

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเอง

A STUDY OF SELF-EXCITED THREE-PHASE INDUCTION GENERATORS



T104100



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104100
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเอง
A STUDY OF SELF-EXCITED THREE-PHASE INDUCTION GENERATORS

โดย



รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเอง

ผู้จัดทำ



1. นายกนก ยืนยง
2. นายณัฐพงศ์ สารทรัพย์
3. นายดิเรก ชีระกุลพิศุทธิ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.ชัชวตม์ นัตอรุทัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเอง

นาย กนก ยืนยง
นายณัฐพงศ์ สารทรัพย์
นายดิเรก วีระกุลพิศุทธิ์
รศ.ดร.ชัชวาลย์ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตนเอง (SEIG) โดยในขั้นต้นนั้นจะเริ่มทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้าก่อน จากนั้นจึงทำการทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าทั้งชนิดความต้านทานล้วนและความต้านทานปนความเหนี่ยวนำเพื่อศึกษาปรากฏการณ์แรงดันตกที่เกิดขึ้น โดยการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 สภาวะคือสภาวะความถี่ทางไฟฟ้าคงที่และความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์คงที่ ในขั้นตอนสุดท้ายจะกล่าวถึงแนวทางในการแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วตก โดยการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อปรับปรุงค่าโวลเตจเรกูเลชันให้ดีขึ้น

A Study of Self-Excited Three-phase Induction Generators

Kanok Yunyong

Nuttapong Sansap

Direk Theerakulpisut

Assoc.Prof.Dr.Chatwut Chat-uthai Advisor

2008

Abstract

This thesis presents a study of three-phase self-excited induction generators which is widely accepted nowadays that it can be used effectively, especially in the field of renewable energy because it is robust and does not require much maintenance. The purposes of the thesis are to study and observe the phenomena of the generator while it is operating at both the no-load and on-load condition. The test began with the no-load condition by connecting the parallel capacitors to the generator's terminals so as to excite the magnetic field for the voltage build up process. When the voltage was completely built up, the test was continued in the on-load condition by connecting a resistive load to its terminal. As the resistive load was connected, the generator lost its terminal voltage level. In order to fix the problem, the authors have suggested two approaches which are called long shunt and short shunt connection. From the test results, it can be concluded that these two approaches can be used to solve this problem as the generator can maintain its terminal voltage level in the range of standard level at the rated power of the generator.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการนี้ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันทรงคุณค่าแก่คณะผู้จัดทำ อีกทั้งคอยให้การช่วยเหลือแนะนำและสนับสนุนการดำเนินโครงการนี้ด้วยดีตลอดมา ตั้งแต่เมื่อเริ่มต้นดำเนินโครงการจนกระทั่งโครงการนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีในที่สุด

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.พิชิต ล้ำยอง ที่ได้เอื้ออำนาจสถานที่การปฏิบัติการแก่คณะผู้จัดทำด้วยดีตลอดมา รวมถึงคำแนะนำต่างๆในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ยังผลให้โครงการนี้สามารถดำเนินการเสร็จสิ้นลงได้ตรงตามเวลาที่กำหนดไว้

ขอขอบพระคุณพี่ วุฒิชัย ที่ได้คอยติดตามดูแลการทำงานอย่างใกล้ชิดตลอดมา รวมถึงคำแนะนำในหลายๆเรื่องที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการ ส่งผลให้การดำเนินโครงการนี้เป็นไปด้วยความเรียบร้อยและปลอดภัย ตั้งแต่เริ่มต้นดำเนินการทดลองในครั้งแรกจนกระทั่งการทดลองในครั้งสุดท้ายได้เสร็จสิ้นลงอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณมารดาและบิดา ที่คอยอบรมสั่งสอนเลี้ยงดูด้วยความรักและความเมตตา ตั้งแต่ครั้งวัยเยาว์จนกระทั่งถึงวันนี้ หากความดีของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้เกิดขึ้น ณ ที่ใด ขอผลแห่งความดีนั้นจงประสพแก่มารดาบิดาของกลุ่มคณะผู้จัดทำและบุคคลผู้มีพระคุณทุกท่าน ด้วยเทอญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญโครงการ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3. ขอบเขตของโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 ทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	4
2.2.1 ส่วนอยู่กับที่ (stator).....	4
2.2.2 ส่วนหมุน (rotor).....	5
2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	6
2.3.1 สลิป (slip).....	7
2.3.2 การเขียนวงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	8
2.4 กำลังในส่วนต่างๆและการสูญเสีย (power flow diagram and losses).....	11
2.5 ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	13
2.6 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	13
2.7 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	15
2.7.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง (grid-connected Induction generator).....	15
2.7.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แยกจากระบบไฟฟ้ากำลัง (isolated induction generator).....	16
2.7.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยก (separate-excited induction generator).....	16
2.7.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง (self-excited Induction generator).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 กำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง.....	22
2.8.1 ความสูญเสียทางไฟฟ้า (power of loss).....	22
2.8.1.1 ความสูญเสียที่ของขดลวดที่สเตเตอร์ ($P_{cu,s}$).....	22
2.8.1.2 ความสูญเสียของขดลวดที่โรเตอร์ ($P_{cu,r}$).....	23
2.8.1.3 ความสูญเสียที่ของแกนเหล็กที่สเตเตอร์ (core loss).....	23
2.8.1.4 ความสูญเสียทางกล ($P_{f\&w}$).....	24
2.8.2 กำลังงานไฟฟ้าด้านออก (output power).....	24
2.8.3 กำลังงานไฟฟ้าด้านเข้า (input power).....	24
2.8.4 ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....	24
บทที่ 3 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	26
3.1 บทนำ.....	26
3.2 การทดสอบขณะไร้ภาระ (no-load test).....	27
3.3 การทดสอบตรึงโรเตอร์ (block - rotor rest).....	30
3.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (V-I method).....	32
3.5 ผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์.....	33
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขณะไร้ภาระ ทางไฟฟ้า.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบ.....	35
4.2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	35
4.2.2 แทนทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	36
4.2.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับเคลื่อนกำลัง.....	36
4.2.4 เครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้า.....	37
4.2.5 ภาระทางไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดความต้านทานล้วน.....	38
4.2.6 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบการหมุน (tachometer).....	38
4.2.7 ชุดตัวเก็บประจุขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ.....	39
4.2.8 ภาระทางไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดความเหนี่ยวนำ.....	39
4.3 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า.....	41
4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	46
4.5 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุขนานกับค่า X_m ค่าอื่นๆ.....	47
4.5.1 การคำนวณค่า X_m และค่าตัวเก็บประจุขนาน ที่พิกัดแรงดันต่างๆ.....	47
4.6 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ค่าตัวเก็บประจุจากการคำนวณ ด้วยค่า X_m ณ พิกัดแรงดันต่างๆ.....	49
4.6.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	51
บทที่ 5 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขณะมีภาระไฟฟ้า.....	52
5.1 บทนำ.....	52
5.2 การทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วน.....	52
5.2.1 การต่อวงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	53
5.2.2 ผลการทดสอบในสภาวะความเร็วคงที่ (constant speed).....	56
5.2.3 ผลการทดสอบในสภาวะความถี่คงที่ (constant frequency).....	71
5.3 การทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ.....	73
5.3.1 ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ.....	74
5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	76
บทที่ 6 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุ อนุกรมขนาน.....	77
6.1 บทนำ.....	77
6.2 การศึกษาวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาน.....	77
6.3 ผลการทดสอบ.....	82
6.3.1 ผลการทดสอบในสภาวะความเร็วคงที่ (constant speed).....	82
6.3.2 ผลการทดสอบในสภาวะความถี่คงที่ (constant frequency).....	94
6.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	104
6.4.1 พฤติกรรมการ build up แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ.....	104
6.4.2 พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น ด้วยตัวเอง เมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้า.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.5 เปรียบเทียบผลการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	107
บทที่ 7 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้	
ตัวเก็บประจุชานอนุกรม.....	108
7.1 บทนำ.....	108
7.2 การวิเคราะห์ค่าตัวเก็บประจุสำหรับการทดสอบ.....	109
7.2.1 กรณีภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน.....	109
7.2.2 กรณีภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานผสมความเหนี่ยวนำ.....	111
7.3 การวิเคราะห์เวคเตอร์.....	113
7.3.1 กรณีภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน.....	113
7.3.2 กรณีภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานผสมความเหนี่ยวนำ.....	113
7.4 ผลการทดสอบ.....	115
7.4.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะต่อภาระทางไฟฟ้า	
แบบความต้านทานในสภาวะความเร็วคงที่ (constant speed).....	115
7.4.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะต่อภาระทางไฟฟ้า	
แบบความต้านทาน ในสภาวะ ความถี่คงที่ (constant frequency)..	124
7.4.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะต่อภาระทางไฟฟ้า	
แบบความต้านทาน ผสมความเหนี่ยวนำในสภาวะความถี่คงที่	
(constant frequency).....	130
7.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	141
7.5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีภาระชนิดความต้านทาน.....	141
7.5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีภาระชนิดความต้านทานปน	
ความเหนี่ยวนำ.....	141
บทที่ 8 บทสรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	144
8.1 บทสรุป.....	144
8.2 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า.....	146
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	146
เอกสารอ้างอิง.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าอัตราส่วนระหว่าง X_1 กับ X_2 ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละชนิด.....	32
4.1 nameplate ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
4.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า.....	42
4.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า (ค่าตัวเก็บประจุจากการคำนวณด้วยค่า X_m ณ พิกัดแรงดันต่างๆ).....	50
5.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า ความเร็วคงที่ $N_r = 1,512$ รอบต่อนาที.....	57
5.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า ความเร็วคงที่ $N_r = 1,480$ รอบต่อนาที.....	58
5.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า ความเร็วคงที่ $N_r = 1,440$ รอบต่อนาที.....	59
5.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า ความเร็วคงที่ $N_r = 1,400$ รอบต่อนาที.....	61
5.5 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า ความเร็วคงที่ $N_r = 1,350$ รอบต่อนาที.....	62
5.6 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า แบบความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	72
5.7 ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานบนความเหนี่ยวนำ แบบความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	75
6.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุนุกรมต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1657 rpm.....	82
6.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุนุกรมต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1657 rpm.....	88
6.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุนุกรมค่าต่างๆ ที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	94
6.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุนุกรมค่าต่างๆ ที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.5 แสดงค่าความจุไฟฟ้ารวม ขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า.....	105
7.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่า ตัวเก็บประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความเร็ว 1568 รอบต่อนาที.....	115
7.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่า ตัวเก็บประจุขนานขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความเร็ว 1513 รอบต่อนาที.....	120
7.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่า ตัวเก็บประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	124
7.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่า ตัวเก็บประจุขนานขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	128
7.5 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด (power factor 0.9) ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	130
7.6 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด (power factor 0.85) ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	134
7.7 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 16 ไมโครฟารัด (power factor 0.9) ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	136
7.8 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ ประจุขนานขนาด 16 ไมโครฟารัด (power factor 0.85) ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	139

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	4
2.2 ส่วนที่อยู่กับที่ (stator).....	6
2.3 ส่วนหมุนแบบกรงกระรอก.....	6
2.4 ส่วนหมุนแบบวาวด์โรเตอร์.....	7
2.5 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ก่อนที่โรเตอร์จะเริ่มหมุน.....	9
2.6 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์เมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน.....	10
2.7 วงจรสมมูลใหม่ทางด้านโรเตอร์.....	11
2.8 วงจรเชื่อมต่อบetween สเตเตอร์กับโรเตอร์.....	11
2.9 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	11
2.10 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.11 ไดอะแกรมการเปลี่ยนรูปของพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	13
2.12 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง.....	16
2.13 ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก.....	17
2.14 ระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง.....	19
2.15 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเองโดย ใช้ตัวเก็บประจุต่อขนาบ.....	10
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง \hat{I}_f กับ \hat{I}_m ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับกราฟของ B-H curve.....	21
2.17 ลักษณะการ build up ที่ตัวเก็บประจุค่าต่างกัน.....	21
2.18 จุดสมดุล build up point ที่ค่าของตัวเก็บประจุต่างกัน.....	22
2.19 ไดอะแกรมการเปลี่ยนรูปของพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	26
3.1 วงจรสมมูลขณะไร้ภาระของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	28
3.2 วงจรทดสอบขณะไร้ภาระและการทดสอบตริ่งโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เหนี่ยวนำ.....	29
3.3 วงจรสมมูลขณะทดสอบการตริ่งโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	31
3.4 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (คร่อมขดลวดกับ จุดนิวทรัล).....	33
3.5 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (คร่อม 2 ขดลวด).....	33
3.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ.....	35
4.1 แทนทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	37
4.2 ชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้ายี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น PZ4000.....	38
4.4 ชุดภาระทางไฟฟ้า 3 เฟสชนิดความต้านทาน.....	39
4.5 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบการหมุน (tacho meter).....	39
4.6 ชุดตัวเก็บประจุขนาดต่างๆที่ใช้สำหรับการทดสอบ.....	40
4.7 ชุดบัลลาสต์จำลองภาระไฟฟ้าแบบความเหนี่ยวนำ.....	40
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วยรอบของการทดสอบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขณะที่ไม่มีภาระ.....	46
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็วยรอบของการทดสอบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขณะที่ไม่มีภาระ.....	46
5.1 วงจรสำหรับทดสอบการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	54
5.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะจ่ายภาระไฟฟ้า.....	54
5.3 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{shunt} (ข) แสดงเวกเตอร์ความสัมพันธ์ \hat{V}_t กับ \hat{I}_{ep}	55
5.4 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อมตกคร่อมภาระทางไฟฟ้า R (ข) แสดงเวกเตอร์ความสัมพันธ์ \hat{V}_t กับ \hat{I}_{load}	55
5.5 เวกเตอร์กระแสรวม.....	56
5.6 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ความเร็วยรอบ $N_r = 1,512$ รอบต่อนาที.....	64
5.7 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ความเร็วยรอบ $N_r = 1,512$ รอบต่อนาที.....	64
5.8 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โวลต์ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วยรอบการหมุน $N_r = 1,512$ รอบต่อนาที.....	65
5.9 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วยรอบ $N_r = 1,480$ รอบต่อนาที.....	65
5.10 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ความเร็วยรอบ $N_r = 1,480$ รอบต่อนาที.....	66
5.11 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โวลต์ของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วยรอบการหมุน $N_r = 1,480$ รอบต่อนาที.....	66
5.12 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วยรอบการหมุน $N_r = 1,440$ รอบต่อนาที.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,440$ รอบต่อนาที.....	67
5.14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกกูเลชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,440$ รอบต่อนาที.....	68
5.15 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,400$ รอบต่อนาที.....	68
5.16 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,400$ รอบต่อนาที.....	69
5.17 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,400$ รอบต่อนาที.....	69
5.18 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,350$ รอบต่อนาที.....	70
5.19 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,350$ รอบต่อนาที.....	70
5.20 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,350$ รอบต่อนาที.....	71
5.21 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	73
5.22 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	73
6.1 วงจรสมมูลเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ.....	78
6.2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองต่อแบบ อนุกรมขนาน.....	79
6.3 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_{load} ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{shunt} (ข) แสดงเวกเตอร์ความสัมพันธ์ \hat{V}_{load} กับ \hat{I}_{cp}	80
6.4 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อมตกคร่อมภาระทางไฟฟ้า R (ข) แสดงเวกเตอร์ความสัมพันธ์ \hat{V}_t กับ \hat{I}_{load}	80
6.5 เวกเตอร์กระแสรวม.....	81
6.6 วงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ต่อแบบอนุกรมขนาน.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที.....	86
6.8 กราฟแสดงค่าความถี่กับกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที.....	87
6.9 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดแรงดันไฟฟ้า ที่โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที.....	87
6.10 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที.....	92
6.11 กราฟแสดงค่าความถี่กับกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที.....	92
6.12 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที.....	93
6.13 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	99
6.14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	99
6.15 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	103
6.16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	103
6.17 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองต่อแบบ long shunt ขณะยังไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	104
6.18 ทิศทางการหมุนสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองสนามแม่เหล็ก.....	106
6.19 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาดเพียงอย่างเดียว.....	107
6.20 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมขนาน.....	107
7.1 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุ แบบ short shunt ต่อกับภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน.....	109
7.2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุ แบบ short shunt ต่อกับภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานผสมความเหนี่ยวนำ.....	111
7.3 เวกเตอร์กระแส.....	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.4	113
7.5	114
7.6	114
7.7	114
7.8	118
7.9	119
7.10	119
7.11	122
7.12	122
7.13	123
7.14	127
7.15	127
7.16	129
7.17	129
7.18	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.19 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจแรกๆเรชันกับเปอร์เซ็นต์โวลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	133
7.20 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โวลต์กับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	135
7.21 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจแรกๆเรชันกับเปอร์เซ็นต์โวลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	135
7.22 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โวลต์กับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	138
7.23 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจแรกๆเรชันกับเปอร์เซ็นต์โวลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	138
7.24 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โวลต์กับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	140
7.25 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจแรกๆเรชันกับเปอร์เซ็นต์โวลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่.....	140
7.26 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียว.....	143
7.27 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานอนุกรม.....	143

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญโครงการ

พลังงานไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มาเนิ่นนาน เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นรูปแบบของพลังงานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การให้แสงสว่างจากหลอดไฟฟ้า การติดต่อสื่อสาร การขนส่ง อุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ส่วนใหญ่ล้วนต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น ในปัจจุบันนี้เราจะพบว่าแหล่งพลังงานปฐมภูมิที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า อาทิ น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น มีปริมาณลดน้อยลงไปทุกที เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดสิ้นไป ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มนุษย์มีความตื่นตัวต่อปัญหาเหล่านี้มากขึ้น จึงได้มีการมองหาแหล่งพลังงานใหม่ เพื่อนำมาใช้ทดแทนกับแหล่งพลังงานหลักที่มีอยู่น้อยลงทุกวัน ซึ่งมีหนึ่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจต่อการศึกษาค้นคว้า นั่นคือ พลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานตามธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเอาพลังงานลมมาประยุกต์ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยการใช้กังหันลม (wind turbine) ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ของลมให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งหลักการมีอยู่ว่าเราจะนำการหมุนของกังหันลมมาใช้ขับเคลื่อนส่วนของส่วนหมุน (rotor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาใช้งานได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้งานกับกังหันลมนั้น จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction machine) ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานในสภาวะมอเตอร์เสียส่วนใหญ่ โดยเฉพาะงานในภาคอุตสาหกรรม แต่ในขณะเดียวกันเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็ยังสามารถนำมาใช้งานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อีกด้วย โดยมีข้อดีหลายประการอันได้แก่ ความแข็งแรงทนทาน การทำงานที่ไม่ยุ่งยาก ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ ไม่ต้องการแหล่งจ่ายจากภายนอกมาใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และไม่ต้องการกำลังในการหมุนที่คงที่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (self excited induction generator) ที่ใช้ในกังหันลมนั้น เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทหนึ่ง ที่มีการคิดค้นขึ้นมานานแล้ว แต่ยังไม่ได้มีการนำมาใช้งานจริงอย่างแพร่หลายมากนัก เนื่องจากยังขาดแคลนผู้ที่สนใจในการศึกษาทางกลุ่มของผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้นเป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบไฟฟ้าได้ แต่ต้องมีการจ่ายชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้โดยใช้ตัวเก็บประจุต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ข้อดีอีกประการหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง คือสามารถทำงานแบบ stand alone ได้เนื่องจากไม่ต้องการแหล่งจ่ายกระตุ้นสนามแม่เหล็กจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกแต่สามารถต่อตัวเก็บประจุเพื่อทำการกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยตัวเองได้ กลุ่มผู้จัดทำจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาถึงหลักการและพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานอย่างเหมาะสมในกาลหน้าต่อไป

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาและอธิบายถึงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้า โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน (shunt capacitor) ในการสร้างแรงดันที่ขั้ว

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทั้งชนิดความต้านทานล้วนและความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ โดยการใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียว

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงวิธีการในการปรับปรุงค่า voltage regulation ให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ โดยการใช้ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมในการช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.3. ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 0.75 กิโลวัตต์ (1 แรงม้า)

1.3.2 ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้า โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน ทำการต่อตัวเก็บประจุ build up ค่าต่างๆ กัน เพื่อดูความแตกต่างของแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.3.3 ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน เมื่อต่อภาระทางไฟฟ้า ที่พิกัดโหลดและตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor) ต่างกัน เพื่อดูการเบี่ยงเบนศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

1.3.4 ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน และมีการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพิ่ม เพื่อวิเคราะห์ค่า voltage regulation

1.4 วิธีการดำเนินงาน

ปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆเป็นลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยได้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสและทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

บทที่ 3 เป็นการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นมาใช้ในการคำนวณในเรื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

บทที่ 4 จะเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุขนานค่าต่างๆกัน

บทที่ 5 จะเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในสภาวะที่มีการต่อภาระทางไฟฟ้า เพื่อดูปรากฏการณ์แรงดันตกที่เกิดขึ้น

บทที่ 6 เป็นการแก้ไขปัญหาแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดโดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยใช้วิธีการต่อวงจรแบบอนุกรมขนาน (long shunt)

บทที่ 7 เป็นการแก้ไขปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเช่นเดียวกับการทดสอบในบทที่ 6 เพียงแต่มีวิธีการต่อวงจรที่แตกต่างกัน โดยจะต่อวงจรแบบขนานอนุกรม (short shunt) และจะมีการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดตัวประกอบกำลังล่าช้าอีกด้วย

บทที่ 8 เป็นบทสุดท้าย เป็นการสรุปการทำงานและผลที่ได้รับจากการวิจัยในครั้งนี้

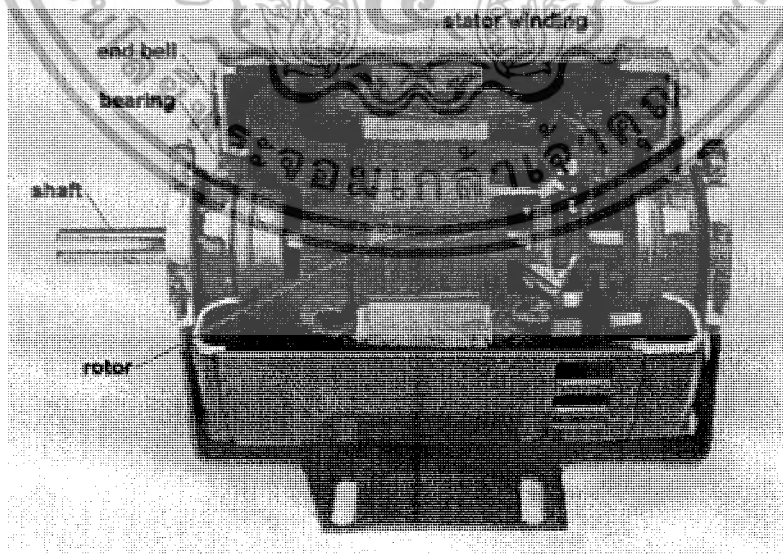
บทที่ 2

ทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction machine) เป็นอุปกรณ์ที่ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานภาคอุตสาหกรรมการผลิต รวมถึงระบบสาธารณูปโภคต่างๆ เนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อดีหลายประการ อันได้แก่ ความแข็งแรงทนทาน ราคาถูก และต้องการการบำรุงรักษาที่ต่ำ การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนที่อยู่กับที่ (stator) และส่วนหมุน (rotor) ดังจะได้กล่าว ในรายละเอียด ต่อไป

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่บนหลักการกระทำระหว่างกระแสไฟฟ้าในโรเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กจากสเตเตอร์ ส่งผ่านมาทางช่องอากาศ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำของโรเตอร์ ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยการกระทำนี้ เครื่องจักรกลจะอยู่ในสภาวะการทำงานเป็นมอเตอร์ แต่เมื่อใดที่โรเตอร์ถูกขับด้วยกำลังทางกลจากภายนอกจนหมุนด้วยความเร็ว ที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ทอร์กไฟฟ้าจะเปลี่ยนทิศทางเป็นตรงข้ามทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเครื่องจักรกล ซึ่งหมายความว่าขณะนี้เครื่องจักรกลกำลังทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้วนั่นเอง



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้งาน ส่วนมากจะนิยมนำมาใช้งานในสภาวะมอเตอร์ (induction motor) และจะมีการนำมาใช้ในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (induction generator) ในงานทางด้านพลังงานทดแทน (renewable energy) ได้แก่พลังงานลมจากกังหันลม พลังงานน้ำ เป็นต้น แต่ก่อนที่จะทำการศึกษาถึงหลักการทำงานและพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เรามีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสภาวะมอเตอร์ให้เข้าใจดีเสียก่อนเพื่อที่จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป

2.2 ทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดในงานภาคอุตสาหกรรม โดยมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนอยู่กับที่ (stator) และส่วนหมุน (rotor) ซึ่งส่วนหมุนจะตั้งอยู่บนเบร็ง แยกจากส่วนที่อยู่กับที่ด้วยช่องอากาศ

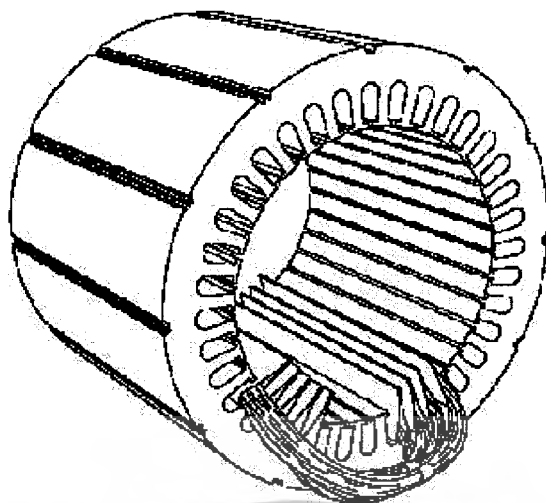
2.2.1 ส่วนอยู่กับที่ (Stator)

ประกอบด้วย โครงสเตเตอร์ แกนสเตเตอร์ และขดลวดสเตเตอร์

โครงสเตเตอร์ (stator frame) เป็นส่วนที่ทำมาจากเหล็กหล่อรูปทรงระบอกลงผิวด้านนอก โดยรอบของมอเตอร์บางตัวจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีบ (fin) เพื่อช่วยในการระบายความร้อนให้กับมอเตอร์ ฐานด้านล่างเป็นขาตั้งและมีกล่องต่อสายไฟอยู่ด้านบนหรือด้านข้าง โครงสเตเตอร์ทำหน้าที่ในการจับยึดแกนเหล็กสเตเตอร์ให้ติดแน่นอยู่กับที่ โดยที่โครงสเตเตอร์จะทำจากเหล็กหล่อ (cast iron) ในมอเตอร์ขนาดเล็ก และจะทำจากเหล็กหล่อเหนียว (cast steel) ในมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมีข้อดีคือจะช่วยลดความหนาของโครงสเตเตอร์ให้ช่วยลดน้ำหนักลงได้ราว 60 %

แกนสเตเตอร์ (stator core) ทำจากเหล็กแผ่นบางๆ เสาะด้านในเป็นร่องสำหรับพันขดลวด เรียกว่า แผ่นเหล็กลามิเนท (laminated sheet steel) โดยแผ่นเหล็กลามิเนทจะนำมาอาบฉนวนแล้วอัดเข้าด้วยกัน จะได้เป็นแกนเหล็กสเตเตอร์

ขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) เป็นขดลวดทองแดงเคลือบด้วยน้ำยาฉนวนไฟฟ้านำมาพันลงในร่องของแกนสเตเตอร์ ประกอบด้วยขดลวดจำนวน 3 ชุด สำหรับระบบไฟ 3 เฟส สามารถนำมาต่อใช้งานได้ 2 แบบคือ แบบสตาร์ (wye) และ แบบเดลตา (delta)

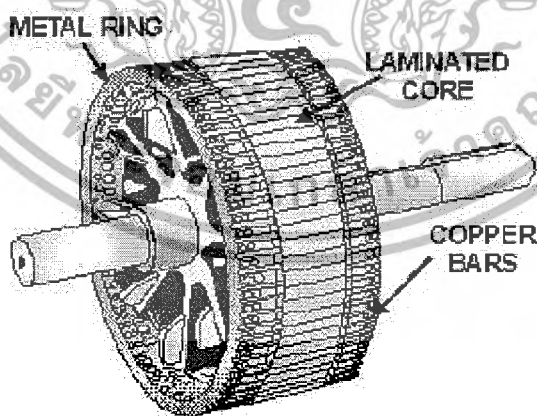


รูปที่ 2.2 ส่วนที่อยู่กับที่ (stator)

2.2.2 ส่วนหมุน (Rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

แกนโรเตอร์ทำมาจากเหล็กแผ่นลามิเนต โดยการนำแผ่นเหล็กมาอบจนร้อนแล้วนำมาอัด เข้าด้วยกันแล้วจึงฝังแท่งทองแดง (copper bars) เข้าไปในร่องของแกนโรเตอร์ ปลายของแท่งทองแดงทั้งสองข้างจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยวงแหวน (end rings) เพื่อให้แท่งทองแดงเหล่านั้น ลัดวงจรถึงกันหมด โครงสร้างของแท่งทองแดงที่ฝังอยู่ในโรเตอร์นั้น จะมี ลักษณะคล้ายกับกรงกระรอก ด้วยเหตุนี้เองจึงมีชื่อเรียกโรเตอร์ชนิดนี้ว่า “ โรเตอร์แบบกรงกระรอก ” ดังรูปที่ 2.3



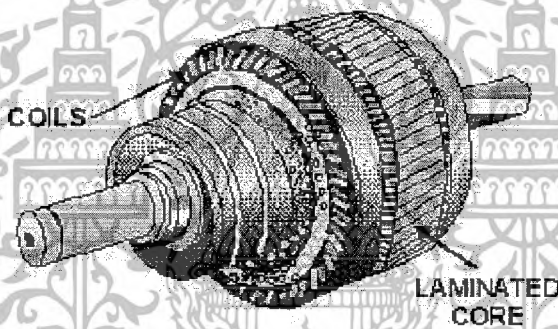
รูปที่ 2.3 ส่วนหมุนแบบกรงกระรอก

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กและขนาดกลาง จะใช้วิธีการนำแกนโรเตอร์ไปวาง ในแบบพิมพ์ (mold) จากนั้นจึงฉีดอะลูมิเนียมเหลวเข้าไป ทำให้ได้อะลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่องของโรเตอร์และมีครีบบนออกไปทั้งสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดสำหรับการระบายความร้อนให้มอเตอร์

ข. โรเตอร์แบบพันขดลวดหรือวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor)

แกนโรเตอร์ชนิดนี้จะทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนตเช่นเดียวกับแบบโรเตอร์กรงกระรอก โดยจะนำแผ่นเหล็กลามิเนตมาป้อนเป็นร่องแล้วนำมาอัดเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก แล้วมีขดลวดทองแดงอาบนํ้ายาจนจนจำนวน 3 ชุด (3 เฟส) พันอยู่ในร่องของแกนโรเตอร์ ซึ่งขดลวดทั้ง 3 นี้ จะวางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ทั้งนี้จะต้องพันขดลวดให้เกิดจำนวนขั้วแม่เหล็กขึ้นเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ส่วนอยู่กับที่ ปลายสายของขดลวดทองแดงจะนำมาต่อกันแบบสตาร์ แล้วนำปลายที่เหลือมาต่อเข้ากับสลีปริง (slip ring) ซึ่งจะมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่ และมีสายต่อจากแปรงถ่านออกไปภายนอกเพื่อต่อกับตัวต้านทานปรับค่าได้จำนวน 3 ตัว (rheostat) ซึ่งสามารถทำให้เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R_2 ในวงจรสมมูลได้ ซึ่งถือเป็นข้อแตกต่างจากโรเตอร์ชนิดกรงกระรอกที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R_2 ได้



รูปที่ 2.4 ส่วนหมุนแบบวาวด์โรเตอร์

2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

การหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นภายในช่องอากาศของสเตเตอร์สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเคลื่อนที่ตัดตัวนำที่อยู่ในโรเตอร์ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นที่ตัวนำและการที่ตัวนำในโรเตอร์นั้นต่อถึงกันหมด ทำให้เกิดการครบวงจรขึ้นจึงเกิดกระแสไหลภายในโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์และขั้วแม่เหล็กนี้จะเกาะไปกับสนามแม่เหล็กหมุนภายในช่องอากาศ ทำให้โรเตอร์สามารถหมุนได้และมีความเร็วใกล้เคียงความเร็วเชิงโคโรนัสแต่จะไม่สามารถหมุนเท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัสได้ เนื่องจากถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสจะไม่ทำให้เกิดการตัดกันระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กหมุน และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งตัวนำในโรเตอร์ ส่งผลให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสจึงไม่เกิดส่งผลให้ไม่มีทอร์ก มอเตอร์จึงไม่สามารถหมุนได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีคำว่า สลิป (slip) เกิดขึ้นเพื่ออธิบายสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส

2.3.1 สลิป (Slip)

ความเร็วของโรเตอร์ (N_r) สามารถแสดงเป็นค่าส่วนหนึ่งของความเร็วซิงโครนัส (N_s) โดยมีความสัมพันธ์กับค่าสลิปคือ

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

โดยสามารถหา N_s ได้จากสมการ

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

สามารถบอกค่าสลิปเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ ดังนี้

$$\%s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.3)$$

โดยที่ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส
 N_r คือ ความเร็วของโรเตอร์

ขณะที่มอเตอร์ยังไม่หมุน ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัดที่โรเตอร์จะมีความเร็วเท่ากับค่าความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์จึงมีความถี่เท่ากับที่สเตเตอร์ด้วยซึ่งก็คือความถี่ของความเร็วซิงโครนัสนั่นเอง แต่เมื่อใด ที่โรเตอร์เริ่มหมุนแล้ว ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัสแล้ว แต่จะเปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$f_{rotor} = sf_{stator} \quad (2.4)$$

โดยที่ f_{rotor} คือ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสที่โรเตอร์
 f_{stator} คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

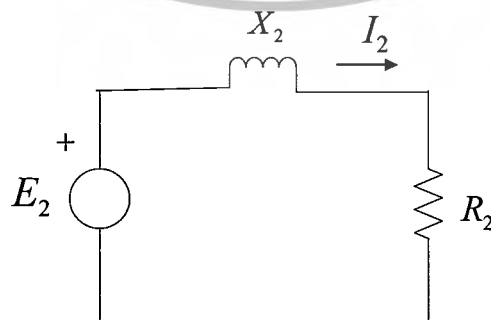
2.3.2 การเขียนวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เราจะพิจารณาสภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้คล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า คิดเป็นค่าต่อเฟสโดยให้ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเสมือนกับขดลวดไพรมารีของหม้อแปลง และส่วนของโรเตอร์เป็นเสมือนกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง เนื่องจากส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นส่งผ่านพลังงานให้แก่กันในรูปแบบของสนามแม่เหล็กหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ คัปปลิ้งกันด้วยวงจรแม่เหล็ก ” ดังนั้นจึงต้องมี magnetizing reactance (X_m) เช่นเดียวกับในหม้อแปลงซึ่งเป็นส่วนที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กให้เกิดขึ้น แต่ด้วยความที่มอเตอร์เหนี่ยวนำส่งผ่านฟลักซ์แม่เหล็กผ่านช่องอากาศซึ่งมีค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กไม่ดีนักจึงทำให้ ต้องใช้กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กสูงกว่าปกติ ในส่วนของค่าการสูญเสียจาก hysteresis loss และกระแสไหลวน (eddy current loss) ก็จะถูกแทนด้วยค่าความต้านทาน (R_c) ต่อขานเช่นเดียวกับในหม้อแปลง ส่วนข้อแตกต่างที่เด่นชัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำคือผลจากการหมุนของโรเตอร์ ทำให้ความถี่ของกระแสในโรเตอร์แตกต่างไปจากความถี่ของกระแสที่สเตเตอร์ซึ่งสัมพันธ์กันด้วยค่าสลิป ดังสมการที่ (2.4) เนื่องจากค่าความถี่ของกระแสที่โรเตอร์นั้น เปลี่ยนแปลงตามสลิปดังนั้นค่า leakage reactance (X_2) ต่อเฟสที่ค่าสลิปใดๆ จะเทียบเป็นค่ารีแอคแทนซ์ต่อเฟสในขณะที่ยังไม่หมุน ดังนี้

$$X_2 = sX_2 \quad (2.5)$$

โดยที่ X_2 คือ ค่า Leakage Reactance
 s คือ ค่าสลิป

เนื่องจากเรามองมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ยังไม่เริ่มหมุนเป็นหม้อแปลงที่ใช้แกนอากาศเป็นตัวกลางส่งผ่านฟลักซ์แม่เหล็กจากปฐมภูมิไปสู่ทุติยภูมิ ดังนั้นเราสามารถแสดงค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง (E_2) ได้ดังรูปวงจรที่ 2.5

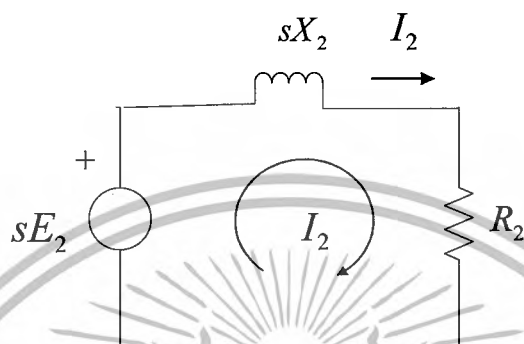


รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ก่อนที่โรเตอร์จะเริ่มหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิป ดังนั้นจะได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_2 ขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุน แล้วจะเป็นไปตามสมการที่ 2.6

$$E_2 = sE_2 \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์เมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน

จากรูปวงจรที่ 2.6 สามารถตั้งสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$s\hat{E}_2 = \hat{I}_2(sX_2 + R_2) \quad (2.7)$$

จะได้ว่า

$$s\hat{E}_2 = s\hat{I}_2 X_2 + \hat{I}_2 R_2 \quad (2.8)$$

นำ s หารตลอดสมการ

$$\hat{E}_2 = \hat{I}_2 X_2 + \hat{I}_2 \left(\frac{R_2}{s}\right) \quad (2.9)$$

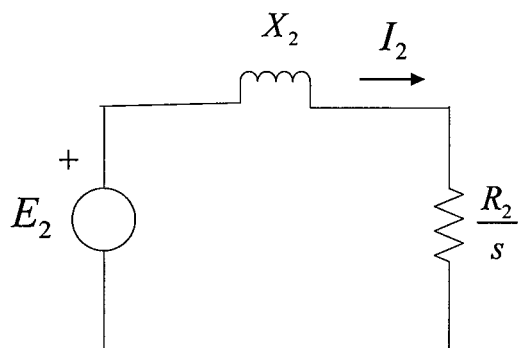
โดยที่ \hat{E}_2 คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ (โวลต์)

\hat{I}_2 คือ ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ (แอมแปร์)

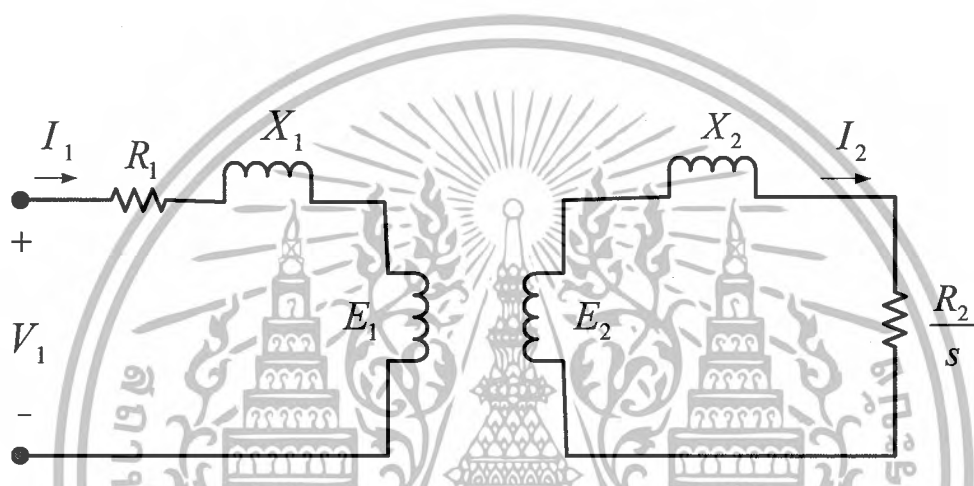
R_2 คือ ค่าความต้านทานของโรเตอร์ (โอห์ม)

