25.49
57	1710	1997	-0.167	131.74	1.99	135.48	-560.77	274	1.96	537.04	23.73
58	1740	2032	-0.167	131.26	2.01	135.09	-560.55	274	1.94	531.56	28.99
59	1770	2070	-0.169	130.52	2.04	134.01	-554.98	274	1.95	534.3	20.68
60	1800	2108	-0.171	130.27	2.03	134.56	-556.65	275	1.95	536.25	20.4
61	1830	2145	-0.172	130	2.05	132.9	-544.24	275	1.95	536.25	7.99
62	1860	2180	-0.172	129.15	2.07	132.6	-542.87	275	1.93	530.75	12.12
63	1890	2215	-0.172	129.4	2.07	132.71	-545.05	275	1.93	530.75	14.3
64	1920	2254	-0.174	130.29	2.03	133.12	-542.36	275	1.92	528	14.36
65	1950	2289	-0.173	129.33	2.04	133.63	-546.13	275	1.9	522.5	23.63
66	1980	2326	-0.174	128.22	2.05	133.08	-538.6	275	1.9	522.5	16.1
67	2010	2364	-0.176	127.95	2.09	132.7	-544.05	275	1.9	522.5	21.55
68	2040	2396	-0.174	128.75	2.09	132.71	-547.56	275	1.87	514.25	33.31
69	2070	2430	-0.173	130.79	1.99	134.05	-542.89	275	1.87	514.25	28.64
70	2100	2466	-0.174	130.81	1.98	133.98	-539.56	275	1.87	514.25	25.31
71	2130	2512	-0.179	130.33	2.05	132.57	-542.23	275	1.87	514.25	27.98
72	2160	2546	-0.178	130.1	2.02	132.31	-530.71	275	1.85	508.75	21.96
73	2190	2592	-0.183	129.83	1.99	132.96	-528.21	275	1.84	506	22.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

74	2220	2622	-0.181	129.78	2	132.96	-530.66	276	1.84	507.84	22.82
75	2250	2661	-0.182	129.62	2.01	132.98	-532.86	276	1.84	507.84	25.02
76	2280	2696	-0.182	129.95	2.06	131.54	-532.56	276	1.82	502.32	30.24
77	2310	2732	-0.182	130.19	2	131.64	-519.03	276	1.8	496.8	22.23
78	2340	2767	-0.182	131.3	2.02	131.27	-524.84	276	1.8	496.8	28.04
79	2370	2803	-0.182	129.89	2	131.08	-512.11	276	1.78	491.28	20.83
80	2400	2844	-0.185	128.79	2.02	130.84	-510.39	276	1.78	491.28	19.11
81	2430	2882	-0.186	130.27	2.04	130.04	-512.89	276	1.77	488.52	24.37
82	2460	2923	-0.188	130.8	1.99	130.68	-509	276	1.77	488.52	20.48
83	2490	2960	-0.188	130.11	2.03	129.51	-504.12	276	1.76	485.76	18.36
84	2520	3000	-0.190	130.25	2.06	128.23	-498.12	276	1.75	483	15.12
85	2550	3038	-0.191	129.58	2.08	128.01	-497.92	276	1.73	477.48	20.44

ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองคืนพลังงานสูงสุดทุกความถี่โดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเดลต้า

$f$	$N_s$	$N_r$	$S$	$V_u$	$I_v$	$\theta_u$	$P_s \phi$	$V_{dc}$	$I_{dc}$	$P_{dc}$	loss (inverter)
10	300	367	-0.223	43.35	2	102.75	-57.4	246.1	0.12	29.53	27.87
11	330	400	-0.212	47.1	2.06	106.54	-82.87	246.8	0.21	51.83	31.04
12	360	429	-0.191	51.19	2	108.4	-96.95	247.4	0.27	66.8	30.15
13	390	464	-0.189	55.19	2.09	111.06	-124.35	248	0.37	91.76	32.59
14	420	498	-0.185	59.06	2.05	113.1	-142.64	249.2	0.46	114.63	28.01
15	450	529	-0.175	62.93	2.02	115.1	-161.77	250.3	0.53	132.66	29.11
16	480	561	-0.168	66.83	2.01	116.57	-180.34	250.7	0.61	152.93	27.41
17	510	593	-0.162	70.67	2.01	117.9	-199.3	251.6	0.69	173.6	25.7
18	540	623	-0.153	74.78	2.05	119.26	-224.79	252.7	0.75	189.53	35.26
19	570	657	-0.152	78.58	2.08	120.58	-248.86	253.7	0.84	213.11	35.75
20	600	688	-0.146	82.29	2.03	121.58	-261.93	254.1	0.9	228.69	33.24
21	630	719	-0.141	86.16	2.06	122.87	-288.43	254.9	0.98	249.8	38.63
22	660	751	-0.137	89.99	2.04	123.99	-307.74	255.6	1.05	268.38	39.36
23	690	782	-0.133	93.7	2.03	124.87	-326.88	256	1.12	286.72	40.16
24	720	816	-0.133	97.57	2.04	125.95	-350.22	256.7	1.23	315.74	34.48
25	750	851	-0.134	101.38	2.04	126.41	-368.63	257.2	1.34	344.65	23.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

