

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การวิเคราะห์ สืบสวน ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส  
แบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดเล็กและการควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว  
สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม

**ANALYSIS, INVESTIGATION, DESIGN AND CONSTRUCTION OF  
A SMALL SCALE THREE-PHASE SELF-EXCITED INDUCTION  
GENERATOR AND TERMINAL VOLTAGE REGULATION  
CONTROL FOR A WIND APPLICATION**



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **117113**  
วันเดือนปี **23 ส.ค. 2554**

b.....  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2553

**KMITL-2010-EN-D-018-135**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ANALYSIS, INVESTIGATION, DESIGN AND CONSTRUCTION OF  
A SMALL SCALE THREE-PHASE SELF-EXCITED INDUCTION  
GENERATOR AND TERMINAL VOLTAGE REGULATION  
CONTROL FOR A WIND APPLICATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2010**

**KMITL-2010-EN-D-018-135**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ สืบสวน การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบ  
กระตุ้นภายในตัวเองขนาดเล็กและการควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสำหรับการประยุกต์ใช้  
งานกับพลังงานลม

Thesis Title Analysis, Investigation, Design and Construction of a Small Scale Three-Phase  
Self-Excited Induction Generator and Terminal Voltage Regulation Control for a  
Wind Application

นักศึกษา นายพุทธพร เสวตสกุลานนท์

รหัสประจำตัว 49060025

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-D-018-135

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	นัทรอุทัย	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร. สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2553 เวลา 08.00-10.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.  
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์  
วันที่ 11 เดือน 10 พ.ศ. 53  
ลงชื่อ 

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ สืบสวน ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดเล็กและการควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม
นักศึกษา	นายพุทธพร เสวตสกุลานนท์
รหัสประจำตัว	49060025
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์ สืบสวน คุณลักษณะและพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดเล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบของการเอียงร่องสลิตของโรเตอร์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และสืบสวนใช้เป็นข้อมูลร่วมกับกฎประสบการณ์อาศัยการทดลองสำหรับการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีการวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ ผลที่ได้รับนำไปสู่การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคั่นแบบสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 0.75 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 3.46/2.0 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก มีการทดสอบและเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานภายใต้เงื่อนไขขณะไม่มีภาระและขณะมีภาระ นอกเหนือจากนี้ยังนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกรุปแบบต่างๆ สำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ผลจากการวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าการผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ชุมชนเมืองและชนบทอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Analysis, Investigation, Design and Construction of a Small Scale Three-Phase Self-Excited Induction Generator and Terminal Voltage Regulation Control for a Wind Application
<b>Student</b>	Mr. Budhapon Sawetsakulanond
<b>Student ID</b>	49060025
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Vijit Kinnares

### ABSTRACT

This thesis proposes the analysis and investigation of characteristics and significant parameters affecting behavior and performance of a small scale three-phase self - excited induction generator particularly an effect of rotor slot skewing. The results obtained from the analysis and investigation are used as information together with empirical rules for designing the self-excited induction generator. Analysis using a 2D-finite element method of the design results is given leading to constructing the three phase, 0.75 kW, 220/380 V, 3.46/2.0 A,  $\Delta/Y$  connected, 4 poles generator prototype. The designed SEIG has been tested and compared with a standard SEIG under various operating conditions such as no-load and on-load. In addition, an application of a static VAR compensator with various configurations for regulating terminal voltage of the self-excited induction generator is given. Research results can be guidelines for development of wind induction generators for effective electricity generation in city and rural areas.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะและช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณ ไตรภพ บัวศร และบริษัทกุลธรเคอร์บี ที่ช่วยสนับสนุนโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

สำหรับคุณงานความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

พุทธพร เสวตสกุลานนท์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพลังงานลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ทฤษฎีพลังงานลม.....	6
2.3 การผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก.....	8
2.3.1 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง.....	9
2.3.2 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	9
2.4 ทฤษฎีวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	10
2.4.1 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุโดยใช้วงจรสมมูลแบบคงตัว.....	10
2.4.2 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุโดยวิธีอย่างง่าย.....	17
2.5 บทสรุป.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงเมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	20
3.1 บทนำ.....	20
3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3.3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูง.....	21
3.3.1 หลักการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูง.....	21
3.3.2 การลดค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก.....	22
3.3.3 การลดค่าความสูญเสียในขดลวด.....	23
3.3.4 การลดค่าความสูญเสียจากแรงลมและแรงเสียดทาน.....	24
3.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	24
3.4.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์.....	24
3.4.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ.....	26
3.4.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ.....	30
3.5 บทสรุป.....	38
บทที่ 4 การสืบสวนผลกระทบของการทำสวิตจิ่งบน โรเตอร์ที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
4.3 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก.....	39
4.4 ทฤษฎีวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุ.....	46
4.5 การวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ.....	49
4.6 การทดสอบ.....	54
4.6.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์และค่าความสูญเสีย.....	54
4.6.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงาน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 บทสรุป.....	70
บทที่ 5 การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง....	71
5.1 บทนำ.....	71
5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	71
5.3 ทฤษฎีการออกแบบ.....	72
5.3.1 สมการเอาท์พุทของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ.....	74
5.3.2 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องว่างอากาศ.....	75
5.3.3 ภาระไฟฟ้าจำเพาะ.....	76
5.3.4 จำนวนของขั้วแม่เหล็ก.....	77
5.3.5 โครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	77
5.3.6 ความยาวช่องว่างอากาศ.....	77
5.3.7 จำนวนรอบของขดลวดทางด้านสเตเตอร์.....	78
5.3.8 การพันขดลวด.....	78
5.3.9 ตัวประกอบระยะขดลวด.....	79
5.3.10 ตัวประกอบการกระจาย.....	80
5.3.11 ตัวประกอบการพันขดลวด.....	80
5.3.12 เส้นแรงแม่เหล็ก.....	81
5.3.13 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก.....	82
5.3.13.1 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นสเตเตอร์.....	82
5.3.13.2 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กแกนสเตเตอร์.....	83
5.3.13.3 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้น โรเตอร์.....	83
5.3.13.4 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กแกน โรเตอร์.....	83
5.3.14 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	84
5.3.14.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ.....	84
5.3.14.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่พื้นสเตเตอร์.....	84
5.3.14.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่พื้น โรเตอร์.....	84
5.3.14.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.14.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แกนเหล็กทางด้าน โรเตอร์.....	85
5.3.15 กระแสไฟฟ้าและขนาดตัวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	86
5.3.16 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	89
5.3.16.1 ความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	89
5.3.16.2 ลีแอกเจอร์เอกแต็นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	91
5.4 การวิเคราะห์การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ ไฟไนท์อีลิเมนต์.....	98
5.5 การทดสอบ.....	101
5.5.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์และค่าความสูญเสีย.....	101
5.5.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงาน.....	103
5.6 บทสรุป.....	112
บทที่ 6 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้น ภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก.....	114
6.1 บทนำ.....	114
6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	114
6.3 หลักการของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (Static Var Compensator).....	115
6.3.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor, TCR).....	115
6.3.2 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ (Thyristor Switched Capacitor, TSC).....	118
6.3.3 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับ คาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC - TCR).....	122
6.4 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยกำลัง ไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก.....	124
6.4.1 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชย กำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC - TCR).....	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4.2 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ กระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC)และ ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC - TCR).....	126
6.5 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุรีแอกเตอร์และค่าความสูญเสียของตัวชดเชยกำลัง ไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก.....	128
6.5.1 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุและรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้า เสมือน.....	128
6.5.2 ค่าความสูญเสียของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก.....	131
6.6 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	132
6.6.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	132
6.6.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก....	133
6.6.2.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยแบบ FC-TCR.....	134
6.6.2.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยแบบ FC ต่อร่วมกับ FC-TCR.....	140
6.7 บทสรุป.....	145
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	147
เอกสารอ้างอิง.....	150
ประวัติผู้เขียน.....	154
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์.....	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	25
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	25
3.3 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทาน.....	32
3.4 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง.....	33
3.5 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีภาวะแบบความต้านทาน.....	33
3.6 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีภาวะแบบความต้านทานร่วมกับ ค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง.....	34
3.7 พฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและ ประสิทธิภาพสูง.....	38
4.1 รายละเอียดของร่องสลัก.....	44
4.2 รายละเอียดการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	45
4.3 ค่าความสูญเสียแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์.....	54
4.4 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้ง โดยใช้ไฟในทอิลิเมนต์ คำนวณ.....	54
4.5 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้ง.....	55
4.6 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีภาวะแบบความต้านทาน.....	64
4.7 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85.....	64
4.8 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทาน.....	65
4.9 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง.....	65
4.10 พฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้ง.....	70
5.1 รายละเอียดของการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	97
5.2 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้ไฟในทอิลิเมนต์คำนวณ.....	100
5.3 ค่าความสูญเสียแกนเหล็กเมื่อใช้ไฟในทอิลิเมนต์คำนวณ.....	100
5.4 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	101
5.5 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีภาวะแบบความต้านทาน.....	109

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.6 การผัดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีกระแบบความต้านทานร่วมกับ ค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.55 ล้าหลัง.....	109
5.7 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับกระแบบความต้านทาน.....	110
5.8 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับกระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.55 ล้าหลัง.....	110
5.9 พฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและออกแบบ.....	113
6.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	132
6.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์.....	145
6.3 การผัดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	145