จากสมการที่ 2.9 สามารถเขียนวงจรสมมูลของโรเตอร์ได้ใหม่ ดังรูปที่ 2.7

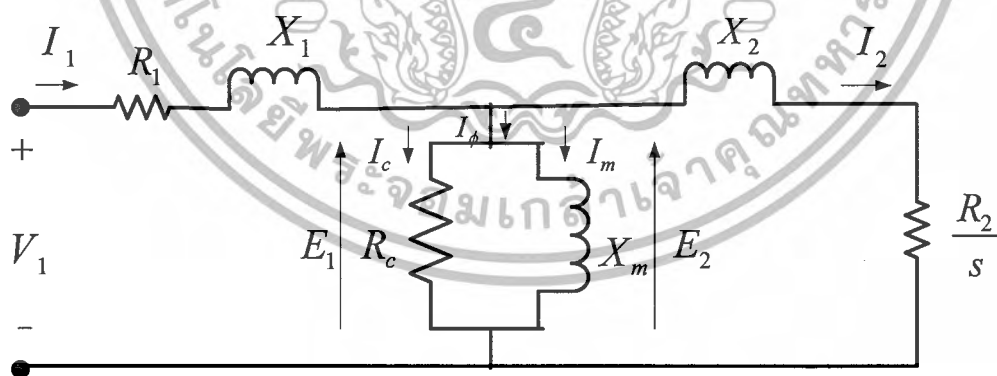
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลใหม่ทางด้านโรเตอร์



รูปที่ 2.8 วงจรเชื่อมต่อระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

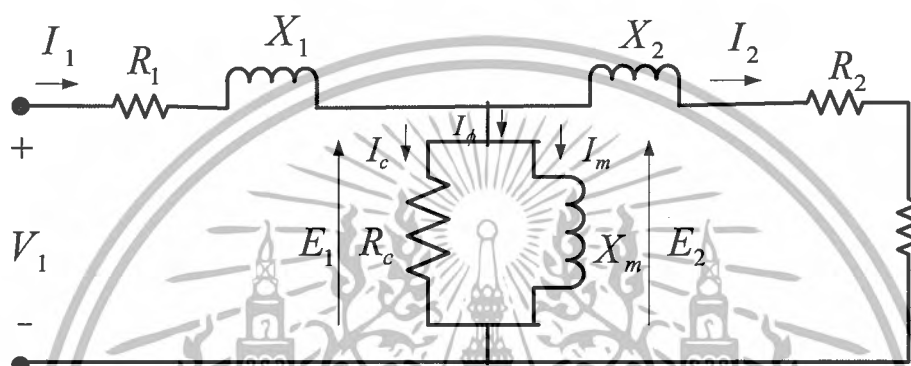
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 2.9 จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังนี้

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{(1-s)R_2}{s} \quad (2.10)$$

โดยที่ R_2 คือ ค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่โอนย้ายมาทางานสเตเตอร์

จากสมการที่ 2.10 ทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ใหม่ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.4 กำลังในส่วนต่าง ๆ และการสูญเสีย (power flow diagram and losses)

กำลังอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส หมายถึง กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ คือ

$$P_{in} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (2.11)$$

เมื่อ θ คือ ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์

การสูญเสียที่สเตเตอร์ประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจาก $I_1^2 R_1$ ในขดลวดสเตเตอร์ เรียกว่าการสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (stator copper loss, P_{cu}) และการสูญเสียในแกนเหล็ก (iron loss) ซึ่งหมายถึงการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss, P_h) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss, P_e) รวมเรียกว่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (iron loss, $P_{c,s}$) ดังนั้นการสูญเสียที่สเตเตอร์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{loss,s} = P_{cu,s} + P_{c,s} \quad (2.12)$$

$$P_{c,s} = P_h + P_e \quad (2.13)$$

กำลังเอาต์พุตจากสเตเตอร์จะถูกส่งผ่านทางช่องอากาศเข้าสู่โรเตอร์โดยอาศัยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถเขียนกำลังอินพุตของโรเตอร์ (rotor power input) ได้ดังนี้

$$P_{in,r} = P_{in} - P_{loss,s} \quad (2.14)$$

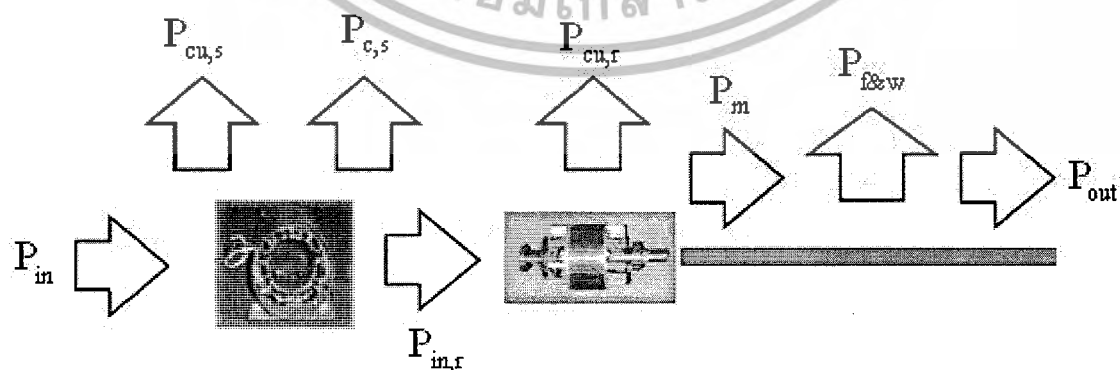
กำลังอินพุตที่เข้าสู่โรเตอร์นี้จะแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเอาต์พุตทางกล (mechanical power developed , P_m) และการสูญเสียในขดลวดของโรเตอร์ $I_2^2 R_2$ (rotor copper loss , $P_{cu,r}$)

$$P_m = P_{in,r} - P_{cu,r} \quad (2.15)$$

สุดท้ายกำลังเอาต์พุตทางกลของโรเตอร์ (P_m) จะเปลี่ยนเป็นกำลังเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์ (P_{out}) รวมกับกำลังการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานจากการหมุนและลม (friction and windage loss , $P_{f\&w}$) สามารถเขียนสมการอธิบายได้ดังนี้

$$P_{out} = P_m - P_{f\&w} \quad (2.16)$$

เพื่อความง่ายต่อการพิจารณากำลังในส่วนต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถเขียนแผนภาพการเปลี่ยนรูปกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไตอะแกรมการเปลี่ยนรูปของพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันนี้ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจาก แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมัน ล้วนแต่เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปมีปริมาณน้อยลง ทุกวัน และ คาดว่ากำลังจะหมดไปภายในไม่กี่สิบปีนับจากนี้ อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุที่ประชากรโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกปีและยังไม่มี แนวโน้มที่จะลดลงจึงเป็นสาเหตุให้ความต้องการใช้พลังงานมีมากขึ้นเรื่อยๆแน่นอนว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกนั้น มีทิศทางที่สวนทางกับ ปริมาณแหล่งพลังงาน ที่มีอยู่ กล่าว คือจำนวนประชากรมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันแหล่งพลังงานกลับมีแนวโน้มที่ลดลง จึงได้มี แนวความคิดสำหรับการที่จะนำพลังงานจากธรรมชาติที่มีอยู่ มาใช้ประโยชน์สำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากน้ำพลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม ฯลฯ โดยนำพลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนรูปเป็น พลังงานไฟฟ้าด้วยแผง โซลาร์เซลล์ หรือนำพลังงานกลจากน้ำและลมเพื่อเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

พลังงานจากลมและพลังงานจากน้ำเป็นอีกหนทางหนึ่ง ในการนำพลังงานจากธรรมชาติ มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วยซึ่งสามารถ นำพลังงานเหล่านี้มาประยุกต์ใช้งานกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ โดยอาศัยหลักการของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง (self-excited induction generator) ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับความเร็รรอบในการหมุนที่ค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง จะให้ค่าศักดาไฟฟ้าที่ชั่วเปลี่ยนแปลงตาม ความเร็วรอบที่หมุน ถ้าแหล่งพลังงานให้ความเร็วในการหมุนที่ไม่คงที่ จะก่อให้เกิดผลคือ ศักดาไฟฟ้าที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่คงที่ตามไปด้วยดังนั้น เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าชนิดนี้จึงไม่ เหมาะที่จะใช้กับพลังงานลม เนื่องจากความเร็วลมจะไม่ค่อย คงที่ แต่เหมาะสมที่จะใช้กับพลังงานน้ำมากกว่าเนื่องจากบริเวณเขื่อนหรือฝายกั้นน้ำ จะมีความเร็ว ในการไหลของน้ำที่ค่อนข้างคงที่มากกว่าลมนั่นเอง

2.6 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบชนิดโรเตอร์กรงกระรอก (squirrel cage rotor) จะไม่ ใช้กระแสไฟฟ้าในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กเหมือนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แต่จะใช้ตัว เก็บประจุ (capacitor bank) ในการสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศระหว่าง สเตเตอร์และโรเตอร์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเมื่อแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะมีความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ ต่ำกว่าค่าความเร็วซิงโครนัส ของสนามแม่เหล็กหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นที่สแตเตอร์ ซึ่งค่าสลิปจะมีค่าเป็นบวก โดยจะมีการดึงกระแสไฟฟ้า 2 ส่วนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ได้แก่กระแสที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน และส่วนที่ใช้ในการสร้างกำลังงานไฟฟ้าจริง ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าความสูญเสียในส่วนต่างๆ ในขณะที่มอเตอร์ไม่มีการต่อภาระทางกล มอเตอร์ไฟฟ้าก็ยังคงดึงส่วนของ กระแสกระตุ้นที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนในปริมาณเท่าเดิม ในขณะที่กระแสไฟฟ้าส่วนที่สร้างกำลังงานไฟฟ้าจริง จะมีค่าน้อยมาก โดยจะถูกใช้ไป ในส่วน ของความสูญเสียภายใน

ในการที่จะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้นั้นจะต้องมีการจ่ายกำลังทางกลให้กับส่วนหมุน (rotor) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลัง ขั้วเมื่อหมุนโรเตอร์จนความเร็วของโรเตอร์ มีค่ามากกว่า ความเร็วซิงโครนัสทำให้ค่าสลิปมีค่าเป็นลบ ค่ามุมของกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์มีค่าตามหลังศักดาไฟฟ้ามากกว่า 90 องศา ดังนั้นค่า power factor ขณะนี้จะมีค่าเป็นลบเมื่อปรับความเร็วของส่วนหมุนให้มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจะทำให้พฤติกรรมกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีมากขึ้นและจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้สูงขึ้น จนกว่าจะถึงค่ากระแสพิคคของเครื่องจักรกลตัวนั้นๆ

ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบได้ เมื่อมีการจ่ายตัวต้นกำลังเข้าที่โรเตอร์ โดยพลังงานกลที่จ่ายเข้ามานั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยส่งผ่านจากโรเตอร์ไปสู่สแตเตอร์ แต่ในขณะที่เดียวกันตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะมีการดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบไฟฟ้าเข้ามาตลอดเวลาทั้งนี้เนื่องมาจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สามารถกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับตัวเองได้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับตัวเอง

ความถี่ทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งเป็นความถี่ของความถี่ทางไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ถ้าไม่มีแหล่งป้อนกระแสกระตุ้นจากภายนอกให้แก่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้วเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่สามารถแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

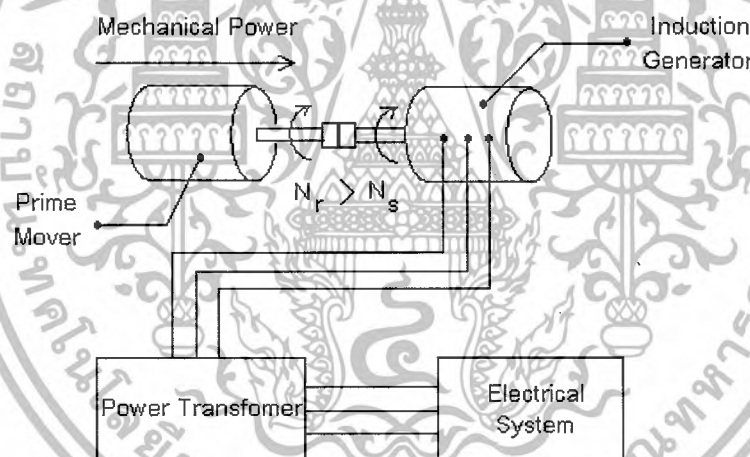
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะมีลักษณะที่แข็งแรงทนทาน มีระบบการทำงานที่ง่ายไม่ซับซ้อน ต้องการการบำรุงรักษาที่ต่ำเนื่องจากไม่ใช้แปรงถ่าน และมีโครงสร้างที่มีน้ำหนักต่อหน่วย ผลิตต่ำ ราคาถูก และไม่ต้องมีการซิงโครไนซ์เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ซึ่งถือเป็นข้อดีและข้อได้เปรียบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ข้อเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสคือไม่สามารถควบคุมกำลัง ไฟฟ้าจินตภาพได้ ด้วยเหตุว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความต้องการ กำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบ จึงสามารถกล่าวได้ว่า แม้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบไฟฟ้าได้ แต่ในขณะที่เดียวกันก็จะแสดงตัวเป็นโหลดภาระทาง ไฟฟ้าประเภท เหนี่ยวนำด้วยเช่นกันด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ เพื่อทำหน้าที่จ่าย กำลังไฟฟ้าจินตภาพให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนระบบไฟฟ้า เพื่อเป็นการควบคุมกำลังจินตภาพให้กับระบบ

2.7 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ ดังนี้

2.7.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง(Grid Connected Induction Generator)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ เมื่อต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง และจะรับกำลังงานไฟฟ้าเข้ามาจากระบบไฟฟ้า โรเตอร์จึงหมุนด้วยความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) แต่เมื่อใดที่ให้ตัวต้นกำลังขับเคลื่อนที่โรเตอร์ จนโรเตอร์หมุนในทิศทางเดิมจนกระทั่งมีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส จะทำให้ทิศทางกระแสของกำลังไหลกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นสภาวะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้วนั่นเอง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำแล้ว จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบได้ แต่ก็ยังคงต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบเพื่อใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กเพราะจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สามารถสร้างกำลังไฟฟ้าเสมือนขึ้นมาเองได้ ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าและความถี่ทางไฟฟ้าในระบบนี้จะขึ้นอยู่กับระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ แต่จะไม่ขึ้นกับค่าความเร็วของโรเตอร์เลย

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยใช้พลังงานจากลมที่ให้ความเร็วรอบการหมุนไม่คงที่หรือในบริเวณที่มีความเร็วลมไม่สม่ำเสมอ จะสามารถควบคุม

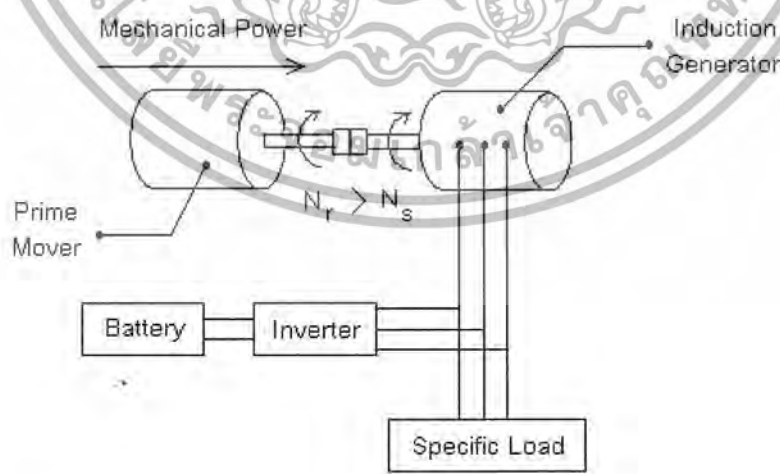
ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ได้ โดยการต่อระบบเกียร์ควบคุมความเร็วเข้าไป เพื่อควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ให้อยู่ในย่านที่เหมาะสม ในขณะที่เดียวกันจะต้องต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบด้วยเพื่อชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องใช้ ข้อดีของเครื่องเหนี่ยวนำแบบต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังคือ เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ค่าติดตั้งไฟฟ้าและความถี่ทางไฟฟ้าจะเท่ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่ต้องร่วมอยู่ ไม่ต้องมีส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน ไม่ต้องการตัวต้นกำลังที่ให้ความเร็วรอบการหมุนคงที่ เพียงแต่ต้องการตัวต้นกำลังที่สามารถให้ความเร็วในการหมุนมากกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ระบบนี้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานลม

2.7.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แยกจากระบบไฟฟ้ากำลัง (Isolated Induction Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะติดตั้งใช้งานแยกออกจากระบบไฟฟ้า โดยแยกโดดมาอยู่เพียงลำพังและสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จำกัด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.7.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยก (Separate-Excited Induction Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้จะถูกต่ออยู่กับแหล่งจ่ายซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยอาจจะใช้แบตเตอรี่ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก

หลักการการทำงานของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ จะมีลักษณะคล้ายกับระบบที่ต่อเข้ากับเครือข่ายโดยตรง เมื่อเริ่มต้นจะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากลับ 3 เฟสจาก อินเวอร์เตอร์เข้าไปยังเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อทำหน้าที่ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กหมุน ณ เวลาที่เครื่องจักรกลจะแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ โดยรับกำลังไฟฟ้าจริงจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อจ่ายตัวต้นกำลังทางกลเข้าสู่โรเตอร์ของเครื่องจักรกลดังกล่าว จนมีความเร็วรอบในการหมุนมากกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ทอร์กทางไฟฟ้าจะกลับทิศทาง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก โดยใช้อินเวอร์เตอร์

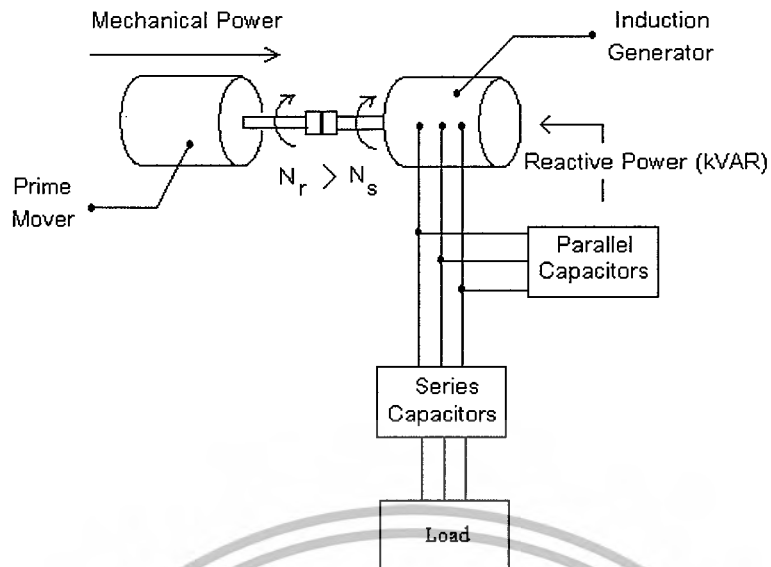
วิธีการในการควบคุมค่าศักดาไฟฟ้าและความถี่ทางไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ซึ่งจะมีค่าไม่คงที่ สามารถทำได้โดยการควบคุมค่าศักดาไฟฟ้าและความถี่ทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ โดยจะต้องควบคุมให้มีความเหมาะสมกับความเร็วรอบของโรเตอร์ รวมถึงภาระทางไฟฟ้าที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อให้ได้ค่าศักดาไฟฟ้าและความถี่ที่คงที่ เหมาะสมกับการใช้งาน

สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคือแหล่งจ่ายกระแสกระตุ้นที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งในระบบนี้หมายถึงแบตเตอรี่ จะต้องมีความจุที่เพียงพอต่อการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการจ่ายภาระทางไฟฟ้า ถ้าภาระทางไฟฟ้าของระบบมีค่าสูงขึ้น ขนาดพิกัดของแหล่งจ่ายกระแสกระตุ้นก็ต้องมีมากขึ้นตามไปด้วย

2.7.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง (Self-Excited Induction Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้จะใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับระบบเพื่อช่วยในกระบวนการ voltage build up ซึ่งก็คือกระบวนการสร้างแรงดันให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง ดังรูปที่ 2.14 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ได้ถูกใช้เป็นหัวข้อในการศึกษาถึงทฤษฎีและพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในปริณญาณานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจะได้ลงลึกในรายละเอียดต่อไป

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง (SEIG) จะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ต่างกันเพียงส่วนของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรและแบบซิงโครนัส จะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าหรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ มีโครงสร้างการทำที่ง่ายกว่า อีกทั้งยังมีราคาต้นทุนในการติดตั้งใช้งานรวมถึงค่าบำรุงรักษาที่ถูกกว่า ด้วยเหตุนี้ จึงมีการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟส เนื่องจากให้กำลังการผลิตที่สูงกว่าแบบเฟสเดียว



รูปที่ 2.14 ระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง

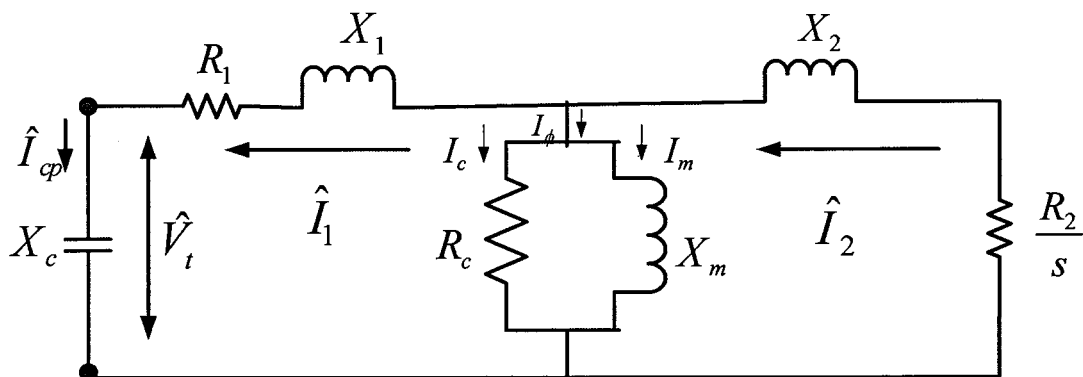
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง สามารถตั้งให้ทำงานแยกโดดออกจากระบบไฟฟ้าได้ แต่มีความจำเป็นที่จะต้องต่อตัวเก็บประจุที่ขั้วของสเตเตอร์ เพื่อทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่มีความถี่เดียวกัน ระหว่างค่า X_{cp} และ X_m

โดยที่ X_{cp} คือ Capacitive Reactance (โอห์ม)

X_m คือ Magnetizing Reactance (โอห์ม)

ที่สภาวะเรโซแนนซ์มีเงื่อนไขว่า $X_{cp} = X_m$

หลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเองจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นด้วยตนเอง โดยอาศัยปรากฏการณ์ที่มีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างอยู่ภายในโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรมูลย์ ดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเองโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อขานาน

การสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำนั้นสามารถทำได้โดยให้ตัวต้นกำลังขั้วที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในขณะเดียวกันแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะไปตกคร่อมตัวเก็บประจุ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุ (\hat{I}_{cp}) ซึ่งจะส่งผลให้กระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก (\hat{I}_m) มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า (\hat{V}_t) สูงขึ้นด้วยและกระแสไฟฟ้า อันเนื่องมาจาก ตัวเก็บประจุ ก็จะเพิ่มตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม มีผลให้ค่ากระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กสูงขึ้น และค่าแรงดันไฟฟ้าจะสูงขึ้นอีก ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นซ้ำกันเรื่อยๆ เรียกว่าปรากฏการณ์สร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (voltage build-up process) โดยแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุลและจะไม่มีการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำอีกต่อไป

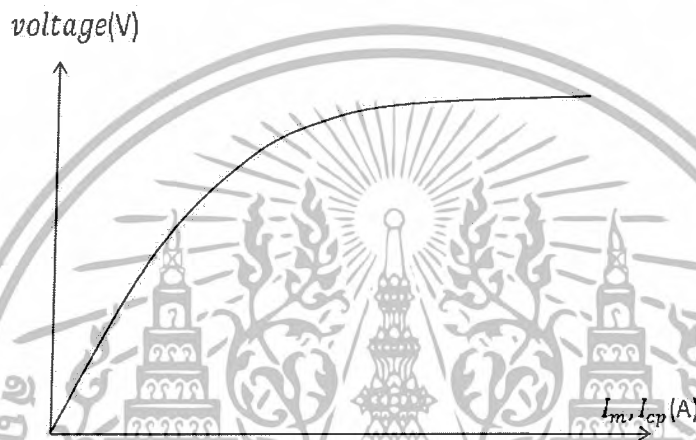
ส่วนของความเร็วซิงโครนัส มีค่าต่ำกว่าความเร็วรอบของโรเตอร์ ทำให้สลิปมีค่าเป็นลบ ดังนั้นกระแสที่โรเตอร์ (\hat{I}_2) จึงมีทิศทางไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าพิจารณาส่วนของความถี่ทางไฟฟ้าของแรงดันเอาท์พุทจะพบว่ามีเปลี่ยนแปลง ไปตามความเร็วรอบของโรเตอร์

$$N_s = \frac{120f_s}{P} \quad (2.17)$$

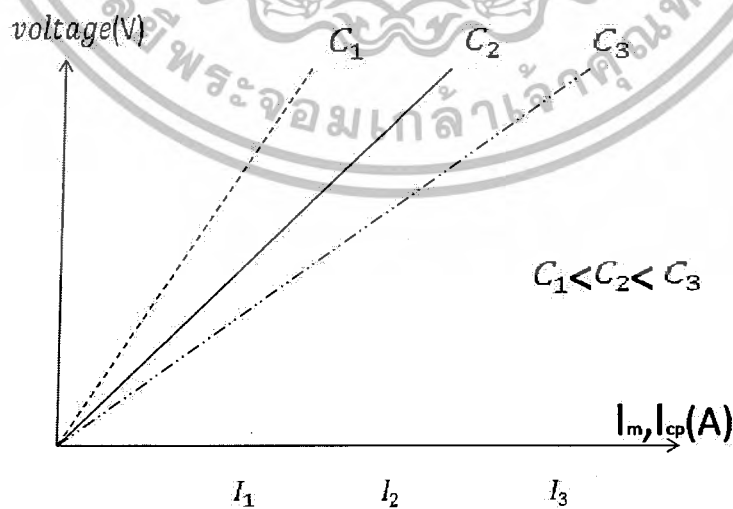
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.18)$$

โดยที่ N_s = ความเร็วเชิงโคจรของสนามแม่เหล็ก (รอบต่อนาที)
 N_r = ความเร็วรอบของโรเตอร์ (รอบต่อนาที)
 f_s = ความถี่ทางไฟฟ้า (เฮิรตซ์)
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก (ขั้ว)
 s = สลิป

สำหรับหลักการในการออกแบบในการพิจารณาเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้งานในการทดสอบ สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.16 ถึง 2.18



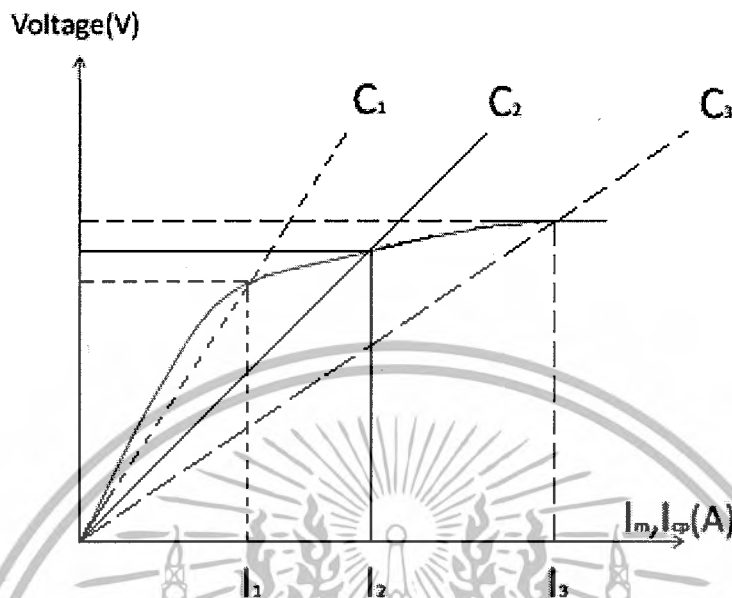
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_i กับ I_m ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับกราฟของ B-H curve



รูปที่ 2.17 ลักษณะการ build up ที่ตัวเก็บประจุค่าต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของสมการ $V_t = I_{cp} X_{cp}$ โดยตัวเก็บประจุมีค่าต่าง ๆ ที่ความถี่เดียวกัน ซึ่งกราฟเป็นเส้นตรง เมื่อนำกราฟทั้งสองมารวมกันจะได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 จุดสมดุล build up point ที่ค่าของตัวเก็บประจุต่างกัน

เมื่อ ω_s เป็นความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ $2\pi f_s$ จะได้ว่า

$$V_t = I_{cp} X_{cp} \quad (2.19)$$

$$V_t = I_m X_m \quad (2.20)$$

เมื่อ $X_m = \omega_s L_m \quad (2.21)$

$$X_m = 2\pi f_s L_m \quad (2.22)$$

$$X_{cp} = \frac{1}{\omega_s C_p} = \frac{1}{2\pi f_s C_p} \quad (2.23)$$

เมื่อจะทำให้เกิดสภาวะ resonance ขึ้นระหว่าง capacitive reactance และ magnetizing reactance ณ ที่ความถี่เดียวกัน ดังนี้

$$X_m = X_{cp} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_m = I_{cp} \quad (2.25)$$

$$\frac{V_t}{2\pi f_s L_m} = 2\pi f_s C_p V_t \quad (2.26)$$

$$C_p = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 L_m} \quad (2.27)$$

จากกราฟรูปที่ 2.16 ถึง 2.18 และสมการที่ 2.24 ถึง 2.27 ทำให้สามารถทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น เมื่อเปลี่ยนตัวเก็บประจุ ที่ความเร็วเท่ากัน

$$\hat{E}_{rms} = 4.44 f_s N_{ph} \phi \quad (2.28)$$

โดยที่ \hat{E}_{rms} คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (โวลต์)
 N_{ph} คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบต่อนาที)
 f_s คือ ความถี่ทางไฟฟ้า (เฮิร์ตซ์)
 ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ (เวเบอร์)

จากคุณสมบัติของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำตั้งสมการที่ 2.28 จะได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะแปรตามความถี่

จากสมการที่ 2.27 และ 2.28 จะได้ว่าเมื่อความเหนี่ยวนำมีค่าคงที่แล้ว ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะแปรผกผันกับความถี่ ซึ่งถ้าหากตัวเก็บประจุมีค่ามาก จะทำให้ค่าความถี่ของการ build up แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำ และแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจะต่ำด้วย

2.8 กำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง

2.8.1 ความสูญเสียทางไฟฟ้า (Power of Loss) มีดังนี้

2.8.1.1 ความสูญเสียที่ของขดลวดที่สเตเตอร์ ($P_{cu,s}$)

$$P_{cu,s} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.29)$$

โดยที่ R_1 คือ ความต้านทานไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (โอห์ม)
 I_1 คือ กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ (แอมแปร์)

2.8.1.2 ความสูญเสียของขดลวดที่โรเตอร์ ($P_{cu,r}$)

$$P_{cu,r} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.30)$$

โดยที่ R_2 คือ ความต้านทานไฟฟ้าที่โรเตอร์ (โอห์ม)

I_2 คือ กระแสไฟฟ้าโรเตอร์ (แอมแปร์)

2.8.1.3 ความสูญเสียของแกนเหล็กที่สเตเตอร์ (Core Loss)

1.Hysteresis Loss (P_h)

เป็นความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากคุณสมบัติของแกนเหล็กมีสนามแม่เหล็กตกค้าง ดังนั้นการกลับทิศสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนเข้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดความสูญเสียที่เกิดจาก hysteresis loop ของความสัมพันธ์ระหว่าง magnetic flux density (B) กับ magnetic field intensity (H) ซึ่งสามารถคำนวณหาความสูญเสียโดยประมาณจาก

$$P_h = K_h f_s B_{\max}^x \quad (2.31)$$

โดยที่ B_{\max} คือ ค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (เทสลา)

f_s คือ ค่าคงที่ทางไฟฟ้า (เฮิร์ตซ์)

x คือ Steinmetz's index มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5

K_h คือ ค่าคงที่ของ hysteresis loss ซึ่งขึ้นอยู่กับเนื้อสารของแกนเหล็ก

2.Eddy Current Loss (P_e)

เป็นความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าในแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรมแม่เหล็กแล้วเกิดกระแสไหลวน (eddy current) ทำให้เกิดความร้อนในแกนเหล็กและเกิดความสูญเสียพลังงานในแกนเหล็กโดยการทำแกนเหล็กเป็นแผ่นบางๆ และเคลือบฉนวนแต่ละแผ่น ซึ่งสามารถคำนวณหาความสูญเสียได้จาก

$$P_e = K_e f_s^2 B_{\max}^2 t^2 \quad (2.32)$$

โดยที่ K_e คือ ค่าคงที่ของ eddy current loss ซึ่งขึ้นอยู่กับเนื้อสารของแกนเหล็ก

t คือ ความหนาของแผ่นเคลือบฉนวน (เมตร)

ดังนั้นค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c) คือ

$$P_c = P_e + P_h \quad (2.33)$$

ความสูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระ ซึ่งจะแปรตามความถี่ และค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดขณะใช้งาน โดยขึ้นอยู่กับชนิดแกนเหล็ก และจะหาได้ ออกมาเป็นค่ากำลังสูญเสียต่อกิโลกรัม

2.8.1.4 ความสูญเสียทางกล ($P_{f\&w}$)

ความสูญเสียทางกลเป็นผลรวมจากค่าความสูญเสียเนื่องมาจากความฝืดและลม

2.8.2 กำลังงานไฟฟ้าด้านออก (Output Power)

กำลังงานไฟฟ้าด้านออก เป็นกำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสาม เฟสสามารถหาได้ดังนี้

$$P_{out} = 3V_o I_o \cos \theta \quad (2.34)$$

โดยที่ V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อเฟส (โวลต์)

I_o คือ กระแสเสดเตอร์เอาต์พุตต่อเฟส (แอมแปร์)

$\cos \theta$ คือ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์

2.8.3 กำลังงานไฟฟ้าด้านเข้า (Input Power)

ค่ากำลังงานไฟฟ้าด้านเข้าทางกล คิดที่กำลังงานของตัวต้นกำลังที่ขับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

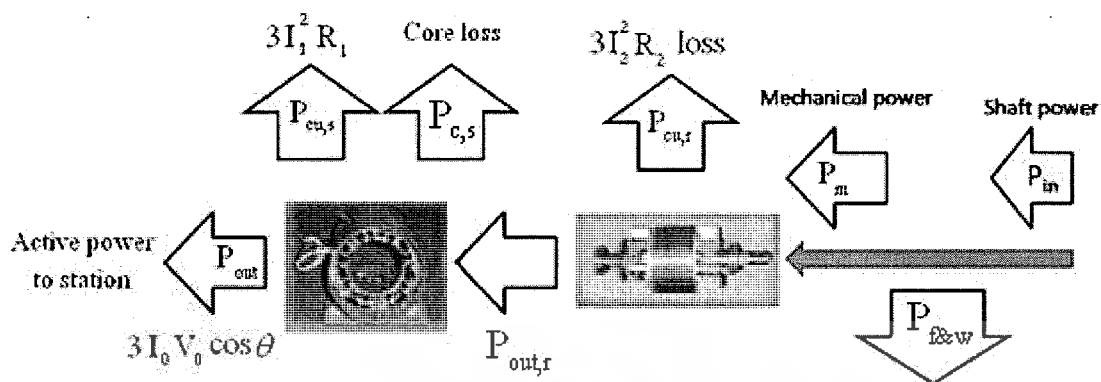
$$P_{in} = P_{out} + P_{c,s} + P_{cu,s} + P_{cu,r} + P_{f\&w} \quad (2.35)$$

2.8.4 ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น ด้วยตัวเอง

จะหาได้จาก

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ไดอะแกรมการเปลี่ยนรูปของพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

3.1 บทนำ

สำหรับในบทที่ 3 นี้จะอธิบายถึง วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (three-phase induction machines) ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้อย่างง่ายดาย โดยใช้วงจรสมมูลแบบประมาณ จะประกอบการทำงานทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การทดสอบขณะไร้ภาระ (no-load test)
2. การทดสอบตรึงโรเตอร์ (block-rotor test)
3. การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (V-I method)

โดยค่าที่วัดได้จากการทดสอบดังกล่าว จะนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วสามารถนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

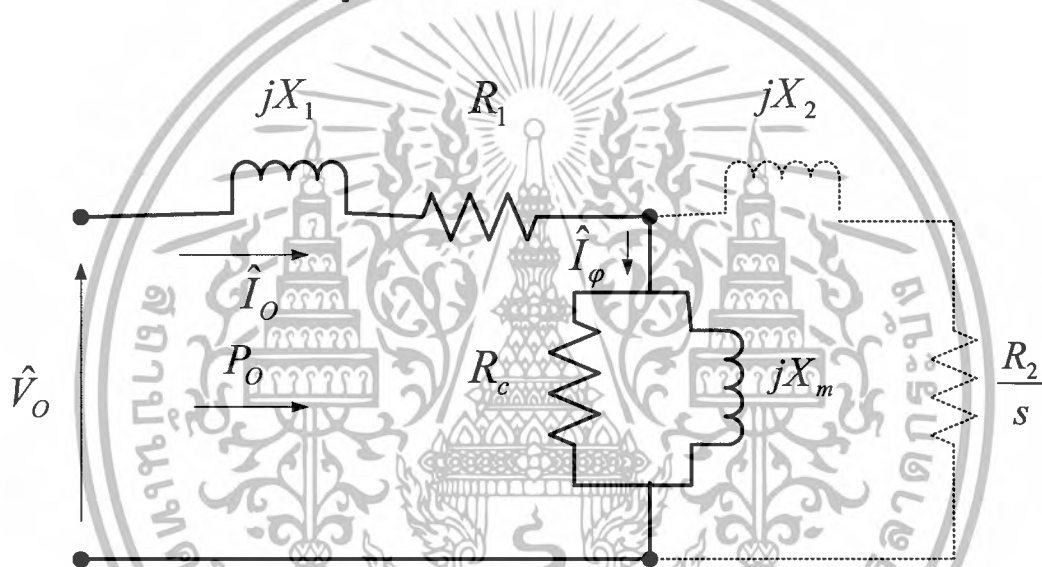
ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการทดสอบ และผลการทดสอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ยี่ห้อ MITSUBISHI ขนาดพิกัดประมาณ 0.75 กิโลวัตต์ (1 แรงม้า), 4 ขั้ว , ต่อแบบสตาร์ โดยมีรายละเอียดเพิ่มเติม ดัง nameplate ต่อไปนี้

	1 HP	0.75 kW	4 Pole	TYPE SF-JR	
Hz	50	50	50	60	60
V	220	380	415	220	440
A	3.3	1.9	1.95	3.0	1.7
r/min	1400	1400	1410	1700	1720
PF	0.8	0.8	0.74	0.85	0.78
IEC	60034-1			IISC	4210
IP	44	IC	411	Bearing	6204ZZ, 6203ZZ
Frame 80 M					
Rating S1			Serial 10.5		
TH CLASS B					
AMB Temp 40 C					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบขณะไร้ภาระ (No-Load Test)

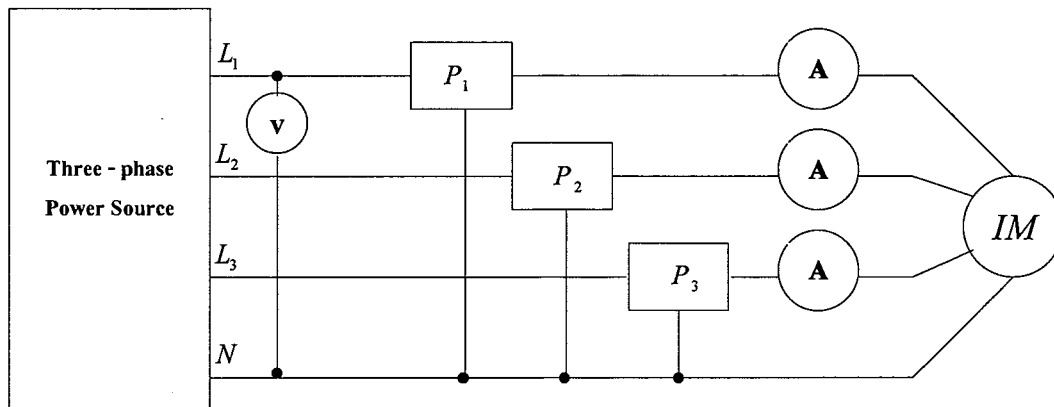
การทดสอบขณะไร้ภาระ จะทำได้เช่นเดียวกับการทดสอบขณะเปิดวงจร (open circuit test) ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งอยู่ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุลเท่ากับแรงดันที่พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไร้ภาระ ซึ่งใน ณ การทดสอบนี้ถูกใช้งานให้อยู่ในสภาวะมอเตอร์ไฟฟ้าความเร็วรอบในการหมุนโรเตอร์ (rotor speed) มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) มาก ดังนั้นค่าสลิป ในการทำงานจึงมีค่าใกล้เคียงเท่ากับศูนย์ และเนื่องด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในส่วนของ $\frac{R_2}{s}$ จะมีค่าน้อยมาก ๆ จึงทำให้ในส่วนของเส้นประจึงไม่นำมาพิจารณาสำหรับการทดลองนี้ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลขณะไร้ภาระของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