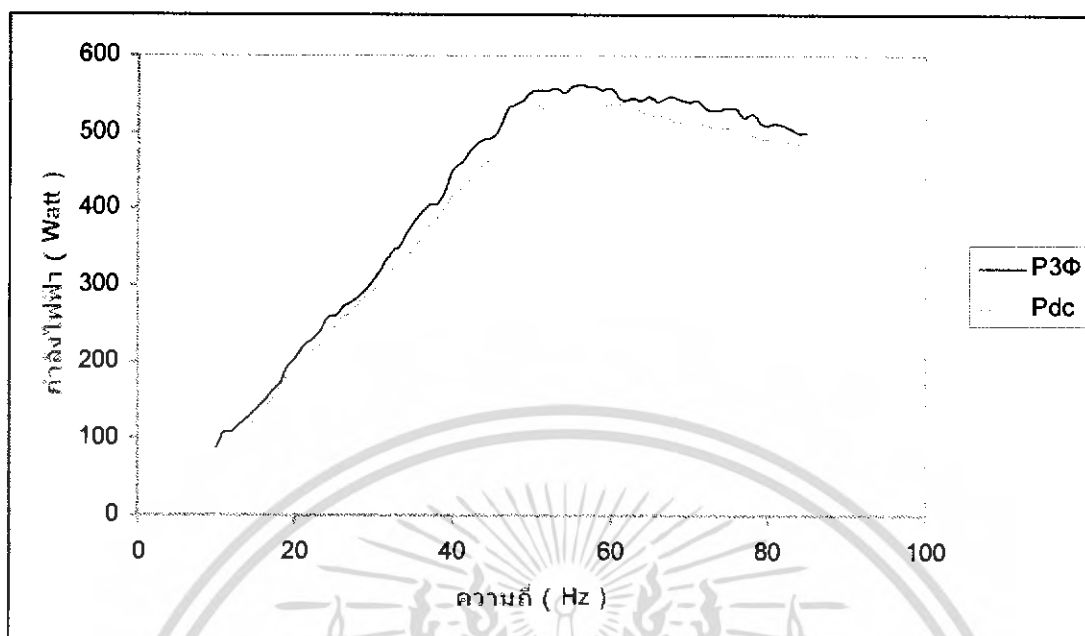
26	780	881	-0.129	105.07	2.03	127.17	-385.84	257.7	1.4	360.78	25.06
27	810	912	-0.125	108.82	2.03	127.69	-404.18	258.1	1.47	379.41	24.77
28	840	943	-0.122	112.63	2.06	128.35	-431.67	258.5	1.53	395.51	36.16
29	870	967	-0.111	116.15	2	128.78	-436.49	258.8	1.6	414.08	22.41
30	900	1005	-0.116	119.94	2.07	129.77	-476.01	259.1	1.66	430.11	45.91
31	930	1036	-0.114	123.75	2.04	130.55	-491.64	259.4	1.74	451.36	40.28
32	960	1067	-0.111	127.4	2.09	131.29	-526.09	259.7	1.8	467.46	58.63
33	990	1098	-0.109	131.09	2.06	131.17	-533.31	259.9	1.88	488.61	44.7
34	1020	1129	-0.106	134.74	2.06	131.64	-552.74	260.2	1.96	509.99	42.75
35	1050	1157	-0.101	138.4	2.02	131.85	-559.01	260.4	1.98	515.59	43.42
36	1080	1190	-0.101	141.43	2.01	132.27	-574.49	260.6	2.02	526.41	48.07
37	1110	1223	-0.101	146.03	2.06	132.75	-612.3	261.1	2.14	558.75	53.54
38	1140	1250	-0.096	149.49	2.02	132.88	-615.22	261.14	2.16	564.06	51.16
39	1170	1282	-0.095	153.11	2.02	133.36	-637.36	261.2	2.24	585.09	52.27
40	1200	1316	-0.096	157.15	2.07	133.72	-673.18	261.16	2.38	621.56	51.62
41	1230	1345	-0.093	160.66	2.02	133.99	-676.2	262	2.38	623.56	52.64
42	1260	1375	-0.091	169.52	2.02	134.06	-713.68	262.2	2.44	639.77	73.91
43	1290	1406	-0.089	168.18	2.02	137.43	-750.94	262.5	2.52	661.5	89.44
44	1320	1439	-0.090	172.98	2.06	134.63	-749.19	262.7	2.65	696.16	53.03
45	1350	1471	-0.089	176.78	2.06	134.93	-769.7	264.5	2.72	719.44	50.26
46	1380	1498	-0.085	180.47	2.05	134.92	-781.8	265	2.75	728.75	53.05
47	1410	1529	-0.084	184.28	2.01	134.91	-784.51	265.2	2.78	737.26	47.25
48	1440	1561	-0.084	188.3	2.01	135.33	-808.3	265.5	2.85	756.68	51.62
49	1470	1591	-0.082	191.41	2.01	135.45	-824.17	266	2.92	776.72	47.45
50	1500	1625	-0.083	193.72	2.01	136.13	-841.28	266.3	3.05	812.22	29.07
51	1530	1658	-0.083	193.72	2.01	136.13	-841.28	266.9	3.15	840.74	0.55
52	1560	1697	-0.087	194.9	2.09	138.04	-908.71	267.1	3.25	868.08	40.64
53	1590	1730	-0.088	194.44	2.04	138.34	-889.9	268	3.25	871	18.9
54	1620	1764	-0.088	195.39	2.04	138.39	-894.95	268	3.29	881.72	13.23
55	1650	1795	-0.087	195.13	2.03	139.59	-904.39	268.2	3.2	858.24	46.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