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ความเร็วลมที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด..... 7
2.2	กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลม..... 8
2.3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง..... 9
2.4	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง..... 9
2.5	ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 11
2.6	วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 11
2.7	วงจรสมมูลอย่างง่าย..... 12
2.8	ไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน..... 14
2.9	วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ..... 14
2.10	การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 15
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก..... 17
2.12	วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้า..... 17
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุกับกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ..... 18
2.14	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ..... 18
3.1	การแปลงรูปพลังงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส..... 22
3.2	มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงเมื่อนำมา ประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง..... 25
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศและ แมกนีโตจิ้งรีแอกแตนซ์..... 25
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและ ความเร็วรอบเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ..... 26
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและ ความเร็วรอบเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและลดความเร็วรอบลง..... 27
3.6	การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ..... 28
3.7	การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ..... 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐาน ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 4.7%.....	29
3.9 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูง ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 6.0%.....	29
3.10 ฮาร์โมนิกของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส แบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูง.....	30
3.11 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ มาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THDv = 5.34%.....	31
3.12 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ ประสิทธิภาพสูงขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THDv = 6.73 %.....	31
3.13 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ มาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 859 W/ph, % THDv = 5.53 %.....	31
3.14 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ ประสิทธิภาพสูงขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 859 W/ph, % THDv = 7.10 %.....	32
3.15 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะมีภาระแบบความต้านทาน.....	34
3.16 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับ ค่าความเหนี่ยวนำ.....	35
3.17 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ แบบความต้านทาน.....	36
3.18 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ แบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	36
3.19 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ แบบความต้านทาน.....	37
3.20 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ แบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	37
4.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาXII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่างๆ..... 41
4.3	โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 41
4.4	การทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์.....42
4.5	แรงเคลื่อน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใน โรเตอร์ที่มีการทำสกีวอิ้ง.....43
4.6	รูปร่างร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.... 44
4.7	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่มีการทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์มุม $0^{\circ}$ , $5^{\circ}$ และ $10^{\circ}$ ..... 46
4.8	วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้ง..... 46
4.9	วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้ง.....47
4.10	วงจรแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....49
4.11	การพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์.....50
4.12	โนดและอิลลิเมนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 50
4.13	ขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 51
4.14	ความหนาแน่นแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมีการทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์มุม $0^{\circ}$ ..... 51
4.15	ความหนาแน่นแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมีการทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์มุม $5^{\circ}$ ..... 52
4.16	ความหนาแน่นแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมีการทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์มุม $10^{\circ}$ ..... 52
4.17	ความสูญเสียของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 53
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ..... 55
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ..... 56
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศกับแมกนีไตซิงอินดักเต็นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ..... 57
4.21	การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบ..... 58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ.....	58
4.23 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ.....	59
4.24 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 10° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ.....	59
4.25 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THD <sub>v</sub> = 9.0 %.....	60
4.26 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THD <sub>v</sub> = 4.70 %.....	60
4.27 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 10° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THD <sub>v</sub> = 3.90 %.....	60
4.28 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0° ขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THD <sub>v</sub> = 9.89 %.....	61
4.29 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° ขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THD <sub>v</sub> = 5.34 %.....	61
4.30 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 10° ขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THD <sub>v</sub> = 4.76 %.....	61
4.31 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0° ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 868 W/ph, % THD <sub>v</sub> = 9.96 %.....	62
4.32 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 868 W/ph, % THD <sub>v</sub> = 5.54 %.....	62
4.33 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 10° ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 868 W/ph, % THD <sub>v</sub> = 4.82 %.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุขณะมีภาระแบบความต้านทาน.....	66
4.35 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบขณะมีภาระแบบความต้านทาน.....	66
4.36 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	67
4.37 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	67
4.38 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน.....	68
4.39 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	68
4.40 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน.....	69
4.41 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	69
5.1 ย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	72
5.2 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	73
5.3 ลักษณะของการพันขดลวดแบบ Spiral.....	79
5.4 ลักษณะของการพันขดลวดแบบ Lap.....	79
5.5 ลักษณะของการพันขดลวดแบบ Wave.....	79
5.6 ผลกระทบของการอิมตัวที่มีต่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ.....	81
5.7 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	82
5.8 การไหลของกระแสไฟฟ้าในแท่งตัวนำและวงแหวนเชื่อมต่อ.....	88
5.9 ตัวประกอบวงแหวนเชื่อมต่อ.....	91
5.10 ลิกเกจรีแอกเต็นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	91
5.11 สัมประสิทธิ์ค่าความนำแม่เหล็กของร่องสลีต.....	92
5.12 เส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหลแบบซิกแซก.....	93
5.13 ลิกเกจรีแอกเต็นซ์ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายของขดลวดทั้งสองด้าน.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ตัวประกอบโอเวอร์เฮงค์.....	94
5.15 การทำสกีวอ์บบน โรเตอร์.....	94
5.16 ภาพตัดขวางของวงจรมแม่เหล็กสเตเตอร์และโรเตอร์.....	95
5.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ออกแบบ.....	96
5.18 การออกแบบพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ออกแบบ.....	98
5.19 โนคและอิลิเมนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	99
5.20 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ออกแบบ.....	99
5.21 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและเวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ออกแบบ.....	99
5.22 ความสูญเสียของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ออกแบบ.....	100
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียในขดลวดทางด้านสเตเตอร์.....	101
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก.....	102
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศกับแมกนีโตซิง รีเอกแต็นซ์.....	103
5.26 การสร้างแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ.....	104
5.27 การสร้างแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและลด ความเร็วรอบลง.....	104
5.28 การสร้างแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วขณะ ไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ มาตรฐานภายใต้สภาวะชั่วขณะ.....	105
5.29 การสร้างแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วขณะ ไม่มีภาระของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ ภายใต้สภาวะชั่วขณะ.....	105
5.30 แรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วขณะ ไม่มีภาระของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน ภายใต้สภาวะคงตัว % THD <sub>v</sub> = 3.10 %.....	106
5.31 แรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วขณะ ไม่มีภาระของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ ภายใต้สภาวะคงตัว % THD <sub>v</sub> = 1.0 %.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ มาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 796 W, % THD <sub>v</sub> = 5.30 %.....	107
5.33 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ ขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 796 W, % THD <sub>v</sub> = 1.60 %.....	107
5.34 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ มาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 1079 W, % THD <sub>v</sub> = 5.53 %.....	108
5.35 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 1079 W, % THD <sub>v</sub> = 1.84 %..	108
5.36 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบ ความต้านทาน.....	111
5.37 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบ ความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	111
5.38 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบ ความต้านทาน.....	112
5.39 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบ ความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ.....	112
6.1 ไทริสเตอร์คอนโทลลิ่งแอกเตอร์และชุดควบคุม.....	115
6.2 ไทริสเตอร์คอนโทลลิ่งแอกเตอร์.....	116
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมจุดชนวนกับค่าซบแซบเต็มซันของการควบคุมโดยใช้ TCR.....	118
6.4 ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์.....	118
6.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีการควบคุมโดยใช้ TSC.....	119
6.6 ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ที่ใช้รีแอกเตอร์ต่ออนุกรมเพิ่มในวงจร.....	120
6.7 แฟลคเตอร์ของการขยายตัวสำหรับความถี่มูลฐาน.....	121
6.8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการควบคุมโดยไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์.....	122
6.9 ไทริสเตอร์คอนโทลลิ่งแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR).....	123
6.10 การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟของ FC-TCR.....	123
6.11 ค่าความสูญเสียของการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟแบบ FC-TCR.....	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยูสตีเห็นนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	124
6.13 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก.....	125
6.14 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR).....	126
6.15 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC) และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR).....	127
6.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ที่มุมจุดชนวนค่าต่างๆ.....	127
6.17 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.....	129
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยแบบสแตติกและมุมจุดชนวน.....	130
6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศและแมกนีโตซิงรีแอคแตนซ์.....	132
6.20 โครงสร้างของวงจรถูกชนวนต่อเฟสของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก.....	133
6.21 วงจรถูกชนวนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก.....	134
6.22 ตัวเก็บประจุและรีแอคเตอร์.....	134
6.23 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ.....	135
6.24 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 2.43 %.....	135
6.25 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ 108°.....	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.26 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ เมื่อใช้ตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัว เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $108^\circ$ , % THD <sub>v</sub> = 2.11 % .....	136
6.27 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์มุม $108^\circ$ , % THD <sub>v</sub> = 2.11 %.....	136
6.28 แรงดันไฟฟ้าที่รีแอกเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่มีภาระ เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $108^\circ$ , % THD <sub>i</sub> = 21.3 %.....	137
6.29 แรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่มีภาระ เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $108^\circ$ , % THD <sub>i</sub> = 21.3 %.....	137
6.30 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะช่วงขณะ เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $126^\circ$ .....	138
6.31 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระขนาด 1800 W เมื่อใช้ตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $126^\circ$ , % THD <sub>v</sub> = 2.34 %.....	138
6.32 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $126^\circ$ , % THD <sub>v</sub> = 2.34 %.....	139
6.33 แรงดันไฟฟ้าที่รีแอกเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $126^\circ$ , % THD <sub>i</sub> = 64.3 %.....	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
6.34	แรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $126^\circ$ , % THDi = 64.3 %.....	139
6.35	การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ.....	140
6.36	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 1.92 %.....	141
6.37	การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะชั่วขณะเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $144^\circ$ .....	141
6.38	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระขนาด 1800 W เมื่อใช้ตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $144^\circ$ , % THDv = 2.51 %.....	142
6.39	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ $144^\circ$ , % THDv = 2.51 %.....	142
6.40	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 2.51 %.....	143
6.41	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 2.51 %.....	143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีอี จำกัด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืนกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.42	แรงดันไฟฟ้าที่รีแอกเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และทรিসเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของทรিসเตอร์ $144^\circ$ , % THDi = 103.7 %..... 144
6.43	แรงดันไฟฟ้าที่ทรিসเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และทรিসเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของทรিসเตอร์ $144^\circ$ , % THDi = 103.7 %..... 144