กำลังที่ป้อนเข้าให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสูญเสียในส่วนประกอบต่างๆดังต่อไปนี้

1. stator core loss (P_c)
2. stator copper loss ($P_{cu,s}$) อันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้ากระตุ้น
3. mechanical loss (P_{mech})



รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบขณะไว้ภาระและการทดสอบตริ่งโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในการทดสอบครั้งนี้จะวัดค่ากระแสไฟฟ้า (\hat{I}_o) , ค่าแรงดันไฟฟ้า (\hat{V}_o) และ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าทางสเตเตอร์ (P_o) แล้วนำผลการทดสอบดังกล่าวมาคำนวณหาค่า fix-loss resistance (R_c) และค่า magnetizing reactance (jX_m) ซึ่งเป็นค่าต่อเฟส

จากรูปที่ 3.1 จะสามารถคำนวณหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$\phi_o = \cos^{-1}\left(\frac{P_o}{\hat{V}_o \hat{I}_o}\right) \quad (3.1)$$

$$R_c = \frac{\hat{V}_o^2}{P_o} \quad (3.2)$$

$$X_m = \frac{\hat{V}_o}{\hat{I}_o \sin \phi_o} \quad (3.3)$$

หรือ

$$S_o = V_o I_o \quad (3.4)$$

$$S_o = \sqrt{P_o^2 + Q_o^2} \quad (3.5)$$

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่า X_o ได้โดย

$$X_o = \frac{Q_o}{\hat{I}_o^2} \quad (3.7)$$

$$X_o = X_1 + X_m \quad (3.8)$$

เมื่อแทนค่า X_1 ที่ได้จากการทดสอบการดริ้งโรเตอร์ ดังนั้นเราก็จะได้ค่า X_m ในขณะที่ ส่วนของความต้านทานของแกนเหล็กสามารถหาได้จากการคำนวณดังนี้

$$R_o = \frac{P_o}{\hat{I}_o^2} \quad (3.9)$$

$$R_o = R_1 + R_c \quad (3.10)$$

เมื่อแทนค่า R_1 ที่ได้จากการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (V-I method) ดังนั้นเราก็จะได้ค่า R_c

โดยที่ ϕ_o คือ มุมระหว่างแรงดันกับกระแส (องศา)

P_o คือ กำลังที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (วัตต์)

V_o คือ แรงดันที่วัดได้ (โวลต์)

I_o คือ กระแสที่วัดได้ (แอมแปร์)

R_c คือ ความต้านทานของแกนเหล็ก (โอห์ม)

X_m คือ magnetizing reactance (โอห์ม)

S_o คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (โวลต์แอมแปร์)

Q_o คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน (VAR)

X_o คือ รีแอกแตนซ์รวมที่สเตเตอร์ (โอห์ม)

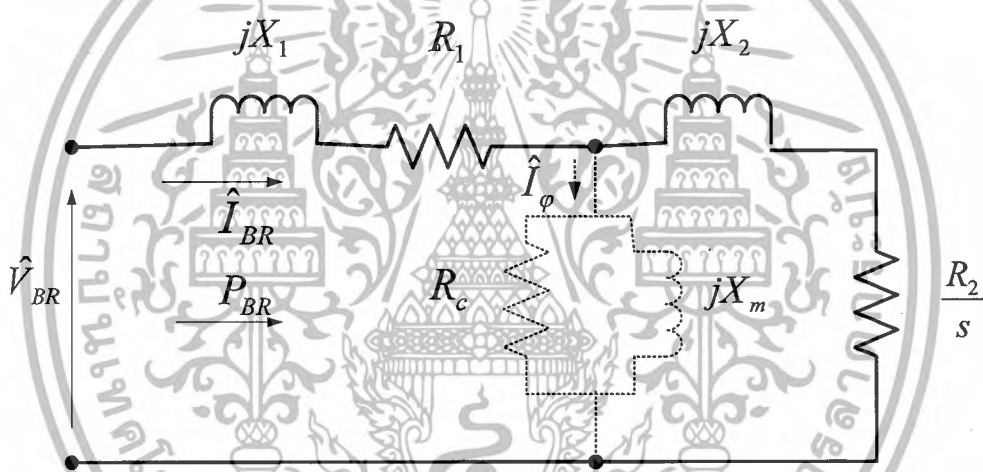
X_1 คือ leakage reactance ของขดลวดสเตเตอร์ (โอห์ม)

R_1 คือ ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (โอห์ม)

R_o คือ ความต้านทานรวมที่สเตเตอร์ (โอห์ม)

3.3 การทดสอบเครื่องโรเตอร์ (Block - Rotor Test)

การทดสอบเครื่องโรเตอร์ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบลัดวงจร (short circuit test) ของหม้อแปลง โดยจะทำการทดสอบโดยการตั้งส่วนโรเตอร์ให้หยุดอยู่กับที่ หรือไม่ให้หมุนแล้วจึงป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนถึงกระแสไฟฟ้าพิกัด (rated current) ณ ตอนนี้อัตราลื่น จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะความเร็วโรเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการ $s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$ จึงทำให้ ค่าลื่นเท่ากับหนึ่ง และความถี่ที่โรเตอร์เท่ากับความถี่ที่สเตเตอร์ ($f_r = f_s$) จากการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระตุ้นเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยมากๆ ทั้งนี้เพราะค่ากระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านจากด้านสเตเตอร์ไปยังด้านโรเตอร์ ดังนั้นวงจรสมมูลในการทดสอบเครื่องโรเตอร์จะแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยในส่วนที่เป็นเส้นประจะไม่นำมาพิจารณา



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลขณะทดสอบการตั้งโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การทดสอบเครื่องโรเตอร์จะทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าไหลเข้า (\hat{I}_{BR}) , ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข้า (\hat{V}_{BR}) และ กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปทางด้านสเตเตอร์ (P_{BR}) จากนั้นนำผลการทดสอบเหล่านี้มาคำนวณหาค่า leakage reactance (X_1, X_2) เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์แล้วนั้น จะสามารถหาค่าความต้านโรเตอร์ (R_2) ได้

จากรูปที่ 3.3 จะสามารถคำนวณหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$\phi_{BR} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{BR}}{\hat{V}_{BR} \hat{I}_{BR}} \right) \quad (3.11)$$

$$Z_{BR} = \frac{\hat{V}_{BR}}{\hat{I}_{BR}} \quad (3.12)$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{\hat{I}_{BR}^2} \quad (3.13)$$

จาก $Z_{BR} = \sqrt{R_{BR}^2 + X_{BR}^2}$

$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \quad (3.14)$$

$$X_{BR} = X_1 + X_2 \quad (3.15)$$

ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ ได้มีการระบุ NEMA Design Letter ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นสามารถแยกค่า X_1, X_2 ได้ โดยดูจากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าอัตราส่วนระหว่าง X_1 กับ X_2 ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละชนิด

Motor Class	Description	X_1	X_2
A	Normal starting torque, normal starting current	$0.5 X_{BR}$	$0.5 X_{BR}$
B	Normal starting torque, low starting current	$0.4 X_{BR}$	$0.6 X_{BR}$
C	High starting torque, low starting current	$0.3 X_{BR}$	$0.7 X_{BR}$
D	High starting torque, high slip	$0.5 X_{BR}$	$0.5 X_{BR}$
Wound rotor	Performance varies with rotor resistance	$0.5 X_{BR}$	$0.5 X_{BR}$

จาก $R_{BR} = R_1 + R_2$

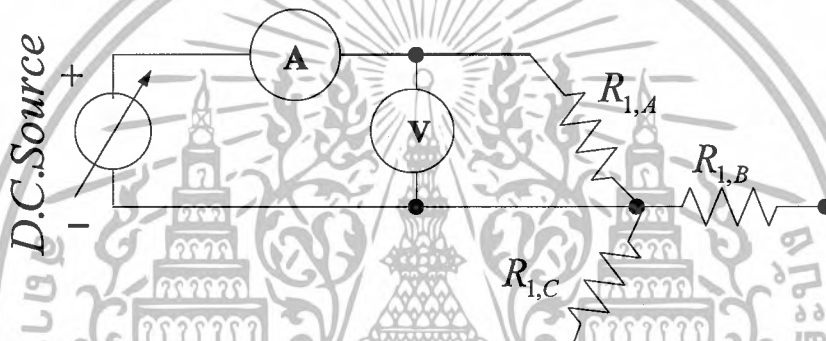
$$R_2 = R_{BR} - R_1 \quad (3.16)$$

เมื่อนำค่า R_1 ที่ได้จากการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (V-I method) มาแทนในสมการ 3.16 ดังนั้นจะได้ค่า R_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

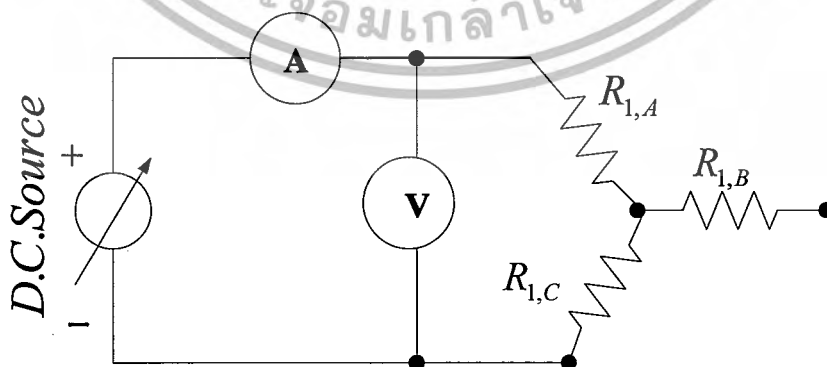
3.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (V-I Method)

การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (R_1) นี้ จะทำการทดสอบ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อลดผลของกระแสที่ไหลบริเวณผิวของตัวนำ (skin effect) ให้กับขดลวดสเตเตอร์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะปรับแรงดันหลายระดับจึงถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าแล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า แล้วหาความชันจากกราฟ จะได้ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ จะสอดคล้องกับ $R_1 = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ ส่วนค่า reactance ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นศูนย์ในการทดสอบนี้



รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (คร่อมขดลวดกับ จุดนิวทรัล)

หรือ



รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (คร่อม 2 ขดลวด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความต้านทาน 2 ขดลวด ดังนั้นต้องนำค่าที่คำนวณได้มาหารด้วย 2 จะได้ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์เฉลี่ย 1 ขดลวดออกมา

3.5 ผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์

การทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัดประมาณ 0.75 กิโลวัตต์ ได้ผลการทดสอบดังนี้

$$\text{No-load} \quad : \hat{V}_O = 220.35V, \hat{I}_O = 1.05A, P_O = 31.30W, \phi_O = 82.26^\circ$$

$$\text{Block-rotor} \quad : \hat{V}_{BR} = 49.58V, \hat{I}_{BR} = 2.01A, P_{BR} = 70.23W, \phi_{BR} = 45.38^\circ$$

จากข้อมูลการทดสอบข้างต้นสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$R_C = \frac{\hat{V}_O^2}{P_O} = \frac{(220.35)^2}{31.30} = 1,551.25\Omega$$

$$X_m = \frac{\hat{V}_O}{\hat{I}_O \sin \phi_O} = \frac{220.35}{1.05 \cdot \sin 82.26^\circ} = 211.78\Omega$$

$$Z_{BR} = \frac{\hat{V}_{BR}}{\hat{I}_{BR}} = \frac{49.58}{2.01} = 24.67\Omega$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{\hat{I}_{BR}^2} = \frac{70.23}{(2.01)^2} = 17.38\Omega$$

$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} = \sqrt{(24.67)^2 - (17.38)^2} = 17.51\Omega$$

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเครื่องนี้เป็น Class B จากตารางที่ 3.1 จะหา X_1 และ X_2 ได้ดังนี้

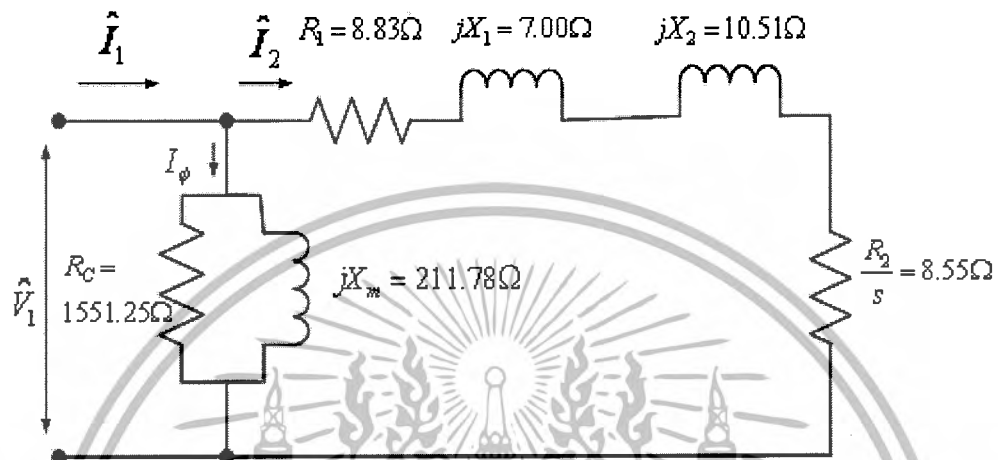
$$X_1 = 0.4X_{BR} = (0.4)(17.51) = 7.00\Omega, \quad X_2 = 0.6X_{BR} = (0.6)(17.51) = 10.51\Omega$$

จากการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ จะได้ค่า $R_1 = 8.83\Omega$

ดังนั้น

$$R_2 = R_{BR} - R_1 = 17.38 - 8.83 = 8.55\Omega$$

เราจะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ (approximated equivalent circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า

4.1 บทนำ

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้านั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสร้างแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึง การพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับความเร็วยรอบการหมุนของส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับความเร็วยรอบในการหมุน โดยก่อนจะทำการทดสอบนั้นจะต้องมีการคำนวณค่าตัวเก็บประจุเริ่มต้นที่ใช้สำหรับการทดสอบ โดยอาศัยหลักการของการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างค่าแม่เหนี่ยวนำ (X_m) กับค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ (X_c) ของตัวเก็บประจุขนาด ดังจะได้กล่าวต่อไป

4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบ

4.2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้น จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดพิกัดกำลัง 1 แรงม้าหรือ 0.75 kW โดยมีโรเตอร์ชนิดกรงกระรอก (squirrel cage rotor) สำหรับตัวต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาดพิกัดกำลัง 5 แรงม้า

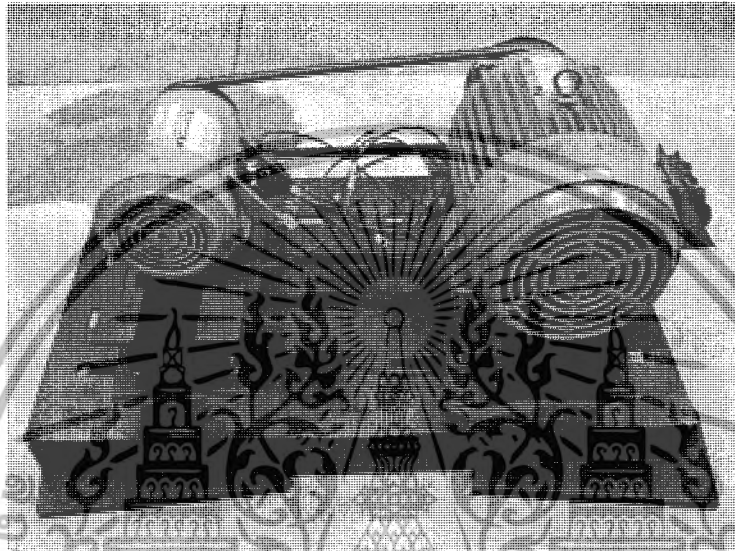
ตารางที่ 4.1 nameplate ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบ

1 HP 0.75 kW 4 Pole TYPE SF-JR						IEC 60034-1	IISC 4210
Hz	50	50	50	60	60	IP 44	IC 411
V	220	380	415	220	440	Bearing 6204ZZ, 6203ZZ	
A	3.3	1.9	1.95	3	1.7	Frame 80 M	Rating S1
r/min	1400	1400	1410	1700	1720	Serial10.5	
PF	0.8	0.8	0.74	0.85	0.78	TH CLASS B AMB Temp 40 C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 แทนทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

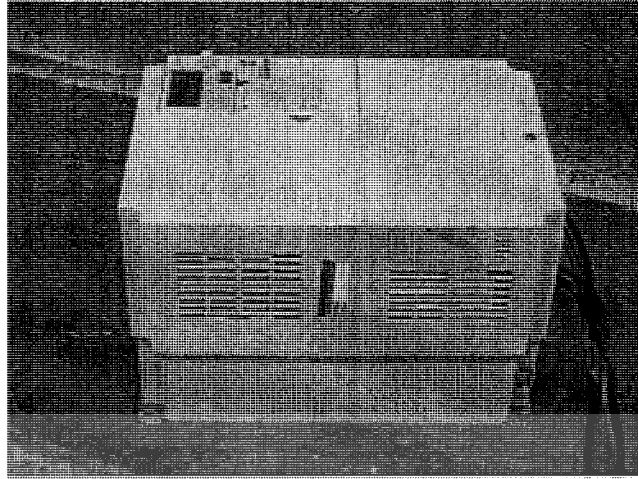
ลักษณะการทดสอบนี้จะเป็นการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 5 แรงม้ามาต่อเป็นต้นกำลังในการขับเครื่องส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเป็นการจำลองแหล่งพลังงานจากน้ำหรือพลังงานลมที่มีความเร็วคงที่ ซึ่งจะทำการติดตั้งบนแท่นทดสอบเดียวกันแล้วใช้มู่เล่กับสายพานเป็นตัวส่งผ่านกำลังระหว่างเครื่องจักรกลทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แท่นทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

4.2.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับตัวต้นกำลัง

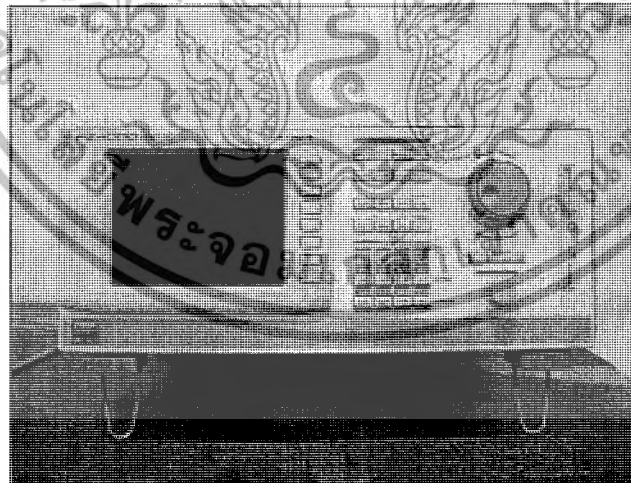
ชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นตัวต้นกำลังการหมุนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนให้กับส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

4.2.4 เครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้า

เครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้า ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น PZ4000 เป็นอุปกรณ์วัดทางไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ทั้ง ค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า (I), กำลังไฟฟ้าจริง (P), กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q), กำลังไฟฟารวม (S), อิมพีแดนซ์ (Z), ความต้านทาน (R), ความถี่ทางไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (f) และอื่นๆอีกมากมาย แสดงดังรูปที่ 4.3

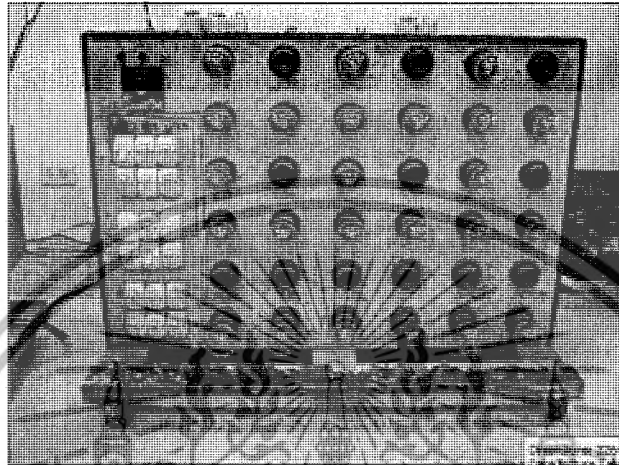


รูปที่ 4.3 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้ายี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น PZ4000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ภาระทางไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดความต้านทานล้วน

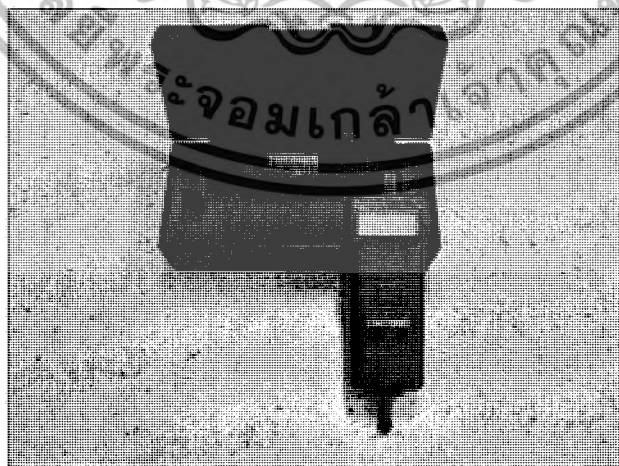
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นภาระให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเป็นการผสมผสานระหว่างหลอดไส้ (incandescent) ขนาด 75 W และ 100 W เพื่อให้สามารถปรับระดับการจ่ายภาระไฟฟ้าได้อย่างละเอียด แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ชุดภาระทางไฟฟ้า 3 เฟสชนิดความต้านทาน

4.2.6 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบการหมุน (Tacho Meter)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วรอบการหมุน ของส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.5

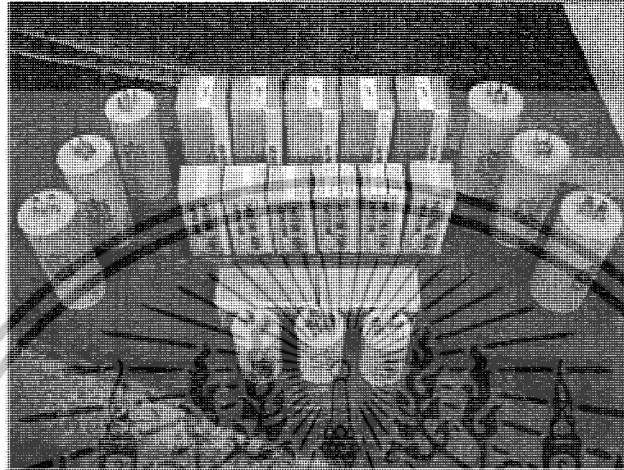


รูปที่ 4.5 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบการหมุน (tacho meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ชุดตัวเก็บประจุขนาดต่าง ๆที่ใช้ในการทดสอบ

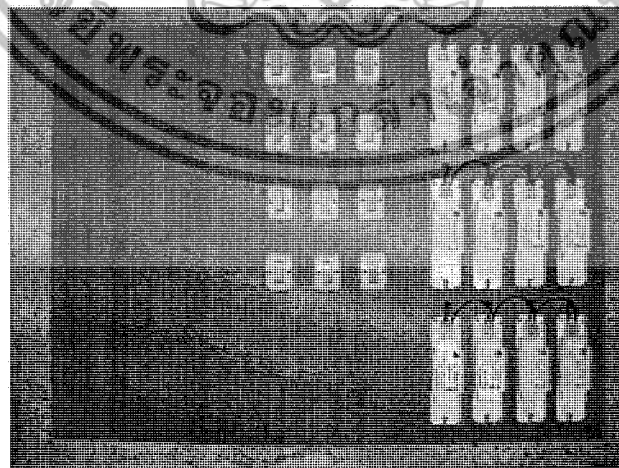
ประกอบด้วยตัวเก็บประจุขนาดต่าง ๆ ใช้ในการจ่ายกระแสกระตุ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังจะได้กล่าวต่อไป แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ชุดตัวเก็บประจุขนาดต่าง ๆที่ใช้สำหรับการทดสอบ

4.2.8 การะทางไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดความเหนี่ยวนำ

ประกอบด้วยบัลลาสต์ ใช้ร่วมกับภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วน เพื่อจำลองภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานผสมความเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ชุดบัลลาสต์จำลองภาระไฟฟ้าแบบความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สำหรับวิธีการในการคำนวณจะอาศัยหลักการของการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างค่า X_m กับ X_c หรือกล่าวได้ในอีกนัยหนึ่งว่า ตัวเก็บประจุขนาดที่ใช้ในการ build up นั้น จะทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับส่วนกระตุ้น (X_m) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถสร้างแรงดันที่ขั้วขึ้นมาได้ สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$X_c = X_m \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{2\pi f C} = X_m \quad (4.2)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_m} \quad (4.3)$$

แทนค่า $X_m = 211.78 \ \Omega$ และค่า $f = 50 \ \text{Hz}$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 211.78} = 15.03 \times 10^{-6} = 15 \ \mu\text{F}$$

ดังนั้นจากการคำนวณค่าตัวเก็บประจุ ทำให้ทราบว่าค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กมีค่า 15 ไมโครฟารัด ซึ่งจะช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถ build up แรงดันได้ประมาณ 220 โวลต์ โดยมีความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ประมาณ 1500 รอบต่อนาที หรือได้ความถี่ทางไฟฟ้าประมาณ 50 เฮิร์ตซ์

4.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไร้อะไรทางไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไร้อะไรทางไฟฟ้า

ขนาดตัวเก็บประจุขนานเท่ากับ 15 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.65	202.5	-0.003
400	-	-	13.28	401.1	-0.004
600	1.55	-	19.98	602.7	-0.001
800	2.26	-	26.5	801	-0.006
1000	3.29	-	33.27	998.1	-0.002
1200	5.39	-	39.98	1199.4	-0.001
1400	11.31	0.05	46.66	1399.8	-0.000
1477	203.57	1	49.01	1470.3	-0.005
1512	221.39	1.15	50.11	1503.3	-0.006
1600	257.71	1.44	53.05	1591.5	-0.005
1725	302.75	1.91	57.17	1715.1	-0.006

ขนาดตัวเก็บประจุขนานเท่ากับ 20 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.65	200.4	-0.003
400	-	-	13.33	404.4	-0.003
600	1.64	-	19.98	603.6	-0.001
800	2.51	-	26.65	801.6	-0.001
1000	4.04	-	33.30	1001.7	-0.001
1200	9.47	0.05	39.98	1201.5	-0.001
1357	210.32	1.32	45.07	1352.1	-0.004
1380	219.54	1.41	45.74	1372.2	-0.006
1400	227.46	1.5	46.44	1393.2	-0.005
1502	263.53	1.89	49.71	1491.3	-0.007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดตัวเก็บประจุขนานเท่ากับ 25 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.66	202.8	-0.001
400	-	-	13.30	398.1	-0.003
600	1.67	-	19.97	602.7	-0.002
800	2.66	-	26.65	800.1	-0.001
1000	5.33	0.03	33.33	1001.7	-0.000
1194	179.21	1.2	39.64	1189.2	-0.004
1200	184.68	1.27	39.73	1191.9	-0.007
1303	220.59	1.69	43.12	1293.6	-0.007
1345	234.86	1.88	44.47	1334.1	-0.008

ขนาดตัวเก็บประจุขนานเท่ากับ 30 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.65	201.0	-0.003
400	-	-	13.30	400.8	-0.003
600	1.71	-	19.99	602.4	-0.001
800	3.01	-	26.64	799.2	-0.001
1000	7.99	0.05	33.32	999.6	-0.000
1120	176.72	1.35	37.01	1110.3	-0.009
1200	204.39	1.73	39.62	1188.6	-0.010
1243	220.78	1.92	41.03	1230.9	-0.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดตัวเก็บประจุขบวนการเท่ากับ 35 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.64	201.0	-0.004
400	-	-	13.32	400.5	-0.001
600	1.82	-	19.98	600.9	-0.001
800	3.61	-	26.65	813	-0.001
986	140.81	1.05	32.59	977.7	-0.008
1000	146.93	1.14	33.11	993.3	-0.007
1150	199.21	1.88	37.82	1134.6	-0.0135

ขนาดตัวเก็บประจุขบวนการเท่ากับ 40 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.65	201.3	-0.003
400	-	-	13.31	400.8	-0.002
600	2	-	19.99	602.7	-0.001
800	4.45	0.03	26.64	800.4	-0.001
912	123.79	0.96	30.13	903.9	-0.009
1000	160.2	1.44	33.01	990.3	-0.010
1078	188.76	1.9	35.53	1065.9	-0.011

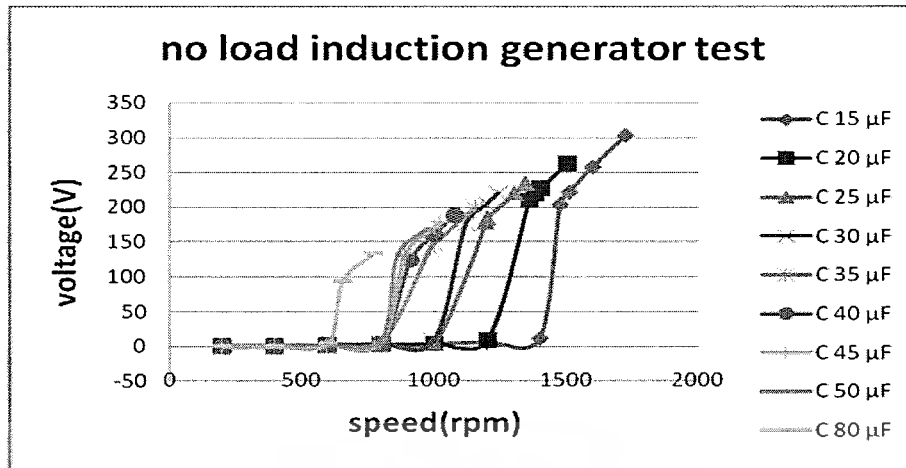
ขนาดตัวเก็บประจุขบวนการเท่ากับ 45 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.66	200.4	-0.001
400	-	-	13.30	400.5	-0.003
600	2.11	-	19.99	600.3	-0.001
800	6.06	0.05	26.66	800.4	-0.000
890	132.94	1.18	29.45	883.5	-0.007
1000	171.8	1.79	32.89	986.7	-0.013
1019	178.93	1.92	33.54	1006.2	-0.012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

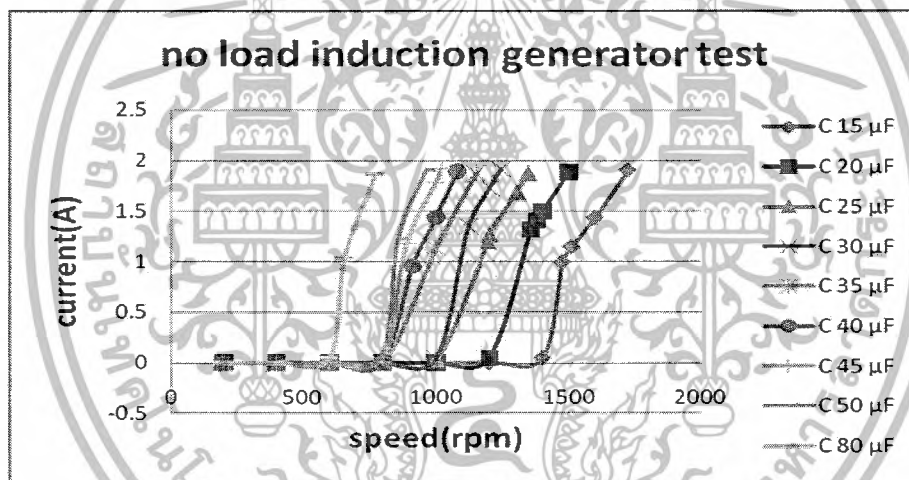
ขนาดตัวเก็บประจุขนานเท่ากับ 50 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.65	200.1	-0.003
400	-	-	13.33	400.2	-0.000
600	2.3	-	19.99	600	-0.001
800	10.17	0.09	26.65	800.1	-0.001
859	130.34	1.23	28.07	842.1	-0.020
964	168.34	1.91	31.68	950.4	-0.014

ขนาดตัวเก็บประจุขนานเท่ากับ 80 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.66	200.4	-0.001
400	-	-	13.33	400.5	-0.000
600	4.55	0.05	19.98	599.4	-0.001
657	93.53	1.04	21.6	648	-0.014
773	134.08	1.86	25.23	756.9	-0.021

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อมีการเปลี่ยนค่าของตัวเก็บประจุขนานให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะพบว่าที่ความเร็วรอบเดียวกัน ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุทางไฟฟ้ามากจะให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าที่น้อย อีกทั้งแนวโน้มในการ build up แรงดันจะเป็นไปได้ง่ายขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุขนาน ที่ใช้มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วรอบของการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขณะที่ไม่มีภาระ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็วรอบของการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขณะที่ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเองในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้านั้น จะพบว่าที่ค่าความจุของตัวเก็บประจุขนาน ขนาด 15 ไมโครฟารัด จะให้ระดับแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทประมาณ 220 โวลต์ ที่ความถี่ทางไฟฟ้าประมาณ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งตรงตามที่ได้คำนวณไว้ก่อนการทดสอบ ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าวิธีการคำนวณนี้สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมได้จริง จากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุทดสอบหลายๆ ค่าจะพบว่าเมื่อขนาดของตัวเก็บประจุขนานมีค่ามากขึ้นจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถ build up แรงดันได้ง่ายขึ้น คือ build up ได้ ณ ความเร็วรอบที่ต่ำลงนั่นเองแต่ก็จะส่งผลให้ความถี่ทางไฟฟาลดลงไปด้วย และจะพบว่าถ้าขนาดของตัวเก็บประจุขนานมีค่ามากเกินไป จะทำให้การ build up เกิดที่ความเร็วรอบการหมุนที่ต่ำและค่ากระแสกระตุ้นจะมีค่าสูง แสดงให้เห็นว่าค่าตัวเก็บประจุขนานไม่ควรมีค่ามากเกินไป แต่ควรมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 15 – 20 ไมโครฟารัด

สำหรับการอธิบายพฤติกรรมการ build up แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น จะพบว่าการเพิ่มค่าความจุของตัวเก็บประจุขนาน จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถ build up แรงดันที่ขั้วได้ง่ายขึ้น เนื่องจากการเพิ่มค่าความจุให้กับตัวเก็บประจุจะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่ากระแสกระตุ้นมีค่ามาก จึง build up แรงดันที่ขั้วได้ง่ายกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าต่ำกว่าหรือถ้าอธิบายในเชิงสมการเรโซแนนซ์จะพบว่าการเพิ่มค่าความจุ จะทำให้การเรโซแนนซ์เกิดขึ้นที่ความถี่ที่ต่ำลงนั่นเอง

4.5 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุขนานกับค่า X_m ค่าอื่น ๆ

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นการทดสอบจากคำนวณค่าตัวเก็บประจุโดยการใช้ค่า X_m ที่พิกัดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ 220 โวลต์ ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในหัวข้อนี้ จะเป็นการทดสอบหาค่าตัวเก็บประจุ build up ค่าอื่น ๆ โดยการใช้ค่า X_m ที่พิกัดแรงดันอื่น คือที่พิกัดแรงดัน 200 , 210 และ 230 โวลต์ แล้วลองทดสอบ build up เพื่อดูว่าค่าของตัวเก็บประจุจากการคำนวณที่พิกัดแรงดันอื่น ๆ นั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถ build up แรงดันตรงตามพิกัดแรงดันหรือไม่

4.5.1 การคำนวณค่า X_m และค่าตัวเก็บประจุขนาน ที่พิกัดแรงดันต่าง ๆ

ณ แรงดัน 200 โวลต์ จากการทดสอบ no load test จะได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

$$V_o = 200.47 \text{ โวลต์} , I_o = 0.88 \text{ แอมแปร์} , \phi_o = 82.17^\circ$$

$$\text{จาก } X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} = \frac{200.47}{0.8796 \times \sin 82.17^\circ} = 230.05 \text{ โอห์ม}$$

จากสมการเรโซแนนซ์

$$X_m = X_c$$

$$230.05 = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = 13.83 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ณ แรงดัน 210 โวลต์ จากการทดสอบ no load test จะได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

$$V_o = 210.24 \text{ โวลต์} , I_o = 0.96 \text{ แอมแปร์} , \phi_o = 82.21^\circ$$

$$\text{จาก } X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} = \frac{210.24}{0.96 \times \sin 82.21^\circ} = 221.04 \text{ โอห์ม}$$

จากสมการเรโซแนนซ์

$$X_m = X_c$$

$$221.04 = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = 14.40 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ณ แรงดัน 230 โวลต์ จากการทดสอบ no load test จะได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

$$V_o = 229.88 \text{ โวลต์} , I_o = 1.16 \text{ แอมแปร์} , \phi_o = 82.25^\circ$$

$$\text{จาก } X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} = \frac{229.88}{1.16 \times \sin 82.25^\circ} = 199.99 \text{ โอห์ม}$$

จากสมการเรโซแนนซ์

$$X_m = X_c$$

$$199.99 = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = 15.92 \text{ ไมโครฟารัด}$$



4.6 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ค่าตัวเก็บประจุจากการคำนวณด้วยค่า X_m ณ พิกัดแรงดันต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไว้ภาระทางไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุขนาน 13.8 μF					
$N_r(\text{rpm})$	V	I	f(Hz)	$N_s(\text{rpm})$	S
200	-	-	6.74	202.2	0.011
400	-	-	13.37	401.1	0.003
600	-	-	20.15	604.5	0.007
800	2.12	-	26.64	799.2	-0.001
1000	3.08	-	33.43	1002.9	0.003
1200	4.68	-	40.07	1202.1	0.002
1400	8.88	0.037	46.78	1403.4	0.002
1508	195.52	0.888	49.95	1498.5	-0.006
1528	207.12	0.973	50.77	1523.1	-0.003
1555	220.19	1.065	51.72	1551.6	-0.002
1600	240.41	1.227	53.15	1594.5	-0.003
1800	315.56	1.927	59.77	1793.1	-0.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุขนาด 14.4 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.61	198.3	-0.009
400	-	-	13.33	399.9	-0.000
600	0.51	-	19.96	598.8	-0.002
800	2.13	-	26.66	799.8	-0.000
1000	3.09	-	33.45	1003.5	0.003
1200	4.85	-	40.06	1201.8	0.001
1400	9.9	0.043	46.74	1402.2	0.002
1489	198.46	0.922	49.55	1486.5	-0.002
1500	205.12	0.971	49.83	1494.9	-0.003
1508	208.29	0.996	50.04	1501.2	-0.005
1530	220.17	1.082	50.7	1521	-0.006
1600	249.01	1.322	52.93	1587.9	-0.008
1700	286.46	1.694	56.28	1688.4	-0.007

ตัวเก็บประจุขนาด 16 μ F					
N_r (rpm)	V	I	f(Hz)	N_s (rpm)	S
200	-	-	6.66	199.8	-0.001
400	-	-	13.56	406.8	0.0167
600	0.51	-	20.15	604.5	0.007
800	2.18	-	26.64	799.2	-0.001
1000	3.27	-	33.33	999.9	-0.0001
1200	5.47	-	40.01	1200.3	0.000
1400	16.16	0.075	46.73	1401.9	0.001
1480	219.35	1.172	49	1470	-0.007
1484	220	1.176	49.2	1476	-0.005
1508	230.3	1.27	50.07	1502.1	-0.004
1600	265.5	1.595	53.04	1591.2	-0.006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบจะพบว่าที่ค่าตัวเก็บประจุขนาดที่ได้จากการคำนวณค่า X_m ณ พิกัดแรงดันอื่นๆจะสามารถ build up แรงดันได้ค่อนข้างตรงกับพิกัดแรงดันที่ใช้ในการคำนวณจึงแสดงให้เห็นว่าค่า X_m ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นอาจมีได้หลายค่า ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ no load test แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่า X_m ควรจะทำการคำนวณที่พิกัดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าควรจะต้องใช้งานที่พิกัดแรงดัน