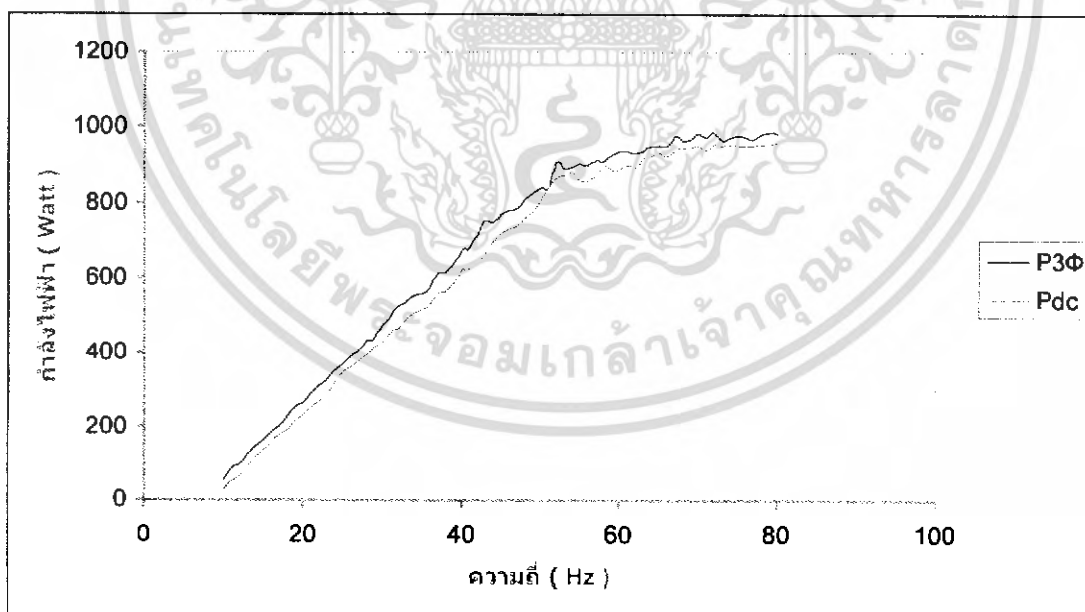
56	1680	1827	-0.087	195.24	2	140.09	-899.46	268	3.2	857.6	41.86
57	1710	1864	-0.090	195.33	2.02	140.56	-914.16	268.4	3.25	872.3	41.86
58	1740	1899	-0.091	195.99	2	140.74	-910.51	268.7	3.35	900.15	10.36
59	1770	1929	-0.089	196.05	2.02	141.29	-928.91	268.7	3.3	886.71	42.2
60	1800	1963	-0.090	196.21	2.03	141.66	-937.23	269	3.3	887.7	49.53
61	1830	1998	-0.091	196.24	2.02	142.12	-938.18	269.2	3.35	901.82	36.36
62	1860	2029	-0.090	196.37	2	142.4	-933.49	269.3	3.32	894.08	39.42
63	1890	2066	-0.093	196.53	2	142.72	-938.26	269.7	3.4	916.98	21.28
64	1920	2100	-0.093	197.09	2.02	142.93	-952.98	269.9	3.42	923.06	29.93
65	1950	2134	-0.094	196.93	2.04	142.15	-951.66	270.1	3.45	931.85	19.81
66	1980	2165	-0.093	197	2.01	143.25	-951.82	270.2	3.41	921.38	30.44
67	2010	2203	-0.096	197.1	2.05	143.72	-977.17	270.6	3.48	941.69	35.48
68	2040	2233	-0.094	197.52	2.02	143.53	-962.57	270.9	3.49	945.44	17.13
69	2070	2270	-0.096	197.6	2.02	143.82	-967.5	270.9	3.5	948.15	19.35
70	2100	2305	-0.097	198.29	2.05	143.84	-984.58	271	3.51	951.21	33.37
71	2130	2336	-0.096	197.82	2.05	143.08	-972.64	271.2	3.48	943.78	28.86
72	2160	2373	-0.098	198.17	2.05	144.27	-989.35	271.6	3.52	956.03	33.32
73	2190	2405	-0.098	198.73	2	144.03	-965.02	271.6	3.5	950.6	14.42
74	2220	2438	-0.098	198.48	2.01	144.51	-974.48	271.9	3.51	954.37	20.11
75	2250	2470	-0.097	197.97	2.02	144.73	-979.48	271.9	3.49	948.93	30.55
76	2280	2504	-0.098	199.36	2.02	143.83	-975.28	272.2	3.49	949.98	25.3
77	2310	2539	-0.099	199.2	2.01	143.96	-971.28	272.3	3.5	953.05	18.23
78	2340	2572	-0.099	199.51	2.03	143.89	-981.6	272.6	3.5	954.1	27.5
79	2370	2606	-0.099	199.08	2.04	144.37	-988.34	272.9	3.5	955.15	33.19
80	2400	2641	-0.100	198.91	2.02	144.72	-982.55	272.9	3.51	957.88	24.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาผลการทดลองมาทำการแสดงเป็นกราฟจะดังรูปดังต่อไปนี้

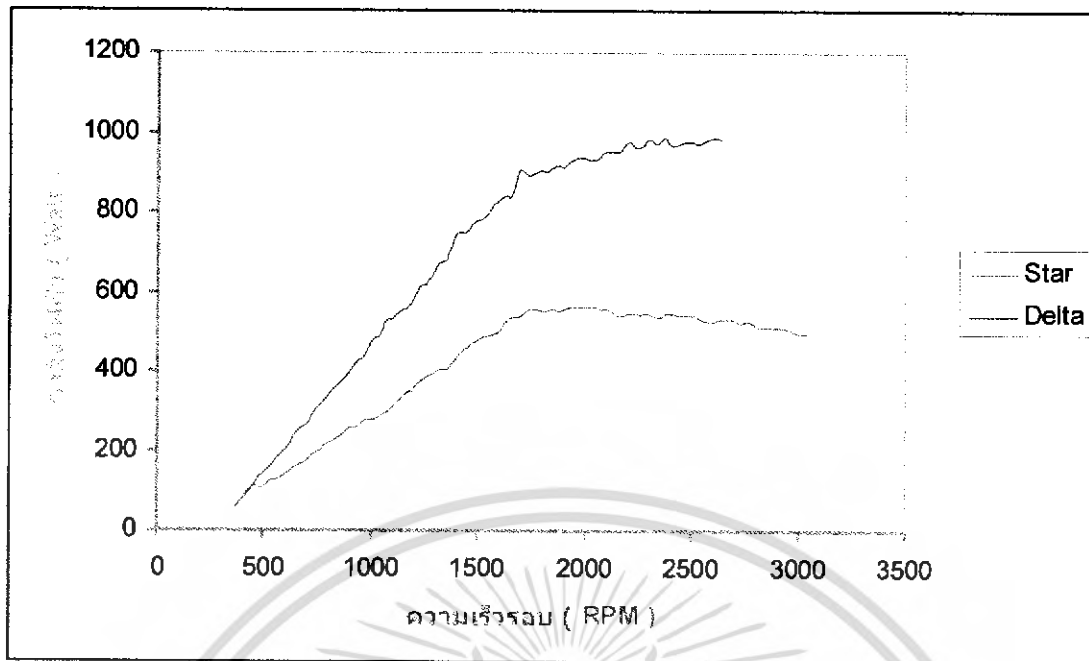


รูปที่ 6.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถคืนได้ที่พิกัดกระแสกับ ความถี่ระบบเมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบสตาร์