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาวะโลกร้อน (Global warming) หรือ ภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate change) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกทุกปี ซึ่งมีสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของประชากรในโลก รวมทั้งการใช้พลังงานกันอย่างฟุ่มเฟือย โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่จะตามมาในอนาคต ทำให้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้านต่างๆ เช่น การเดินทางขนส่ง ขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ด้านต่างๆ ขบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อสร้างความสะดวกสบาย รวมทั้งการตัดและทำลายป่าไม้จำนวนมาก เพื่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกสบายในรูปแบบต่างๆ ทำให้ชั้นบรรยากาศถูกกดทอนลง ในที่สุดสิ่งต่างๆ ที่ได้กระทำต่อธรรมชาติได้หวนกลับมาสู่มนุษย์ในลักษณะต่างๆ เช่น ภาวะโลกร้อน ภัยธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ เช่น ปรากฏการณ์เอลนีโญ สึนามิ และอื่นๆ

จากประเด็นปัญหาดังกล่าวทำให้ต้องมีการทบทวนถึงมาตรการในการดูแลและรักษาสิ่งแวดล้อม เพื่อลดปัญหาข้างต้น ซึ่งได้แก่ การรณรงค์อนุรักษ์พลังงานทั้งภาครัฐและเอกชนในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งได้มีการปลูกจิตสำนึกต่อเยาวชนในการดูแลรักษาสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังได้สนับสนุนให้มีการค้นคว้าวิจัยพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เนื่องจากพลังงานดังกล่าวเป็นพลังงานที่ได้รับการยอมรับว่าสะอาด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในขณะใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานลม ซึ่งสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จากพื้นที่ชายฝั่งทะเล ภูเขา ของประเทศโดยไม่มีขีดจำกัดในส่วนของช่วงเวลาและฤดูกาล โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลมนั้นมีประโยชน์ต่อชุมชนเมืองและชนบทที่อยู่ห่างไกลความเจริญ ดังนั้นหากเราสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราก็สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้นรวมทั้งเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ถ้าเราสามารถพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมให้มีประสิทธิภาพสูง ทำให้สามารถได้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดและรักษาสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้นเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นสอดคล้องกับหลักเกณฑ์ข้างต้น [1-2] การพัฒนาส่วนหนึ่งของระบบดังกล่าวคือการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองและระบบควบคุมที่เหมาะสมใช้กับพลังงานลม ในบทความงานวิจัย [3] ได้นำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสแบบมาตรฐานมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ซึ่งสามารถใช้งานได้จริง แต่มีขีดจำกัดของสมรรถนะหลายอย่างเนื่องจากถูกออกแบบให้ใช้งานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อขับภาระทางกล นอกเหนือจากนี้ [10] นำเสนอการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในงานวิจัยไม่ได้นำผลจากการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ไปสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองรวมทั้งไม่ได้นำเสนอรายละเอียดของโครงสร้างเช่น การเรียงร่องสลิตของโรเตอร์ คุณภาพไฟฟ้าและอื่นๆ งานวิจัย [4] นำเสนอการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมโดยใช้หลักการของตัวชดเชยสแตติกแบบไทรสเตอร์คอนโทริสแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) แต่ในงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้นำเสนอพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองภายใต้สภาวะชั่วขณะและสภาวะคงตัว รวมทั้งความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อใช้ตัวชดเชยแบบกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า และงานวิจัย [15] นำเสนอการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้หลักการของตัวชดเชยสแตติกแบบไทรสเตอร์สวิทช์คาปาซิเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor-Thyristor Switch Capacitor, FC-TSC) โดยงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้นำเสนอความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวชดเชยเมื่อใช้ตัวชดเชยแบบกำลังไฟฟ้าเสมือนในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า จากประเด็นดังกล่าวเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัย ผลจากการวิจัยจากประเด็นดังกล่าวหวังว่าจะทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลมกันอย่างกว้างขวางมากขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความมุ่งหมายที่จะทำการวิเคราะห์ สืบสวน โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูง เพื่อศึกษาคุณลักษณะรวมทั้งพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบของการเรียงร่องสลิตของโรเตอร์ที่มีต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และสืบสวนนำไปสู่ขบวนการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง มีการวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ ผลที่ได้รับนำไปสู่การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่เหมาะสมใช้กับพลังงานลม นอกเหนือจากนี้ยังนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกรูปแบบต่างๆ สำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลจากการวิจัยหวังว่าจะทำให้เกิดประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ชนบท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในปัจจุบันการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมนั้นเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยไม่เป็นปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม โดยระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมแบบแยกอิสระ (Stand alone) ประกอบด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ การผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบจะอาศัยเส้นแรงแม่เหล็กที่ตกค้างในโรเตอร์ (Residual flux) ตัดกับขดลวดที่สเตเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการชาร์จให้กับตัวเก็บประจุและดิสชาร์จให้กับขดลวดสเตเตอร์ ส่งผลทำให้สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับแท่งตัวนำที่โรเตอร์ ทำให้ปริมาณสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Build-up voltage) ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่เนื่องจากทางโรงงานผู้ผลิตได้ออกแบบมาให้ใช้งานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อขับภาระทางกล ดังนั้นจึงมีจุดค้อยในการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพคุณภาพไฟฟ้าและอื่นๆ ดังนั้นความเป็นไปได้ในการวิจัยคือ การวิเคราะห์สืบสวน เพื่อหาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ผลที่ได้ถูกนำไปออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่เหมาะสมใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม นอกเหนือจากนี้ยังศึกษาการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยการประยุกต์ใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก แง่มุมในการศึกษาวิจัยจะนำไปสู่การพัฒนาาระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมภายในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ผู้เขียนได้ศึกษาบทความงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองหลายบทความ [2-8, 10, 13, 15] ซึ่งบทความเหล่านี้ได้สนใจที่จะศึกษาวิจัยหลายส่วน เช่น ทฤษฎีการวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุ การศึกษาสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสรูปแบบต่างๆ การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสและสร้างระบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง หลังจากศึกษางานวิจัยข้างต้นจึงมีความคิดที่อยากจะนำเสนอมุมมองของงานวิจัยในด้านอื่นๆบ้าง เช่น นำเสนอการวิเคราะห์ สืบสวน คุณสมบัติและพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองแบบมาตรฐานและประสิทธิภาพสูง ผลกระทบของการเอียงร่องสล้อตของโรเตอร์ที่มีต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปโฆษณาตามการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนียวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดเล็ก โดยมีการวิเคราะห์ผลการออกแบบใช้ไฟไนท์อิเลิเมนต์แบบสองมิติ ผลที่ได้เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า นอกเหนือจากนี้ยังนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกรูปแบบต่างๆ สำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำ ผลกระทบของการใช้ตัวชดเชยแบบสแตติกที่มีต่อการบิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวชดเชย แง่มุมของแนวความคิดที่นำเสนอจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจวิจัยทางด้านพลังงานลม

## 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ สืบสวน ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดเล็กและการควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม ขอบเขตงานวิจัยประกอบด้วยรายละเอียดในแต่ละบทดังต่อไปนี้

1.5.1 อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ขั้นตอนการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีพลังงานลมและหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำแบบกรงกระรอก

1.5.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงเมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก

1.5.4 สืบสวนผลกระทบของการทำสเก็วอินบน โรเตอร์ที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก

1.5.5 ศึกษาทฤษฎีของการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 0.75 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 3.46/2.0 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก

1.5.6 ศึกษาทฤษฎีของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก โดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก 2 แบบ

เอกสารนี้เป็น 1.5.7 บทสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อนำไปใช้ประยุกต์ในการดำเนินงานวิจัยในอนาคต ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆเป็นลำดับ ดังนี้

1.6.1 ทำการศึกษาหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองและทฤษฎีวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.6.2 ทดสอบและเก็บข้อมูลการเปรียบเทียบพฤติกรรมและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงเมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก

1.6.3 ทดสอบและเก็บข้อมูลผลกระทบของการทำสตาร์ทอิน โรเตอร์ที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก

1.6.4 ออกแบบและจัดสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 0.75 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 3.46/2.0 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก มีการวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ ทดสอบและเก็บข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ออกแบบเพื่อปรับปรุงให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.6.5 ทดสอบและเก็บข้อมูลการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็กโดยใช้ตัวชลเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก 2 แบบ

1.6.6 จัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำต้นแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองและระบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวิจัย นำไปติดตั้งกับกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับชนบท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพลังงานลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

## แบบกรงกระรอก

### 2.1 บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมนั้นเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากพลังงานดังกล่าวเป็นพลังงานที่ได้รับการยอมรับว่าสะอาด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานลมที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จากพื้นที่ชายฝั่งทะเล ภูเขา ของประเทศโดยไม่มีขีดจำกัดในส่วนของช่วงเวลาและฤดูกาล โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลมนั้นมีประโยชน์ต่อชุมชนเมืองและชนบทที่อยู่ห่างไกลความเจริญ ดังนั้นหากเราสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประเทศก็สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้นรวมทั้งเป็นการรักษาสีเขียวอีกด้วย

### 2.2 ทฤษฎีพลังงานลม

พลังงานลมคือมวลอากาศซึ่งเคลื่อนที่ไปบนผิวโลกตามแนวนอนในทุกทิศทางด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน พลังงานลมเกิดจากอิทธิพลของดวงอาทิตย์ เนื่องจากบริเวณพื้นผิวโลกแต่ละส่วนได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากัน จึงเป็นเหตุให้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงเกิดการลอยตัวสูงขึ้น และอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไหลเข้ามาแทนที่ จึงทำให้มวลของอากาศเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นซึ่งเราเรียกว่าลม พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ที่เกิดจากลมในหนึ่งหน่วยเวลา (Wind power) ค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของความเร็วลม โดยขนาดความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที จะมีกำลังลมต่อพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเมตร มีค่าเท่ากับ 9 วัตต์/ตารางเมตร ณ ที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 325 วัตต์ต่อตารางเมตร และที่ความเร็ว 50 เมตรต่อวินาที (ความเร็วพายุเฮอริเคน) จะมีกำลังสูงถึง 40,560 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามทฤษฎีแล้วกังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดแค่ 16 ใน 27 ส่วนหรือประมาณ 59.3 % ของพลังงานจลน์ของลม เราสามารถพิจารณากำลังลมจากสมการที่ (2.1) [34]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.1)$$