บทที่ 5

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ขณะมีภาระไฟฟ้า

5.1 บทนำ

การทดสอบพฤติกรรมของการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อีกทั้งเป็นการศึกษาปรากฏการณ์การตกลงของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายภาระไฟฟ้าที่พิกัดต่างๆ โดยปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอถึงการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า ในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้าและขณะมีภาระทางไฟฟ้า ในการทดสอบขณะมีภาระทางไฟฟ้าจะทำการทดสอบที่ 2 สภาวะด้วยกัน คือ สภาวะความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์คงที่(constant speed) และสภาวะความถี่ทางไฟฟ้าเอาร์ทพุทคงที่ (constant frequency) โดยการทดสอบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุขนาดค่าต่างๆกัน แล้วจึงทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วนเพื่อดูว่าที่ค่าความจุของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ดีมากน้อยต่างกันอย่างไร รวมถึงศึกษาการตกของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายภาระที่พิกัดโหลดต่างๆ และจ่ายภาระชนิดความต้านทานปนความเหนี่ยวนำแล้วดูปรากฏการณ์เกิดขึ้น

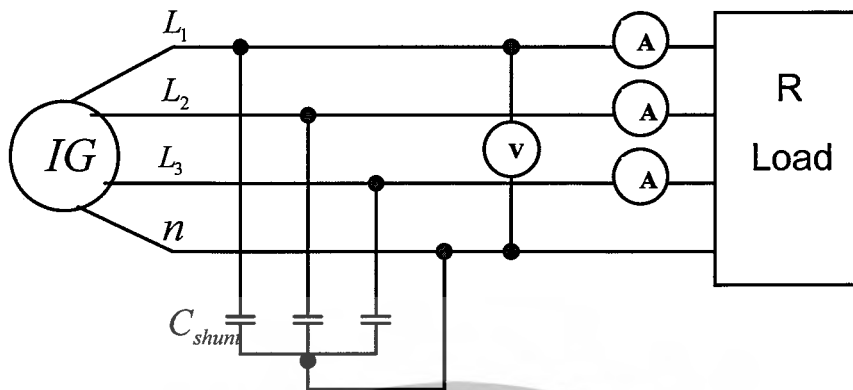
5.2 การทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วน

การทดสอบโดยการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาจ่ายภาระไฟฟ้านั้น จะเป็นการทดสอบโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาดเพียงอย่างเดียวแล้วทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานล้วน เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น โดยมีสมมติฐานในขั้นต้นว่า เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการจ่ายภาระไฟฟ้า จะทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นตกลงเนื่องจากจะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเสมือน ในส่วนของลิกเกจรีแอกแตนซ์ ($X_{\ell,2}$) เนื่องจากเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_1) ไหลสูงขึ้นด้วย กระแสนี้จะไหลผ่านลิกเกจรีแอกแตนซ์ ($X_{\ell,2}$) ทำให้เสียกำลังไฟฟ้าเสมือนไปในส่วนนี้ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงมีค่าลดลง ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วตกลง สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$Q = I_1^2 X_{\ell,2} \quad (5.1)$$

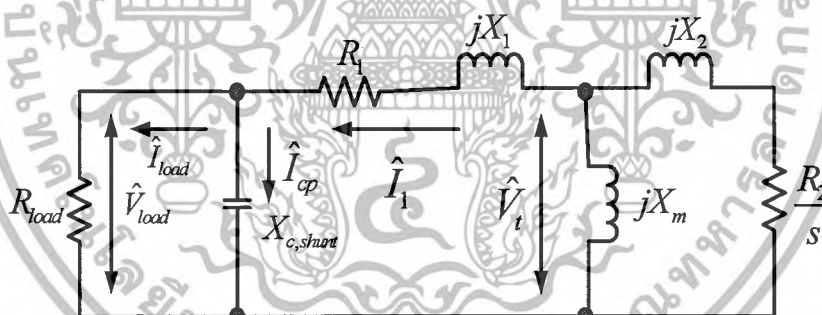
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การต่อวงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.1 วงจรสำหรับทดสอบการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 5.1 จะใช้มิเตอร์คล่องวัดกระแสยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น PZ4000 ในการอ่านค่ากระแสรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (\hat{I}_1) และค่ากระแสกระตุ้น (\hat{I}_{cp}) ส่วนค่ากระแสที่ภาระทางไฟฟ้า (\hat{I}_{load}) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระทางไฟฟ้า (\hat{V}_{load}) จะใช้ power analyzer ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น PZ400 ในการวัดค่า



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะจ่ายภาระไฟฟ้า

รูปวงจรมูลที่ 5.2 แสดงถึงวงจรมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ขณะต่ออยู่กับภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน ซึ่งจะพบว่ามีกระแสที่เกี่ยวข้องกัน 3 กระแสด้วยกันคือ \hat{I}_1 , \hat{I}_{cp} และ \hat{I}_{load} โดยที่

- \hat{I}_1 คือ ค่ากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวม (แอมแปร์)
- \hat{I}_{cp} คือ ค่ากระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (แอมแปร์)
- \hat{I}_{load} คือ ค่ากระแสภาระทางไฟฟ้า (แอมแปร์)
- \hat{V}_t คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (โวลต์)
- \hat{V}_{load} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ภาระทางไฟฟ้า (โวลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าค่า \hat{V}_t เป็นค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งแรงดัน \hat{V}_t นี้จะเป็นแรงดันที่ไปตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ (C_{shunt}) และ ภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน (R) ด้วย เนื่องจาก C_{shunt} และ R นั้นต่อขนานกันอยู่ ดังนั้นเราจึงสามารถวิเคราะห์ทิศทางของแอมพลิจูดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้ดังนี้

- แรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อม ตัวเก็บประจุ C_{shunt}

จะพบว่าในส่วนนี้ตัวเก็บประจุ C_{shunt} เปรียบเสมือนเป็นภาระทางไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุเพียงชนิดเดียว ดังนั้นค่ากระแสของภาระทางไฟฟ้า C_{shunt} จะต้องมีเฟสหน้าหน้าแรงดัน \hat{V}_t โดยทำมุมเฟสเท่ากับ 90 องศา สามารถแสดงแอมพลิจูดได้ดังนี้



รูปที่ 5.3 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{shunt}
(ข) แสดงแอมพลิจูดความสัมพันธ์ \hat{V}_t กับ \hat{I}_{cp}

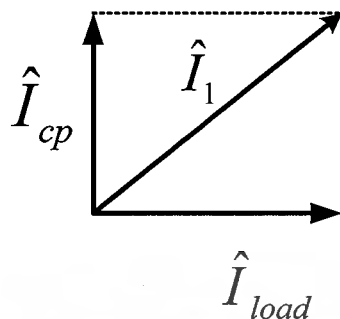
- แรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อม ภาระทางไฟฟ้า R

จะพบว่าในส่วนนี้ภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นภาระทางไฟฟ้า R ล้วน ไม่มีภาระทางไฟฟ้าชนิดอื่นเกี่ยวข้อง ดังนั้นค่ากระแสของภาระทางไฟฟ้า R (\hat{I}_{load}) นี้จะอยู่บนเฟสเดียวกันกับ \hat{V}_t นั่นคือ ทำมุมเฟสกันเท่ากับ 0 องศา สามารถแสดงแอมพลิจูดได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อมตกคร่อมภาระทางไฟฟ้า R
(ข) แสดงแอมพลิจูดความสัมพันธ์ \hat{V}_t กับ \hat{I}_{load}

เมื่อนำเวกเตอร์จาก 2 กรณีมารวมเป็นรูปเดียวกัน จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ
เวกเตอร์กระแส \hat{I}_1 , \hat{I}_{cp} และ \hat{I}_{load} ได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 เวกเตอร์กระแสรวม

จากรูปเวกเตอร์ข้างต้นทำให้ทราบว่าผลรวมของกระแสกระตุ้น \hat{I}_{cp} และกระแสภาระ
ทางไฟฟ้า \hat{I}_{load} คือ ค่ากระแสรวม \hat{I}_1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นั่นเอง นั่นคือ

$$\hat{I}_1 = \sqrt{\hat{I}_{load}^2 + \hat{I}_{cp}^2} \quad (5.2)$$

วิธีในการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีหลักการดังต่อไปนี้

1. ทำการ build up แรงดันให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก่อน โดยการปรับเร่งความเร็วให้กับส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนกระทั่งการ build up สมบูรณ์
2. การจ่ายภาระไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะทำที่ 2 สภาวะคือความเร็วรอบการหมุนโรเตอร์คงที่หรือเรียกสั้นๆว่าสภาวะความเร็วคงที่ (constant speed) และสภาวะความถี่ทางไฟฟ้าเอาท์พุทคงที่หรือเรียกสั้นๆว่า สภาวะความถี่คงที่ (constant frequency)
3. การจ่ายภาระไฟฟ้าจะใช้วิธีการเปิดสวิตช์โหลดไฟทีละ 3 เฟส เฟสละ 25 W ดังนั้นสเต็ปการจ่ายภาระไฟฟ้าคือ 75 W เมื่อเปิดสวิตช์แล้วจึงทำการบันทึกผลแล้วจึงจ่ายภาระเพิ่มทีละ 75 W ไปเรื่อยๆ จนกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าต่อไปได้หรือจนกว่ากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าถึงพิกัด

4. สำหรับกรณีของการทดสอบในสภาวะความเร็วคงที่ เมื่อมีการจ่ายภาระไฟฟ้าเกิดขึ้น จะทำให้ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ตกลงไป ดังนั้นทุกครั้งที่มีการจ่ายภาระเพิ่มจะต้องทำการปรับความเร็วรอบของโรเตอร์ให้มีค่าเพิ่มตามที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลอง แล้วจึงค่อยทำการบันทึกผล

5. สำหรับกรณีของการทดสอบในสภาวะความถี่คงที่นั้น จะมีหลักการคล้ายกับการทดสอบในสภาวะความเร็วคงที่คือ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการจ่ายภาระไฟฟ้า จะทำให้ความถี่ทางไฟฟ้าเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกลงไป ดังนั้นจึงต้องทำการปรับความเร็วรอบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุนของโรเตอร์ให้เพิ่มขึ้นแล้วดูว่าความถี่ทางไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นกลับมาเท่าเดิมตามที่กำหนดไว้แล้วจึงค่อยทำการบันทึกผลต่อไป

6. เมื่อทำการจ่ายภาระไฟฟ้าจนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าต่อไปได้ จึงหยุดทำการทดสอบในตัวเก็บประจุขนาดค่านั้นๆ แล้วจึงเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุขนาดใหม่แล้วทดสอบเช่นเดิม จนกว่าจะครบตามที่ได้ออกแบบการทดสอบไว้

5.2.2 ผลการทดสอบในสภาวะความเร็วคงที่ (Constant Speed)

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า (ชุดที่ 1)

$N_r = 1,512$ รอบต่อนาที

ตัวเก็บประจุขนาด 15 μF								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_C	$\%V_{reg}$
0	1512	220.08	0	50.2	-0.004	1.05	1.06	0.04
67.6	1512	211.18	0.107	49.88	-0.010	0.97	1	-4.01
123.9	1512	199.23	0.207	49.66	-0.015	0.91	0.93	-9.44
166.6	1512	185.03	0.3	49.64	-0.015	0.85	0.84	-15.90

ตัวเก็บประจุขนาด 17.5 μF								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_C	$\%V_{reg}$
0	1512	246.78	0	50.3	-0.002	1.36	1.36	12.17
81.9	1512	239.08	0.11	49.8	-0.012	1.27	1.29	8.67
156.8	1512	232.71	0.23	49.57	-0.017	1.21	1.25	5.78
223.3	1512	224.61	0.33	49.34	-0.021	1.15	1.19	2.10
287.8	1512	215.91	0.44	49.36	-0.021	1.1	1.13	-1.86
325	1512	202.9	0.53	48.93	-0.030	1.08	1.06	-7.77
346.7	1512	188.25	0.61	48.8	-0.033	1.08	0.97	-14.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุขนาน 20 μF								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	1512	266.11	0.47	49.9	-0.010	1.73	1.72	20.96
341.2	1512	241.45	0	49.08	-0.027	1.41	1.5	9.75
405.3	1512	234.4	0.57	48.87	-0.031	1.37	1.44	6.55
461.2	1512	227	0.67	48.82	-0.032	1.35	1.39	3.18
504.4	1512	217.76	0.77	48.6	-0.037	1.36	1.33	-1.02
532.9	1512	203.29	0.87	48.3	-0.043	1.38	1.23	-7.60
538.7	1512	189.92	0.94	48.19	-0.046	1.38	1.14	-13.67

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า

$N_r = 1,480$ รอบต่อนาที

ตัวเก็บประจุขนาน 15 μF								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	1480	205.4	0	48.99	-0.007	1	0.99	-6.64
60.9	1480	196.67	0.1	48.9	-0.009	0.93	0.92	-10.60
110.4	1480	184.22	0.2	48.91	-0.009	0.86	0.84	-16.26
136.8	1480	161.97	0.28	48.54	-0.016	0.77	0.75	-26.38

ตัวเก็บประจุขนาน 17.5 μF								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	IC	$\%V_{\text{reg}}$
0	1480	235.1	0	49.23	-0.002	1.28	1.28	6.86
76	1480	227.54	0.11	48.75	-0.012	1.2	1.22	3.43
146	1480	221.91	0.22	48.92	-0.008	1.14	1.16	0.87
204.4	1480	211.64	0.32	48.27	-0.022	1.09	1.11	-3.80
255.2	1480	199.58	0.43	48.32	-0.021	1.02	1.03	-9.28
278.7	1480	183.69	0.51	47.87	-0.031	0.99	0.95	-16.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุขบวนการ 20 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	I_C	% V_{reg}
0	1480	255.04	0	48.8	-0.011	1.68	1.66	15.93
244.4	1480	238.4	0.34	48.39	-0.019	1.45	1.5	8.36
321.8	1480	231.86	0.46	48.4	-0.019	1.37	1.43	5.39
378	1480	223.44	0.56	48.17	-0.024	1.32	1.36	1.56
420.4	1480	213.62	0.66	47.63	-0.036	1.3	1.3	-2.90
465.2	1480	206.3	0.75	47.79	-0.032	1.31	1.22	-6.23

ตัวเก็บประจุขบวนการ 22.5 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	I_C	% V_{reg}
0	1480	266.25	0	48.8	-0.011	1.86	1.86	21.02
343.6	1480	242.5	0.47	47.96	-0.029	1.55	1.65	10.23
408.9	1480	235.85	0.58	47.76	-0.033	1.49	1.58	7.20
473.8	1480	230.61	0.69	47.84	-0.031	1.46	1.52	4.82
524	1480	223.11	0.78	47.66	-0.035	1.44	1.47	1.41
556.4	1480	209.3	0.89	46.98	-0.050	1.46	1.38	-4.86
584.8	1480	200.59	0.97	46.97	-0.050	1.49	1.3	-8.82

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า

$N_r = 1,440$ รอบต่อนาที

ตัวเก็บประจุขบวนการ 17.5 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	I_C	% V_{reg}
0	1440	218.54	0	47.96	-0.001	1.16	1.16	-0.66
67.8	1440	210.99	0.11	47.52	-0.010	1.1	1.09	-4.10
128	1440	203.18	0.21	47.61	-0.008	1.02	1.03	-7.65
176.8	1440	192.47	0.31	47.17	-0.018	0.96	0.97	-12.51
205.3	1440	173.53	0.39	46.83	-0.025	0.91	0.87	-21.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุขนาน 20 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	IC	% V_{reg}
0	1440	241.99	0	47.6	-0.008	1.55	1.54	10.00
80.7	1440	236.6	0.11	47.54	-0.010	1.46	1.47	7.55
155.4	1440	231.23	0.22	47.44	-0.012	1.38	1.4	5.10
219.9	1440	222.64	0.33	46.92	-0.023	1.3	1.34	1.20
286.8	1440	215.2	0.44	46.89	-0.024	1.24	1.29	-2.18
336.3	1440	207.12	0.54	46.72	-0.027	1.21	1.21	-5.85
372.7	1440	197.01	0.63	46.59	-0.030	1.19	1.14	-10.45

ตัวเก็บประจุขนาน 22.5 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	IC	% V_{reg}
0	1440	253.07	0	47.36	-0.014	1.73	1.71	15.03
168.1	1440	243.64	0.23	47.32	-0.014	1.57	1.61	10.75
243.5	1440	237.64	0.34	47.13	-0.018	1.48	1.57	8.02
315.6	1440	229.6	0.46	46.68	-0.028	1.42	1.5	4.36
373.9	1440	222.15	0.56	46.61	-0.030	1.36	1.44	0.98
425.8	1440	215.49	0.66	46.34	-0.036	1.36	1.4	-2.05
469.5	1440	207.63	0.75	46.35	-0.036	1.36	1.32	-5.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า

$N_r = 1,400$ รอบต่อนาที

ตัวเก็บประจุขนาน 20 μF								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	IC	$\%V_{\text{reg}}$
0	1400	228.92	0	46.43	-0.005	1.39	1.39	4.05
73.3	1400	222.05	0.11	46.16	-0.011	1.32	1.33	0.93
139.4	1400	215.15	0.22	45.87	-0.017	1.23	1.26	-2.20
196.4	1400	206.34	0.32	45.64	-0.022	1.18	1.2	-6.21
249	1400	196.78	0.42	45.29	-0.030	1.12	1.14	-10.55
284.4	1400	186.03	0.51	45.21	-0.032	1.09	1.07	-15.44

ตัวเก็บประจุขนาน 22.5 μF								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	IC	$\%V_{\text{reg}}$
0	1400	241.24	0	46.35	-0.007	1.58	1.58	9.65
80.8	1400	236.85	0.11	46.3	-0.008	1.5	1.54	7.66
152.4	1400	228.48	0.22	45.69	-0.021	1.4	1.48	-23.08
222.7	1400	224.13	0.33	45.82	-0.018	1.36	1.43	-23.08
286.3	1400	215.34	0.29	45.49	-0.026	1.28	1.35	-23.08
335	1400	206.83	0.54	45.25	-0.031	1.24	1.29	-23.08
380	1400	200.01	0.63	45.1	-0.035	1.24	1.23	-23.08
401	1400	187.61	0.71	44.68	-0.044	1.24	14.14	-23.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุขบวนการ 25 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	IC	$\%V_{reg}$
0	1400	251.66	0	45.99	-0.015	1.96	1.95	14.39
244.2	1400	238.22	0.34	45.77	-0.020	1.72	1.77	8.28
322.1	1400	232.09	0.46	45.56	-0.024	1.63	1.69	5.50
385.5	1400	226	0.57	45.47	-0.026	1.55	1.64	2.73
440.9	1400	220	0.67	45.25	-0.031	1.52	1.57	0.00
487.9	1400	212.99	0.76	45.02	-0.037	1.49	1.52	-3.19
520.9	1400	200.33	0.86	44.52	-0.048	1.48	1.42	-8.94
547.5	1400	191.91	0.95	44.42	-0.051	1.5	1.34	-12.77

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า

$N_r = 1,350$ รอบต่อนาที

ตัวเก็บประจุขบวนการ 22.5 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	IC	$\%V_{reg}$
0	1350	223.93	0	44.56	-0.010	1.48	1.48	1.79
71	1350	217.56	0.11	44.37	-0.014	1.4	1.41	-1.11
136.7	1350	212.28	0.21	44.33	-0.015	1.32	1.35	-3.51
196.4	1350	205.93	0.32	43.93	-0.024	1.25	1.3	-6.40
250.3	1350	196.95	0.42	44.07	-0.021	1.18	1.22	-10.48
283.8	1350	185.62	0.51	43.6	-0.032	1.16	1.14	-15.63

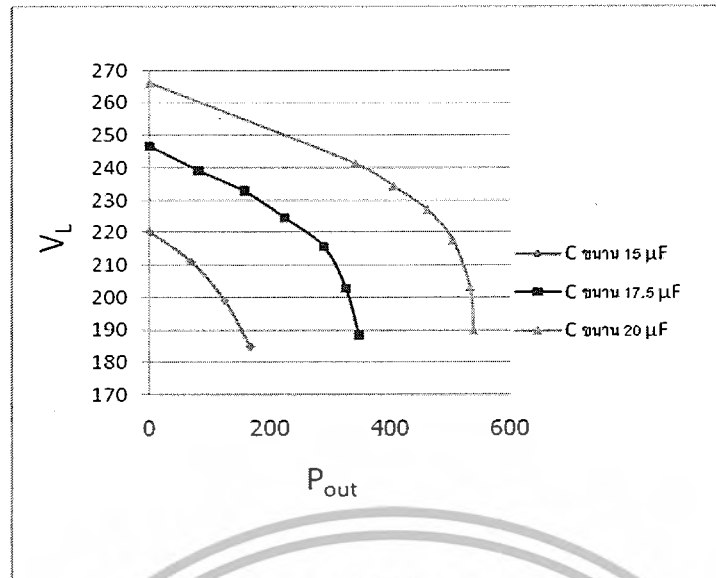
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุขนาด 25 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	IC	% V_{reg}
0	1350	238.16	0	44.69	-0.007	1.76	1.75	8.25
77.5	1350	230.64	0.11	44.16	-0.019	1.68	1.68	4.84
150.9	1350	226.8	0.22	44.34	-0.015	1.6	1.63	3.09
218	1350	221.23	0.33	43.89	-0.025	1.52	1.56	0.56
280.5	1350	212.47	0.44	43.7	-0.030	1.45	1.5	-3.42
339.6	1350	208.32	0.54	43.82	-0.027	1.38	1.44	-5.31
378.1	1350	199.09	0.63	43.47	-0.035	1.35	1.37	-9.50
415	1350	191.75	0.72	43.14	-0.043	1.34	1.32	-12.84

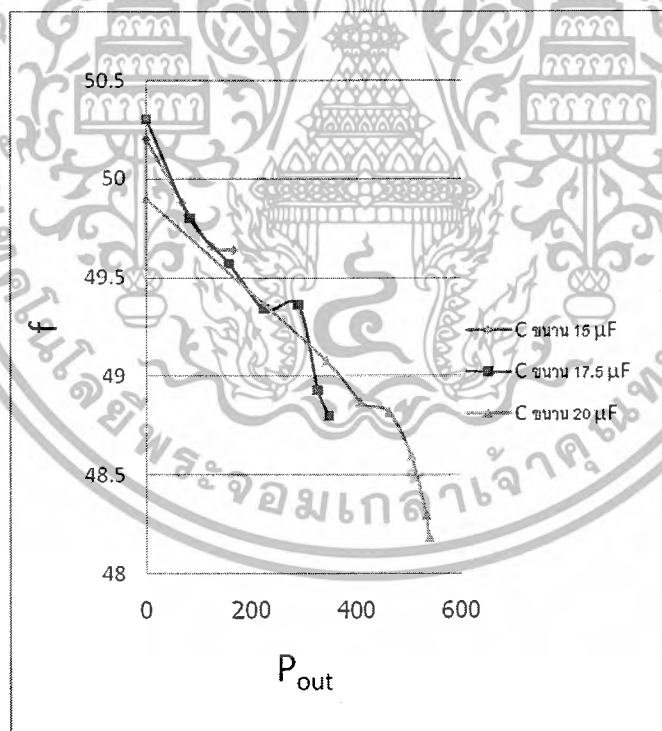
ตัวเก็บประจุขนาด 27.5 μ F								
P_{out}	N_r (rpm)	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	IC	% V_{reg}
0	1350	243.18	0	44.24	-0.017	1.99	1.98	10.54
81.7	1350	238.43	0.11	44.09	-0.021	1.89	1.9	8.38
159	1350	235.04	0.22	44.17	-0.019	1.82	1.85	6.84
226.6	1350	226.98	0.33	43.68	-0.030	1.72	1.76	3.17
304.8	1350	223.77	0.454	43.85	-0.026	1.64	1.71	1.71
360	1350	216.5	0.55	43.61	-0.032	1.57	1.66	-1.59
411.8	1350	210.69	0.65	43.39	-0.037	1.52	1.58	-4.23
455.1	1350	203.39	0.74	43.15	-0.043	1.5	1.51	-7.55
495.9	1350	193.78	0.85	42.912	-0.049	1.48	1.43	-11.92

เมื่อดูผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กรณีความเร็วรอบในการหมุนของ โรเตอร์คงที่ จากตารางที่ 5.2 ถึง 5.6 จะพบว่าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการจ่ายภาระ ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้ามียาลดลง โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าสู่ภาระไฟฟ้าสูงขึ้น และมีค่ากระแสไฟฟ้ายรวมและกระแสไฟฟ้ากระตุ้นที่ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

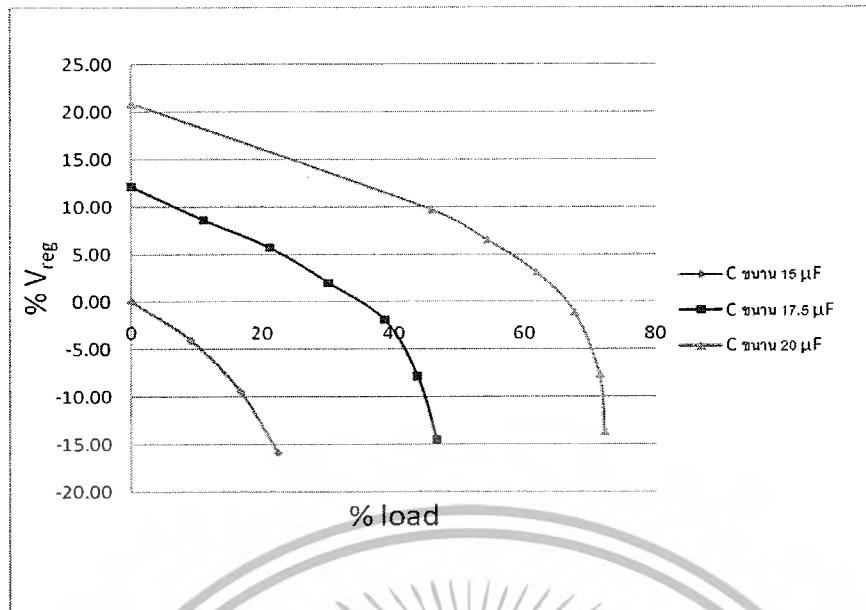


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,512$ รอบต่อนาที

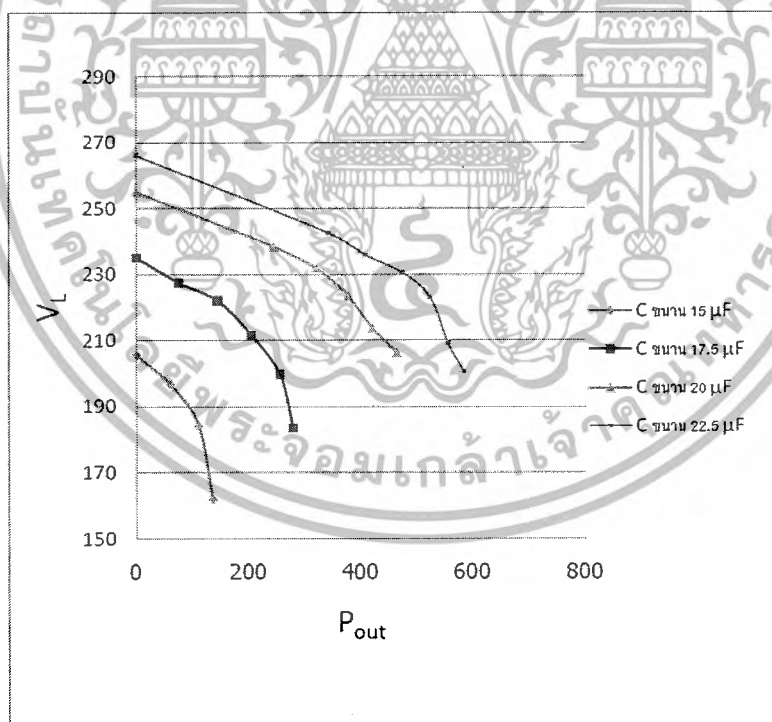


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,512$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

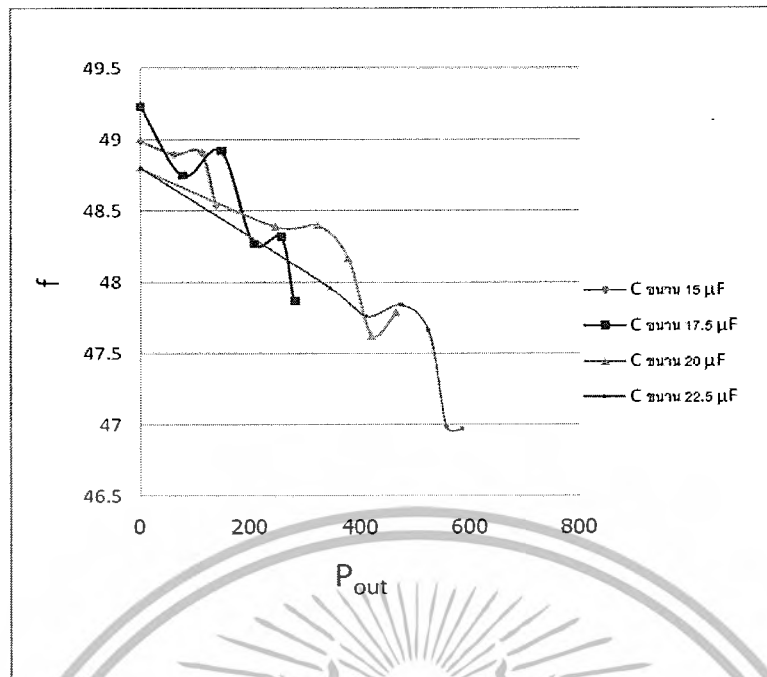


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,512$ รอบต่อนาที

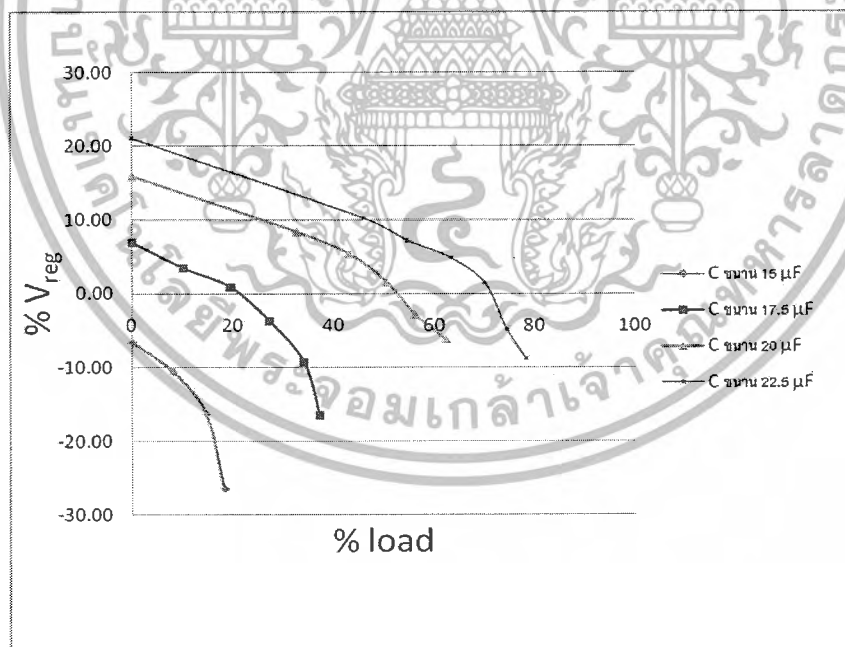


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,480$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

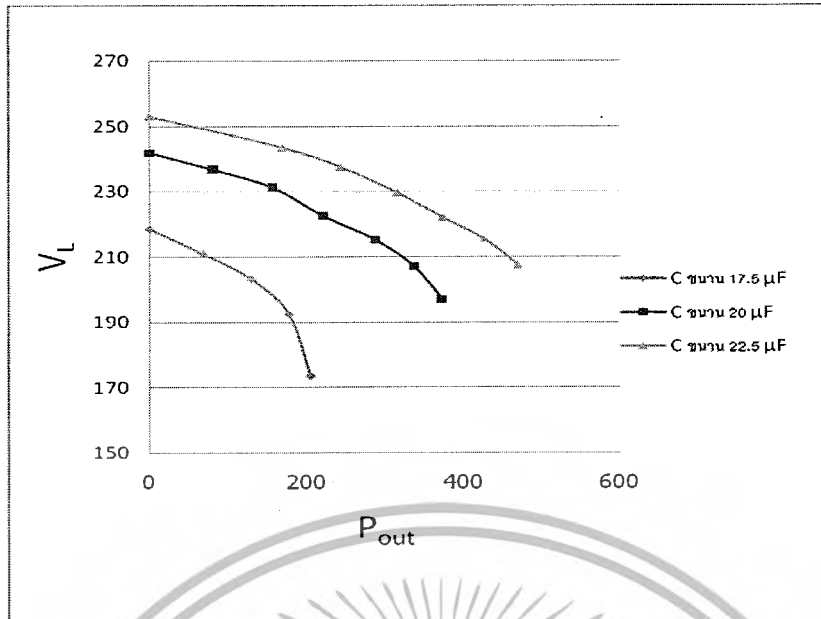


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่รอบ $N_r = 1,480$ รอบต่อวินาที

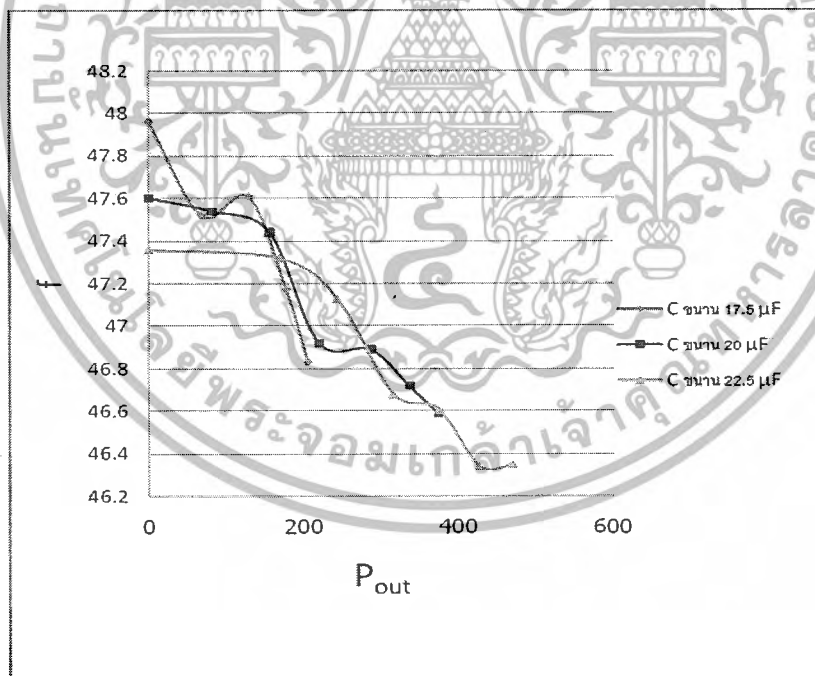


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่รอบการหมุน $N_r = 1,480$ รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

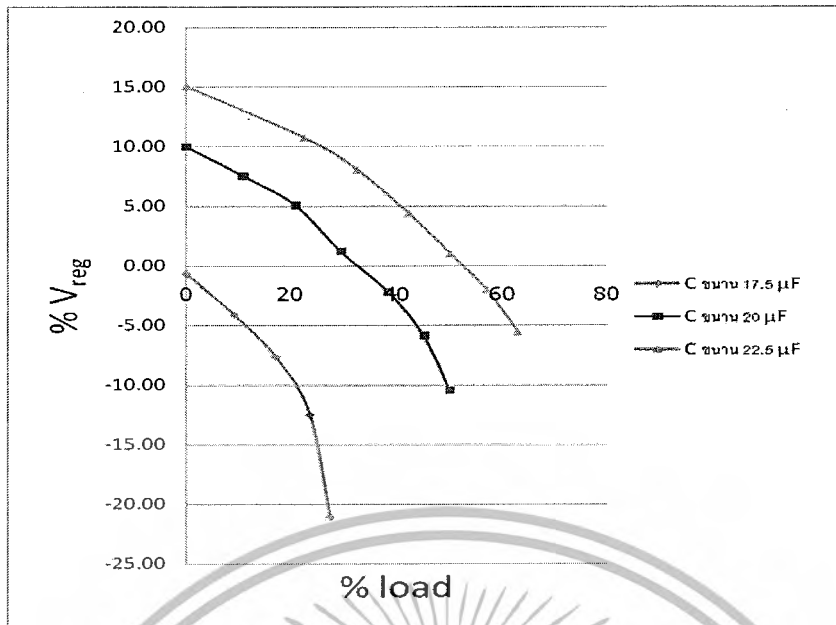


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,440$ รอบต่อนาที

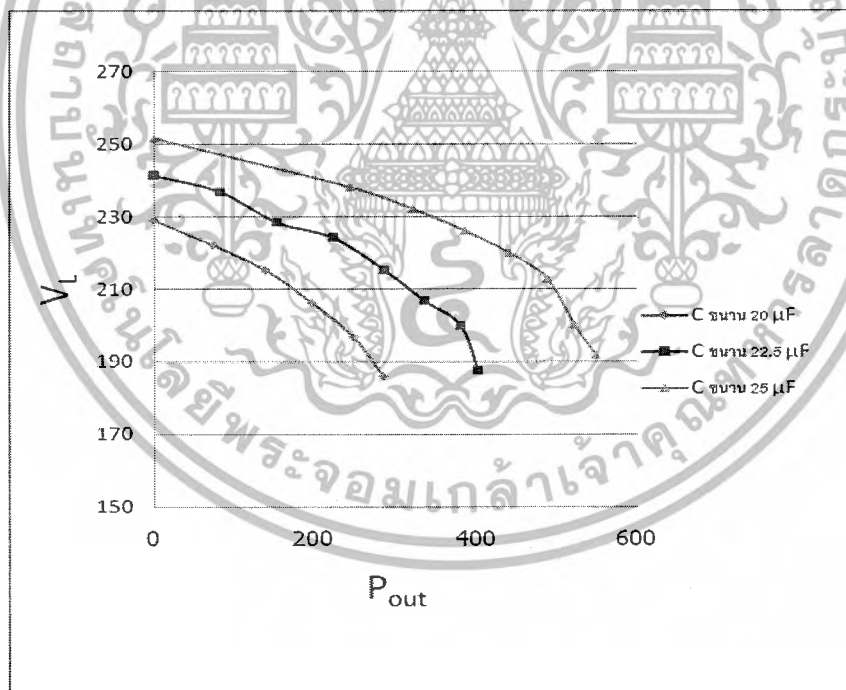


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,440$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

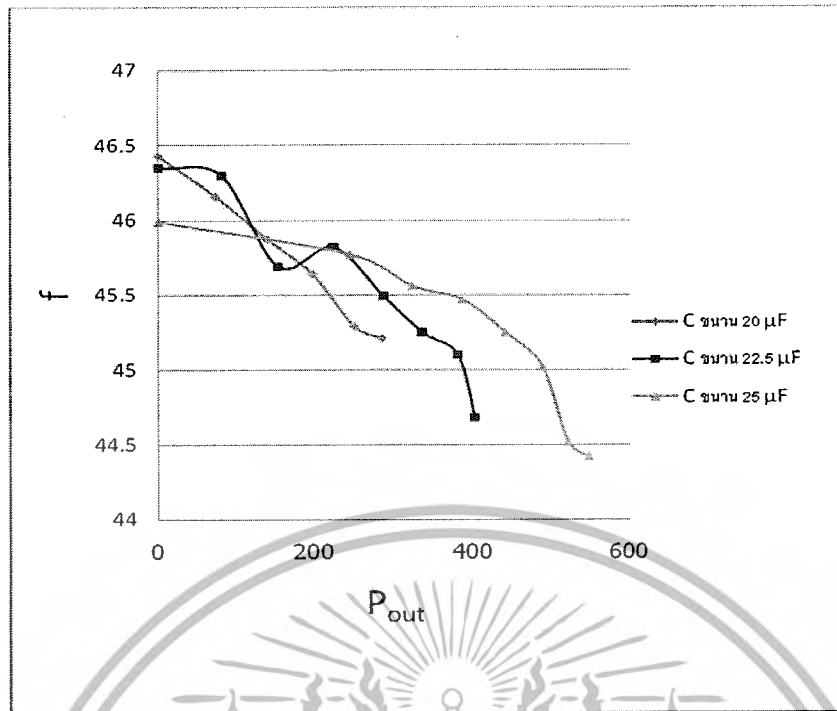


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเลชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,440$ รอบต่อนาที