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถคืนได้ที่พิกัดกระแสกับ ความถี่ระบบเมื่อเครื่องกำเนิดต่อแบบเดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแบบเดลต้าและแบบสตาร์

### 6.7 สรุปผลการทดลองคืนพลังงานสูงสุดทุกความถี่

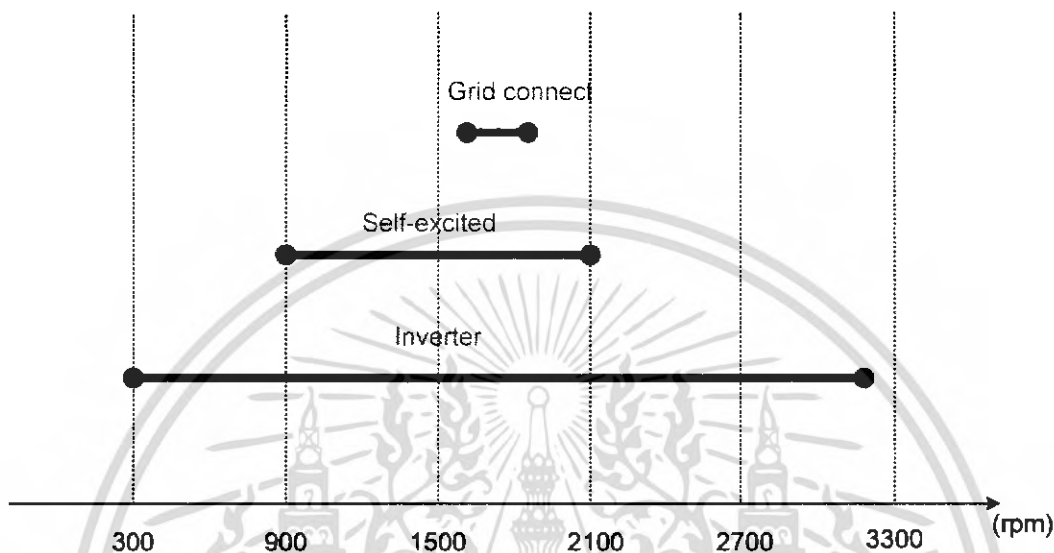
จากกราฟการคืนพลังงานสูงสุดในรูปที่ 6.9 และ 6.10 ในช่วงความเร็วค่าต่ำๆจนถึงความเร็วที่พิกัดของมอเตอร์ กำลังงานที่คืนได้จะเป็นอัตราส่วนตาม  $V/f$  ตามคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์และหลังจากความเร็วพิกัดกำลังงานที่คืนได้จะมีค่าค่อนข้างคงที่โดยการต่อเครื่องกำเนิดแบบเดลต้ากำลังงานที่คืนได้จะไม่ลดลงแต่การต่อเครื่องกำเนิดแบบสตาร์กำลังงานที่คืนได้จะตกลงเล็กน้อย และจากรูปกราฟจะเห็นได้ว่ากำลังงานที่คืนให้เบดเดอร์จริงๆจะต่ำกว่าที่เครื่องกำเนิดผลิตได้เล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียภายในอินเวอร์เตอร์ด้วย

จากกราฟรูปที่ 6.11 เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผลิตได้เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสตาร์และแบบเดลต้าจะเห็นได้ว่าแบบเดลต้าจะผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าแบบสตาร์ทุกๆความถี่หรือทุก ๆ ความเร็วรอบเป็น  $\sqrt{3}$  เท่าเนื่องจากเราให้กระแสแต่ละเฟสไม่เกินพิกัดในที่นี้คือ 2 A ในส่วนของแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแบบเดลต้า  $V_{Phase}$  จะเท่ากับ  $V_{line}$  แต่แบบสตาร์  $V_{Phase}$  จะน้อยกว่า  $V_{line}$  เป็น  $\sqrt{3}$  เท่าดังนั้นในการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้งานจริงควรต่อแบบเดลต้า

## บทที่ 7

### สรุป

#### 7.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 7.1 ย่านการคืนกำลังไฟฟ้าของการต่อในแต่ละแบบ

7.1.1 *ย่านการคืนกำลังไฟฟ้า* จากภาพประกอบจะเห็นได้ว่าแบบต่อกับระบบโดยตรงคืนกำลังไฟฟ้าได้ในช่วงประมาณ 1,550 rpm จนถึงประมาณ 1,800 rpm ทั้งนี้เนื่องจากต้องให้ความเร็วโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อยจึงจะแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยที่เราไม่สามารถปรับความถี่ได้ และในแบบ self-excited นั้นจะคืนกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 900 rpm จนถึงประมาณ 2,000 rpm โดยต้องปรับค่าคาปาซิเตอร์ให้เหมาะสมกับความเร็วโรเตอร์โดยความถี่ระบบขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์และขนาดตัวเก็บประจุ ส่วนแบบ Inverter สามารถคืนกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 300 rpm จนถึง 3,000 rpm ทั้งนี้ต้องปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับความเร็วโรเตอร์ด้วยเพื่อที่จะคืนกำลังไฟฟ้าสูงสุดทุกความเร็วรอบ โดยกำลังไฟฟ้าที่คืนได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละแบบ

7.1.2 *ความยากง่ายในการควบคุม* แบบต่อกับระบบโดยตรงเพียงแค่ให้ความเร็วรอบโรเตอร์มากกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนก็เพียงพอแล้วแต่ต้องมีการควบคุมไม่ให้ความเร็วสูงเกินไปเพราะจะทำให้กระแสเกินพิกัด

แบบกระตุ้นด้วยตัวเองถ้าหากจะควบคุมความถี่กับแรงดันให้คงที่และเหมาะสมกับโหลดทำได้ค่อนข้างยากดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงจะต้องแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

โดยผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ก่อนแล้วต่อผ่านอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลดซึ่งจะควบคุมความถี่และแรงดันให้คงที่ได้ และตัวเก็บประจุต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับความเร็วโรเตอร์ด้วย

แบบกระตุ้นแยกจะต้องมีการออกแบบวงจรควบคุมความถี่ให้สัมพันธ์กับความเร็วโรเตอร์ซึ่งมีอยู่หลายวิธีแล้วแต่ความถนัดของผู้ออกแบบแต่ละคนแต่ต้องไม่ลืมว่ากระแสไม่ควรงเกินพิกัด

**7.1.3 ราคาของแต่ละระบบ** ในการประยุกต์ใช้งานจริงต่อกับระบบโดยตรงจะทำได้ง่ายที่สุดและมีราคาถูกที่สุด ส่วนแบบ self-excited ถ้าหากจ่ายโหลดโดยตรงจะทำให้แรงดันตกและความถี่ก็ขึ้นอยู่กับความเร็วต้นกำลังซึ่งจะไม่ได้ 50 Hz พอติจำเป็นที่จะต้องมีการเก็บพลังงานในแบตเตอรี่ก่อนแล้วใช้อินเวอร์เตอร์มาต่อเพื่อจ่ายโหลดอีกทีหนึ่งดังนั้นราคาอุปกรณ์ที่จะใช้มีมากขึ้นราคาก็สูงขึ้นสุดท้ายแบบอินเวอร์เตอร์ใช้อุปกรณ์มากที่สุดและมีราคาสูงที่สุด

**7.1.4 การนำไปใช้งานจริง** แบบต่อกับระบบโดยตรงจะมีข้อจำกัดในการใช้งานคือใช้ได้ในพื้นที่ที่มีไฟฟ้าจากการไฟฟ้าครอบคลุมถึงเท่านั้น ส่วนแบบ self-excited กับแบบ Separated สามารถใช้ในพื้นที่ที่ห่างไกลซึ่งไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึงได้

**7.1.5 การคืนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ** แบบ grid connect ทำได้ง่ายไม่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากนักไม่มีฮาร์มอนิกส์รบกวนระบบแต่ในแบบ self-excited กับแบบ Separated นั้นจะต้องต่อผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อจะรักษาระดับแรงดันกับความถี่ให้คงที่ก่อนที่จะต่อร่วมกับระบบได้และจะเกิดฮาร์มอนิกส์รบกวนระบบเนื่องจากรูปคลื่นที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ไม่เป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์

ตารางที่ 7.1 สรุปการเปรียบเทียบการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแบบต่างๆ

เรื่อง	Grid	Self-Excited	Inverter
ย่านการคืนกำลังไฟฟ้า	แคบ	ปานกลาง	กว้าง
ความยากง่ายในการควบคุม	ง่าย	ยาก	ยาก
ราคา	ถูก	แพง	แพงที่สุด
การนำไปใช้งานจริง	เฉพาะพื้นที่ไฟฟ้าเข้าถึง	ได้ทุกที่	ได้ทุกที่
การคืนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ	มีฮาร์มอนิกส์รบกวนน้อย	มีฮาร์มอนิกส์รบกวนมาก	มีฮาร์มอนิกส์รบกวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นแปะใช้ระบบเหล่านี้การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ

ข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีดังต่อไปนี้

- โครงสร้างมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อนโดยเฉพาะที่เป็นโรเตอร์แบบกรงกระรอก
- มีราคาถูกกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่นที่พิกัดเดียวกัน
- การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยากมากนัก
- ในกรณีโรเตอร์กรงกระรอกซึ่งไม่มีแปรงถ่าน จะทำให้ลดความฝืด (friction losses) ลงไปได้
- ต้นกำลังไม่จำเป็นต้องหมุนด้วยความเร็วคงที่เพียงแต่ให้มีมากกว่าสนามแม่เหล็กก็สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