เมื่อ

$P_w$  กำลังลม, วัตต์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\rho$  ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
 $A$  พื้นที่หน้าตัด, ตารางเมตร  
 $V$  ความเร็วลม, เมตรต่อวินาที

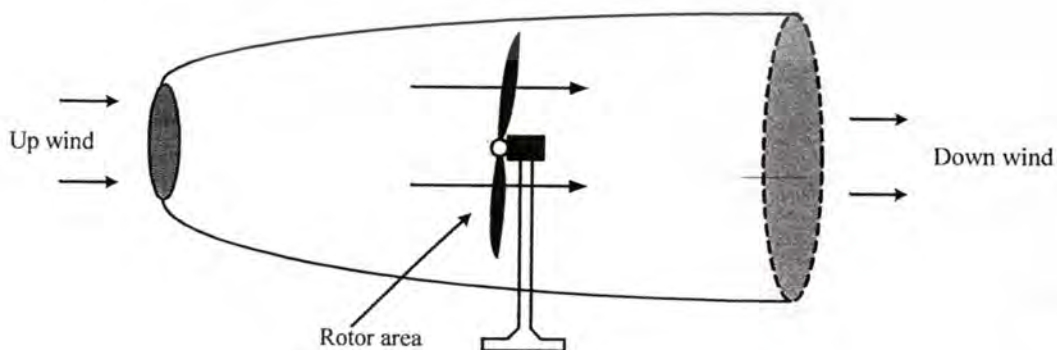
ซึ่งความหนาแน่นของอากาศเป็นฟังก์ชันของความกดอากาศและอุณหภูมิที่ระดับสูงกว่าน้ำทะเล สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\rho(z) = \frac{P_0}{(RT) \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right)} \quad (2.2)$$

เมื่อ

- $\rho(z)$  ความหนาแน่นของอากาศที่เป็นฟังก์ชันกับระดับความสูงของน้ำทะเล, กิโลกรัมต่อเมตร<sup>3</sup>  
 $P_0$  ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลมาตรฐาน, กิโลกรัมต่อเมตร<sup>2</sup>  
 $R$  ค่าคงที่ของอากาศ, จูลต่อกิโลโมล  
 $T$  อุณหภูมิ, เคลวิน  
 $g$  ค่าแรงดึงดูดโลก, เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>  
 $z$  ค่าความสูงจากระดับน้ำทะเล, เมตร

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 พลังงานลมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าเห็นยวน่า ในทางปฏิบัติแล้วพลังงานลมไม่สามารถถ่ายเทให้กับใบพัดได้ทั้งหมด นั่นหมายความว่ามวลของอากาศที่ปะทะเข้ากับใบพัดจะต้องหยุดสนิทอยู่กับที่บริเวณพื้นที่หน้าตัดของใบพัดทั้งหมด โดยสมการที่ (2.3) สามารถอธิบายพลังงานทั้งหมดที่ใบพัดสามารถเปลี่ยนรูปได้จากพลังงานลม



รูปที่ 2.1 ความเร็วลมที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด

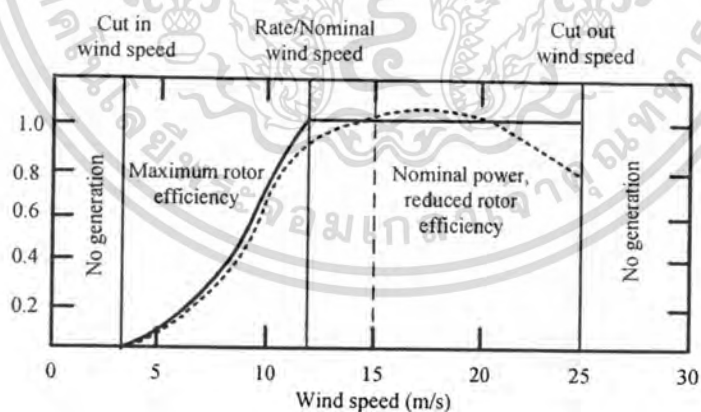
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{wt} = P_w C_p = \frac{1}{2} \rho A_R V^3 C_p \quad (2.3)$$

เมื่อ

- $P_{wt}$  กำลังของลม, วัตต์  
 $C_p$  สัมประสิทธิ์สมรรถนะของใบพัด  
 $A_R$  พื้นที่กวาดของใบพัด, เมตร<sup>2</sup>

พลังงานที่ได้รับจากกังหันลมจะมีเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง ณ.ที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1-3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่ทำงานจึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ความเร็วลมระหว่าง 2.5-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่าช่วงเริ่มความเร็วลม (Cut in wind speed) และที่ความเร็วลมในช่วง 12-15 เมตรต่อวินาที เรียกว่าช่วงความเร็วลมที่กีด (Nominal or Rate wind speed) ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง ในช่วงที่ความเร็วลมได้ระดับไปสู่ช่วงความเร็วลมซึ่งเป็นการทำงานของกังหันลมด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum rotor efficiency) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ้นความเร็ว (Tip speed ratio) และในช่วงเลขความเร็วลม (Cut out wind speed) คือช่วงที่ความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไป ทำให้เกิดความเสียหายต่อกลไกและระบบของกังหันลมได้



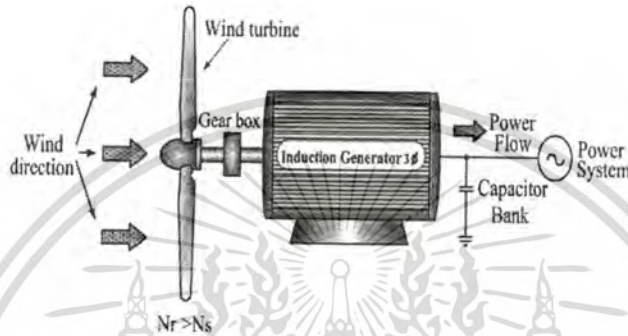
รูปที่ 2.2 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลม

### 2.3 การผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก

สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกนั้น สามารถแบ่งแยกตามระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ดังหัวข้อต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 2.3 นั้นสามารถแบ่งแยกพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกเป็น 2 สถานะคือ ขณะทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เงื่อนไขที่สำคัญในการพิจารณาสถานะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพิจารณาจากค่าสลิปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานได้จากสมการที่ (2.4) - (2.5)



รูปที่ 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง

$$\text{motor} : N_r < N_s, s_m = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \text{ค่าบวก} \tag{2.4}$$

$$\text{Generator} : N_r > N_s, s_s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \text{ค่าลบ} \tag{2.5}$$

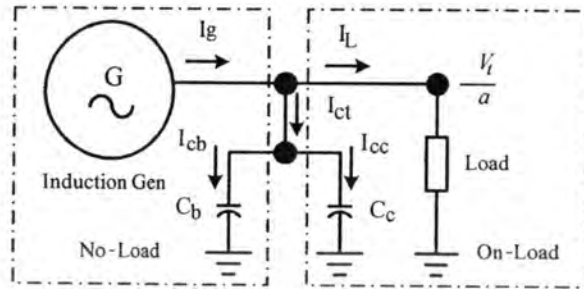
เมื่อความเร็วโรเตอร์มีค่ามากกว่าความเร็วซิงโครนัส แท่งตัวนำที่ฝังในโรเตอร์เคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วซิงโครนัส กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในแท่งตัวนำโรเตอร์จะไหลตรงข้ามกับทิศทางเดิมทำให้เกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงจากทางด้านโรเตอร์ส่งมายังทางด้านสเตเตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้ตัวเก็บประจุที่ต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังนี้ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมในบริเวณที่มีไฟฟ้าเข้าถึง

2.3.2 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

สำหรับหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองสามารถทำได้โดยใช้ตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า (Built-up capacitor,  $C_b$ ) นำมาต่อที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.4 และใช้ต้นกำลังจากภายนอกขับ โรเตอร์จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



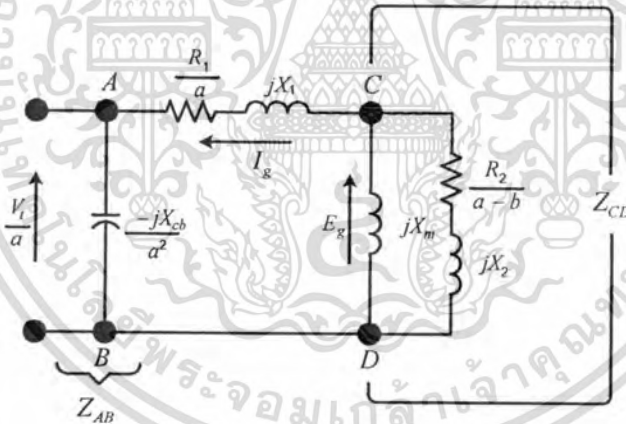
กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ (No-load) จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.5 เมื่อไม่คิดผลกระทบของฮาร์มอนิกและค่าสูญเสียในแกนเหล็ก



รูปที่ 2.5 โค้ดแอมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.6 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่โหนด C และ D สามารถพิจารณาจากสมการที่ (2.6) - (2.8)

$$Z_{CD} = R_{CD} + jX_{CD} \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อ

$$R_{CD} = \frac{(a-b)R_2X_m^2}{R_2^2 + (a-b)^2(X_m + X_2)^2} \tag{2.7}$$

$$X_{CD} = \frac{R_2^2X_m + (a-b)^2X_mX_2(X_m + X_2)}{R_2^2 + (a-b)^2(X_m + X_2)^2} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำใหม่ดังรูปที่ 2.7 ผลรวมของอิมพีแดนซ์ที่โนด A และ D สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.9) - (2.11)