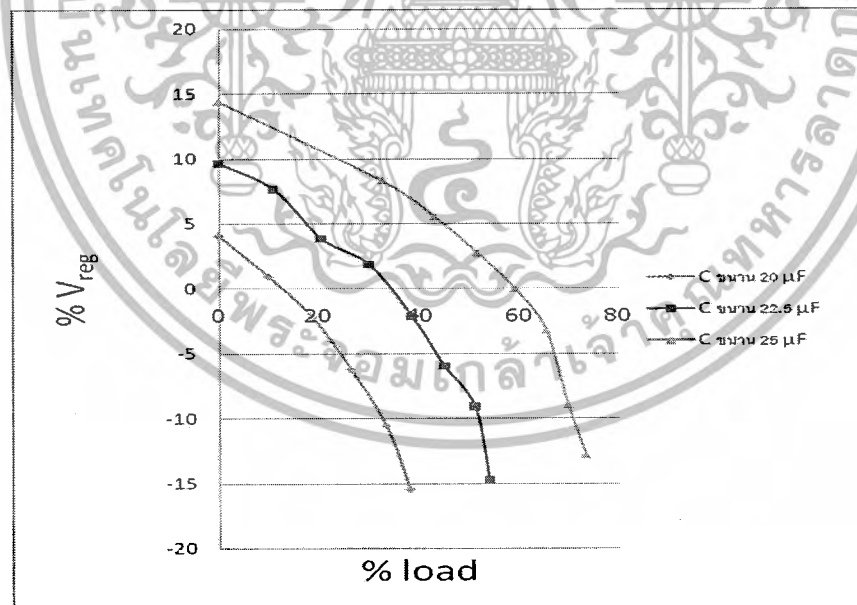


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,400$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

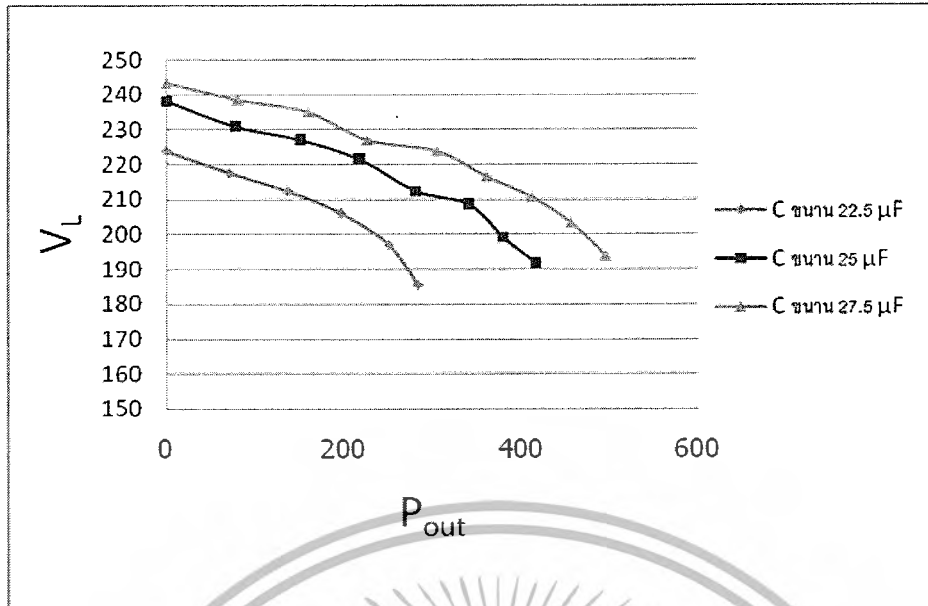


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,400$ รอบต่อนาที

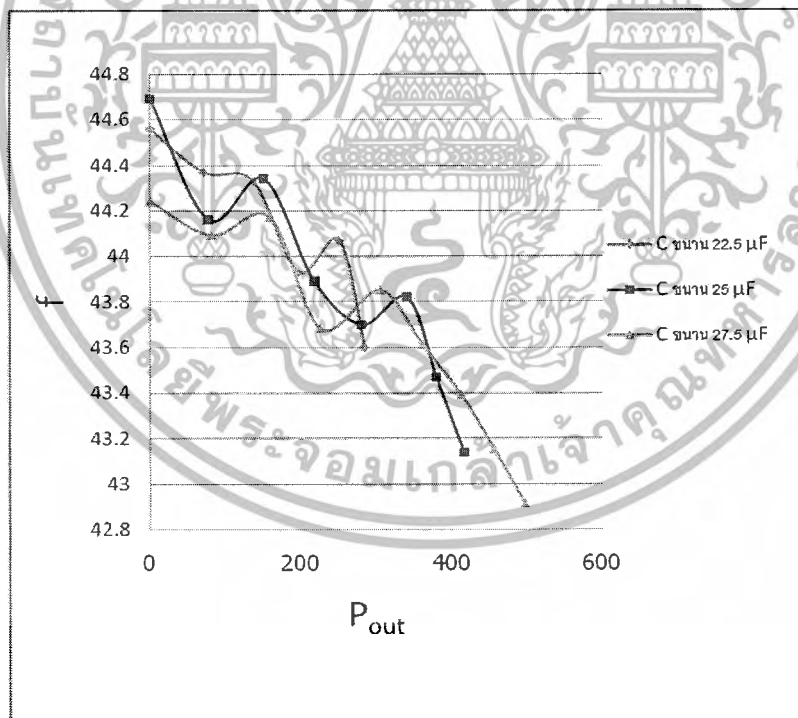


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,400$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

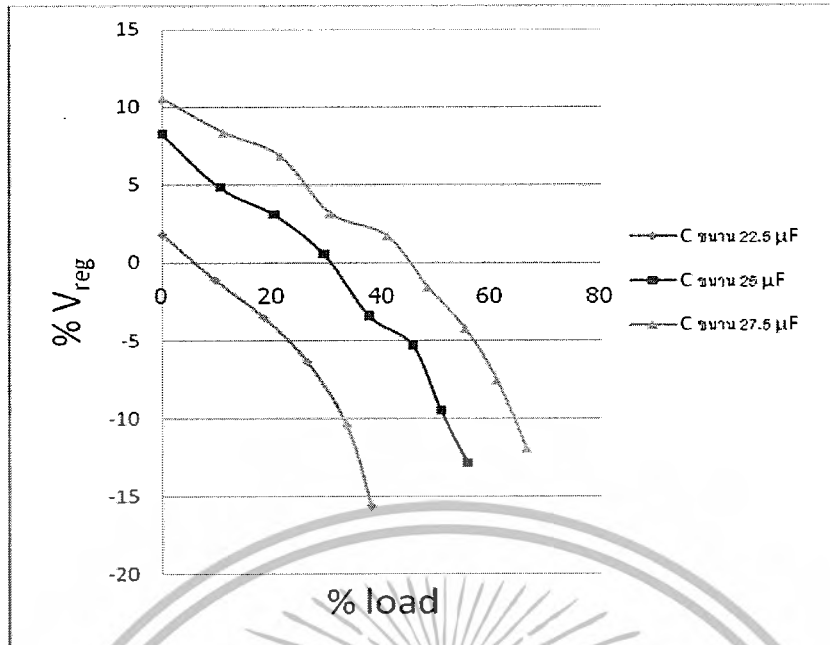


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,350$ รอบต่อนาที



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,350$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,350$ รอบต่อนาที

จากกราฟในรูปที่ 5.5 ถึง 5.19 จะพบว่าเมื่อเปลี่ยนค่าของตัวเก็บประจุขนาดให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้สูงขึ้นเป็นลำดับและที่ค่า % voltage regulation เดียวกันจะพบว่าเมื่อตัวเก็บประจุขนาดที่มีค่าสูงกว่าจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้มากกว่าตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่าความจุของตัวเก็บประจุขนาดเดียวกันโดยใช้ความเร็วการหมุนของโรเตอร์ที่ไม่เท่ากัน จะพบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ที่สูงขึ้น จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้น

5.2.3 ผลการทดสอบในสภาวะความถี่คงที่ (Constant Frequency)

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า
แบบความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

ตัวเก็บประจุขบวนการ 15 μ F								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
0	1508	218.85	0	50.08	-0.002	1.06	1.07	-0.52
68.7	1513	213.11	0.11	50.07	-0.007	0.99	1.02	-3.13
130.8	1518	206.18	0.21	50.07	-0.011	0.93	0.97	-6.28
183.8	1527	197.29	0.31	50.04	-0.016	0.9	0.92	-10.32
218.2	1534	180.35	0.4	50.04	-0.021	0.86	0.82	-18.02

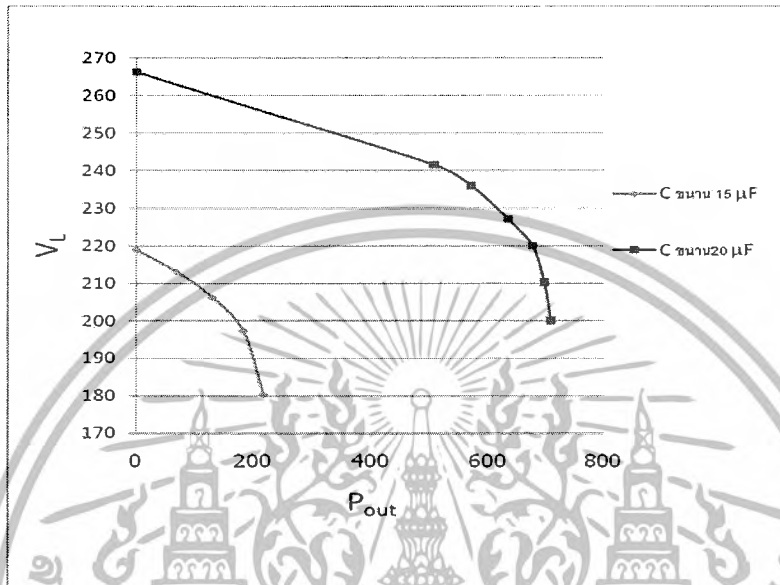
ตัวเก็บประจุขบวนการ 20 μ F								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
0	1512	266.33	0	50.05	-0.008	1.78	1.77	21.06
507.8	1548	241.56	0.7	50.09	-0.027	1.43	1.53	9.80
570.8	1553	236.1	0.81	50.07	-0.032	1.45	1.5	7.32
633.8	1562	227.22	0.93	50.04	-0.038	1.5	1.43	3.28
675.6	1570	220.11	1.02	50.06	-0.043	1.52	1.38	0.05
697.4	1578	210.13	1.11	50.09	-0.047	1.56	1.32	-4.49
708.4	1589	199.88	1.18	50.07	-0.053	1.61	1.26	-9.15

ตัวเก็บประจุขบวนการ 25 μ F								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
0	1397	252.32	0	46.17	-0.009	1.9	1.9	14.69

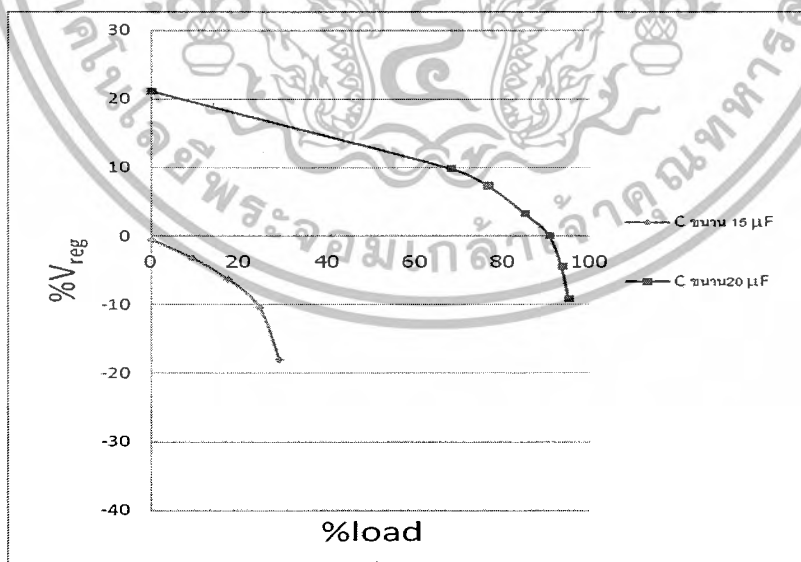
ตัวเก็บประจุขบวนการ 30 μ F								
P_{out}	$N_r(\text{rpm})$	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
0	1288	230.93	0	42.21	-0.017	1.88	1.87	4.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางผลการทดสอบจะพบว่า การทดสอบที่กรณีความถี่ทางไฟฟ้าคงที่ เมื่อเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุขนาดให้มากขึ้น จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยจะพบว่าแรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะตกลงเป็นอย่างมากเมื่อภาระทางไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ

การทดสอบโดยการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาจ่ายภาระไฟฟ้า นั้น จะเป็นการทดสอบโดยใช้ตัวเก็บประจุชานเพียงอย่างเดียวแล้วทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น โดยมีสมมติฐานในขั้นต้นว่าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดนี้ จะทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดกลงเนื่องจากจะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเสมือน ในส่วนรีแอกแตนซ์ที่โหลด (X_L) และในส่วนของรีแอกแตนซ์ ($X_{1,2}$) จะพบว่าในภาระไฟฟ้าชนิดนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสูญเสียกำลังไฟฟ้าเสมือนจาก 2 ส่วนด้วยกัน ทำให้สามารถทำนายผลล่วงหน้าได้ว่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องตกมากกว่าในกรณีที่จ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานเพียงอย่างเดียวอีกทั้งอาจไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$Q_L = I_L^2 X_L \quad (5.3)$$

$$Q_{1,2} = I_1^2 X_{1,2} \quad (5.4)$$

สำหรับการทดสอบในกรณีนี้จะทำการทดสอบที่กรณีความถี่คงที่เท่านั้น

5.3.1 ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนียวนำ

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนียวนำ
แบบความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

ตัวเก็บประจุขนาด 20 μ F										
P _{out}	V _L	I _L	N _r	f(Hz)	S	V ₁	I ₁	I _c	p.f.	%V _{reg}
357.6	215.88	0.61	1565	50	-0.043	215.5	1.13	1.47	0.91	-1.87

ตัวเก็บประจุขนาด 25 μ F										
P _{out}	V _L	I _L	N _r	f(Hz)	S	V ₁	I ₁	I _c	p.f.	%V _{reg}
618.4	218.04	1.04	1592	50	-0.061	219.5	1.43	1.9	0.91	-0.89

จากตารางการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนียวนำนั้น จะพบว่าที่ค่าตัวประกอบกำลังล้าหลังประมาณ 0.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะสังเกตได้ว่าค่าตัวเก็บประจุขนาดที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าปกติคือ 20 และ 25 ไมโครฟารัด เนื่องจากการใช้ค่าตัวเก็บประจุที่น้อยกว่านี้ คือ 15 ,17.5 ไมโครฟารัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้เลย เนื่องจากแรงดันที่ขั้วจะตกลงอย่างมากและล่มไปในที่สุด

5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในทั้ง 2 สภาวะแล้ว โดยภาพรวมจะพบว่าค่าตัวเก็บประจุชุนานให้มากขึ้น จะสามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้มากขึ้นที่ความเร็วรอบเดียวกันทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุ C_{shunt} ที่มีค่าความจุไฟฟ้ามากจะมีค่า $X_{c,shunt}$ น้อย ทำให้กระแสกระตุ้นในช่วงไร้ภาระทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่า เมื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าจึงสามารถจ่ายภาระได้มากกว่า แต่ทั้งนี้ค่าตัวเก็บประจุก็ไม่ควรที่จะมีค่ามากเกินไป เนื่องจากจะเกิดการ build up ที่ความเร็วรอบต่ำมาก ทำให้ค่าความถี่ไฟฟ้าเอาท์พุทมีค่าต่ำไปด้วย หรือในบางครั้งถ้าค่าตัวเก็บประจุชุนาน มีค่ามากเกินไป จะทำให้ค่ากระแสกระตุ้น I_{cp} ที่ 50 เฮิร์ตซ์ มีค่าเกินพิกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายภาระไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จะพบว่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ ตามการเพิ่มขึ้นของภาระไฟฟ้าจนในที่สุดถ้าภาระทางไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สามารถจ่ายภาระต่อไปได้ จะทำให้เกิดการล่มของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหลือศูนย์โวลต์ จากสิ่งที่เกิดขึ้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า เป็นการไม่เหมาะสมที่จะนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการต่อตัวเก็บประจุชุนานเพียงอย่างเดียวมาใช้ในจ่ายภาระไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อมีการจ่ายภาระไฟฟ้ามากขึ้น จะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเสมือนขึ้น การใช้ตัวเก็บประจุชุนานเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว นั้น จะไม่เพียงพอต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นเหตุให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกลงและล่มไปในที่สุด

บทที่ 6

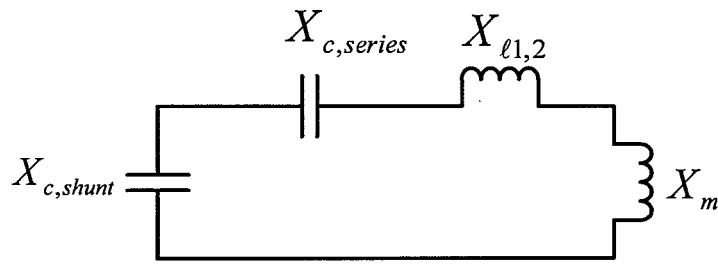
การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาน

6.1 บทนำ

จากการทดสอบในบทที่ 5 ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานเพียงชนิดเดียว นั้น จะพบปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือเมื่อมีการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุขนาน จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้สูงขึ้น เนื่องจากค่า $X_{c,shunt}$ ที่น้อยลงทำให้กระแสกระตุ้น มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถทำได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาจ่ายภาระทางไฟฟ้า โดยการใช้ตัวเก็บประจุขนาน เพียงอย่างเดียว นั้น ยังมีข้อบกพร่องอยู่ เนื่องจากเมื่อใดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายภาระทางไฟฟ้า จะทำให้ต้องจ่ายกระแสเพิ่มมากขึ้น กระแสที่เพิ่มขึ้นนี้จะไหลผ่าน leakage reactance ($X_{l,2}$) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนถูกใช้ไปในส่วนนี้ ผลที่ตามมาคือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในส่วน magnetizing reactance (X_m) จะมีค่าลดลงไป ทำให้เกิดภาวะแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกลง เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายภาระทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นไปเรื่อยๆ จะทำให้แรงดันที่ขั้วตกลงไปเรื่อยๆ ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงซึ่งไม่เหมาะแก่การใช้งานจริง

6.2 การศึกษาวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาน

ในการแก้ปัญหาแรงดันตกที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม (C_{series}) เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อไปชดเชยให้กับส่วนของ leakage reactance ซึ่งการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในลักษณะนี้เรียกว่า การต่อวงจรแบบ long shunt สามารถแสดงวงจรสมมูลอย่างง่ายสำหรับการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอนุกรมได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 วงจรสมมูลเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ

วิธีในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอนุกรมนั้นจะใช้เงื่อนไขการเกิด resonance เช่นเดียวกับการคำนวณค่าตัวเก็บประจุชานาน ดังนี้

$$X_{c,series} = X_{\ell,1,2} \quad (6.1)$$

$$\frac{1}{2\pi f C_{series}} = X_{\ell,1,2} \quad (6.2)$$

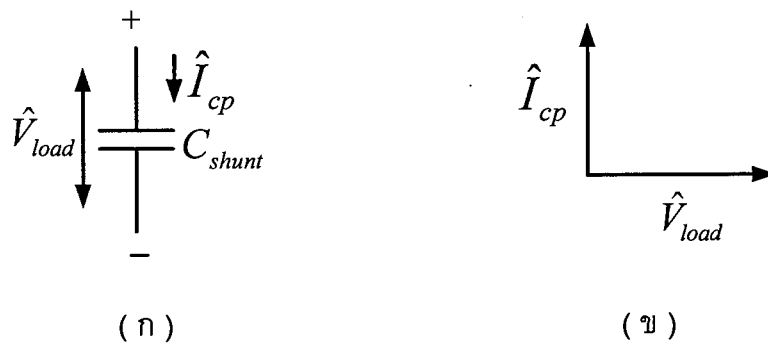
ดังนั้น

$$C = \frac{1}{2\pi f X_{\ell,1,2}} \quad (6.3)$$

โดยที่ $X_{\ell,1,2} = 17.56$ โอห์ม , $f = 55$ เฮิรตซ์

ดังนั้นสามารถคำนวณหาตัวเก็บประจุอนุกรม โดยประมาณได้ดังนี้

$$C = \frac{1}{2\pi \times 55 \times 17.56} = 164.87 \mu F$$



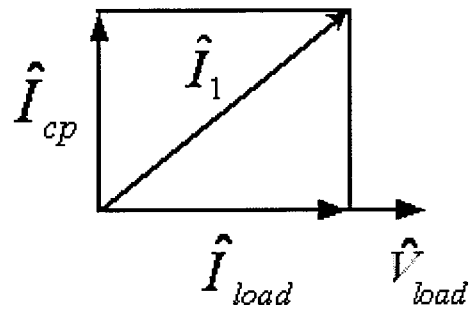
รูปที่ 6.3 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_{load} ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{shunt}
 (ข) แสดงเวกเตอร์ความสัมพันธ์ \hat{V}_{load} กับ \hat{I}_{cp}

- แรงดัน \hat{V}_{load} ตกคร่อม ภาระทางไฟฟ้า R
 จะพบว่าในส่วนนี้ภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นภาระทางไฟฟ้า R ล้วน ไม่มีภาระทางไฟฟ้าชนิดอื่นเกี่ยวข้อง ดังนั้นค่ากระแสของภาระทางไฟฟ้า R (\hat{I}_{load}) นี้ จะอยู่บนเฟสเดียวกับกับ \hat{V}_{load} นั่นคือ ทำมุมเฟสกันเท่ากับ 0 องศา สามารถแสดงเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 6.4

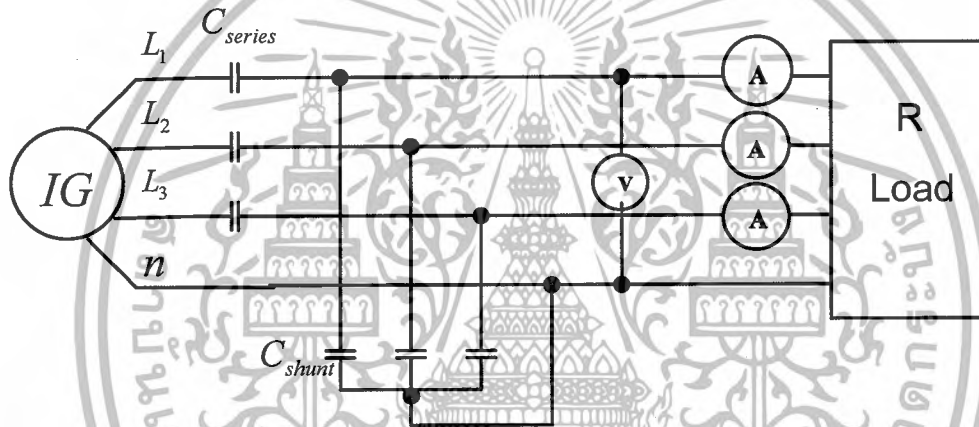


รูปที่ 6.4 (ก) แสดงแรงดัน \hat{V}_t ตกคร่อมตกคร่อมภาระทางไฟฟ้า R
 (ข) แสดงเวกเตอร์ความสัมพันธ์ \hat{V}_t กับ \hat{I}_{load}

เมื่อนำเวกเตอร์จาก 2 กรณีมารวมเป็นรูปเดียวกัน จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเวกเตอร์กระแส \hat{I}_1 , \hat{I}_{cp} และ \hat{I}_{load} ได้ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 เวกเตอร์กระแสรวม



รูปที่ 6.6 วงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ต่อแบบอนุกรมขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลการทดสอบ

6.3.1 ผลการทดสอบในสภาวะความเร็วคงที่ (Constant Speed)

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1657 rpm

ตัวเก็บประจุอนุกรม 60 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_c	% V_{reg}
0	187.19	0	54.94	-0.005	234.8	1.02	1.03	-14.91
102.5	175.37	0.2	54.65	-0.011	222	0.9	0.92	-20.29
147.6	170.42	0.29	54.37	-0.016	214.8	0.86	0.89	-22.54
188	164.06	0.38	54.29	-0.017	207	0.86	0.85	-25.43
226.8	160.24	0.47	54.42	-0.015	202	0.87	0.82	-27.16
261.9	156.46	0.56	54.19	-0.019	197.8	0.9	0.81	-28.88
295.7	153.41	0.64	53.68	-0.029	196.2	0.95	0.79	-30.27
338.5	151.27	0.75	53.49	-0.033	194.5	1	0.78	-31.24
388.2	153.18	0.85	53.58	-0.031	195.7	1.06	0.77	-30.37
427.8	152.96	0.93	53.11	-0.040	198.7	1.14	0.78	-30.47
484.9	155.9	1.04	53.36	-0.035	202.11	1.23	0.79	-29.14
530.1	156.22	1.13	53.02	-0.042	204.8	1.31	0.79	-28.99
582.2	157.89	1.23	52.76	-0.047	208.4	1.4	0.81	-28.23
645.7	160.9	1.34	52.93	-0.044	212.3	1.48	0.81	-26.86
696.9	161.96	1.43	52.65	-0.049	216.1	1.58	0.82	-26.38
763.9	163.3	1.56	52.59	-0.050	219.9	1.66	0.82	-25.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 80 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_C	% V_{reg}
0	207.26	0	54.88	-0.006	249	1.16	1.15	-5.79
63.7	202.2	0.11	54.81	-0.008	243.3	1.08	1.09	-8.09
121.7	196.39	0.21	54.57	-0.012	235.7	1	1.04	-10.73
174.2	190.27	0.31	54.29	-0.017	288.5	0.96	1	-13.51
225.5	184.53	0.41	54.34	-0.016	220.5	0.94	0.96	-16.12
264.1	177.43	0.5	53.93	-0.024	214	0.96	0.93	-19.35
306.2	173.5	0.59	53.97	-0.023	207.4	0.98	0.89	-21.14
340.2	168.08	0.68	53.83	-0.026	202	1.02	0.86	-23.60
372	160.95	0.77	53.29	-0.036	195.2	1.06	0.82	-26.84
406.6	158.25	0.86	53.09	-0.040	192.3	1.11	0.8	-28.07
444.2	156.59	0.95	53.04	-0.041	190.6	1.17	0.8	-28.82
483.4	155.81	1.03	52.85	-0.045	190.8	1.23	0.79	-29.18
523.4	155.08	1.13	52.65	-0.049	190.5	1.31	0.79	-29.51
567.9	155.4	1.22	52.49	-0.052	192.2	1.38	0.79	-29.36
624.9	157.58	1.32	52.58	-0.050	194.5	1.46	0.78	-28.37
670.5	158.06	1.41	52.09	-0.060	197	1.56	0.8	-28.15
737.5	159.7	1.54	52.05	-0.061	200.1	1.64	0.8	-27.41
786.1	160.29	1.64	51.79	-0.066	203.1	1.74	0.81	-27.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 100 μF								
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	221.54	0	55.21	0.000	256.9	1.2	1.21	0.70
70	215.17	0.11	54.74	-0.009	250.7	1.12	1.17	-2.20
134.4	210.29	0.21	54.74	-0.009	244.2	1.07	1.11	-4.41
193.8	204.15	0.32	54.53	-0.013	236.5	1.01	1.08	-7.20
250.2	196.96	0.42	54.48	-0.014	227.2	0.98	1.01	-10.47
291	188.64	0.51	54.01	-0.023	219.7	0.99	0.97	-14.25
335.5	184.07	0.61	54.06	-0.022	212.1	1.01	0.93	-16.33
366.4	176.5	0.69	53.69	-0.029	205	1.05	0.9	-19.77
391.3	166.56	0.78	53.21	-0.038	194.7	1.08	0.85	-24.29
416.8	160.8	0.86	53.31	-0.036	187.9	1.11	0.81	-26.91
435.3	154.76	0.94	52.91	-0.044	181.4	1.15	0.75	-29.65
461.4	151.03	1.02	52.92	-0.044	176.6	1.19	0.76	-31.35
474.6	145.34	1.09	52.63	-0.049	170.6	1.24	0.73	-33.94
502.3	143.43	1.17	52.23	-0.058	170.1	1.3	0.72	-34.80
584.7	144.41	1.35	51.94	-0.063	172.3	1.45	0.72	-34.36
641.4	145.81	1.47	51.92	-0.064	174.1	1.53	0.72	-33.72
689.6	147.3	1.56	51.57	-0.071	177.6	1.61	0.73	-33.05
739.9	148.72	1.66	51.31	-0.076	180.59	1.72	0.73	-32.40
802.5	151.3	1.77	51.43	-0.074	183.7	1.8	0.74	-31.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

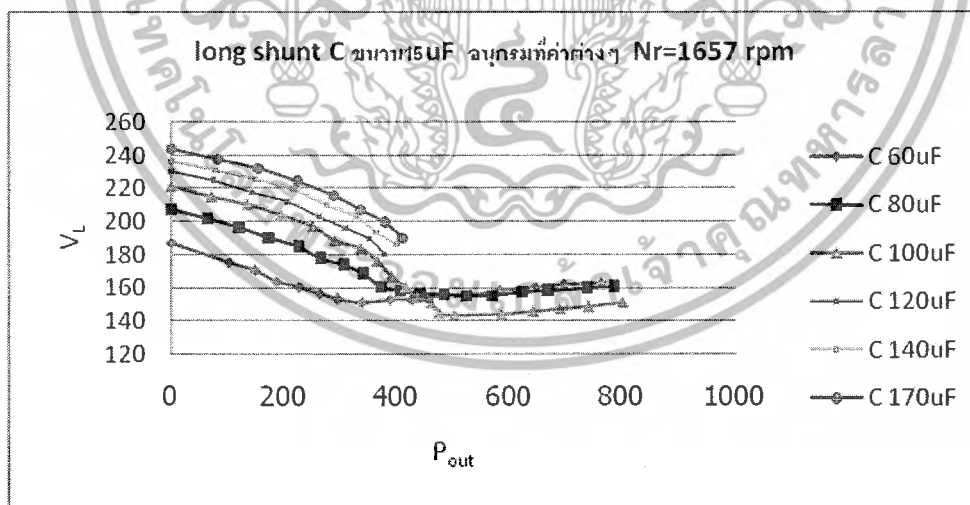
ตัวเก็บประจุอนุกรม 120 μF								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	230.59	0	55.11	-0.002	261.5	1.26	1.27	4.81
74.9	225.24	0.11	54.97	-0.005	255.7	1.18	1.22	2.38
142.2	217.75	0.22	54.5	-0.013	247.6	1.1	1.17	-1.02
204.9	212.09	0.32	54.21	-0.019	240.2	1.04	1.11	-3.60
261.7	203.16	0.43	54.07	-0.022	231.2	1.01	1.06	-7.65
308.6	196.16	0.52	53.81	-0.026	223.1	1.02	1.01	-10.84
351.1	189.64	0.62	53.81	-0.026	214.7	1.04	0.97	-13.80
377.7	180.28	0.7	53.43	-0.034	205.5	1.08	0.93	-18.05

ตัวเก็บประจุอนุกรม 140 μF								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	236.86	0	54.97	-0.005	265	1.24	1.3	7.66
77.6	230.8	0.11	54.66	-0.010	258.8	1.21	1.25	4.91
150.2	225.76	0.22	54.74	-0.009	251.5	1.13	1.19	2.62
216.5	219.82	0.33	54.55	-0.013	244.3	1.08	1.14	-0.08
276.1	210.14	0.44	54.13	-0.020	234.5	1.04	1.09	-4.48
327.2	203.42	0.54	54.2	-0.019	225.9	1.04	1.03	-7.54
363.3	193.98	0.62	53.71	-0.028	216.4	1.06	0.98	-11.83
399.7	186.65	0.71	53.76	-0.027	206.8	1.09	0.94	-15.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

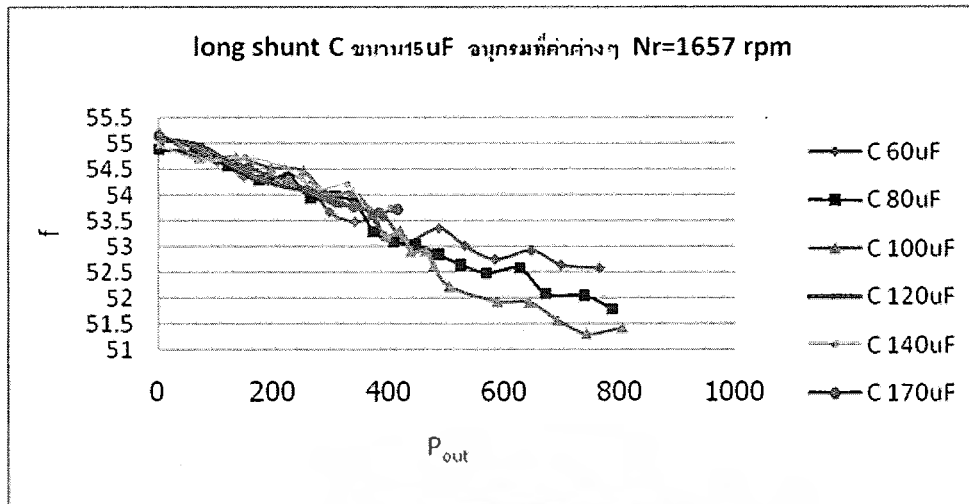
ตัวเก็บประจุอนุกรม 170 μF								
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	243.99	0	55.16	-0.001	267.7	1.33	1.33	10.90
81.4	238.09	0.11	54.84	-0.007	261.6	1.24	1.29	8.22
156.2	232.24	0.22	54.53	-0.013	254.2	1.17	1.23	5.56
222.9	224.31	0.33	54.26	-0.018	241.5	1.11	1.18	1.96
288	216.04	0.44	54	-0.023	236.5	1.05	1.11	-1.80
336.2	207.45	0.54	53.78	-0.027	228.3	1.06	1.08	-5.70
378.7	199.4	0.63	53.67	-0.029	218.4	1.09	1.02	-9.36
412.4	190.55	0.72	53.73	-0.028	207.4	1.11	0.96	-13.39

จากตารางที่ 6.1 เป็นการใช้ตัวเก็บประจุขนาด 15 ไมโครฟารัด แล้วเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ จะพบว่าที่ค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 60, 80 และ 100 ไมโครฟารัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระได้ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าต่ำมาก กล่าวคือมีค่า % voltage regulation ที่สูงในทางลบ และเมื่อค่าตัวเก็บประจุอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 120 ไมโครฟารัดเป็นต้นไป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลัง

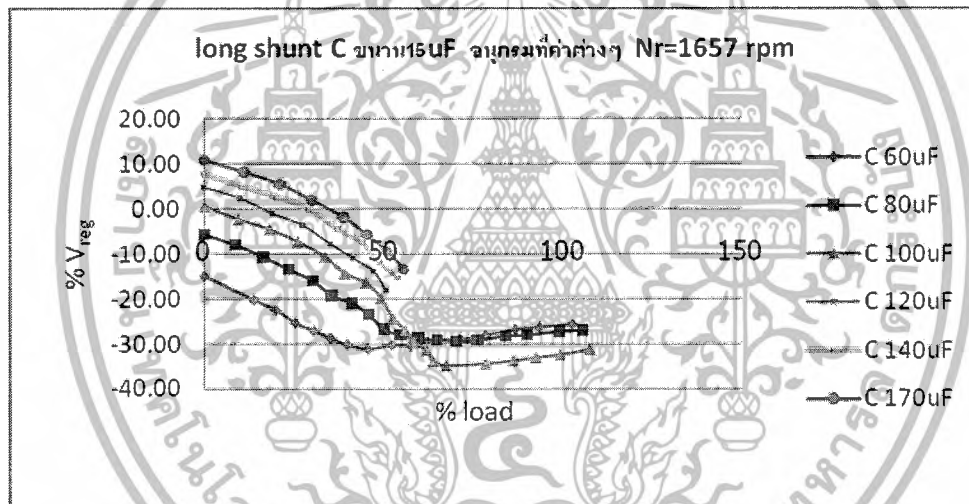


รูปที่ 6.7 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงค่าความถี่กับกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดแรงดันไฟฟ้าที่โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุขนานขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1657 rpm

ตัวเก็บประจุอนุกรม 60 μF								
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	210.02	0	54.94	-0.005	281.7	1.52	1.53	-4.54
65.7	206.36	0.11	54.85	-0.007	277.4	1.46	1.52	-6.20
129	204.03	0.21	54.81	-0.008	273.3	1.38	1.47	-7.26
187	199.6	0.31	54.31	-0.017	269.1	1.34	1.45	-9.27
246.2	195.49	0.42	53.96	-0.024	264.8	1.31	1.42	-11.14
304.4	194.29	0.52	54.13	-0.020	261.3	1.29	1.38	-11.69
346.9	188.47	0.61	53.72	-0.028	258.1	1.27	1.36	-14.33
394.8	185.83	0.71	53.38	-0.035	255.4	1.27	1.33	-15.53
458.2	183.68	0.83	53.64	-0.030	252.2	1.3	1.3	-16.51
517.7	184.25	0.94	53.83	-0.026	250.1	1.35	1.29	-16.25
562.2	182.13	1.03	53.48	-0.033	248.5	1.4	1.26	-17.21
591.1	177.59	1.11	52.87	-0.045	247.5	1.46	1.26	-19.28
656.3	178.68	1.22	53.23	-0.038	246.4	1.55	1.26	-18.78
690.7	176.23	1.31	52.8	-0.046	246.4	1.6	1.24	-19.90
740.9	175.87	1.4	52.79	-0.046	246.2	1.67	1.24	-20.06
792.1	175.36	1.51	52.88	-0.045	246.2	1.75	1.22	-20.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 80 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_C	% V_{reg}
0	226.93	0	54.41	-0.015	290	1.68	1.68	3.15
75.9	226.93	0.11	54.93	-0.006	285.6	1.59	1.64	3.15
147.3	222.52	0.22	54.73	-0.009	281.4	1.55	1.62	1.15
211.7	216.59	0.33	53.87	-0.025	276.9	1.49	1.58	-1.55
287.8	215.37	0.45	54.48	-0.014	271.7	1.42	1.54	-2.10
341.1	209.61	0.54	53.63	-0.030	267.4	1.39	1.51	-4.72
396	205.64	0.64	53.46	-0.033	263.5	1.36	1.48	-6.53
451.8	202.69	0.74	53.42	-0.034	260	1.35	1.44	-7.87
528.7	201.84	0.87	53.66	-0.029	255	1.38	1.41	-8.25
562	195.69	0.96	52.93	-0.044	251.9	1.45	1.39	-11.05
616.4	193.94	1.06	53.03	-0.042	249.2	1.51	1.36	-11.85
676.3	193.58	1.17	53.35	-0.035	247.8	1.56	1.34	-12.01
705.7	188.53	1.25	52.48	-0.052	244.2	1.63	1.31	-14.30
744.9	185.57	1.34	52.32	-0.056	252.4	1.68	1.29	-15.65
789.9	183.93	1.43	52.07	-0.061	240.9	1.76	1.28	-16.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 100 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_c	% V_{reg}
0	241.03	0	54.38	-0.016	295.5	1.8	1.8	9.56
80.8	237.37	0.11	54.29	-0.017	290.6	1.7	1.76	7.90
161.7	236.98	0.23	54.76	-0.009	286.1	1.62	1.7	7.72
230.7	229.79	0.34	54.04	-0.022	281.1	1.57	1.68	4.45
315.1	228.56	0.46	54.4	-0.015	275.3	1.49	1.63	3.89
368.7	220.61	0.56	53.48	-0.033	270.9	1.45	1.58	0.28
428.9	216.69	0.66	53.39	-0.035	266.1	1.42	1.56	-1.50
501.4	216.38	0.77	53.85	-0.026	261.6	1.41	1.52	-1.65
564.5	210.29	0.9	53.52	-0.032	256.1	1.45	1.47	-4.41
617.5	207.49	0.99	53.2	-0.038	252.6	1.49	1.43	-5.69
659.9	203.03	1.08	52.87	-0.045	248.4	1.54	1.4	-7.71
702.3	198.81	1.18	52.51	-0.052	245	1.6	1.39	-9.63
752.1	195.77	1.28	52.76	-0.047	240.6	1.68	1.34	-11.01
792.2	192.64	1.37	52.31	-0.056	237.5	1.73	1.32	-12.44