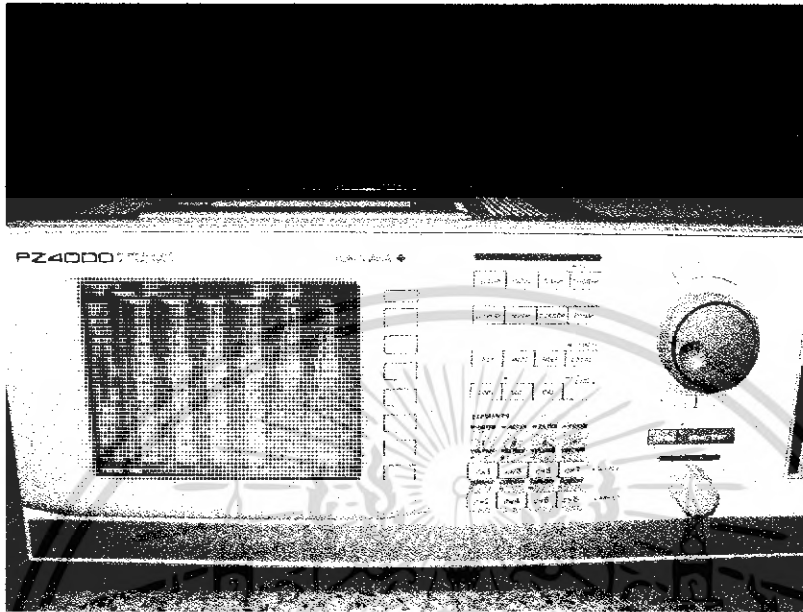
## เอกสารอ้างอิง

- [1] กนกภูมิ เรียงใจดีและคณะ, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ปรินทิพนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [2] เกียรติขจร วรปรัชญาและคณะ, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ปรินทิพนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [3] พันรบ ชินบุตรและคณะ, การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ปรินทิพนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [4] กิตติ ขจรประสิทธิ์และคณะ, การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง, ปรินทิพนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [5] เซาวนันท ชื่นจิตรและคณะ, การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง, ปรินทิพนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [6] ทรงฤทธิ์ ศิริวัฒน์, เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ 2, กรุงเทพมหานคร, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2540.
- [7] พุทธพร เสวตสกุลานนท์, การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุอย่างง่ายสำหรับอินดักชันเจนเนอเรเตอร์แบบกระตุ้นภายในตัวเอง, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่26, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546, หน้า 35-38.
- [8] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, เอกสารประกอบการเรียนวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] วีระเชษฐ ชันเงิน, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพมหานคร: หจก. วี.เจ. ฟรินดิง, 2547
- [10] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, เอกสารประกอบการเรียน**Electrical Power Engineering Laboratory II**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546, Lab.Induction Motor
- [11] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans, **Electric Machinery**, Fourth Edition, McGraw-Hill, 1983, pp.409-434.
- [12]. Shepherd, A. H. Morton, L. F. Spence, higher **Electrical Engineering**, Second Edition, Longman Scientific & Technical, 1970, pp.435-445.
- [13] ข้อมูลอีกบางส่วนสืบค้นจากอินเทอร์เน็ต

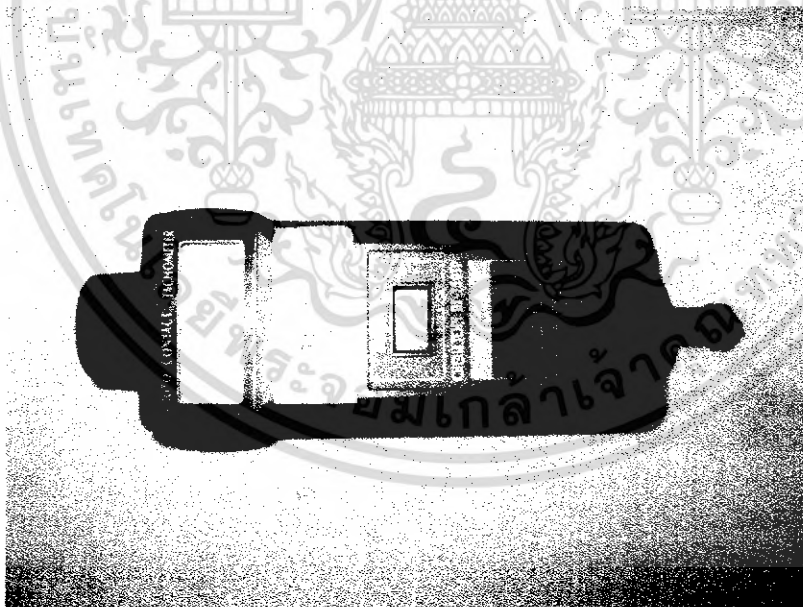
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