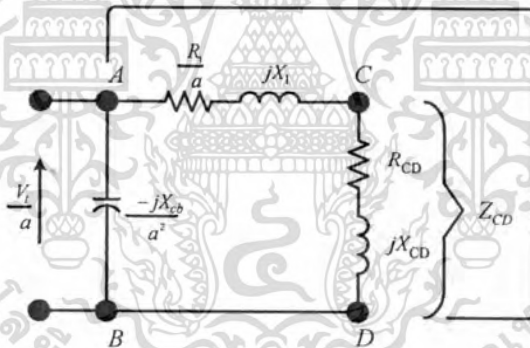
$$Z_{AD} = R_{AD} + jX_{AD} \quad (2.9)$$

$$R_{AD} = \frac{R_1}{a} + R_{CD} \quad (2.10)$$

$$X_{AD} = X_1 + X_{CD} \quad (2.11)$$

จากกฎของ Kirchoff's voltage law ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าในลูปมีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ดังสมการที่ (2.12)

$$I_g \left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_1 \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลอย่างง่าย

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.12) เงื่อนไขในการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $I_g \neq 0$  ดังนั้นผลรวมของอิมพีแดนซ์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.13)

$$\left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_1 \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.13) พิจารณาในส่วนของจำนวนจริงมีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ดังสมการที่ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_1}{a} + \frac{(a-b)R_2 X_m^2}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2} = 0 \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) สามารถหาค่า  $a_{\max}$  ได้จากสมการที่ (2.15)

$$a_{\max} = b - \frac{b}{2} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{b_c}{b}\right)^2}}{1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2} \right] \quad (2.15)$$

เมื่อค่า  $b_c$  สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.16)

$$b_c = \frac{2R_1}{X_m} \sqrt{\frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2} \quad (2.16)$$

ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีภาระ (No-load) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.17)

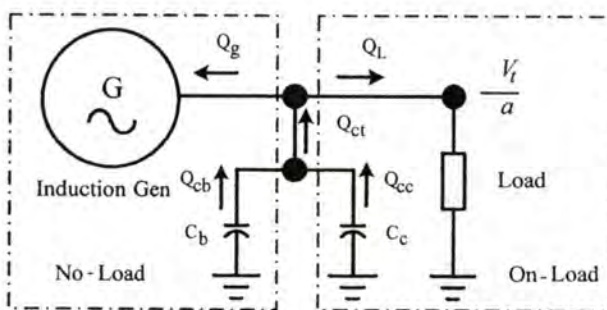
$$C_b = \frac{I}{\sqrt{2\pi f_b Z_b a_{\max}^2 (X_1 + X_{CD})}} \quad (2.17)$$

เมื่อ

- $C_b$  ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีภาระ
- $Z_b$  อิมพีแดนซ์ฐาน
- $f_b$  ความถี่ไฟฟ้าฐาน

ในการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระ ผู้เขียนจึงนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระดังรูปที่ 2.8 วิธีดังกล่าวง่ายและสามารถวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ทุกสภาวะการทำงานที่พิกัดต่างๆ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

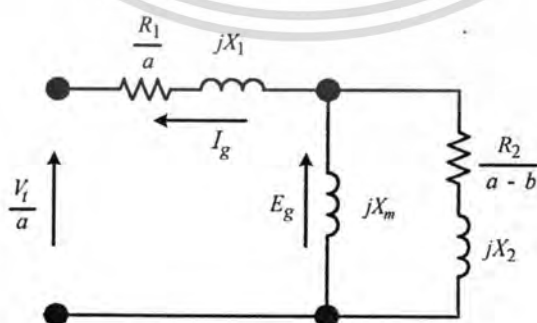


รูปที่ 2.8 ไคอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน

การวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ (On-load) โดยเฉพาะภาระแบบค่าความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) จะดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะลดลงเนื่องจากผลของอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ ทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไฟฟ้าลดลงอย่างมาก โดยกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power,  $S_g$ ) ต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.18)

$$S_g = \frac{V_t}{a} I_g \tag{2.18}$$

การวิเคราะห์หาค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $I_g$ ) เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายภาระทางไฟฟ้า จะทำให้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระสามารถพิจารณาจากสมการที่ (2.19) - (2.22)



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_g = \frac{V_t}{a} \cdot \frac{1}{Z_{total}} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$Z_{total} = \frac{R_1}{a} + jX_1 + [Z_1 + Z_2] \quad (2.20)$$

$$Z_1 = jX_m \quad (2.21)$$

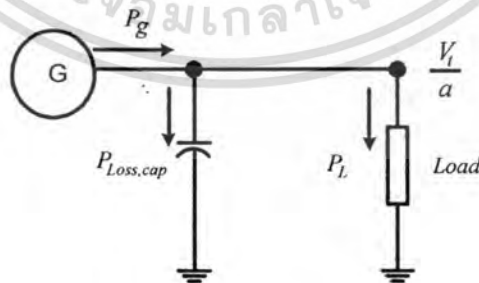
$$Z_2 = \frac{R_2}{a-b} + jX_2 \quad (2.22)$$

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.10 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ภาระและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss,  $P_{loss, cap}$ ) ของตัวเก็บประจุ โดยทั่วไปค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณ 2 - 3 % ของพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power,  $P_g$ ) ต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองสามารถพิจารณาจากสมการที่ (2.23)

$$P_g = P_L + P_{loss, cap} \quad (2.23)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเสมือนทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.24)

$$Q_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.10 การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเสมือนทั้งหมดของตัวเก็บประจุสามเฟสสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.25) -

(2.26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{ct} = Q_g + Q_L \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$Q_L = \frac{\left(\frac{V_t}{a}\right)^2}{X_L} \quad (2.26)$$

จากรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน จะเห็นได้ว่าขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุที่ชดเชยเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.27) - (2.28)

$$Q_{cc} = Q_{ct} - Q_{cb} \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$Q_{cb} = 2\pi \left(\frac{V_t}{a}\right)^2 (fC_b) \quad (2.28)$$

กระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ชดเชยเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.29)

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t / a} \quad (2.29)$$

ค่าคาปาซิแตนซ์ต่อเฟสและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยต่อเฟสสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.30) - (2.31)

$$X_{cc} = \frac{V_t / a}{I_{cc}} \quad (2.30)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f X_{cc}} \quad (2.31)$$

ดังนั้นผลรวมขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะทำงานสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.32)

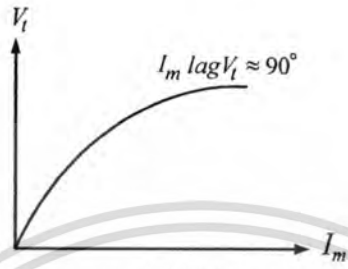
$$C_t = C_b + C_c \quad (2.32)$$

สำหรับการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน (Resistive-load) สามารถวิเคราะห์ได้เหมือนกับโดยเฉพาะภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) โดยกำหนดเงื่อนไข  $Q_L = 0$  ด้านการคำนวณค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การวิเคราะห์ห้ขนาดตัวเก็บประจุโดยวิธีอย่างง่าย

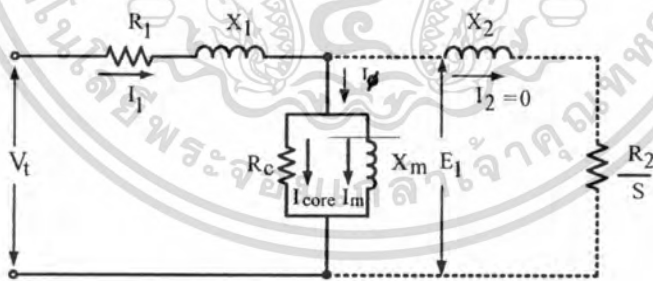
สำหรับการวิเคราะห์ห้ขนาดตัวเก็บประจุสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้น สามารถพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะไม่มีภาระ (No-load) ดังรูปที่ 2.11 [1]



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก

ดังนั้นขนาดของกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.12 เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ขนาดของกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.33)

$$I_m = \frac{E_1}{X_m} \approx \frac{V_t}{X_m} \tag{2.33}$$

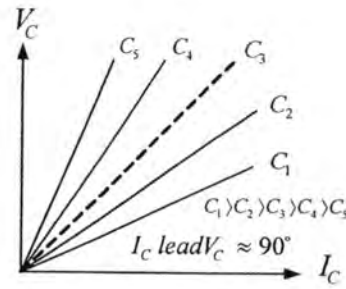


รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

เมื่อนำชุดตัวเก็บประจุสามเฟสต่อเข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้า ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุกับแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.13 ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.34)

$$I_C = \frac{V_C}{X_C} \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุกับกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

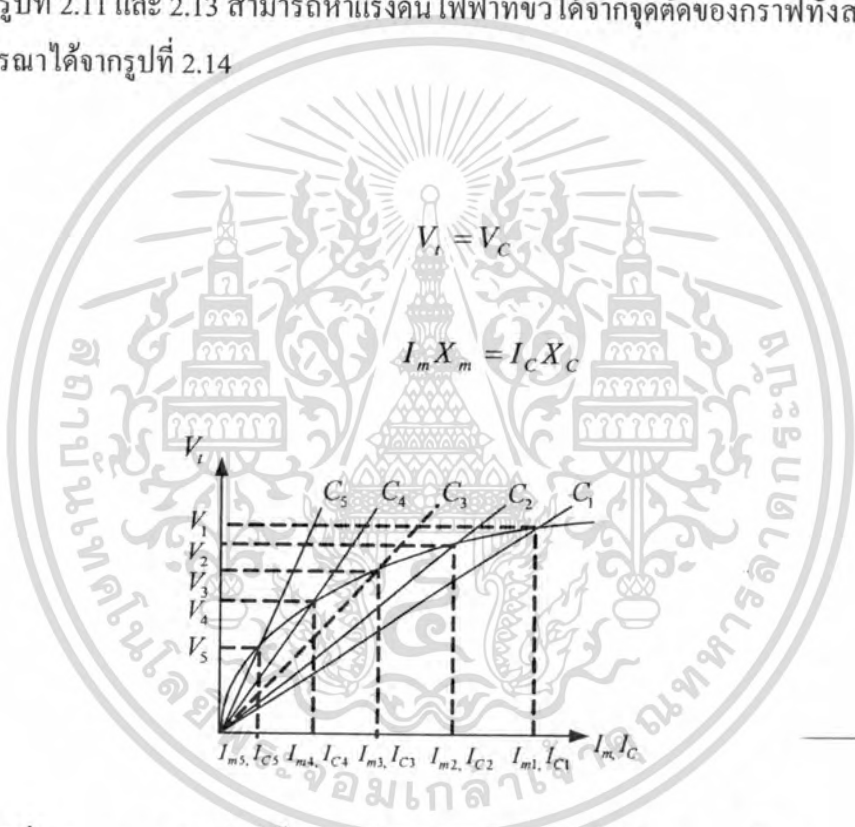
จากรูปที่ 2.11 และ 2.13 สามารถหาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้จากจุดตัดของกราฟทั้งสองรูป ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.14