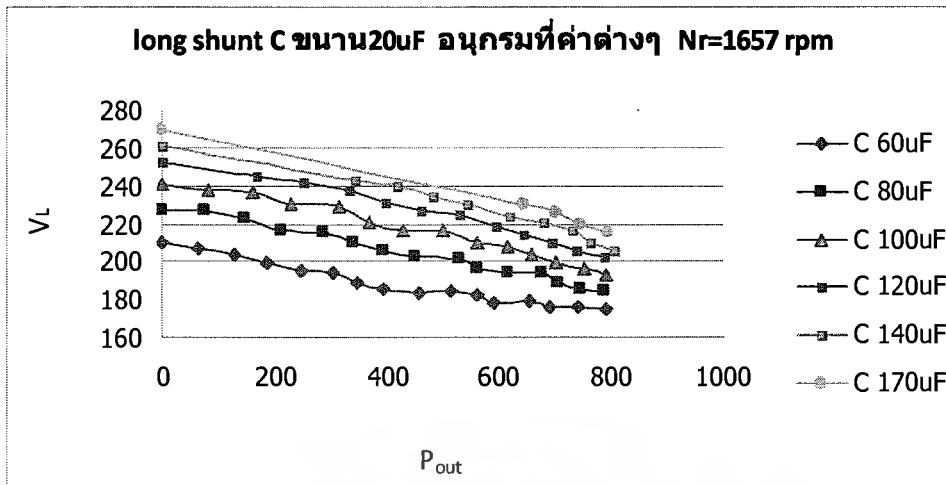
ตัวเก็บประจุอนุกรม 120 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_c	% V_{reg}
0	252.27	0	54.73	-0.009	299.3	1.85	1.86	14.67
169.1	244.53	0.23	54.28	-0.018	290	1.7	1.79	11.15
249.3	241.4	0.34	54.33	-0.017	284.6	1.63	1.72	9.73
333.4	237.08	0.47	54.28	-0.018	278.9	1.56	1.7	7.76
398	231.39	0.57	53.8	-0.027	273.6	1.5	1.66	5.18
461.3	226.79	0.68	53.56	-0.031	269	1.48	1.6	3.09
529.3	224.56	0.79	53.66	-0.029	264.2	1.47	1.57	2.07
594.3	218.09	0.91	53.26	-0.037	258.1	1.48	1.51	-0.87
645.6	213.66	1.01	53.09	-0.040	253.7	1.53	1.47	-2.88
697	210.15	1.11	53.01	-0.042	249.1	1.59	1.44	-4.48
739.3	205.71	1.2	52.65	-0.049	244.9	1.63	1.42	-6.50
787.4	201.97	1.3	52.54	-0.051	239.9	1.71	1.38	-8.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

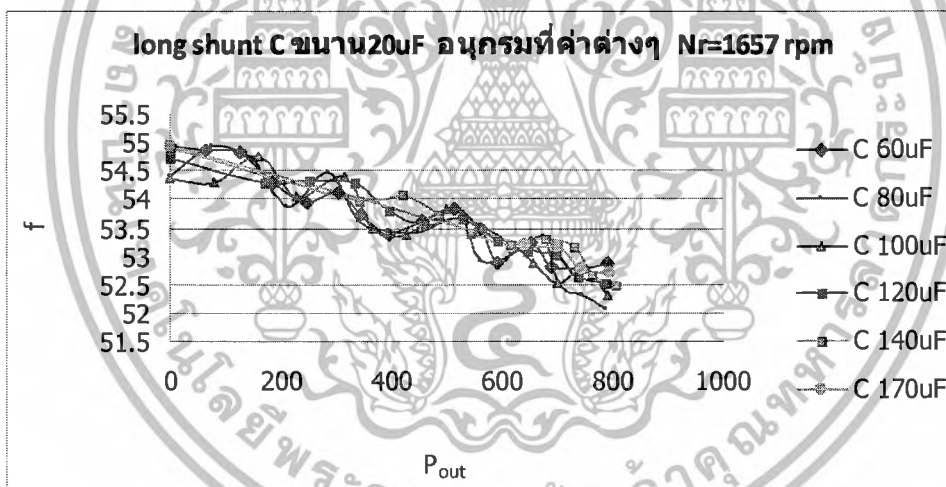
ตัวเก็บประจุอนุกรม 140 μF								
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	261.04	0	54.89	-0.006	301.7	1.93	1.93	18.65
343.4	242.53	0.47	53.99	-0.023	281.1	1.62	1.75	10.24
420.9	240.09	0.58	54.1	-0.021	276.2	1.58	1.7	9.13
485.5	234.62	0.69	53.73	-0.028	271.3	1.54	1.65	6.65
545.8	229.65	0.79	53.42	-0.034	266.3	1.52	1.62	4.39
618.8	223.78	0.92	53.21	-0.038	259.5	1.53	1.56	1.72
679.4	220.68	1.03	53.31	-0.036	254.4	1.58	1.53	0.31
730.2	216.5	1.12	53.15	-0.039	249.6	1.63	1.48	-1.59
763.3	210.1	1.21	52.68	-0.048	244.4	1.68	1.45	-4.50
806.3	205.26	1.31	52.48	-0.052	238.5	1.75	1.39	-6.70

ตัวเก็บประจุอนุกรม 170 μF								
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	269.17	0	54.94	-0.005	304.4	1.99	1.99	22.35
644.6	229.75	0.94	53.19	-0.038	260.3	1.56	1.61	4.43
702.8	225.72	1.04	53.15	-0.039	254.9	1.61	1.55	2.60
746.7	219.71	1.13	52.76	-0.047	249.1	1.66	1.51	-0.13
795.5	215.69	1.23	52.69	-0.048	243.3	1.72	1.46	-1.96

จากตารางที่ 6.2 เป็นการใชตัวเก็บประจุขนาด 20 ไมโครฟารัด แล้วเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลังในค่าตัวเก็บประจุอนุกรมแต่ละค่า และจะพบว่าเมื่อเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุอนุกรมให้มีค่าสูงขึ้นค่าแรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าที่สูงขึ้นเป็นลำดับ กล่าวคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่า % voltage regulation ที่ลดน้อยลง และจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์เมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 170 ไมโครฟารัด หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าแรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 220 โวลต์นั่นเอง

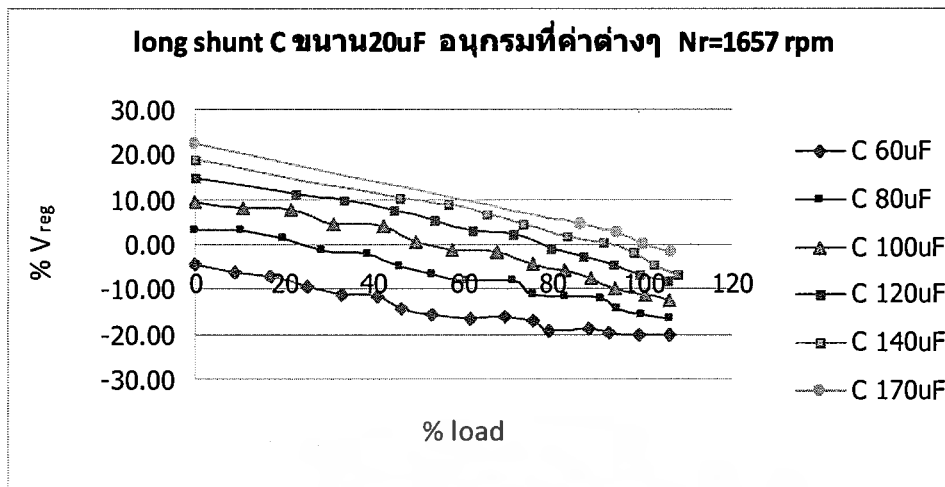


รูปที่ 6.10 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อวินาที



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงค่าความถี่กับกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,657$ รอบต่อนาที



6.3.2 ผลการทดสอบในสภาวะความถี่คงที่ (Constant Frequency)

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่

ตัวเก็บประจุอนุกรม 60 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
0	187.35	0	1657	-0.004	235.7	1.02	1.02	-14.84
55.5	184.64	0.1	1662	-0.007	231.7	0.98	0.98	-16.07
106.4	179.88	0.11	1667	-0.010	227.1	0.92	0.96	-18.24
156.6	177.3	0.16	1671	-0.013	222.5	0.9	0.94	-19.41
205	173.43	0.39	1677	-0.016	218.6	0.9	0.92	-21.17
252.5	172.04	0.49	1682	-0.019	216.9	0.94	0.9	-21.80
297.3	170.16	0.58	1687	-0.022	215.7	0.97	0.9	-22.65
346.7	170.34	0.68	1692	-0.025	215.5	1.03	0.89	-22.57
405.4	169.99	0.8	1697	-0.028	216.6	1.11	0.89	-22.73
461.8	171.69	0.9	1704	-0.033	219.7	1.17	0.9	-21.96
512.7	172.02	0.99	1708	-0.035	222	1.24	0.91	-21.81
572.8	174.05	1.1	1713	-0.038	224.6	1.32	0.93	-20.89
627.2	174.36	1.2	1719	-0.042	227.5	1.42	0.94	-20.75
689.6	176.24	1.3	1720	-0.042	230.2	1.52	0.94	-19.89
750.1	177.5	1.41	1728	-0.047	233.6	1.59	0.95	-19.32
809.7	178.58	1.51	1730	-0.048	236.6	1.69	0.96	-18.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 80 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
0	208.41	0	1657	-0.004	549.2	1.16	1.15	-5.27
64.6	204.11	0.11	1662	-0.007	245.4	1.09	1.11	-7.22
125.9	201	0.21	1669	-0.012	241.7	1.04	1.08	-8.64
186.2	198.99	0.31	1676	-0.016	238	1.01	1.06	-9.55
241.1	192.78	0.42	1679	-0.018	231.9	1	1.03	-12.37
293.6	189.93	0.52	1685	-0.021	228.5	1.02	1	-13.67
343.9	187.3	0.61	1690	-0.024	225.5	1.05	0.98	-14.86
396.2	185.89	0.71	1696	-0.028	223.6	1.1	0.96	-15.50
455.9	183.44	0.83	1704	-0.033	221	1.16	0.97	-16.62
507	182.59	0.93	1708	-0.035	220.2	1.23	0.97	-17.00
557.5	181.82	1.02	1715	-0.039	220.6	1.3	0.97	-17.35
611.4	181.84	1.12	1721	-0.043	221.1	1.38	0.97	-17.35
665.2	181.11	1.22	1726	-0.046	220.9	1.46	0.96	-17.68
719.7	181.25	1.32	1730	-0.048	221.7	1.54	0.95	-17.61
778.8	182.02	1.43	1735	-0.052	223.4	1.62	0.96	-17.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 100 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
0	219.6	0	1658	-0.005	255.3	1.21	1.21	-0.18
70.5	216.39	0.11	1662	-0.007	251.6	1.14	1.18	-1.64
137.1	213.01	0.22	1667	-0.010	247.1	1.08	1.15	-3.18
202.5	210.33	0.32	1672	-0.013	243.2	1.06	1.11	-4.40
265.2	204.62	0.43	1677	-0.016	237.2	1.03	1.08	-6.99
321.4	201.15	0.53	1683	-0.020	232.9	1.04	1.05	-8.57
374.3	197.95	0.63	1688	-0.023	229.7	1.09	1.04	-10.02
427	195.18	0.73	1694	-0.027	226.2	1.14	1.02	-11.28
486.5	191.54	0.85	1702	-0.032	221.8	1.21	1.01	-12.94
534.2	188.96	0.94	1708	-0.035	219.58	1.26	1	-14.11
576.9	186.02	1.03	1713	-0.038	217.1	1.33	0.98	-15.45
630	185.35	1.13	1720	-0.042	216.1	1.4	0.97	-15.75
675	182.87	1.23	1728	-0.047	214.3	1.49	0.97	-16.88
722.5	181.54	1.32	1733	-0.050	212.9	1.54	0.95	-17.48
774.4	181.19	1.43	1739	-0.054	213.3	1.62	0.96	-17.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 120 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	230.38	0	1658	-0.005	261.4	1.26	1.26	4.72
75.3	226.05	0.11	1664	-0.008	257.2	1.19	1.24	2.75
147.7	223.49	0.22	1669	-0.012	253.3	1.13	1.2	1.59
215.5	219.11	0.33	1675	-0.015	247.6	1.1	1.17	-0.40
282.8	213.7	0.44	1683	-0.020	242.3	1.07	1.13	-2.86
340.4	209.01	0.54	1687	-0.022	237.9	1.08	1.11	-5.00
396.2	205.35	0.64	1693	-0.026	232.8	1.12	1.08	-6.66
448.5	201.52	0.74	1700	-0.030	229	1.16	1.05	-8.40
504.9	196.2	0.86	1708	-0.035	222.8	1.22	1.03	-10.82
550.8	192.77	0.95	1714	-0.039	218.8	1.28	1.01	-12.38
592.2	189.07	1.04	1721	-0.043	214.7	1.34	0.99	-14.06
626.5	184.68	1.13	1727	-0.047	211.5	1.4	0.98	-16.05
663.6	180.68	1.22	1739	-0.054	206.5	1.46	0.96	-17.87
737.1	175.43	1.4	1749	-0.060	201.2	1.59	0.93	-20.26
774.3	173.39	1.49	1757	-0.065	199.2	1.66	0.92	-21.19

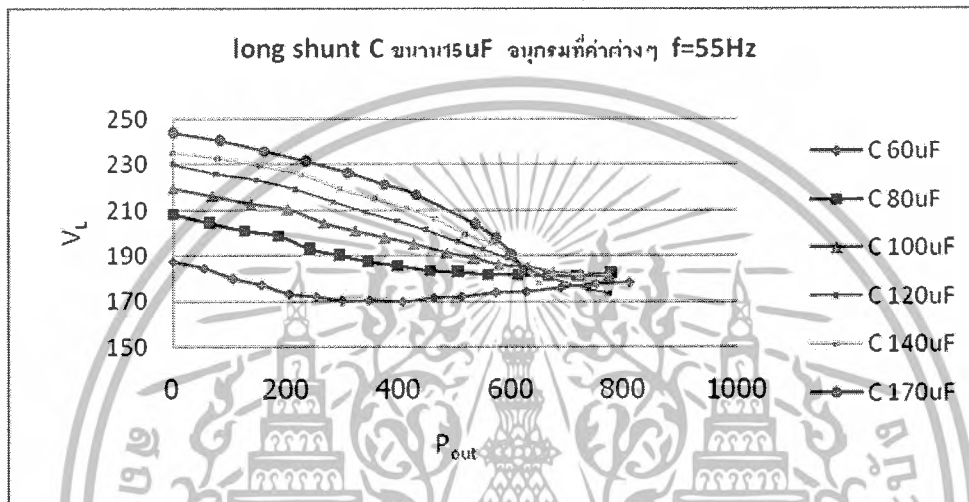
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 140 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	235.09	0	1657	-0.004	263.5	1.29	1.31	6.86
78.6	232.75	0.11	1663	-0.008	259.9	1.22	1.28	5.80
153.5	229.45	0.22	1669	-0.012	256.2	1.17	1.24	4.30
225.6	225.81	0.33	1674	-0.015	250.8	1.13	1.2	2.64
294.3	219.24	0.45	1681	-0.019	245	1.09	1.18	-0.35
356.2	215.13	0.55	1686	-0.022	240	1.1	1.13	-2.21
413.1	210.88	0.65	1691	-0.025	234.9	1.14	1.11	-4.15
464.6	206.16	0.75	1697	-0.028	229.7	1.2	1.09	-6.29
517.6	199.29	0.87	1705	-0.033	222.3	1.24	1.04	-9.41
564.5	195.74	0.96	1713	-0.038	217.7	1.3	1.02	-11.03
599	190.32	1.05	1720	-0.042	212.4	1.34	1	-13.49
625.8	184.51	1.13	1726	-0.046	207	1.4	0.97	-16.13
649.4	178.12	1.22	1735	-0.052	198.4	1.44	0.94	-19.04

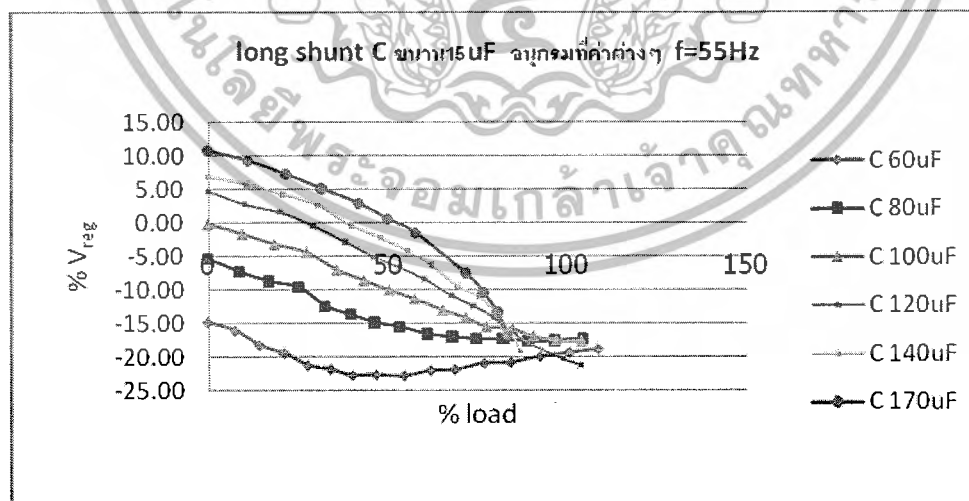
ตัวเก็บประจุอนุกรม 170 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	243.82	0	1660	-0.006	268.6	1.33	1.33	10.83
82.8	240.51	0.12	1665	-0.009	264.6	1.27	1.31	9.32
160.3	236.14	0.23	1670	-0.012	259.9	1.2	1.28	7.34
234.1	231.41	0.34	1676	-0.016	255.1	1.16	1.24	5.19
310.5	226.6	0.46	1682	-0.019	248.5	1.13	1.2	3.00
372.4	221.41	0.56	1689	-0.024	243.3	1.12	1.16	0.64
430.4	216.79	0.66	1694	-0.027	237.3	1.16	1.13	-1.46
535.2	203.69	0.88	1710	-0.036	222.9	1.27	1.08	-7.41
571.7	197.38	0.97	1718	-0.041	217	1.31	1.05	-10.28
600.7	190.79	1.05	1725	-0.045	209.8	1.35	1.01	-13.28
620.5	183.44	1.13	1732	-0.050	201.3	1.39	0.97	-16.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 6.3 เป็นการใช้ตัวเก็บประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด แล้วเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ จะพบว่าที่ค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 60, 80, 100 และ 120 ไมโครฟารัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระได้ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่า คือมีค่า % voltage regulation ที่สูงในทางลบและเมื่อค่าตัวเก็บประจุอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 140 ไมโครฟารัดเป็นต้นไป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลัง



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิรตซ์ คงที่



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิรตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุขนานขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่

ตัวเก็บประจุอนุกรม 60 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{reg}$
0	212.28	0	1663	-0.008	284.1	1.55	1.56	-3.51
66.8	208.51	0.11	1666	-0.010	280.8	1.47	1.54	-5.22
132.1	207.3	0.21	1671	-0.013	278.4	1.43	1.51	-5.77
194.2	204.56	0.32	1677	-0.016	276.2	1.4	1.5	-7.02
262.2	203.25	0.43	1681	-0.019	272.8	1.37	1.49	-7.61
320.6	201.08	0.53	1684	-0.021	271	1.34	1.46	-8.60
379.2	199.52	0.63	1688	-0.023	269	1.34	1.45	-9.31
437.1	198.34	0.74	1694	-0.027	268	1.34	1.43	-9.85
506.3	196.44	0.86	1699	-0.030	267	1.38	1.42	-10.71
562.1	195.27	0.96	1703	-0.032	265.8	1.43	1.42	-10.71
615.4	193.9	1.06	1708	-0.035	265.7	1.5	1.42	-11.86
675.5	193.59	1.16	1714	-0.039	265.6	1.57	1.42	-12.00
730.4	192.16	1.267	1718	-0.041	265.4	1.65	1.4	-12.65
785.4	191.23	1.37	1723	-0.044	265.8	1.73	1.41	-13.08
841.5	191.13	1.47	1727	-0.047	266.3	1.81	1.41	-13.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 80 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	230.51	0	1664	-0.008	292.3	1.7	1.7	4.78
76.6	228.37	0.11	1668	-0.011	289.9	1.63	1.64	3.80
150.1	225.85	0.22	1672	-0.013	286.7	1.58	1.66	2.66
223.7	224.64	0.33	1677	-0.016	284.2	1.53	1.64	2.11
300.7	222.09	0.45	1682	-0.019	280.5	1.49	1.62	0.95
367.9	219.83	0.56	1688	-0.023	278.5	1.47	1.59	-0.08
432.4	217.31	0.66	1693	-0.026	276.1	1.46	1.58	-1.22
498.9	216.13	0.77	1697	-0.028	273.9	1.46	1.56	-1.76
574.8	213.34	0.9	1703	-0.032	271.3	1.48	1.54	-3.03
638	211.84	1	1708	-0.035	269.9	1.54	1.54	-3.71
696.2	210.01	1.11	1715	-0.039	268.7	1.6	1.52	-4.54
754.9	208.59	1.21	1719	-0.042	267.4	1.67	1.5	-5.19
820.5	207.23	1.32	1724	-0.045	265.7	1.76	1.5	-5.80

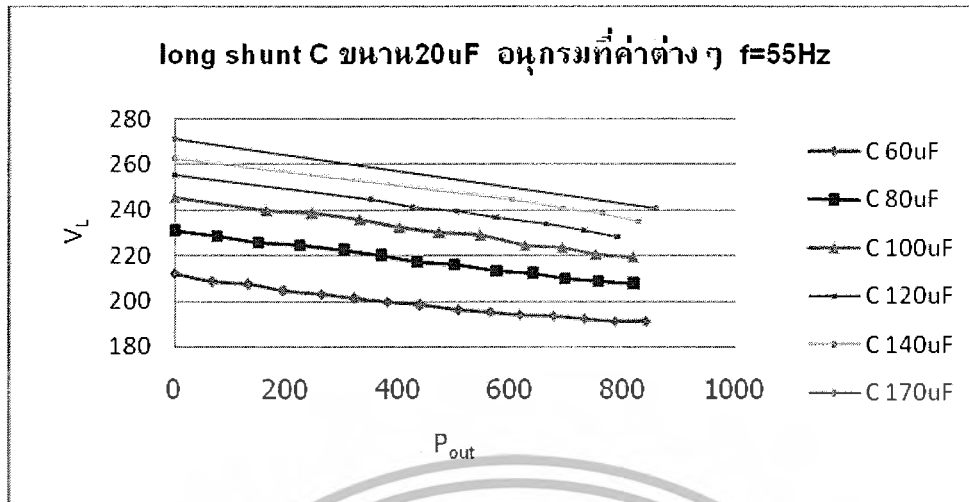
ตัวเก็บประจุอนุกรม 100 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	245.43	0	1665	-0.009	298.7	1.82	1.83	11.56
164.7	240.02	0.23	1675	-0.015	294.05	1.7	1.78	9.10
244.6	238.49	0.34	1680	-0.018	289.4	1.65	1.76	8.40
329.5	235.68	0.47	1685	-0.021	285.4	1.6	1.73	7.13
400.6	232.55	0.57	1690	-0.024	282.6	1.55	1.69	5.70
471.9	230.35	0.68	1695	-0.027	279.7	1.54	1.66	4.70
543.8	228.77	0.79	1702	-0.032	277.6	1.54	1.67	3.99
623.7	224.61	0.93	1709	-0.036	274.4	1.56	1.63	2.10
690.9	223.36	1.03	1714	-0.039	272	1.6	1.6	1.53
752.1	220.63	1.14	1720	-0.042	269.9	1.7	1.6	0.29
816.7	219.57	1.24	1726	-0.046	268	1.74	1.58	-0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

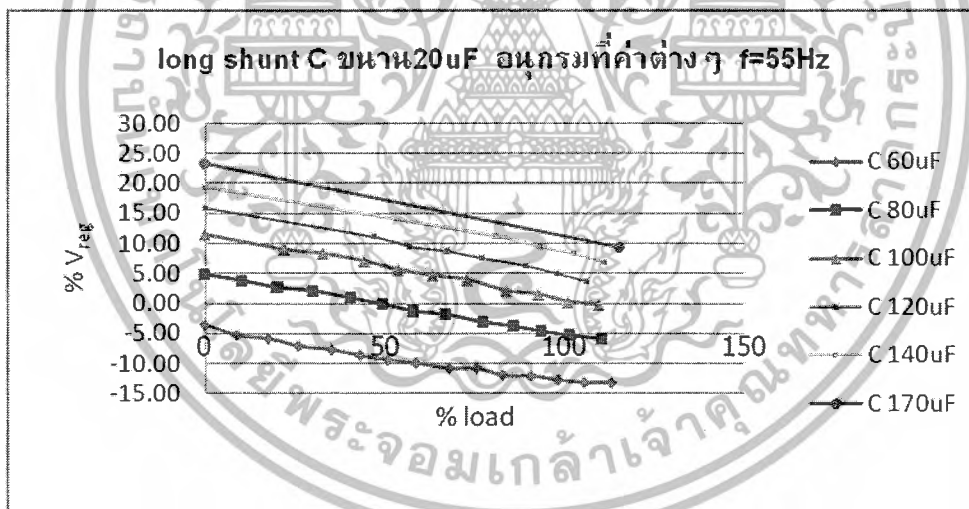
ตัวเก็บประจุอนุกรม 120 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	255.14	0	1663	-0.008	302	1.88	1.88	15.97
348.8	244.62	0.48	1685	-0.021	289.5	1.66	1.81	11.19
423.9	241.1	0.59	1689	-0.024	286.4	1.62	1.76	9.59
501.6	239.32	0.7	1693	-0.026	283.2	1.61	1.73	8.78
573.1	236.78	0.81	1699	-0.030	280	1.6	1.71	7.63
663.6	234.03	0.95	1707	-0.035	276.4	1.62	1.69	6.38
729.2	231.13	1.05	1711	-0.037	273.9	1.66	1.69	5.06
789.8	228.3	1.15	1718	-0.041	271	1.73	1.66	3.77

ตัวเก็บประจุอนุกรม 140 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	262.62	0	1665	-0.009	304.7	1.97	1.97	19.37
601.1	244.47	0.82	1700	-0.030	281.8	1.66	1.78	11.12
692.6	240.55	0.96	1708	-0.035	278.5	1.68	1.74	9.34
762.7	238.18	1.07	1714	-0.039	275.2	1.72	1.72	8.26
826.9	235.08	1.17	1718	-0.041	271.9	1.78	1.68	6.85

จากตารางที่ 6.4 เป็นการใชตัวเก็บประจุขนาด 20 ไมโครฟารัด แล้วเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ จะพบว่าที่ค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรมทุกขนาด ตั้งแต่ 60,100,120,140 และ 170 ไมโครฟารัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีแนวโน้มของแรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรม สำหรับค่าตัวเก็บประจุอนุกรมที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่สุดในการทดสอบกรณีนี้คือตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 100 ไมโครฟารัด โดยจะพบว่าที่พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าประมาณ 220 โวลต์ หรือมีค่า % voltage regulation ประมาณศูนย์นั่นเอง



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่



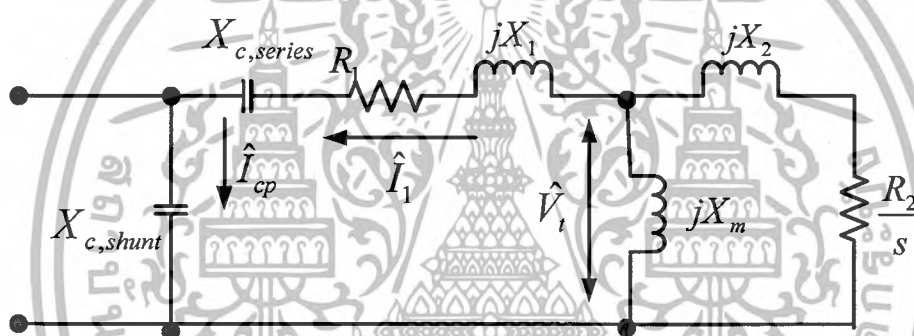
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

6.4.1 พฤติกรรมการ build up แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ขณะยังไม่มี การจ่ายภาระทางไฟฟ้า จะพบว่าตัวเก็บประจุอนุกรม ซึ่งต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองและตัวเก็บประจุ build up (C_{shunt}) มี ลักษณะต่ออนุกรมกันอยู่ ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองมีค่าลดลง ทำให้การ build up แรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นไปได้ยากขึ้น และค่าความจุไฟฟ้า รวมที่ลดลงนี้ ทำให้ค่า X_C รวมมีค่ามาก ส่งผลให้ค่ากระแสกระตุ้นมีค่าต่ำ การ build up แรงดัน ในช่วงแรกจึงเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์สูง สามารถแสดงรูปวงจรสมมูลของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองต่อแบบ long shunt ขณะยังไม่มีภาระทาง ไฟฟ้า ดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ต่อแบบ long shunt ขณะยังไม่มีภาระทางไฟฟ้า

$$C_{total} = \frac{C_{shunt} \cdot C_{series}}{C_{shunt} + C_{series}} \quad (6.5)$$

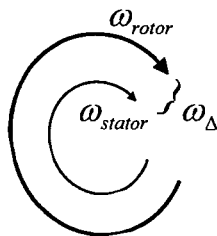
จากสมการ 6.5 จะพบว่า เมื่อเพิ่มค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมี ค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า X_C รวมมีค่าลดลง จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมเมื่อเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของตัว เก็บประจุอนุกรมแล้วจึงทำให้การ build up ทำได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความจุไฟฟ้ารวม ขณะไว้ภาระทางไฟฟ้า

$C_{shunt} (\mu F)$	$C_{series} (\mu F)$	$C_{total} (\mu F)$	$C_{shunt} (\mu F)$	$C_{series} (\mu F)$	$C_{total} (\mu F)$
15	60	12.00	20	60	15.00
15	80	12.63	20	80	16.00
15	100	13.04	20	100	16.67
15	120	13.33	20	120	17.14
15	140	13.54	20	140	17.50
15	170	13.78	20	170	17.89

6.4.2 พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้า

เมื่อมีการนำตัวเก็บประจุอนุกรมมาต่ออนุกรมเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและความถี่ไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในกรณีทดสอบลักษณะความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์คงที่ สาเหตุที่ความถี่ทางไฟฟ้าของเอาต์พุตตกลงเมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นั้นแสดงว่าการจ่ายกระแสต้องเพิ่มขึ้น การที่กระแสจะเพิ่มขึ้นนั้น แสดงว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องเกิดการเหนี่ยวนำที่ขดลวดสเตเตอร์มากขึ้น ซึ่งการเหนี่ยวนำใน ณ ที่นี้เป็นการเหนี่ยวนำที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน 2 สนามที่หมุนในทิศทางเดียวกัน ได้แก่ สนามแม่เหล็กหมุนที่โรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์ เนื่องจากพฤติกรรมที่กล่าวถึงในขณะนี้ เป็นสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์คงที่ นั้นแสดงว่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนโรเตอร์มีค่าคงที่นั่นเองดังนั้นการที่จะเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์เพื่อให้มีกระแสไหลได้มากขึ้นนั้น ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์จะต้องตกลง เพื่อให้การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ามีมากขึ้น โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 ทิศทางการหมุนสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองสนามแม่เหล็ก

เมื่อความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์ (ω_{stator}) มีค่าลดลงในขณะที่ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ (ω_{rotor}) มีค่าคงที่จะทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ (ω_{Δ}) ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีค่ามากขึ้น ซึ่งความเร็วสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นนี้ ก็คือตัวแทนความถี่สัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากสมการที่ 6.6 ดังต่อไปนี้

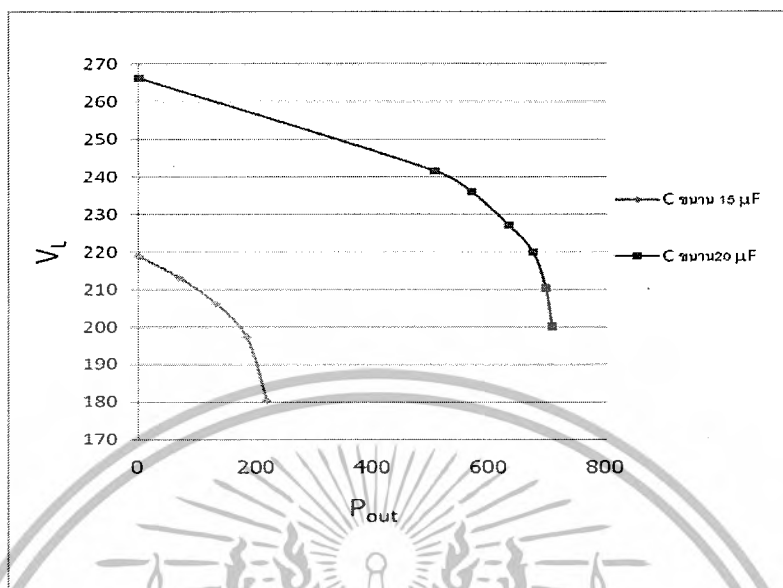
$$E = 4.44 \cdot N \cdot f \cdot \phi \quad (6.6)$$

ขณะนี้ความถี่สัมพัทธ์ (f) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ (E) จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าออกสู่ภาระไฟฟ้าได้มากขึ้น

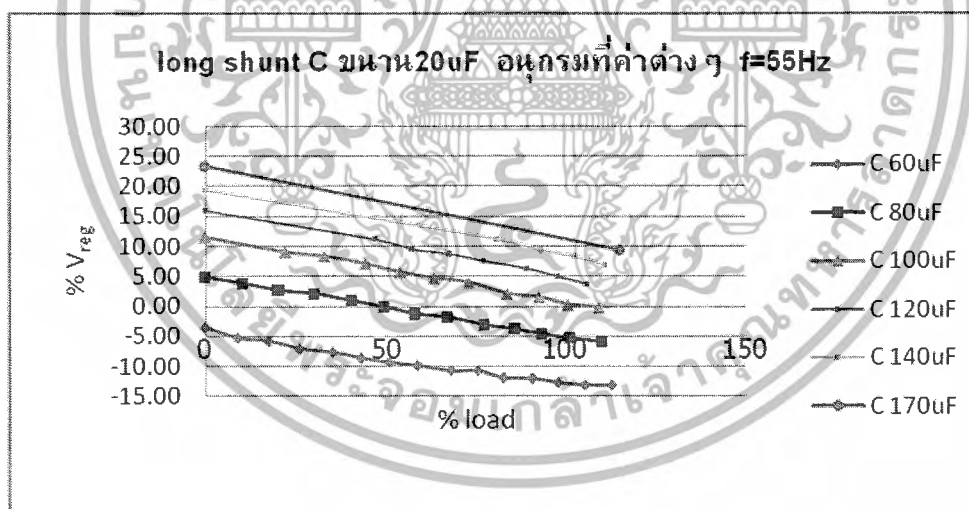
ในทำนองเดียวกันการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะความถี่คงที่ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าเอาท์พุทจะต้องถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ตลอดการจ่ายภาระไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีการจ่ายภาระไฟฟ้าเพิ่มขึ้นความเร็วของส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์มากขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงจะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น

เมื่อเทียบกับการจ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จะพบว่าการต่อใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ long shunt จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลัง โดยที่แรงดันที่ขั้วไม่ล้มไปเสียก่อน อีกทั้งแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะตกน้อยลงเมื่อเทียบกับพิกัดโหลดเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาแรงดันตกให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างได้ผล สำหรับการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าโดยวิธีการต่อวงจรแบบ long shunt นี้ จะเป็นการศึกษาเฉพาะการจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วนเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามหากนำภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนี่ยวนำมาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็พอจะสามารถทำนายผลที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้ กล่าวคือแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็น่าจะตกลงมากเช่นเดียวกัน และอาจจ่ายภาระได้ไม่ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันที่ขั้วล้มไปเสียก่อน

6.5 เปรียบเทียบผลการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 6.19 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 6.20 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมขนาน

จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเพิ่มให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกทั้งยังมีค่า % voltage regulation ที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับการจ่ายภาระไฟฟ้า โดยการใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้ตัวเก็บประจุขนานอนุกรม

7.1 บทนำ

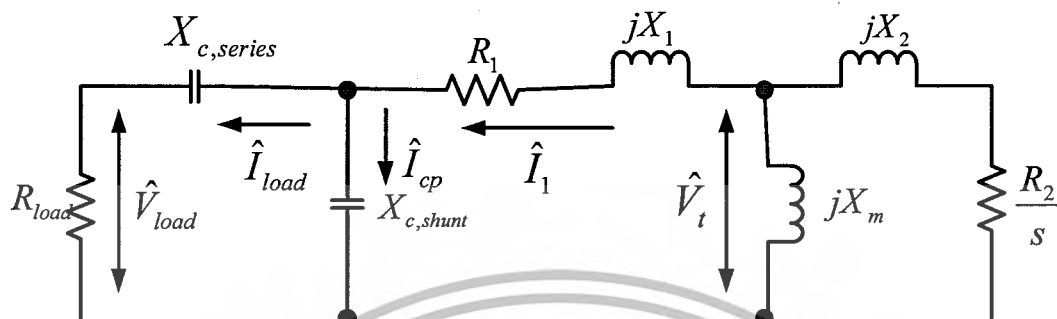
การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในบทที่ผ่านมา นั้น เป็นการทดสอบการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยตรงแล้วจึงต่อตัวเก็บประจุ build up ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า ได้ถึงค่าพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกกูเลชันจะมีค่าแตกต่างกันที่ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมและขนานค่าต่างๆ ดังแสดงในผลการทดสอบในบทที่ผ่านมา ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงอีกแนวคิดหนึ่งในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรม แต่ในครั้งนี้จะเป็นการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาทดสอบโดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมแบบ short shunt หรือขนานอนุกรม ซึ่งเป็นการต่อตัวเก็บประจุขนาน ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก่อนแล้วจึงต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับภาระไฟฟ้าทั้งชนิดความต้านทาน (R) และความต้านทานปนกับความเหนี่ยวนำ ($R-L$)

สำหรับแนวคิดในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนในภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานนั้น การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับภาระทางไฟฟ้านั้น ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าชนิด leading power factor ซึ่งจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกลับเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สูญเสียไปในส่วน leakage reactance ($X_{l,2}$) ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมภาระทางไฟฟ้า มีค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกกูเลชัน ที่ดีขึ้นและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

สำหรับแนวคิดในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนในภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานผสมความเหนี่ยวนำนั้น ตัวเก็บประจุอนุกรมที่ต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า จะทำหน้าที่ในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน ทั้งในส่วนของรีแอกแตนซ์ (X_L) ที่ภาระทางไฟฟ้าและส่วนของลิกเกจรีแอกแตนซ์ ($X_{l,2}$) ซึ่งจะมีลักษณะการคำนวณค่าตัวเก็บประจุอนุกรม คล้ายกับการคำนวณของภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน ดังจะอธิบายต่อไป

7.2 การวิเคราะห์ค่าตัวเก็บประจุสำหรับการทดสอบ

7.2.1 กรณีการทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน



รูปที่ 7.1 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุแบบ short shunt ต่อกับภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน

สำหรับวิธีการในการวิเคราะห์ตัวเก็บประจุอนุกรมเพื่อใช้ในการทดสอบ จะอาศัยวงจรสมมูลรูปที่ 7.1 ในการคำนวณ การคำนวณจะคิดแยกให้ $X_{c,shunt}$ จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับ X_m เพื่อใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และให้ $X_{c,series}$ จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้กับ $X_{l,2}$ โดยการคำนวณจะทำการคำนวณที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีพิกัดกระแสเท่ากับ 1.9 แอมแปร์ ดังนั้นสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่สูญเสียไปใน $X_{l,2}$ ณ พิกัดกำลังได้ดังนี้

$$Q_1 = \hat{I}_1^2 X_{l,2} \quad (7.1)$$

$$Q_1 = 1.9^2 \times 17.54 = 63.31 \text{ VAR}$$

พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 750 วัตต์ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ต่อเฟส โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่พร้อมภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน มีค่า 220 โวลต์

$$P = \hat{I}_{load} \hat{V}_{load} \cos \theta \quad (7.2)$$

$$\hat{I}_{load} = \frac{250}{220 \times 1} = 1.13 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก \hat{I}_{load} ไหลผ่าน $X_{c,series}$ ด้วย ดังนั้นสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนได้ที่ $X_{c,series}$ ได้ดังนี้

$$Q_2 = \hat{I}_{load}^2 X_{c,series} \quad (7.3)$$

แต่กำลังไฟฟ้าเสมือนในส่วนนี้จะนำไปชดเชยในส่วนของ $X_{e1,2}$ ดังนั้นจะได้ว่า Q_2 จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้กับ Q_1 ดังสมการ

$$Q_2 = Q_1 \quad (7.4)$$

$$\hat{I}_{load}^2 \times X_{c,series} = Q_1 \quad (7.5)$$

$$(1.13)^2 \times X_{c,series} = 63.31$$

ดังนั้น $X_{c,series} = 49.58 \Omega$

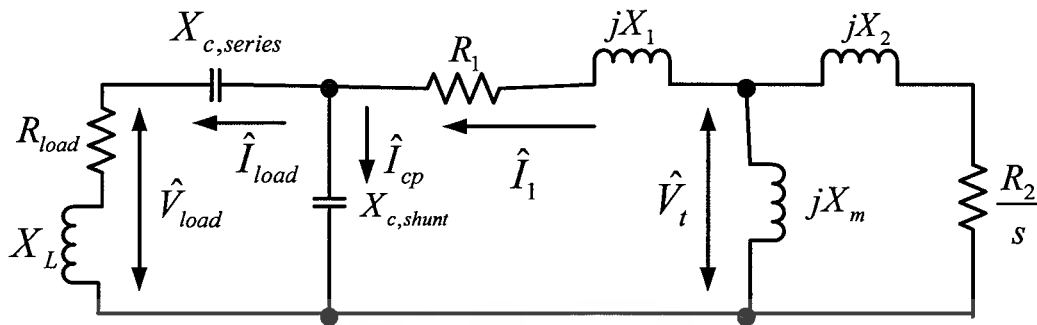
จาก $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$ ที่ $f = 50 \text{ Hz}$

$$X_{c,series} = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 49.58}$$

ดังนั้น $C = 64.23 \mu F$

7.2.2 กรณีการทางไฟฟ้าแบบความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 7.2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุแบบ short shunt ต่อกับภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ

ลักษณะวงจรสมมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณในกรณีนี้ดังรูปที่ 7.2 จะมีลักษณะคล้ายกับวงจรของภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน เพียงแต่มีการเพิ่มส่วนของค่าความเหนี่ยวนำ X_L ขึ้นมา โดยการคำนวณจะคิดแยกให้ $X_{c,shunt}$ จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้กับ $X_{l,2}$ เช่นเคย แต่ครั้งนี้ $X_{c,series}$ จะทำหน้าที่ในการชดเชยให้ค่า X_L รวมถึงจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้กับ $X_{l,2}$ สำหรับการทดสอบในปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการทดสอบที่ค่าประกอบกำลังไฟฟ้าล้าหลัง 0.9 ที่พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก่อนอื่นต้องคำนวณหาพิกัดกระแสที่ผ่านภาระทางไฟฟ้าโดยประมาณก่อน จากสมการ

$$P = \hat{I}_{load} \hat{V}_{load} \cos \phi \quad (\cos = 0.9 \text{ ดังนั้น } \phi = 25.84^\circ) \quad (7.7)$$

$$\hat{I}_{load} = \frac{250}{220 \times 0.9} = 1.26 \text{ A}$$

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าต่อเฟส $S(VA)$ มีค่า

$$S = 1.26 \times 220 = 277.77 \text{ VA}$$

คำนวณค่า Q_3 ที่ภาระทางไฟฟ้าใช้ได้จาก

$$Q_3 = S \sin \phi \quad (7.8)$$

$$Q_3 = 277.77 \times \sin(25.84)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$Q_3 = 121 \text{ VAR}$$

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนรวมที่ตัวเก็บประจุอนุกรมต้องชดเชยให้มีค่าเท่ากับ

$$Q_{total} = Q_3 + Q_1 = 121 + 63.31 = 184.31 \text{ VAR}$$

ในทำนองเดียวกัน \hat{I}_{load} ก็ไหลผ่าน $X_{c,series}$ เช่นกัน ดังนั้นสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนจาก $X_{c,series}$ ได้จากสมการ 7.3 เช่นเดียวกันกำลังไฟฟ้าเสมือนจาก $X_{c,series}$ นี้ จะนำไปชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน Q_{total}

$$Q_2 = Q_{total} \quad (7.9)$$

$$\hat{I}_{load}^2 \times X_{c,series} = Q_{total} \quad (7.10)$$

$$X_{c,series} = \frac{184.31}{(1.26)^2} = 116 \text{ } \Omega$$

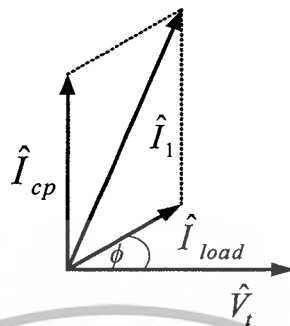
$$C_{series} = \frac{1}{2\pi f X_{c,series}} \quad (7.11)$$

ดังนั้น

$$C_{series} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 116} = 27.45 \text{ } \mu F$$

7.3 การวิเคราะห์เวกเตอร์

7.3.1 กรณีภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน



รูปที่ 7.3 เวกเตอร์กระแส

รูปที่ 7.3 สามารถรวมเวกเตอร์กระแสได้ดังนี้

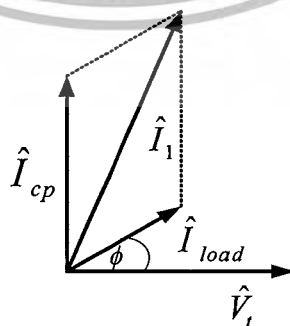
$$\hat{I}_1^2 = (\hat{I}_{load} \cos \phi)^2 + (\hat{I}_{cp} + \hat{I}_{load} \sin \phi)^2 \quad (7.12)$$

$$\hat{I}_1^2 = (\hat{I}_{load})^2 \cos^2 \phi + (\hat{I}_{cp})^2 + 2\hat{I}_{cp} \hat{I}_{load} \sin \phi + \hat{I}_{load}^2 \sin^2 \phi \quad (7.13)$$

$$\hat{I}_1^2 = (\hat{I}_{load})^2 \cos^2 \phi + (\hat{I}_{cp})^2 + 2\hat{I}_{cp} \hat{I}_{load} \sin \phi + (\hat{I}_{load})^2 - (\hat{I}_{load})^2 \cos^2 \phi \quad (7.14)$$

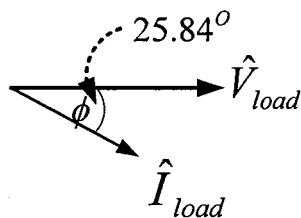
ดังนั้น
$$\hat{I}_1 = \sqrt{\hat{I}_{load}^2 + \hat{I}_{cp}^2 + 2\hat{I}_{load} \hat{I}_{cp} \sin \phi} \quad (7.15)$$

7.3.2 กรณีภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานผสมความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 7.4 เวกเตอร์กระแส

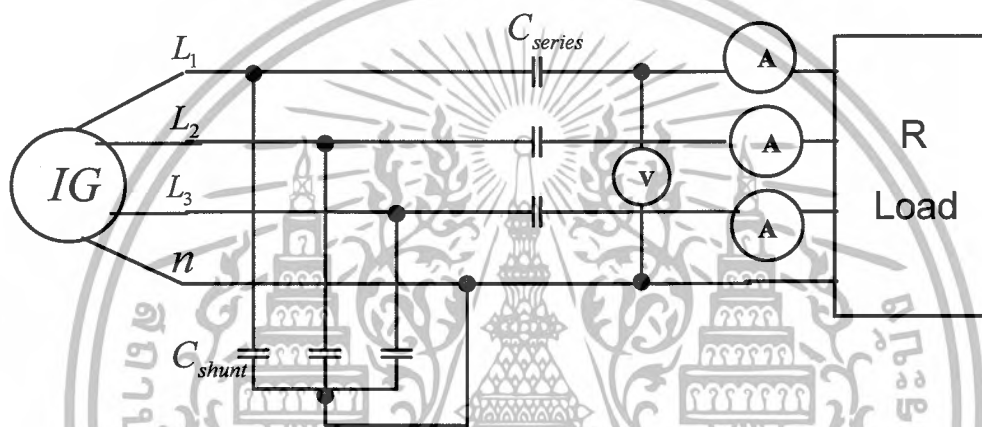
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



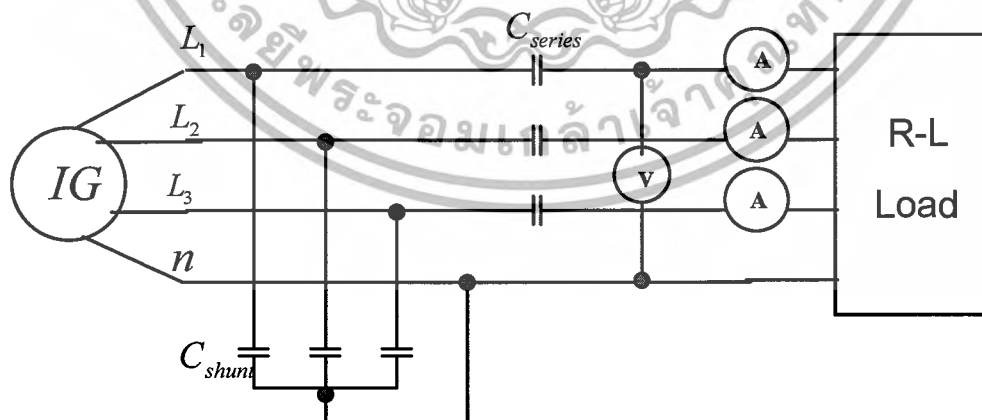
รูปที่ 7.5 เวกเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่าง \hat{I}_{load} กับ \hat{V}_{load}

ดังนั้น

$$\hat{I}_1 = \sqrt{\hat{I}_{load}^2 + \hat{I}_{cp}^2 + 2\hat{I}_{load}\hat{I}_{cp} \sin \phi} \quad (7.16)$$



รูปที่ 7.6 วงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุ แบบ short shunt ต่อกับภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน



รูปที่ 7.7 วงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุ แบบ short shunt ต่อกับภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานผสมความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 ผลการทดสอบ

7.4.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะต่อภาระทางไฟฟ้าแบบ ความต้านทานในสภาวะความเร็วคงที่ (Constant Speed)

ตารางที่ 7.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุ ขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุนุกรมค่าต่างๆ ที่ความเร็ว 1568 รอบต่อนาที

ตัวเก็บประจุนุกรมขนาด 40 μF							
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	245.72	0	51.85	-0.008	1.25	1.24	11.69
82.7	240.72	0.12	51.87	-0.008	1.18	1.19	9.42
159.4	235.02	0.23	51.75	-0.010	1.12	1.15	6.83
230.2	228.84	0.34	51.56	-0.014	1.09	1.11	4.02
305	223.83	0.45	51.26	-0.020	1.1	1.08	1.74
369	220.28	0.56	50.96	-0.026	1.15	1.06	0.13
435.6	218.41	0.67	50.88	-0.027	1.24	1.06	-0.72
498.4	215.92	0.76	50.48	-0.035	1.34	1.06	-1.85
574	213.68	0.9	50.15	-0.042	1.46	1.04	-2.87
648.3	214.65	1	50.24	-0.040	1.57	1.05	-2.43
706.9	212.74	1.11	49.87	-0.048	1.68	1.05	-3.30
765.9	211.05	1.21	49.66	-0.052	1.78	1.07	-4.07

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 60 μF							
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	245.05	0	51.78	-0.009	1.25	1.25	11.39
81.7	238.59	0.11	51.65	-0.012	1.16	1.2	8.45
156.9	232.66	0.22	51.41	-0.017	1.1	1.15	5.75
228.5	227.74	0.34	51.58	-0.013	1.07	1.1	3.52
293.5	218.39	0.45	51.07	-0.023	1.06	1.05	-0.73
352.7	213.87	0.55	50.92	-0.026	1.11	1.03	-2.79
407.4	209.14	0.65	50.54	-0.034	1.17	1.01	-4.94
462.8	205.79	0.75	50.42	-0.037	1.05	0.99	-6.46
526.7	201.87	0.87	50.1	-0.043	1.33	0.97	-8.24
592.3	202.23	0.98	50.09	-0.043	1.44	0.96	-8.08
646.8	200.51	1.07	49.72	-0.051	1.53	0.96	-8.86
704.7	199.59	1.18	49.43	-0.057	1.63	0.96	-9.28
770.5	199.23	1.29	49.29	-0.060	1.75	0.96	-9.44

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 65 μF							
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	245.67	0	51.86	-0.008	1.25	1.25	11.67
82	238.87	0.12	51.64	-0.012	1.16	1.18	8.58
155.9	231.73	0.22	51.46	-0.016	1.09	1.12	5.33
224.6	225.15	0.33	51.31	-0.019	1.06	1.08	2.34
286.3	215.34	0.44	50.92	-0.026	1.05	1.02	-2.12
347.7	211.58	0.55	51.06	-0.024	1.09	0.99	-3.83
397.5	205.74	0.64	50.64	-0.032	1.15	0.96	-6.48
447.6	201.18	0.74	50.38	-0.037	1.22	0.94	-8.55
509.5	197.4	0.86	50.03	-0.045	1.32	0.91	-10.27
564.4	195.83	0.96	49.91	-0.047	1.41	0.92	-10.99
621.1	195.19	1.06	49.61	-0.054	1.49	0.91	-11.28
688.5	196.32	1.17	49.68	-0.052	1.59	0.91	-10.76

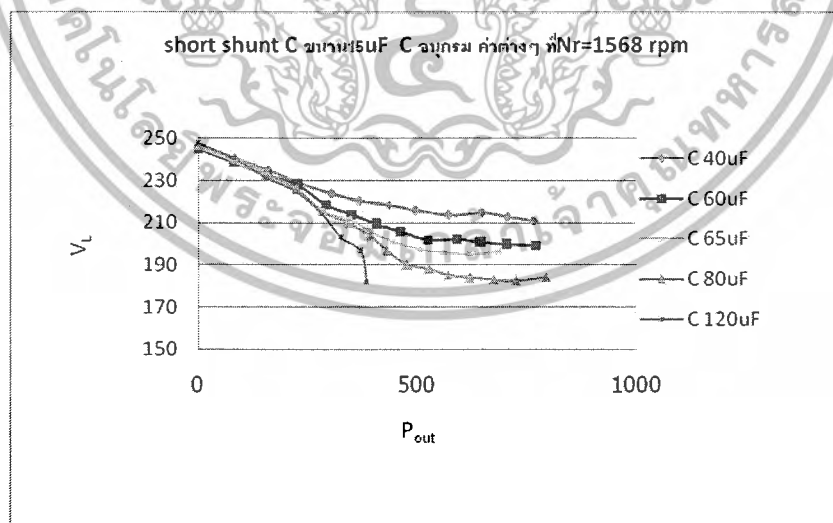
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 80 μF							
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	246.58	0	52.07	-0.004	1.25	1.25	12.08
82.8	240.57	0.11	51.93	-0.006	1.16	1.19	9.35
156.7	232.8	0.23	51.56	-0.014	1.09	1.13	5.82
225.5	225.97	0.33	51.56	-0.014	1.06	1.09	2.71
286.6	215.32	0.44	50.89	-0.027	1.04	1.03	-2.13
343.2	209.77	0.54	51.08	-0.023	1.08	1	-4.65
391.9	203.54	0.64	50.84	-0.028	1.13	0.96	-7.48
432.3	196.88	0.73	50.29	-0.039	1.2	0.95	-10.51
479.1	189.91	0.84	49.97	-0.046	1.26	0.92	-13.68
529.7	187.91	0.94	50.07	-0.044	1.33	0.89	-14.59
572.9	185.04	1.03	49.63	-0.053	1.42	0.89	-15.89
621.1	183.9	1.12	49.36	-0.059	1.5	0.89	-16.41
675.6	182.89	1.23	49.29	-0.060	1.62	0.88	-16.87
726.2	182.42	1.32	48.92	-0.068	1.72	0.88	-17.08
794.4	184.13	1.43	48.98	-0.067	1.82	0.88	-16.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

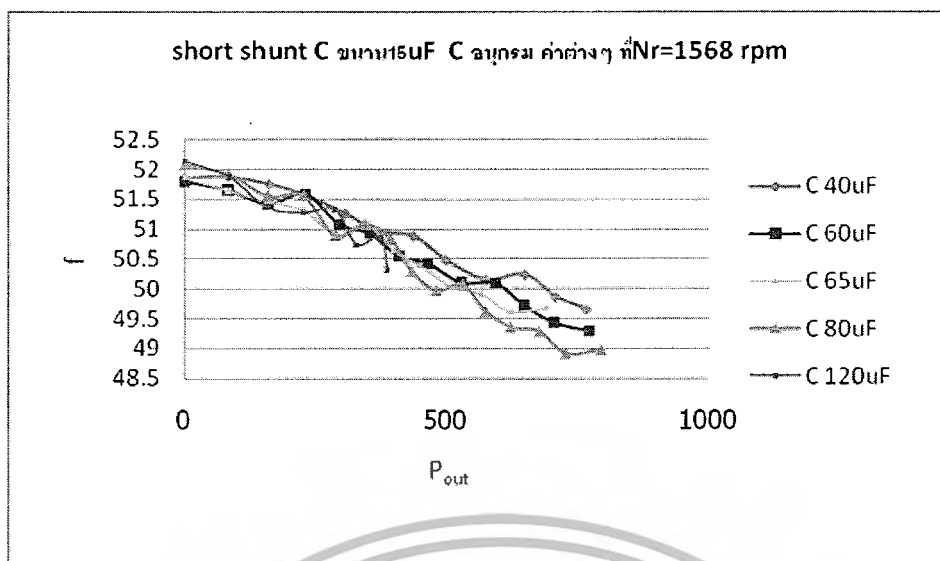
ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 120 μF							
P_{out}	V_L	I_L	$f(\text{Hz})$	S	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	247.78	0	52.14	-0.002	1.26	1.25	12.63
82.6	240.35	0.11	51.88	-0.007	1.18	1.19	9.25
155.5	231.37	0.22	51.36	-0.018	1.1	1.14	5.17
223.7	224.73	0.33	51.28	-0.019	1.05	1.09	2.15
285.3	214.3	0.44	51.32	-0.018	1.04	1.04	-2.59
326.4	203.26	0.53	50.74	-0.030	1.05	0.98	-7.61
371.8	196.68	0.63	50.87	-0.027	1.1	0.94	-10.60
384.7	182.11	0.7	50.32	-0.039	1.12	0.87	-17.22

จากผลการทดสอบในตารางที่ 7.1 จะพบว่าเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเมื่อเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุอนุกรมจากน้อยไปหามาก จะพบว่าค่าแรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามลำดับและหากใช้ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมมากเกินไปจนเกินจากที่คำนวณไว้มากเกินไป จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้า ได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

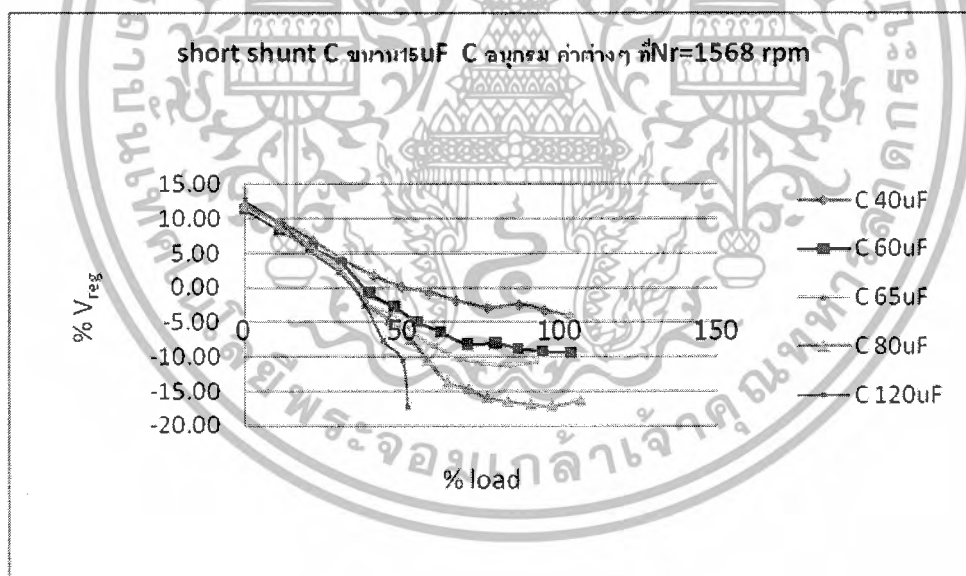


รูปที่ 7.8 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,568$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.9 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,568$ รอบต่ออนาที



รูปที่ 7.10 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดแรงดันไฟฟ้าที่โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,568$ รอบต่ออนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุขนานขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความเร็ว 1513 รอบต่อนาที

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 30 μF								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_c	% V_{reg}
0	266.93	0	50.06	-0.007	265.1	1.78	1.78	21.33
419.5	239.43	0.58	48.88	-0.032	248.6	1.59	1.56	8.83
484.7	234.26	0.69	48.62	-0.037	247.7	1.61	1.52	6.48
557.7	232.18	0.8	48.74	-0.035	247.3	1.69	1.50	5.54
627.4	225.82	0.92	48.33	-0.044	247.7	1.79	1.50	2.65
675.6	220.33	1.02	48.07	-0.049	249	1.91	1.49	0.15
724.8	215.99	1.11	47.92	-0.052	250.1	2	1.49	-1.82

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 40 μF								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_c	% V_{reg}
0	266.4	0	50.12	-0.006	264.4	1.79	1.79	21.09
419.3	239.32	0.58	48.79	-0.034	245.2	1.54	1.54	8.78
490.9	236.14	0.69	48.72	-0.035	243.2	1.57	1.51	7.34
559.8	232.91	0.8	48.6	-0.038	241.8	1.61	1.48	5.87
630.8	227.12	0.93	48.15	-0.047	241.1	1.73	1.47	3.24
690.4	223.74	1.03	47.93	-0.052	240.9	1.84	1.46	1.70
750.9	221.21	1.13	47.89	-0.053	241.5	1.94	1.45	0.55

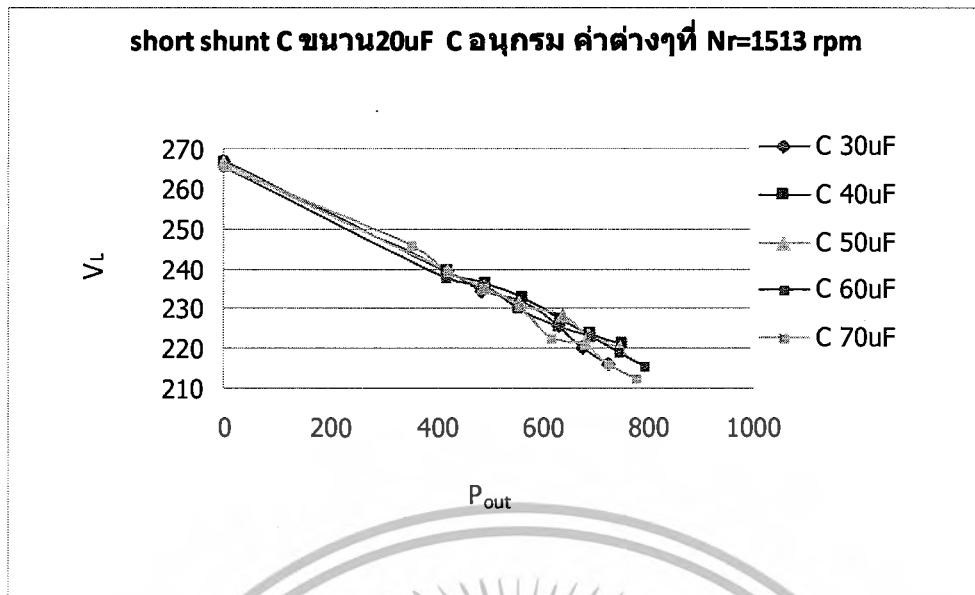
ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 50 μF								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_c	% V_{reg}
0	266.4	0	49.96	-0.009	265.3	1.8	1.80	21.09
419.6	239.18	0.58	48.87	-0.032	242.5	1.49	1.51	8.72
488.5	235.2	0.69	48.66	-0.036	240.1	1.52	1.49	6.91
554.8	231.42	0.8	48.54	-0.039	237.6	1.58	1.46	5.19
637.7	228.17	0.93	48.4	-0.042	235.4	1.68	1.42	3.71
686.9	222.99	1.02	47.94	-0.052	234.3	1.77	1.41	1.36
745	220.03	1.13	47.77	-0.056	233.8	1.87	1.40	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

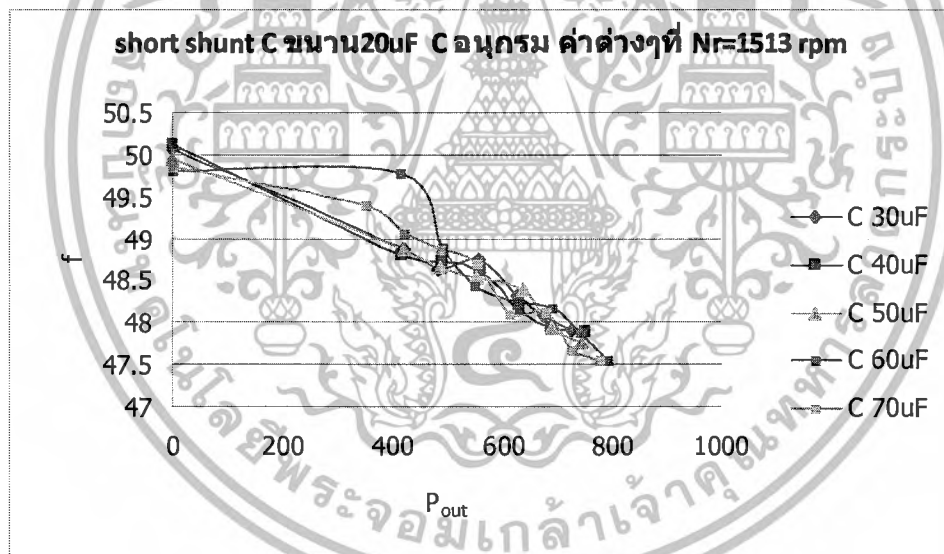
ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 60 μF								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	265.5	0	49.8	-0.013	265	1.8	1.79	20.68
415.2	237.95	0.58	49.78	-0.013	241.5	1.48	1.52	8.16
490	235.66	0.69	48.9	-0.031	237.7	1.49	1.47	7.12
548.2	230.07	0.79	48.43	-0.041	234	1.55	1.45	4.58
624.9	225.69	0.92	48.24	-0.045	231.4	1.63	1.39	2.59
688.8	223.2	1.03	48.18	-0.047	230	1.73	1.38	1.45
740.8	219.16	1.13	47.88	-0.053	227.9	1.81	1.36	-0.38
790.2	215.35	1.22	47.55	-0.061	226.7	1.91	1.35	-2.11

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 70 μF								
P_{out}	V_L	I_L	f(Hz)	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	265.66	0	49.85	-0.012	265.7	1.8	1.80	20.75
352.4	245.69	0.48	49.39	-0.021	245.4	1.5	1.57	11.68
420.2	239.31	0.58	49.07	-0.028	240.9	1.46	1.50	8.78
488.8	235.14	0.69	48.88	-0.032	236.2	1.47	1.47	6.88
551.6	230.53	0.8	48.7	-0.036	232.7	1.53	1.42	4.79
612.4	222.64	0.92	48.1	-0.049	227.9	1.61	1.38	1.20
678.3	220.89	1.02	48.13	-0.048	225.4	1.69	1.35	0.40
724.3	216.05	1.12	47.67	-0.058	223.4	1.77	1.33	-1.80
776.5	212.69	1.22	47.54	-0.061	221.8	1.87	1.32	-3.32

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีนี้ จะพบว่าค่าตัวเก็บประจุอนุกรมที่ใช้งานได้ดีจะมีค่าอยู่ที่ 40 ,50 และ 60 ไมโครฟารัดโดยจะพบว่าที่พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 220 โวลต์ หรือมีค่า % voltage regulation ประมาณศูนย์นั่นเอง

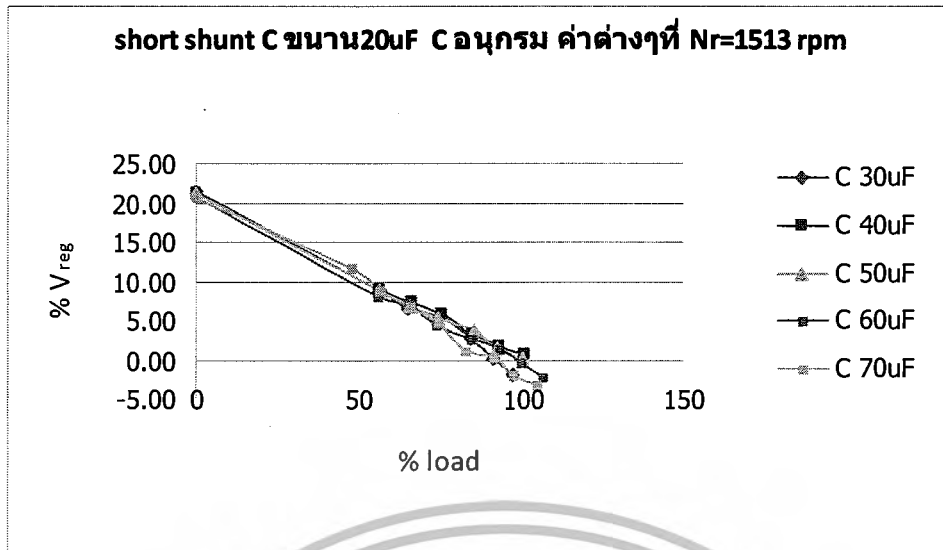


รูปที่ 7.11 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ความเร็วรอบ $N_r = 1,513$ รอบต่อนาที



รูปที่ 7.12 กราฟแสดงค่าความถี่กับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,513$ รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชั่นกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบการหมุน $N_r = 1,513$ รอบต่อนาที



7.4.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะต่อภาระทางไฟฟ้าแบบความ ต้านทาน ในสภาวะความถี่คงที่ (Constant Frequency)

ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์คงที่

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 40 μ F								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{reg}$
70.4	216.3	0.11	1514	-0.009	218	1.05	1.06	-1.68
136.2	211.91	0.21	1520	-0.013	215	1.01	1.01	-3.68
202.4	210.21	0.32	1526	-0.017	213	1	0.99	-4.45
272.2	208.29	0.44	1532	-0.021	212	1.04	0.99	-5.32
338.7	208.35	0.54	1539	-0.026	214	1.12	0.99	-5.30
407.9	209.27	0.65	1544	-0.029	217	1.22	0.99	-4.88
478	210.25	0.76	1550	-0.033	220.5	1.32	1.01	-4.43
568.2	211.71	0.9	1556	-0.037	225	1.46	1.03	-3.77
641.6	212.99	1	1561	-0.041	229	1.57	1.04	-3.19
710.7	213.06	1.11	1568	-0.045	233	1.7	1.06	-3.15
783.2	213.7	1.22	1574	-0.049	237	1.81	1.08	-2.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 60 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
70.1	215.86	0.11	1515	-0.010	219	1.03	1.06	-1.88
136.3	211.75	0.22	1521	-0.014	213	0.99	1.01	-3.75
198.1	207.41	0.32	1526	-0.017	209	0.97	0.98	-5.72
259.8	202.46	0.43	1534	-0.023	205	1	0.96	-7.97
323	202.14	0.53	1541	-0.027	204	1.05	0.95	-8.12
379	199.47	0.63	1546	-0.031	203	1.14	0.94	-9.33
441.8	200	0.74	1554	-0.036	205	1.23	0.96	-9.09
523.7	200.87	0.87	1562	-0.041	206	1.34	0.95	-8.70
587.1	201.16	0.97	1569	-0.046	209	1.44	0.96	-8.56
659.5	203.01	1.08	1575	-0.050	212	1.55	0.98	-7.72
727.8	203.74	1.19	1582	-0.055	215	1.67	0.99	-7.39
807.4	205.2	1.31	1586	-0.057	217.5	1.8	0.99	-6.73

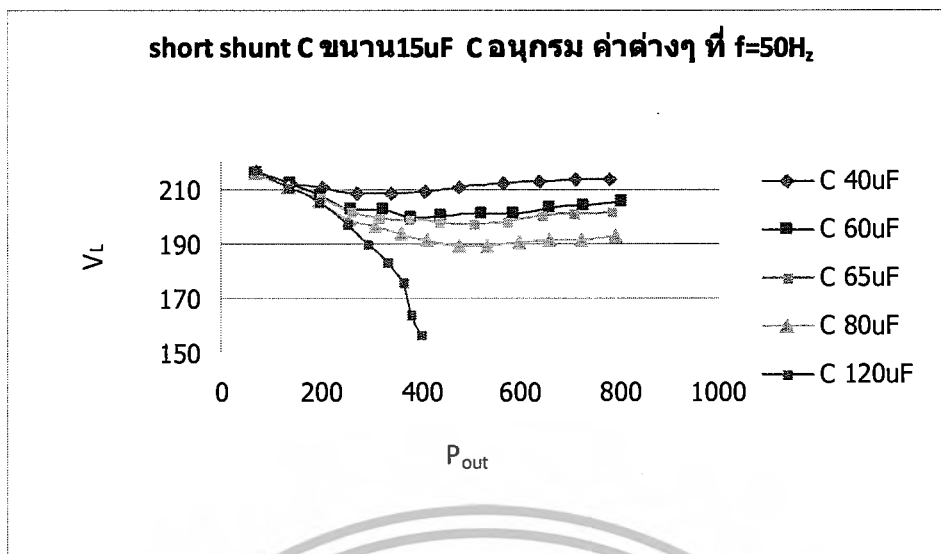
C อนุกรม 65 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
70.4	216.29	0.11	1515	-0.010	216.9	1.01	1.02	-1.69
134.7	210.45	0.21	1519	-0.013	211	0.96	0.97	-4.34
197	206.57	0.32	1528	-0.019	207.3	0.96	0.94	-6.10
259.5	201.89	0.43	1536	-0.024	202.7	0.98	0.91	-8.23
316.1	199.19	0.53	1543	-0.029	201	1.04	0.91	-9.46
376.8	198.63	0.63	1549	-0.033	200.4	1.12	0.9	-9.71
435.3	197.68	0.73	1556	-0.037	201.2	1.2	0.9	-10.15
507.7	196.88	0.86	1563	-0.042	201.4	1.31	0.9	-10.51
574.6	198.08	0.97	1568	-0.045	204.1	1.4	0.92	-9.96
644	199.79	1.08	1576	-0.051	206.7	1.51	0.93	-9.19
710.4	200.56	1.18	1583	-0.055	209.3	1.62	0.94	-8.84
784.7	201.5	1.3	1589	-0.059	211.8	1.75	0.94	-8.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

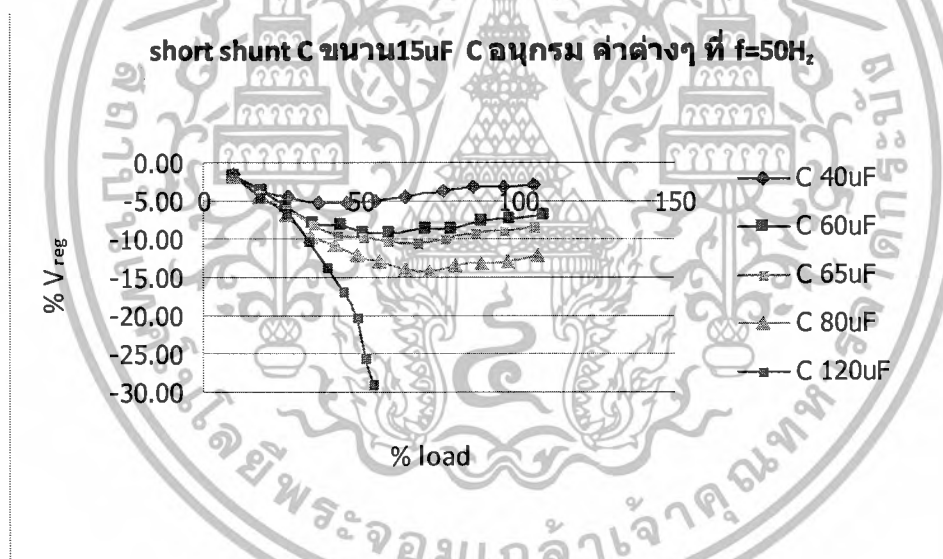
ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 80 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
70.2	215.91	0.11	1513	-0.009	217	1.03	1.06	-1.86
134.8	210.23	0.21	1520	-0.013	212	0.98	1.01	-4.44
194.6	204.96	0.32	1528	-0.019	208	0.96	0.98	-6.84
253.3	198.78	0.43	1534	-0.023	200.5	0.97	0.93	-9.65
309	196.13	0.53	1539	-0.026	197	1.03	0.91	-10.85
361.3	193.56	0.62	1549	-0.033	196	1.1	0.91	-12.02
414	191.41	0.72	1554	-0.036	193.9	1.17	0.89	-13.00
476.7	189.07	0.84	1563	-0.042	192.5	1.26	0.89	-14.06
533.5	188.86	0.94	1570	-0.047	194	1.35	0.91	-14.15
599	190.61	1.05	1575	-0.050	195.7	1.44	0.91	-13.36
658.7	191.02	1.15	1581	-0.054	197.5	1.55	0.91	-13.17
724.2	191.39	1.26	1589	-0.059	199	1.67	0.91	-13.00
793.1	193.1	1.37	1594	-0.063	201.5	1.77	0.93	-12.23

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 120 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
70.6	217.03	0.11	1514	-0.009	218	1.3	1.06	-1.35
134.8	210.19	0.21	1520	-0.013	212.5	0.97	1	-4.46
195.2	205.24	0.32	1527	-0.018	205.5	0.95	0.96	-6.71
250.1	197.17	0.42	1536	-0.024	197	0.95	0.92	-10.38
293.5	189.72	0.52	1542	-0.028	190	0.99	0.88	-13.76
332.2	182.98	0.61	1550	-0.033	184	1.03	0.85	-16.83
363	175.47	0.69	1558	-0.039	177	1.07	0.82	-20.24
381.3	163.73	0.78	1568	-0.045	165	1.1	0.77	-25.58
399.4	156.39	0.85	1577	-0.051	158	1.15	0.75	-28.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.14 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่



รูปที่ 7.15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เดจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุ ขนขนาด 20 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 30 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	267.44	0	1514	-0.009	265.5	1.77	1.78	21.56
598.1	243.53	0.82	1554	-0.036	259.9	1.8	1.65	10.70
686.8	240.13	0.95	1562	-0.041	261.4	1.91	1.66	9.15
758.4	237.86	1.06	1567	-0.045	263.1	2.03	1.66	8.12

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 40 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	265.39	0	1514	-0.009	265	1.8	1.79	20.63
771.8	240.45	1.07	1570	-0.047	256.9	1.96	1.62	9.30

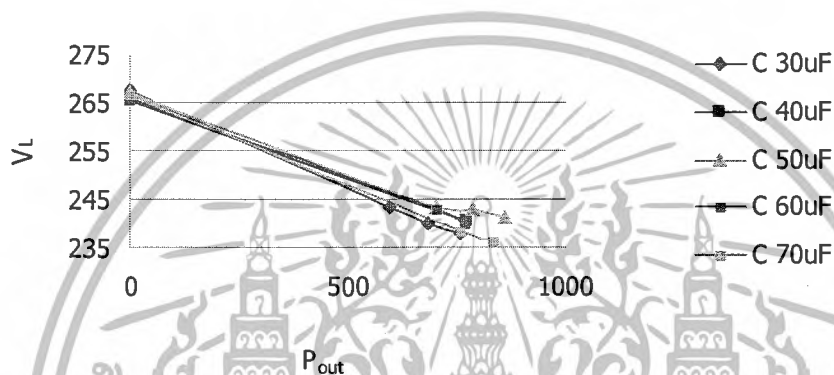
ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 50 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	267.07	0	1512	-0.008	265.7	1.8	1.80	21.40
701.8	243.21	0.96	1557	-0.038	251.4	1.79	1.59	10.55
785.8	243.07	1.08	1564	-0.043	251.6	1.9	1.60	10.49
859.5	241.21	1.19	1571	-0.047	252.1	2.02	1.58	9.64

ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 60 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	$\%V_{\text{reg}}$
0	265.68	0	1513	-0.009	265.2	1.8	1.80	20.76
702.2	243.03	0.96	1566	-0.044	247.4	1.75	1.56	10.47
769.8	239.82	1.07	1571	-0.047	247	1.85	1.55	9.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

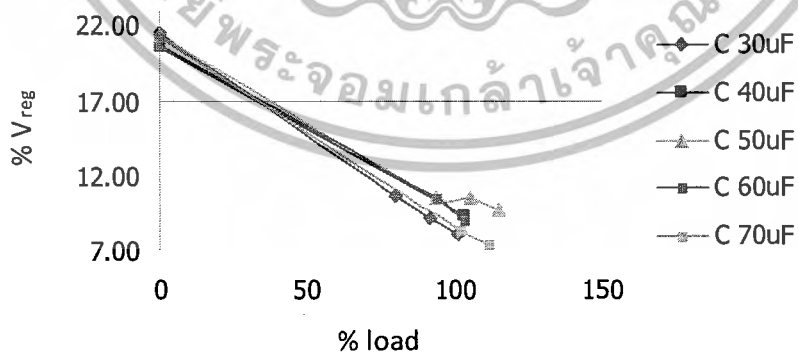
ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 70 μF								
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_C	$\%V_{\text{reg}}$
0	266.83	0	1515	-0.010	265.9	1.8	1.80	21.29
760.2	238.45	1.06	1573	-0.049	244.1	1.83	1.55	8.39
832.9	236.32	1.18	1588	-0.059	243	1.92	1.53	7.42

short shunt C ขนาด 20 μF C อนุกรม ค่าต่างๆ ที่ $f=50\text{Hz}$



รูปที่ 7.16 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คงที่

short shunt C ขนาด 20 μF C อนุกรม ค่าต่างๆ ที่ $f=50\text{Hz}$



รูปที่ 7.17 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะต่อภาระทางไฟฟ้า แบบความ ต้านทาน ปนความเหนี่ยวนำในสภาวะความถี่คงที่ (Constant Frequency)