ก.รูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

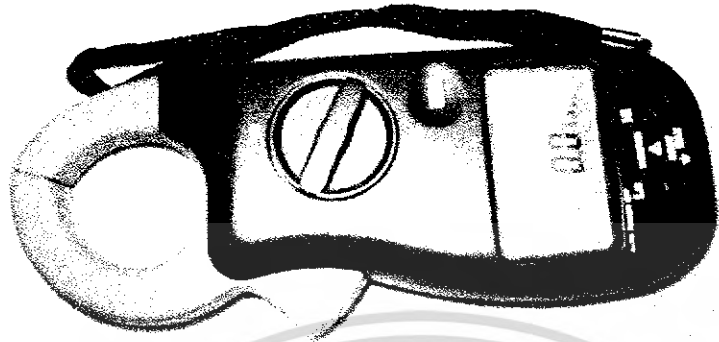


**POWER ANALYZER METER**

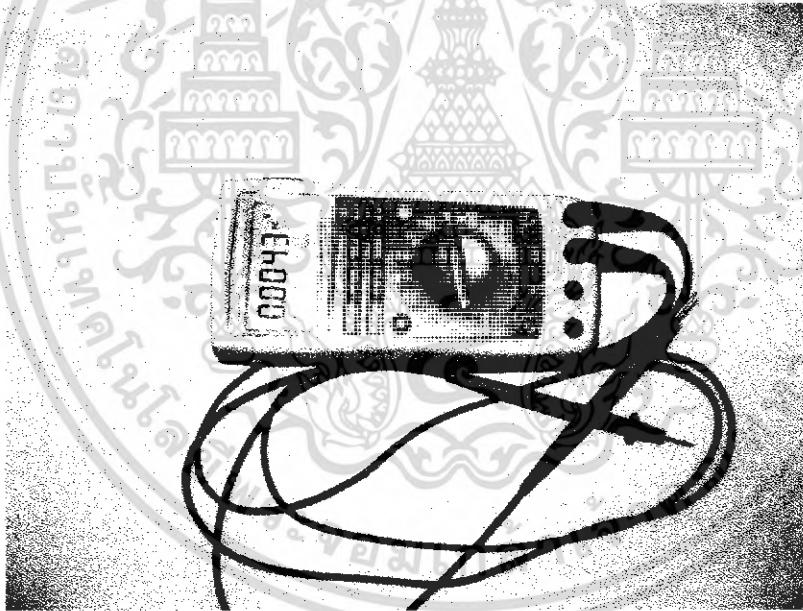


**PHOTO/CONTACT TACHOMETER**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

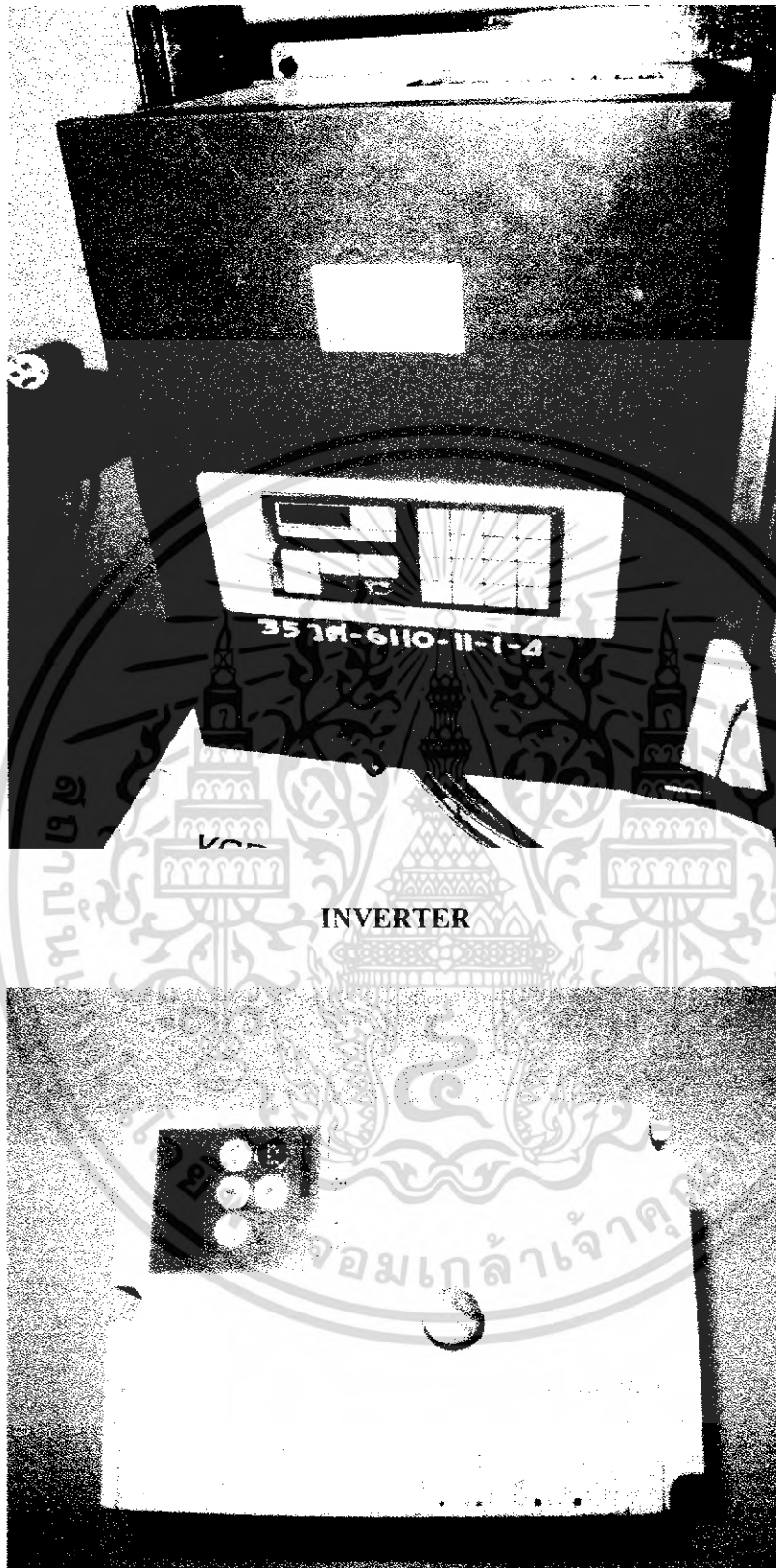


**DIGITAL CLAMP-ON METER**



**DIGITAL MULTIMETER**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

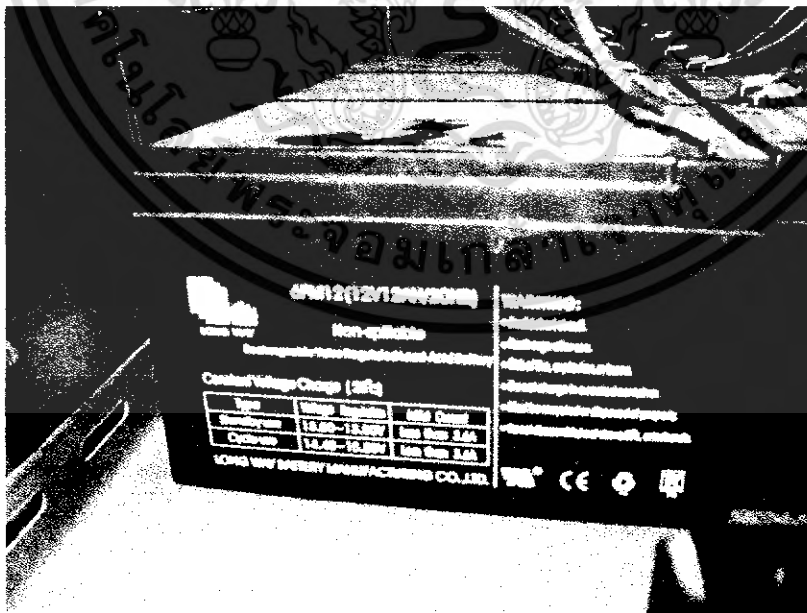