เมื่อ

$$V_t = V_C \tag{2.35}$$

ดังนั้น

$$I_m X_m = I_C X_C \tag{2.36}$$



รูปที่ 2.14 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ

จากรูปที่ 2.14 เมื่อพิจารณาจุดตัดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (2.37) - (2.38)

$$V_t = I_m X_C \tag{2.37}$$

เมื่อ

$$X_C = \frac{1}{\omega C_b} = \frac{1}{2\pi f C_b} \tag{2.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า  $C_b$  (Build-up capacitor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.39)

$$C_b = \frac{I_m}{2\pi f V_r} \quad (2.39)$$

สำหรับการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระสามารถใช้วิธีที่กล่าวมาข้างต้นในการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

## 2.5 บทสรุป

สำหรับหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองสามารถทำได้โดยใช้ตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า (Built-up capacitor,  $C_b$ ) นำมาต่อที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนี้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะตกลงเมื่อมีภาระ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ สามารถทำได้โดยใช้ตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเพิ่มเข้าไป (Compensating capacitor,  $C_c$ ) โดยขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของภาระ ประเภทของภาระและตัวประกอบกำลัง ทฤษฎีที่นำเสนอในการวิเคราะห์ห้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและลดความยุ่งยากทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุได้ทุกเงื่อนไขในทุกสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

### บทที่ 3

# การวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงเมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

## 3.1 บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเป็นหัวใจหลักที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยทั่วไปจะนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง สิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยคือการในการมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 V, 8.7/5.2 A 4 ขั้วแม่เหล็ก โดยเนื้อหาในบทนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา วิเคราะห์ พฤติกรรมจุดเด่นและจุดด้อยของการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองทั้งสองแบบ ผลที่ได้รับนำไปสู่การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมใช้งานกับพลังงานลม

## 3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทความงานวิจัยของ [3] นำเสนอการวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้วงจรสมมูลแบบคงตัว งานวิจัย [5] นำเสนอการศึกษามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานเมื่อนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ในงานวิจัยที่นำเสนอได้มีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองหลายพิกัด งานวิจัย [6] นำเสนอการปรับปรุงคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยในงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองเช่น ค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับนักออกแบบที่จะออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง แต่ในงานวิจัยไม่ได้มีการทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจริง ทำให้ไม่ได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

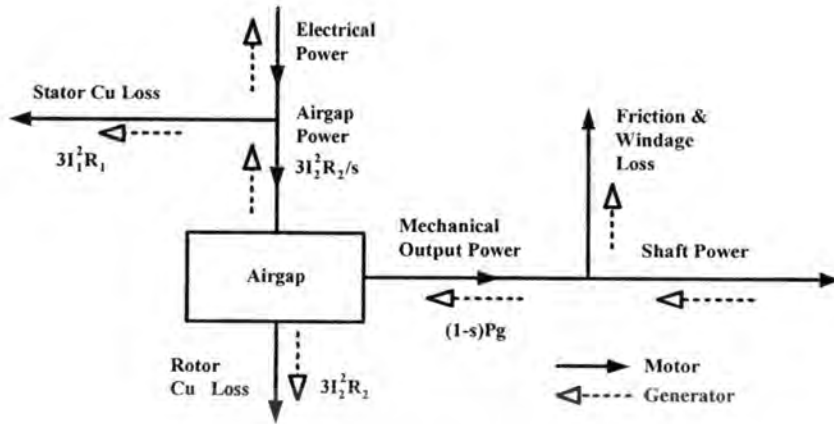
มุมมองด้านอื่นเช่น คุณภาพไฟฟ้า พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะชั่วขณะ และอื่นๆ และงานวิจัย [13] นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระแสคูลภายในตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบขนานสั้น (Short shunt SEIG) และขนานยาว (Long shunt SEIG) โดยงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดล้วนเป็นงานวิจัยที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระแสคูลภายในตัวเอง สิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยคือการนำเอามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงที่ใช้งานปัจจุบันมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระแสคูลภายในตัวเอง วิเคราะห์จุดเด่นจุดด้อยเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระแสคูลภายในตัวเองที่เหมาะสมใช้งานกับพลังงานลมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศ

### 3.3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูง

#### 3.3.1 หลักการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูง

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายใน บ้านเรือน อาคาร สำนักงานและ โรงงานอุตสาหกรรมทั้งภาครัฐและเอกชน เนื่องมาจากราคาที่ถูกลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่นที่พิถีพิถันขนาดแรงม้าเท่ากัน อีกทั้งยังมีต้นทุนในการบำรุงรักษาต่ำ ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มาก สำหรับภาคอุตสาหกรรมนั้นมีอัตราส่วนการใช้ไฟฟ้าประมาณ 50 % ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดของประเทศและกว่า 80 % เป็นการใช้งพลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) มีวัตถุประสงค์ที่จะส่งเสริมการผลิตและใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงภายในประเทศให้ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากปัญหาด้านวิกฤตการณ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นภายในประเทศและโลก จากประเด็นปัญหาดังกล่าวทำให้ต้องมีการทบทวนถึงมาตรการในการดูแลและรักษาสิ่งแวดล้อม เพื่อลดปัญหาข้างต้น ซึ่งได้แก่ การรณรงค์อนุรักษ์พลังงานทั้งภาครัฐและเอกชนในรูปแบบต่างๆ ส่วนหนึ่งในการรณรงค์อนุรักษ์พลังงานของอุปกรณ์แปรรูปพลังงานคือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลซึ่งอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field) การแปรรูปของพลังงานดังรูปที่ 3.1 ทำให้ค่าความสูญเสียต่างๆเกิดขึ้น [22] ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลง โดยทั่วไปแล้วค่าความสูญเสียภายในมอเตอร์มาจาก 4 องค์ประกอบคือ การสูญเสียของแกนเหล็ก (Core losses) ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ การสูญเสียของขดลวด (Copper losses) ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ การสูญเสียเนื่องจากแรงลมปะทะและแรงเสียดทาน (Friction and Windage losses) และการสูญเสียเนื่องจากการใช้งาน (Stray load losses)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การแปลงรูปพลังงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ดังนั้นการลดค่าความสูญเสียทั้ง 4 องค์ประกอบจะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมีแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังหัวข้อถัดไป

### 3.3.2 การลดค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

การลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กนั้น มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะใช้แผ่นเหล็กซิลิกอนที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนต่ำ (Low carbon laminated steel) ในการขึ้นรูปเป็น โครงสร้างสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยแกนเหล็กดังกล่าวมีค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (Core losses) สูง ประมาณ 6.6 วัตต์ต่อเหล็ก 1 กิโลกรัม แต่สำหรับการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงนั้นประกอบด้วยแนวความคิด 3 ส่วน ส่วนแรกคือจะเลือกใช้แผ่นเหล็กซิลิกอนคุณภาพสูง (High grade silicon steel) และบาง เพื่อลดค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (Core losses) ประกอบด้วยค่าความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis losses) และค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current losses) ทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กลดลงเหลือเพียง 3.3 วัตต์ต่อเหล็ก 1 กิโลกรัม ส่วนที่สองคือเลือกออกแบบวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ ( $B_{max}$ ) ทำให้ค่าความสูญเสียแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กมีค่าลดลง และส่วนที่สามคือการลดช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ซึ่งการลดช่องว่างอากาศที่เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field) ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กจากสเตเตอร์ที่วิ่งผ่านไปยังโรเตอร์มีความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กสูงขึ้น ปริมาณค่าความสูญเสียแกนเหล็กจะประกอบด้วยค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและความถี่ไฟฟ้างตามการที่ (3.1)

$$P_{core} = P_h + P_e = k_h f(B_m)^2 + k_e (fB_m)^2 \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

- $B_m$  ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, เทสลา  
 $f$  ความถี่ไฟฟ้า, เฮิรตซ์  
 $k_h$  สัมประสิทธิ์ค่าความสูญเสียฮีตเทอริซิส  
 $k_c$  สัมประสิทธิ์ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

ในทางปฏิบัติค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสามารถทราบได้โดยการทดสอบขณะไม่มีภาระอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 112-2004 Method F-F1 [37] ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้วงจรสมมูลแบบคงตัวในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียส่วนต่างๆที่เกิดขึ้น โดยค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.2)

$$P_{core} = P_{no-load} - P_{fr,w} - P_{cu,s} \quad (3.2)$$

เมื่อ

- $P_{core}$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก, วัตต์  
 $P_{no-load}$  กำลังไฟฟ้าขณะไม่มีภาระ, วัตต์  
 $P_{fr,w}$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงลมปะทะ, วัตต์  
 $P_{cu,s}$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดทางด้านสเตเตอร์, วัตต์