ตารางที่ 7.5 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บ
ประจุขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ
(power factor 0.9) ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คงที่

ตัวเก็บประจุอนุกรม 10 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{reg}$
270.2	230.25	0.42	1531	-0.021	217.5	1.08	0.99	0.92	4.66
338	240.18	0.53	1537	-0.025	222.2	1.19	1.01	0.89	9.17
402	229.97	0.64	1538	-0.025	240.3	1.41	1.08	0.92	4.53
466.9	210.46	0.82	1545	-0.030	260.1	1.71	1.15	0.9	-4.34

ตัวเก็บประจุอนุกรม 15 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{reg}$
224.7	206.06	0.39	1534	-0.023	189	0.9	0.86	0.91	-6.34
389.8	225.52	0.63	1546	-0.031	213.6	1.23	0.96	0.91	2.51
454.4	231.86	0.73	1551	-0.034	216.1	1.33	0.96	0.9	5.39
559.2	232.58	0.87	1555	-0.037	236	1.58	1.04	0.91	5.72
624.5	237.29	0.98	1559	-0.039	240.1	1.69	1.05	0.9	7.86
663.7	226.56	1.07	1560	-0.040	252.1	1.85	1.09	0.92	2.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 20 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
136.9	183.49	0.28	1526	-0.017	169.2	0.69	0.8	0.9	-16.60
514.2	221.04	0.85	1560	-0.040	208.5	1.38	0.94	0.91	0.47
579.8	226.81	0.95	1566	-0.044	210.9	1.49	0.94	0.9	3.10
686.4	230.82	1.08	1568	-0.045	229.8	1.68	1.01	0.92	4.92
755.6	234.92	1.18	1571	-0.047	232.8	1.8	1.02	0.91	6.78

ตัวเก็บประจุอนุกรม 25 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
335	171.12	0.73	1570	-0.047	250.2	1.02	0.7	0.9	-22.22
601.7	212.59	1.03	1574	-0.049	200.8	1.5	0.9	0.92	-3.37
662	216.83	1.13	1582	-0.055	202.8	1.6	0.91	0.9	-1.44
754.3	224.07	1.25	1590	-0.060	213	1.79	0.94	0.9	1.85

ตัวเก็บประจุอนุกรม 27.5 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
95.9	188.27	0.19	1518	-0.012	180	0.78	0.84	0.91	-14.42
509	192.58	0.97	1574	-0.049	177.5	1.33	0.78	0.91	-12.46
556.6	195.77	1.06	1581	-0.054	177.9	1.42	0.79	0.89	-11.01
757.2	218.78	1.26	1580	-0.053	208.9	1.75	0.75	0.92	-0.55

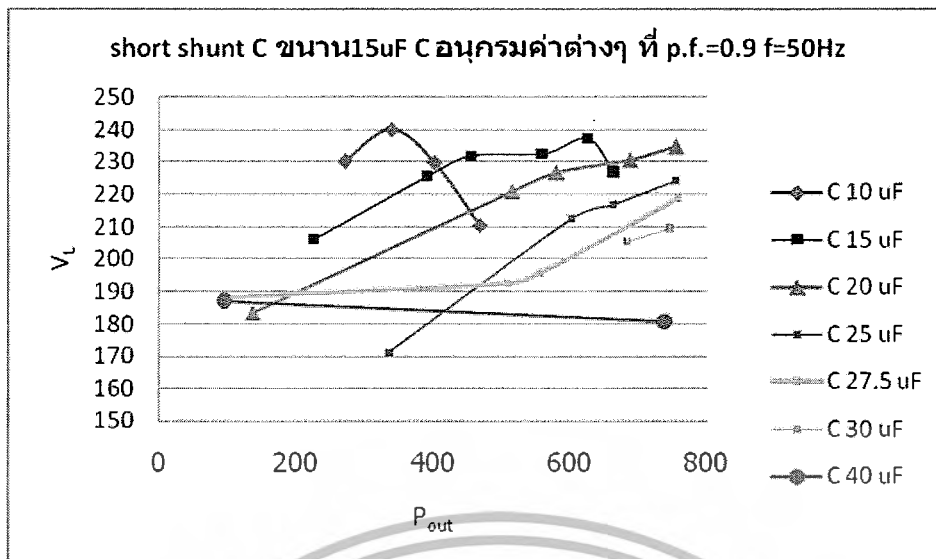
ตัวเก็บประจุอนุกรม 30 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
682.9	205.52	1.21	1540	-0.027	194.5	1.66	0.87	0.9	-6.58
745.4	209.57	1.31	1549	-0.033	196.8	1.76	0.88	0.9	-4.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

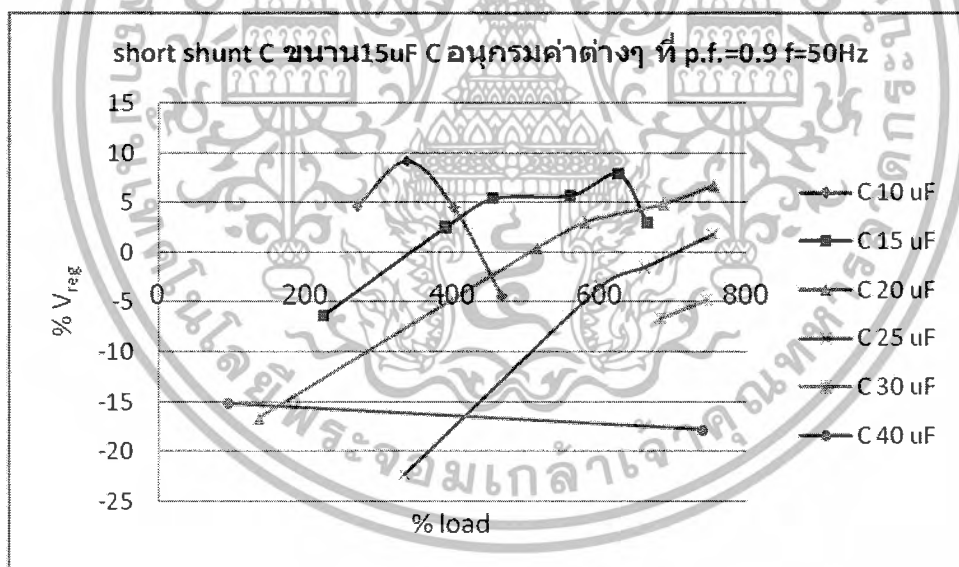
ตัวเก็บประจุอนุกรม 40 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{reg}$
94.8	186.78	0.19	1520	-0.013	181.9	0.78	0.86	0.91	-15.10
739.2	180.9	1.51	1620	-0.080	169.8	1.8	0.78	0.9	-17.77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.18 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คงที่



รูปที่ 7.19 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คงที่

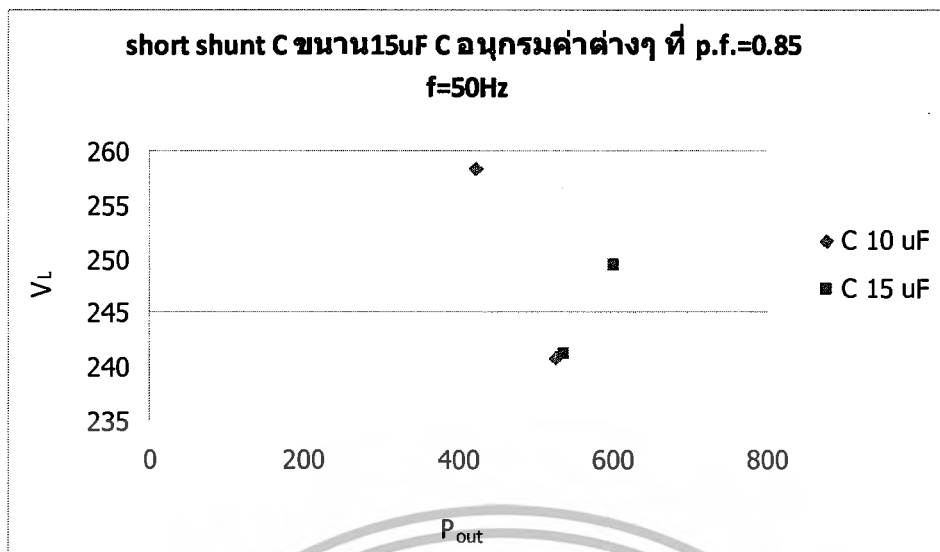
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.6 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุ
ขนาขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุนุกรมค่าต่างๆ (power factor 0.85)
ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

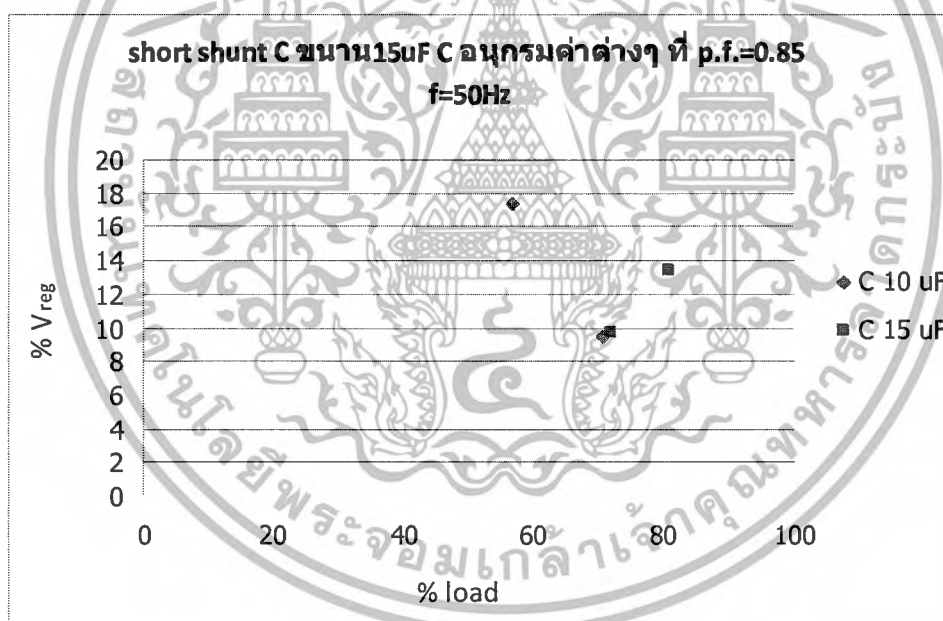
ตัวเก็บประจุนุกรม 10 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	% V_{reg}
422.7	258.31	0.64	1548	-0.032	226.4	1.3	1.01	0.85	17.41
527.1	240.72	0.85	1550	-0.033	253.6	1.67	1.11	0.86	9.42

ตัวเก็บประจุนุกรม 15 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	% V_{reg}
602.2	249.44	0.96	1565	-0.043	222.7	1.56	0.97	0.84	13.38
536.7	241.22	0.86	1558	-0.039	220	1.46	0.96	0.87	9.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.20 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่



รูปที่ 7.21 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.7 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุ
ขนานขนาด 16 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ (power factor 0.9)
ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

ตัวเก็บประจุอนุกรม 10 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	% V_{reg}
0	230.7	0	1508	-0.005	232.8	1.2	1.2	error	4.86
355.2	248.14	0.53	1540	-0.027	230	1.23	1.1	0.89	12.79
468.3	235.96	0.74	1544	-0.029	251.7	1.58	1.17	0.89	7.25

ตัวเก็บประจุอนุกรม 15 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	% V_{reg}
259.3	224.56	0.42	1538	-0.025	208.2	1.99	1.01	0.92	2.07
483.8	239.62	0.75	1552	-0.035	225.2	1.39	1.05	0.9	8.92
585.3	239.86	0.89	1559	-0.039	240.5	1.61	1.12	0.92	9.03
641.7	241.73	0.98	1564	-0.043	244.5	1.72	1.13	0.9	9.88
692	238.83	1.08	1568	-0.045	252.6	1.9	1.15	0.9	8.56

ตัวเก็บประจุอนุกรม 20 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	% V_{reg}
222.9	204.06	0.39	1532	-0.021	188.2	0.87	0.93	0.91	-7.25
360.4	214.86	0.61	1545	-0.030	198.5	1.11	0.96	0.92	-2.34
393.6	212.94	0.69	1552	-0.035	190.6	1.15	0.92	0.89	-3.21
545.9	229.68	0.87	1558	-0.039	216.4	1.43	1.02	0.91	4.40
620.4	235.92	0.97	1562	-0.041	219.1	1.54	1.03	0.91	7.24
719.3	237.45	1.09	1565	-0.043	234.1	1.75	1.08	0.9	7.93
786.5	240.87	1.2	1571	-0.047	236.8	1.86	1.1	0.92	9.49

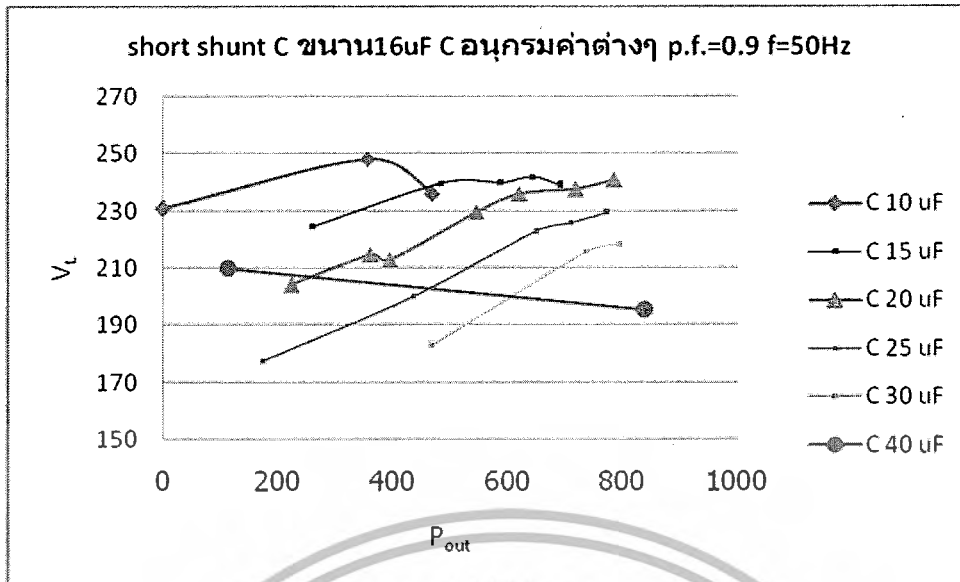
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอนุกรม 25 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{reg}$
173.8	177.24	0.36	1536	-0.024	163.8	0.79	0.82	0.9	-19.44
434.5	200.07	0.79	1569	-0.046	181.7	1.19	0.87	0.91	-9.06
649.8	222.8	1.06	1577	-0.051	211	1.56	1	0.92	1.27
710.2	225.88	1.16	1583	-0.055	212.5	1.66	1	0.9	2.67
772.3	229.53	1.26	1586	-0.057	224	1.88	1.03	0.88	4.33

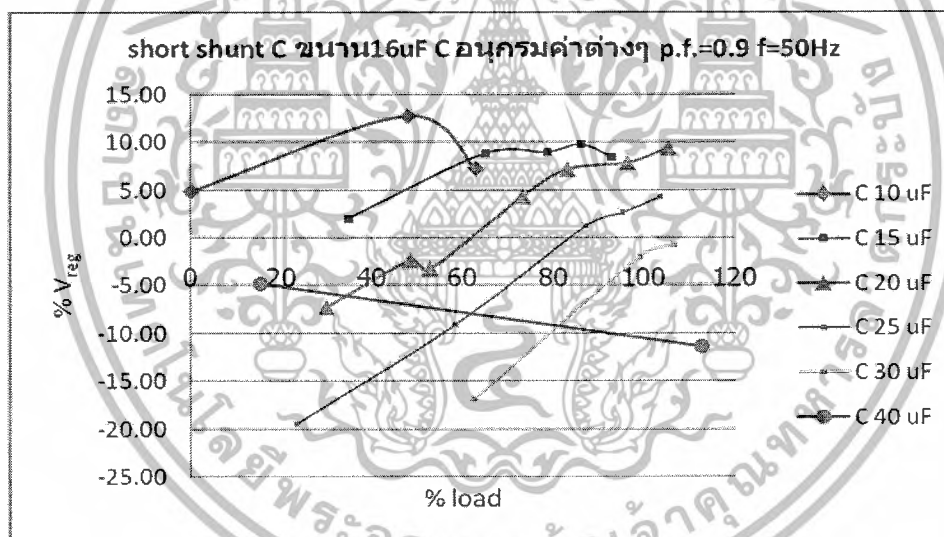
ตัวเก็บประจุอนุกรม 30 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{reg}$
466	182.88	0.94	1585	-0.057	167.1	1.25	0.8	0.9	-16.87
738.5	215.67	1.25	1589	-0.059	202.7	1.7	0.96	0.92	-1.97
795.2	218.27	1.34	1598	-0.065	203.7	1.8	0.95	0.9	-0.79

ตัวเก็บประจุอนุกรม 40 μ F									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{reg}$
114.1	209.52	0.2	1519	-0.013	204.8	0.93	1.02	0.91	-4.76
840.2	195.17	1.58	1618	-0.079	184	1.91	0.85	0.91	-11.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.22 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่



รูปที่ 7.23 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจแรกๆเทียบกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.8 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวเก็บประจุขนานขนาด 16 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ (power factor 0.85) ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

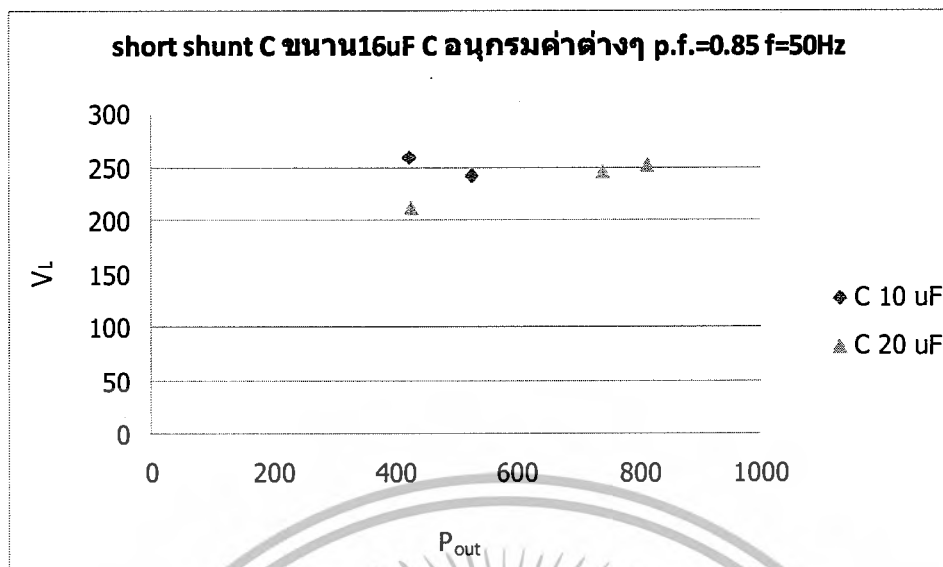
ตัวเก็บประจุอนุกรม 10 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
422.7	258.31	0.64	1545	-0.030	233.1	1.35	1.11	0.85	17.41
527.1	240.72	0.84	1551	-0.034	257.3	1.71	1.19	0.86	9.42

ตัวเก็บประจุอนุกรม 15 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
631	256.45	0.97	1566	-0.044	229.5	1.6	1.06	0.85	16.57

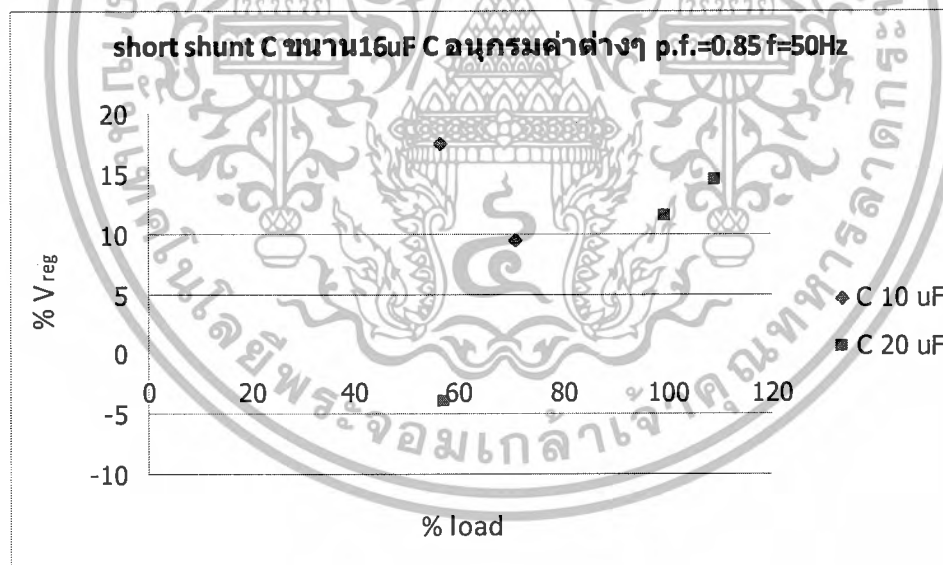
ตัวเก็บประจุอนุกรม 20 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
427.6	211.16	0.79	1565	-0.043	181.9	1.17	0.88	0.85	-4.02
741.2	245.1	1.16	1577	-0.051	221.8	1.73	1.04	0.84	11.41
813.2	251.71	1.28	1583	-0.055	224	1.87	1.04	0.86	14.41

ตัวเก็บประจุอนุกรม 25 μF									
P_{out}	V_L	I_L	N_r	S	V_1	I_1	I_c	p.f.	$\%V_{\text{reg}}$
399.3	177.3	0.89	1587	-0.058	151.6	1.15	0.75	0.85	-19.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.24 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่



รูปที่ 7.25 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเรชันกับเปอร์เซ็นต์โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

7.5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีภาระชนิดความต้านทาน

จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมภาระไฟฟ้าได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเลชันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุอนุกรมทำหน้าที่ในการช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้แรงดันที่คร่อมภาระไฟฟ้าตกน้อยลงและสามารถจ่ายภาระได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจะพบว่าเหตุการณ์แรงดันตกจนกระทั่งล่ม จะไม่เกิดขึ้นเลยถ้าค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรมมีค่าไม่มากจนเกินไป กล่าวคือค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรมจะต้องมีค่าที่พอดี โดยมีค่าไม่มากเกินจากที่ได้คำนวณไว้มากจนเกินไป

ในกรณีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สภาวะความถี่คงที่ จะพบว่าค่าตัวเก็บประจุขนานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงคือ 15 ไมโครฟารัด โดยสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรมได้ในช่วง 40 – 60 ไมโครฟารัด ซึ่งในกรณีทดสอบที่ความถี่คงที่จะให้ผลเป็นที่น่าพอใจที่สุด กล่าวคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลัง โดยมีค่าของเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเลชันไม่เกิน 3 - 6 % แต่เมื่อเปลี่ยนตัวเก็บประจุขนานจาก 15 ไมโครฟารัดเป็น 20 ไมโครฟารัด แล้วทดสอบเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุอนุกรมค่าต่างๆ จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้ถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ว่าค่าแรงดันที่คร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น และมีค่ามากจนเกินพอดี คือมีค่าโวลเตจเรกูเลชันอยู่ที่ประมาณ 7 – 9 % ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าตัวเก็บประจุขนานที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงคือ 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมที่เหมาะสมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง 40 – 60 ไมโครฟารัด

7.5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีภาระชนิดความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ

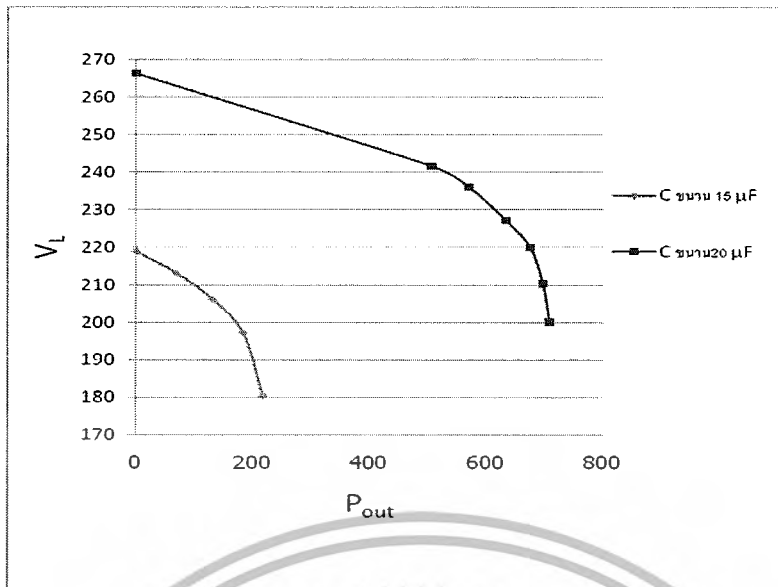
ก่อนการทดสอบในกรณีนี้ผู้ทำการทดสอบได้ลองนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานปนความเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียว จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าในโหลดชนิดนี้ได้เลย กล่าวคือแรงดันที่ขั้วและแรงดันที่คร่อมภาระไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งแรงดันล่มและไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าต่อไปได้ เนื่องจากภาระไฟฟ้าชนิดนี้จะมีการดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยตรง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ใช้ในส่วนกระตุ่นสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดน้อยลงไปมาก

การทดสอบนี้จะเป็นการเน้นการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่าตัวประกอบกำลังลำหลังประมาณ 0.9 จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจากน้อยไปหามากจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้สูงขึ้นเป็นลำดับและจ่ายได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับภาระไฟฟ้าชนิดนี้จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้มากขึ้น จากในครั้งแรกที่ไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้เลย เนื่องจากในครั้งนี้มีตัวเก็บประจุอนุกรมช่วยในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้กับรีแอกแตนซ์ที่ภาระไฟฟ้า (X_L) และส่วนที่สูญเสียไปในลิคเกจรีแอกแตนซ์ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

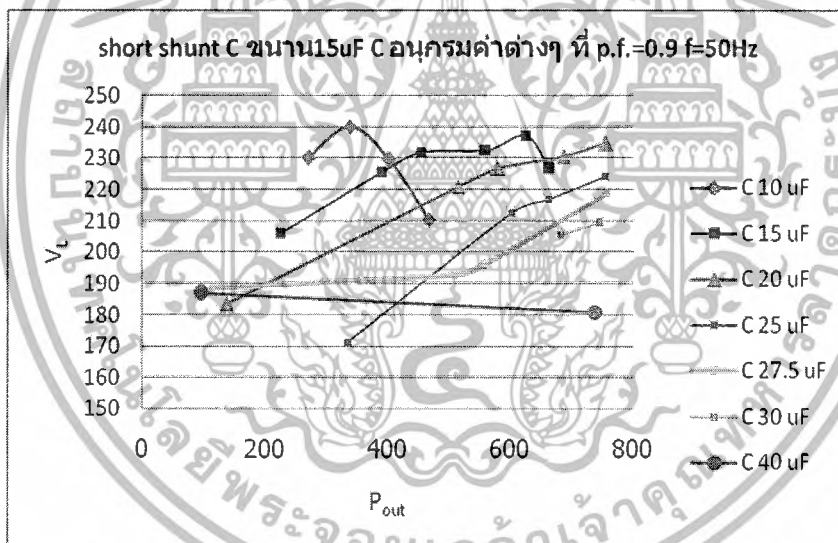
จากการทดสอบจะพบว่า ที่ค่าตัวเก็บประจุขนาด 15 ไมโครฟารัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุอนุกรมให้สูงขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามลำดับ อีกทั้งแรงดันที่ขั้วและแรงดันที่คร่อมภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะตกลงไม่มาก สำหรับการจ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่าตัวประกอบกำลังลำหลังประมาณ 0.9 นี้ ผู้ทดสอบได้ทำการคำนวณค่าตัวเก็บประจุอนุกรมที่เหมาะสมไว้ที่ 27.45 ไมโครฟารัด และจากการทดสอบจะพบว่าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายภาระไฟฟ้าที่พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ค่าตัวประกอบกำลังลำหลัง 0.9 โดยเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุอนุกรมในช่วง 25-30 ไมโครฟารัด จะให้ผลเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากค่าของเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเลชันจะมีค่าอยู่ในช่วง -4.7 % ถึง 1.85 % และมีค่าประมาณ -0.90 % เมื่อใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 27.5 ไมโครฟารัด ซึ่งตรงตามที่ได้คำนวณไว้

เมื่อเปลี่ยนตัวเก็บประจุขนาดจาก 15 ไมโครฟารัด เป็น 16 ไมโครฟารัด จะพบว่าผลที่ได้จะมีแนวโน้มที่เหมือนกับกรณีของตัวเก็บประจุขนาด 15 ไมโครฟารัด เพียงแต่ในกรณีนี้แรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงมีค่าเปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเลชันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวกับการใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานอนุกรมนั้น จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานอนุกรมจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วนหรือความต้านทานปนความเหนี่ยวนำก็ตาม อีกทั้งแรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ในช่วงที่ดี โดยมีค่าโวลเตจเรกูเลชันอยู่ที่ประมาณ 5 % สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการจ่ายภาระไฟฟ้าก่อนการใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมกับหลังใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมได้ดังนี้



รูปที่ 7.26 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 7.27 การจ่ายภาระไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานอนุกรม

จากกราฟในรูปที่ 7.25 และ 7.26 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเพิ่มเข้ามาจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวหน้าสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมีค่าแรงดันตกคร่อมภาระไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 220 โวลต์ (ตัวเก็บประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัดและตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 27.5 ไมโครฟารัด จ่ายภาระไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 0.9 p.f. lagging)

บทที่ 8

บทสรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

8.1 บทสรุป

ในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตนเองมาใช้งาน มีความจำเป็นที่จะต้องต่อตัวเก็บประจุขนาน เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในขั้นแรกนั้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มหมุน จะเกิดแรงดันตกคร่อมที่ขั้วเล็กน้อยซึ่งแรงดันนี้จะตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุขนานทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุไหลผ่าน กระแสนี้จะก่อให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลเพิ่มขึ้นที่โรเตอร์ส่งผลให้โรเตอร์มีความเข้มฟลักซ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อโรเตอร์ที่มีความเข้มฟลักซ์เพิ่มขึ้นเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดสเตเตอร์อีกครั้งหนึ่ง จะส่งผลให้ ณ เวลา t แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นอีกเล็กน้อยและแรงดันที่เพิ่มขึ้นนี้ก็จะตกคร่อมตัวเก็บประจุขนานเช่นเดิม ส่งผลให้เกิดกระแสอันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นอีก กระบวนการเช่นนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดสมดุล หรือ build up point ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเรโซแนนซ์ระหว่างค่า X_c และ X_m ซึ่งจุดนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดแรงดันที่ขั้วขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยขนาดของแรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าขณะไม่มีการต่อภาระทางไฟฟ้า จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง มีการต่อภาระทางไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุขนานเพียงอย่างเดียวจะพบว่าเมื่อมีการจ่ายภาระไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกลงไป ตามขนาดภาระไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการจ่ายภาระไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสรวมไหลมากขึ้น กระแสนี้จะไหลผ่าน leakage reactance ที่ขดลวดสเตเตอร์ ทำให้เกิดการใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนในส่วนนี้ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่จะต้องถูกใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าน้อยลงส่งผลให้แรงดันที่ขั้วตกลงไป ยิ่งภาระทางไฟฟ้ามีขนาดมากขึ้นเท่าไร การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ leakage reactance จะยิ่งมีค่ามากขึ้นเท่านั้น จนในที่สุดเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีกำลังไฟฟ้าเสมือนไม่พอต่อการกระตุ้นจะทำให้เกิดสภาวะแรงดันล้มเหลือศูนย์โวลต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าต่อไปได้

จากปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงได้เกิดแนวคิดในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 2 แนวทางคือการต่อตัวเก็บประจุนุกรมแบบอนุกรมขนาน (long shunt) และการต่อตัวเก็บประจุนุกรมแบบขนานอนุกรม (short shunt) โดยตัวเก็บประจุนุกรมที่ต่อเพิ่มเข้ามานี้ จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยให้กับส่วนของ leakage reactance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการแก้ปัญหาในแนวทางแรกหรือการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมชดเชยแบบอนุกรมขนานนั้น หลังจากการทดสอบพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริง แต่ค่าของแรงดันที่คร่อมภาระไฟฟ้านั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร จะเห็นได้ชัดว่าการใช้ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจากค่าที่คำนวณได้นั้น (ตัวเก็บประจุขนานขนาด 15 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 170 ไมโครฟารัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่าตัวเก็บประจุอนุกรมด้วยวิธีนี้ยังมีข้อบกพร่องอยู่ แต่เมื่อลองทำการทดสอบเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุขนานใหม่เป็น 20 ไมโครฟารัด และใช้ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 100 ไมโครฟารัด จะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่เพียงแต่สามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น แต่แรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้ายังมีขนาด 220 โวลต์อีกด้วย แสดงให้เห็นว่าในการคำนวณค่าตัวเก็บประจุในวิธีการนี้จะต้องมีการคิดที่ตัวเก็บประจุขนานด้วย เนื่องจากวิธีการคำนวณที่กลุ่มผู้ทำการทดสอบได้เสนอไว้ จะใช้วิธีการคิดแยกโดยให้ตัวเก็บประจุขนาน (X_{cp}) จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับส่วนกระตุ้น (X_m) คือการให้ค่าตัวเก็บประจุขนานเท่ากับ 15 ไมโครฟารัด คงที่ โดยจะไม่นำมารวมคำนวณด้วย และให้ตัวเก็บประจุอนุกรม (X_{cs}) จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับส่วน leakage reactance ($X_{1,2}$) แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็ยังคงสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในค่าตัวเก็บประจุขนานและอนุกรมบางค่า จึงสามารถสรุปได้ว่าการแก้ปัญหาด้วยวิธีการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมขนานสามารถนำมาใช้งานได้ แต่ควรมีการปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณค่าตัวเก็บประจุขนานและอนุกรมใหม่ เพื่อให้แรงดันที่คร่อมภาระไฟฟ้า ณ พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

วิธีการที่สองที่ใช้ในการแก้ปัญหาแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตก ซึ่งเรียกการต่อตัวเก็บประจุแบบนี้ว่าการต่อแบบขนานอนุกรม(short shunt) ในการทดสอบแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้ ภาระไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจะมีทั้งภาระไฟฟ้าแบบความต้านทานล้วนและความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ สำหรับแนวคิดในการคำนวณนั้นจะใช้วิธีการคิดแยก โดยให้ตัวเก็บประจุขนานที่คำนวณค่าได้ 15 ไมโครฟารัด ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับส่วนกระตุ้น (X_m) โดยจะไม่นำมาโยงเกี่ยวกับการคำนวณ แต่จะทำการคำนวณที่ตัวเก็บประจุอนุกรมเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยให้ตัวเก็บประจุอนุกรมทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนคืนให้ส่วนของ leakage reactance และส่วนของ X_L (ในกรณีที่เป็นภาระไฟฟ้าแบบความต้านทานปนความเหนี่ยวนำ) จากการทดสอบจะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้จนถึงพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกทั้งยังมีแรงดันที่ตกคร่อมภาระไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีอีกด้วยไม่ว่าจะเป็นภาระจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานล้วนหรือความต้านทานปนความเหนี่ยวนำก็ตาม แสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณที่กลุ่มผู้ทำการทดสอบได้ เสนอไว้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

8.2 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า

สมการที่ใช้ในการประสิทธิภาพทางไฟฟ้า

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss,elec}} \times 100 \quad 8.1$$

กรณี long shunt ตัวเก็บประจุขนาน 20 ไมโครฟารัด , ตัวเก็บประจุอนุกรม 170 ไมโครฟารัด

$$\text{ความเร็วคงที่ 1657 รอบ/นาที } \% \eta = \frac{746.7}{746.7 + 98.53} \times 100 = 88.34\%$$

กรณี short shunt ตัวเก็บประจุขนาน 20 ไมโครฟารัด , ตัวเก็บประจุอนุกรม 50 ไมโครฟารัด

$$\text{ความเร็วคงที่ 1513 รอบ/นาที } \% \eta = \frac{745}{745 + 108.6} \times 100 = 87.27\%$$

กรณี short shunt (R-L) ตัวเก็บประจุขนาน 15 ไมโครฟารัด, ตัวเก็บประจุอนุกรม 27.5 ไมโคร-

$$\text{ฟารัด ความถี่คงที่ 50 เฮิร์ตซ์ } \% \eta = \frac{757.2}{757.2 + 89.16} \times 100 = 89.46\%$$

8.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบทั้งหมดที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองมีความเหมาะสมที่จะถูกนำไปใช้งานจริงในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้า แต่ทั้งนี้ในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานนั้น ควรนำไปใช้กับแหล่งพลังงานที่มีความเร็วในการคืนพลังงานกลับที่ค่อนข้างคงที่ เช่น บริเวณฝายกั้นน้ำ, เขื่อน หรือ บริเวณที่มีความเร็วลมคงที่ เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถในการทำงานได้ตรงตามที่ทดสอบไว้ แต่หากแหล่งพลังงานที่ใช้เป็นตัวต้นกำลังในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ความเร็วที่ไม่คงที่ จะทำให้แรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าไม่คงที่ด้วย ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปขับภาระไฟฟ้า ในระบบโดยตรง ดังนั้นถ้าหากนำพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาใช้ในการชาร์จให้กับเซลล์แบตเตอรี่เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในรูปของพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจึงแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงนี้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้อินเวอร์เตอร์สำหรับการจ่ายภาระไฟฟ้าจึงน่าจะเป็นการเหมาะสมกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] มงคล เดชนครินทร์, **พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ ว.ส.ท.**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : บริษัท โกลบอล กราฟฟิค จำกัด, 2550.
- [2] ศุภชัย สุรินทร์วงศ์, **เครื่องกลไฟฟ้า 4 เล่ม 1 อินดักชันมอเตอร์ระบบไฟ 3 เฟส**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2544.
- [3] Abdulrahman L. Alolah and Majeed A. Alkanhal, " Optimization-Based Steady State Analysis of Three Phase Self-Excited Induction Generator ," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 15, No. 1, March, 2000.
- [4] L. Shridhar, Bhim Singh, C.S. Jha, B.P. Singh, SM and S.S. Murthy, SM, " SELECTION OF CAPACITORS FOR THE SELF REGULATED SHORT SHUNT SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR ," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 10, No. 1, March, 1995.
- [5] R.C. Bansal, " Three-Phase Self-Excited Induction Generators : An Overview ," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 20, No. 2, June, 2005.
- [6] R.J. Harrington and F.M.M. Bassiouny, " NEW APPROACH TO DETERMINE THE CRITICAL CAPACITANCE FOR SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 13, No. 3, September, 1998.
- [7] T.F. CHAN, " CAPACITANCE REQUIREMENTS OF SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 8, No. 2, June, 1993.
- [8] ประสิทธิ์ภาพ ปัญญาพันธ์, " การศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาน," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [9] พันธ ขันบุตร, " เทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยการใช้ตัวเก็บประจุ ," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายกนก ยืนยง
 วัน เดือน ปี เกิด 15 ธันวาคม 2529 ที่กรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 413/31 นีรันคอนโดฯ ซ.พื้งมี52 ถ.สุขุมวิท93 แขวงบางจาก
 เขตพระโขนง จ.กรุงเทพฯ 10250

ชื่อ-นามสกุล นายณัฐพงศ์ สารทรัพย์
 วัน เดือน ปี เกิด 21 พฤศจิกายน 2529 ที่สระบุรี
 ที่อยู่ 43 ซ.5 ถ.สุตบรรทัด ต.แก่งคอย อ.แก่งคอย จ.สระบุรี 18110

ชื่อ-นามสกุล นายดิเรก ชีระกุลพิศุทธิ์
 วัน เดือน ปี เกิด 24 สิงหาคม 2529 ที่ Melbourne
 ที่อยู่ 345/62 หมู่ 2 ถ.มิตรภาพ ต.ศิลา อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้