### INVERTER ที่ดัดแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

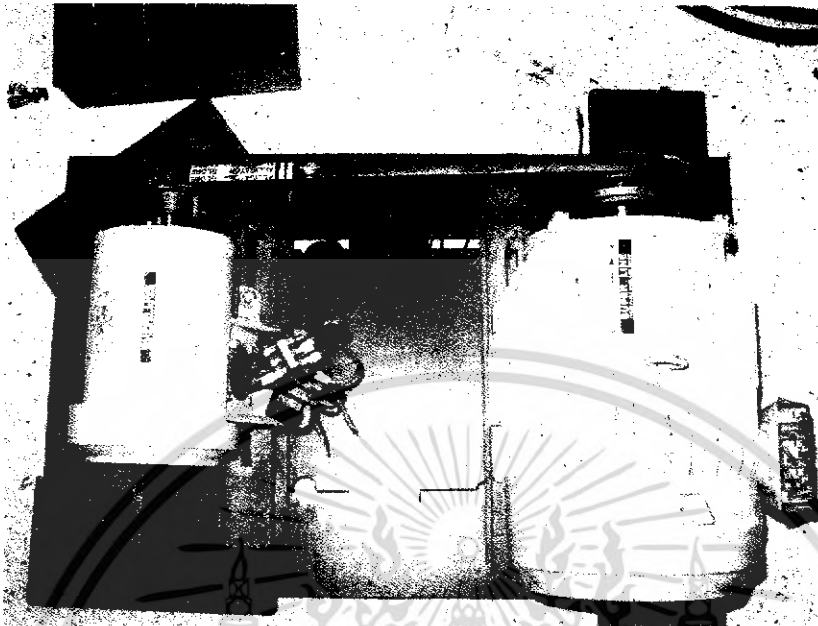


VARIAC

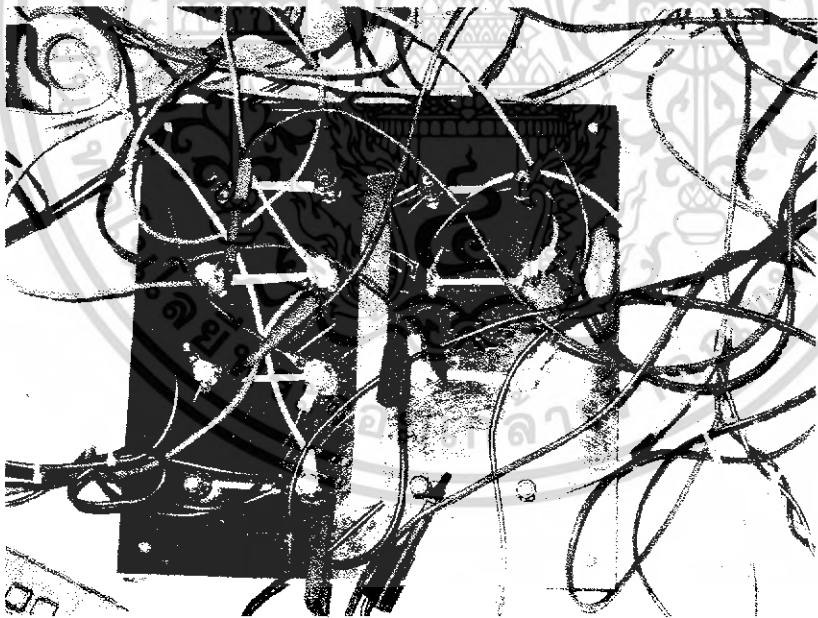


BATTERY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



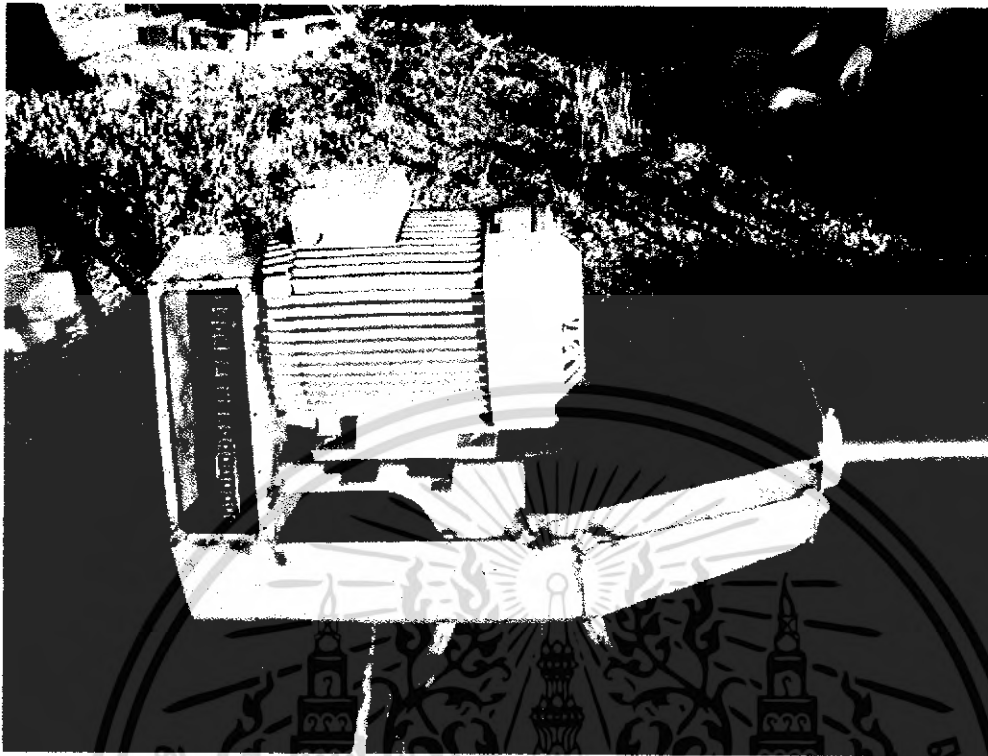
ชุดทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ชุดพักสายและขั้วต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.รูปตัวอย่างการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับกังหันลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้