### 3.3.3 การลดค่าความสูญเสียในขดลวด

สำหรับการลดค่าความสูญเสียในขดลวดนั้น มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจะใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดพอดีกับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่สำหรับการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงนั้น จะใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านสเตเตอร์รวมทั้งเพิ่มขนาดแท่งตัวนำของโรเตอร์ประมาณ 35-40% ดังนั้นจึงทำให้ค่าความสูญเสียของขดลวดที่สเตเตอร์ (Stator copper losses) และค่าความสูญเสียของขดลวดที่โรเตอร์ (Rotor copper losses) ลดลง ดังนั้นขนาดของร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ จึงต้องออกแบบเพื่อให้รองรับกับขนาดของขดลวดที่ใหญ่ขึ้นรวมทั้งเพิ่มความยาวของแกนเหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งเป็นผลดีต่อตัวประกอบกำลังที่สูงขึ้น ค่าความสูญเสียของขดลวดสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.3)

$$P_{cu} = P_{cu,s} + P_{cu,r} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$P_{cu}$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด, วัตต์  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_{cu,s}$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดที่สเตเตอร์, วัตต์

$P_{cu,r}$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์, วัตต์

### 3.3.4 การลดค่าความสูญเสียจากแรงลมและแรงเสียดทาน

สำหรับการลดค่าความสูญเสียจากแรงลมและแรงเสียดทานสามารถทำได้ 2 ส่วน ส่วนแรกคือออกแบบพัดลมให้มีขนาดเล็กกลง ทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานรวมทั้งออกแบบมุมของใบพัดลมที่เหมาะสมเพื่อลดค่าความสูญเสียจากแรงลมปะทะ ส่วนที่สองคือเลือกใช้แบร์ริงที่มีคุณภาพสูงเพื่อลดค่าความสูญเสียเนื่องจากการหมุน ด้วยแนวความคิดดังกล่าวทั้ง 4 ข้อที่กล่าวมา ทำให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

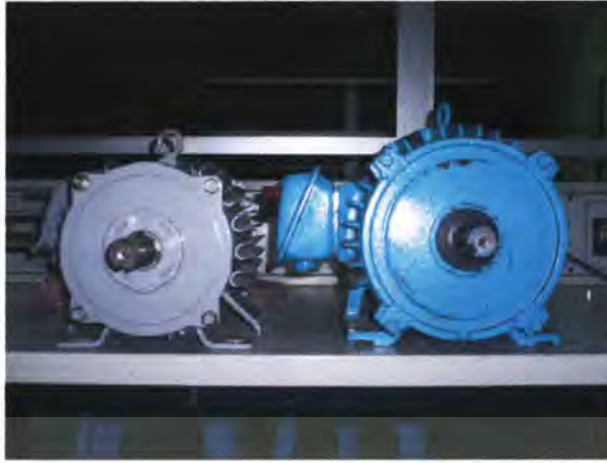
## 3.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นจะมีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระและมีภาระ

### 3.4.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดของพิกัดแสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของตัวเก็บประจุเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ประกอบด้วย การทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-load test) การทดสอบล๊อคโรเตอร์ (Blocked rotor test) ที่ความถี่ 12.5 Hz (i.e. 25 % rated frequency) การทดสอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC test) และการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแรงเสียดทานและลม (Friction and Windage loss test) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ std 112-2004 Method F-F1 [37] ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยการทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



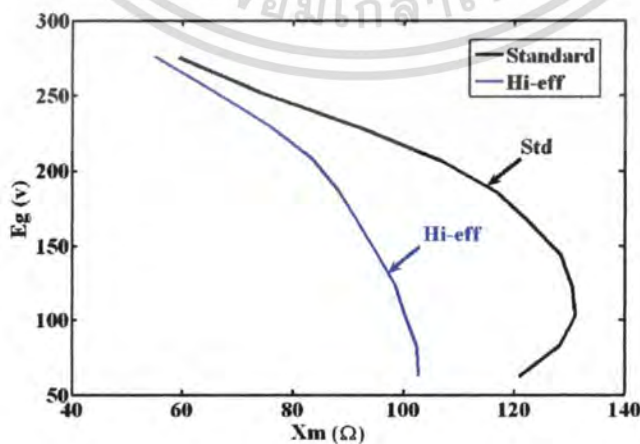
รูปที่ 3.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงเมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

ตารางที่ 3.1 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มาตรฐาน	2.2 kW, 220/380 V, 4 Pole, 8.7/5.2 A, 1420 rpm
ประสิทธิภาพสูง	2.2 kW, 220/380 V, 4 Pole, 8.2/4.7 A, 1465 rpm

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ชนิด	$R1(\Omega)$	$R2(\Omega)$	$X1(\Omega)$	$X2(\Omega)$	$Xm(\Omega)$
มาตรฐาน	3.17	2.56	3.48	3.48	93.43
ประสิทธิภาพสูง	1.81	1.81	3.31	3.31	75.76



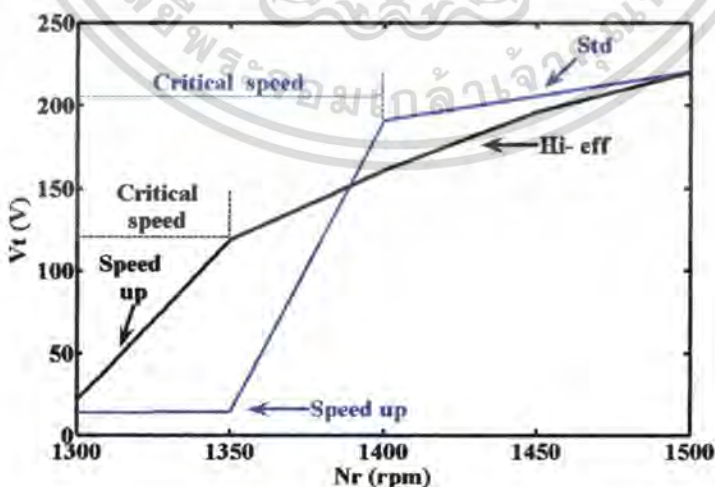
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบพลังงานทดแทนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แมกนีไคซิ่งรีแอกแตนซ์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 แสดงคุณลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศและแมกนีไทด์ซิงโครแอกแตนซ์ ซึ่งได้มาจากการทดสอบแบบซิงโครนัส (Synchronous test) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยขนาดของแมกนีไทด์ซิงโครแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงจะต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากแนวความคิดในการออกแบบต้องการออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจะออกแบบความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ เนื่องจากต้องการลดค่าสูญเสียของแกนเหล็ก ส่งผลให้แมกนีไทด์ซิงโครแอกแตนซ์ต่ำ เมื่อนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงจะต้องใช้ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน ดังนั้นการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสมนั้นควรออกแบบให้ใช้ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าต่ำ เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุในการสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม รวมทั้งลดค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric losses) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ทำให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมมีประสิทธิภาพรวมสูงขึ้น

### 3.4.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะไม่มีภาระ

สำหรับการทดสอบการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองทั้ง 2 แบบภายใต้สภาวะชั่วขณะและสภาวะคงตัว โดยใช้แทนทดสอบของบริษัท Siemens ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและใช้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drive) เป็นต้นกำลังสำหรับขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

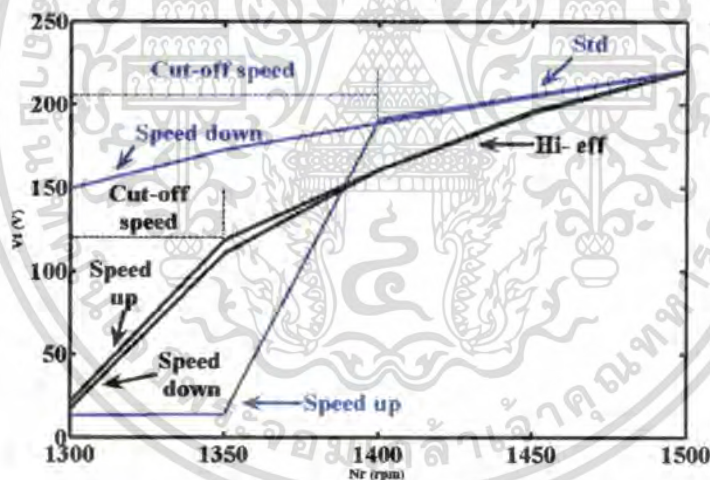


### รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและ

ความเร็วรอบเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

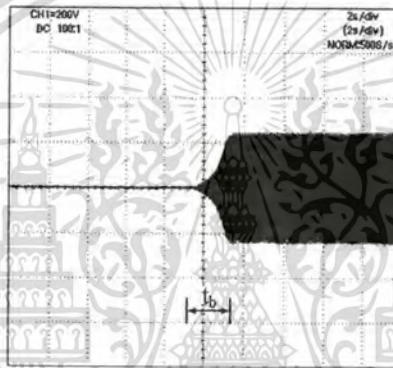
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและความเร็วรอบ ซึ่งได้จากการทดสอบโดยใช้ต้นกำลังขับเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองทั้งสองแบบ โดยเพิ่มความเร็วจาก 1300 รอบต่อนาทีจนถึง 1500 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของต้นกำลังที่ขับเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น ณ. ที่ความเร็ว 1350 รอบต่อนาทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงมีความสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้ถึง 128 โวลต์ ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานมีความสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้เพียง 14 โวลต์ ผลการทดสอบแสดงว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงมีจุดความเร็ววิกฤติ (Critical speed) ที่ต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน ณ. ที่ความเร็วรอบต่ำๆ ซึ่งเป็นจุดเด่นในเรื่องของความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ณ. ที่ความเร็วลมต่ำ ซึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 128 โวลต์นั้น สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่อยู่ที่ 220 โวลต์ได้โดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก



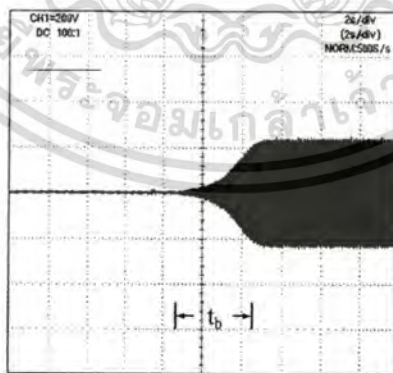
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความเร็วรอบเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและลดความเร็วรอบลง

รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและความเร็วรอบ ซึ่งได้จากการทดสอบโดยใช้ต้นกำลังขับเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองทั้งสองแบบ โดยเพิ่มความเร็วจาก 1300 รอบต่อนาทีจนถึง 1500 รอบต่อนาทีและลดความเร็วลงถึง 1300 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อลดความเร็วรอบของต้นกำลังที่ขับเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาตรฐานจะมีความสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้ดีกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาตรฐานจะต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงไปมาก อย่างไรก็ตามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำในการออกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อลดค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis losses) ทำให้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงมากกว่านั่นเอง ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีต่อผลการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กที่นำมาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำควรเลือกวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าสภาพความนำไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ ) สูงๆมาออกแบบเพื่อลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจึงมีความเหมาะสมกว่า ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองมีความสามารถในการผลิตพลังงานได้สูงสุด [18, 23]



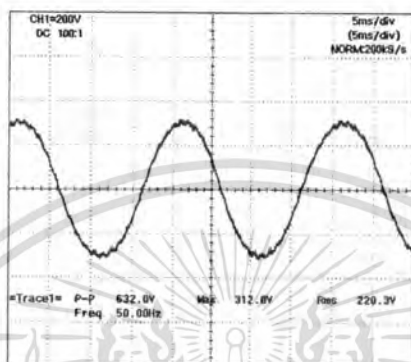
รูปที่ 3.6 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน ขณะไม่มีการะกายได้สภาวะชั่วขณะ



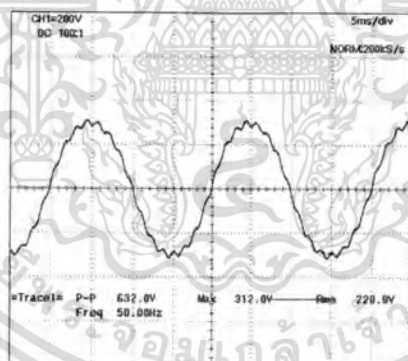
รูปที่ 3.7 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง ขณะไม่มีการะกายได้สภาวะชั่วขณะ

รูปที่ 3.6-3.7 แสดงผลการทดสอบการสร้างแรงดันไฟฟ้าขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองทั้ง 2 แบบขณะ ไม่มีการะกายได้สภาวะชั่วขณะ จะเห็นว่าการค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่าจะใช้เวลาในการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงถูกออกแบบที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำเพื่อลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses) ทำให้ช่วงเวลาในการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build-up voltage time,  $t_b$ ) มีค่ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานนั่นเอง



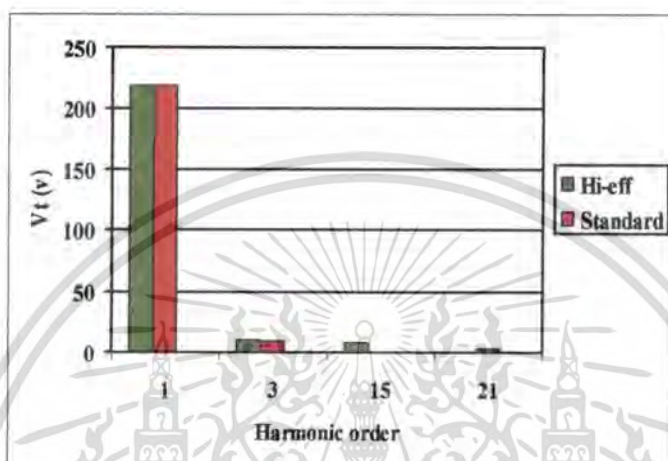
รูปที่ 3.8 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐาน ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THD<sub>v</sub> = 4.7 %



รูปที่ 3.9 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูง ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THD<sub>v</sub> = 6.0 %

ส่วนรูปที่ 3.8-3.9 แสดงผลการทดสอบการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว จะเห็นได้ว่ารูปร่างสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานจะมีรูปร่างใกล้เคียงไซน์มากกว่ารูปร่างสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับได้ในรูปที่ 3.10 ซึ่งปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยไม่วกรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์มอนิกที่เกิดจากการพันขดลวด (Winding harmonic) และเกิดจากผลของฮาร์มอนิกที่เกิดจากร่องสล็อต (Slot harmonic) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโรงงานผู้ผลิตออกแบบที่ออกแบบร่องสล็อต อัตราส่วนแอสเปค การพันขดลวด รวมทั้งการทำสกีวอินบนโรเตอร์ ณ. จุดนี้เป็นมุมมองที่สำคัญในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองให้มีคุณภาพไฟฟ้าที่ดี ทำให้ไม่เกิดผลกระทบกับภาระเมื่อนำไปใช้งาน

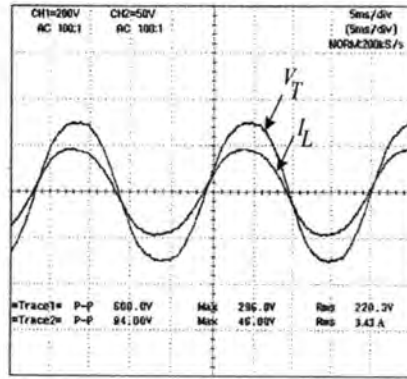


รูปที่ 3.10 ฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูง

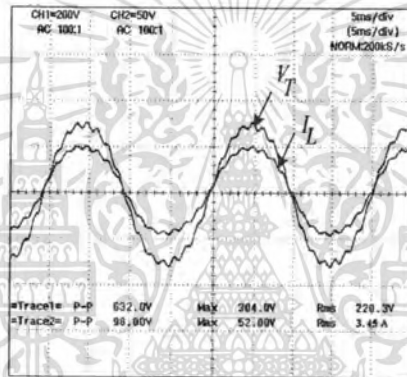
### 3.4.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระ

สำหรับการทดสอบการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขณะมีภาระนั้น จะใช้ภาระทั้งสองแบบคือภาระแบบความต้านทาน (Resistive-load) ภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ถ้าหลังในการทดสอบโดยการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ สืบสวนและเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองทั้ง 2 แบบ โดยการทดสอบใช้แทนทดสอบของบริษัท Siemens ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสและตัวเก็บประจุแบบสตาร์ และใช้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drive) เป็นต้นกำลังสำหรับขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมี Torque and Speed detectors สำหรับวัดสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รักษาความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาทีคงที่และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่กักคองที่ 220 โวลท์ สามารถพิจารณาผลการทดสอบดังรูปที่ 3.11-3.20

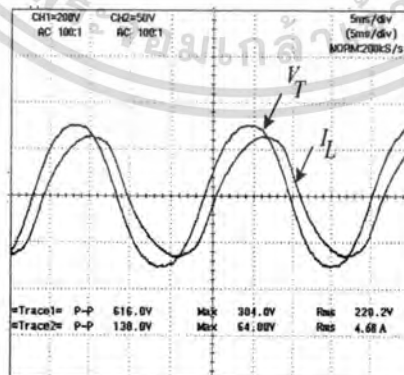
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THD<sub>v</sub> = 5.34 %



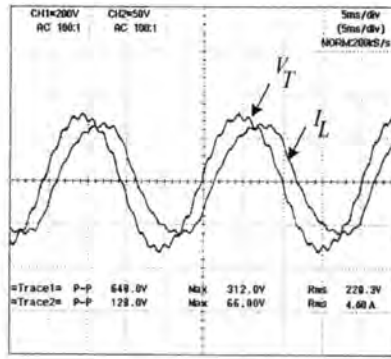
รูปที่ 3.12 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THD<sub>v</sub> = 6.73 %



รูปที่ 3.13 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 859 W/ph,

% THD<sub>v</sub> = 5.53 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.14** แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 859 W/ph, % THDv = 7.1 %

รูปที่ 3.11-3.12 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงขณะมีภาระแบบความต้านทาน จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานจะมีรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์มากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของภาระ กล่าวคือเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปยังย่านอิ่มตัว (Saturation region) ส่งผลทำให้เกิดการอิ่มตัวบริเวณพื้นของร่องสลักทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ทำให้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการผิดเพี้ยนมากขึ้นนั่นเอง รูปที่ 3.13-3.14 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive- Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานจะการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงเหมือนกับภาระแบบความต้านทานเช่นเดียวกัน โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสรุปดังตารางที่ 3.3 - 3.4

**ตารางที่ 3.3** ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาระแบบความต้านทาน

ชนิด	No-load $C_b$ ( $\mu\text{F}$ )	On-load ; $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )					$C_T$ ( $\mu\text{F}$ )
		192 ( W/ph)	384 ( W/ph)	576 ( W/ph)	768 ( W/ph)	Total $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )	
มาตรฐาน	35	5	7	9	12	33	68
ประสิทธิภาพสูง	40	3	4	5	6	18	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ  
ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง

ชนิด	No-load $C_b$ ( $\mu\text{F}$ )	On-load ; $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )					$C_T$ ( $\mu\text{F}$ )
		213 ( W/ph)	424 ( W/ph)	648 ( W/ph)	859 ( W/ph)	Total $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )	
มาตรฐาน	35	14	17	20	24	75	110
ประสิทธิภาพสูง	40	10	13	16	20	59	99

ตารางที่ 3.3-3.4 แสดงขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาระแบบความต้านทาน (Resistive-load) และภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง เมื่อใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าและรักษาระดับไฟฟ้าที่พิกัด 220 โวลต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานจะใช้ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูง เนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้านั้นขึ้นเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของแมกนีโตจิ้งรีแอคเต้นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งหมายถึงความถี่กระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานมีค่าต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงนั่นเอง ขณะเดียวกันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองแบบมีภาระแบบความต้านทาน (Resistive-load) และภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive- Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงจะใช้ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงมีค่าความต้านทานและค่าลิกเกจรีแอคเต้นซ์ทางด้านสเตเตอร์ต่ำกว่านั่นเอง โดยขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับประเภทของภาระและขนาดของตัวประกอบกำลัง ซึ่งภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำจะใช้ขนาดตัวเก็บประจุมากกว่าภาระแบบความต้านทานเนื่องจากภาระดังกล่าวดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบ

ตารางที่ 3.5 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีภาระแบบความต้านทาน

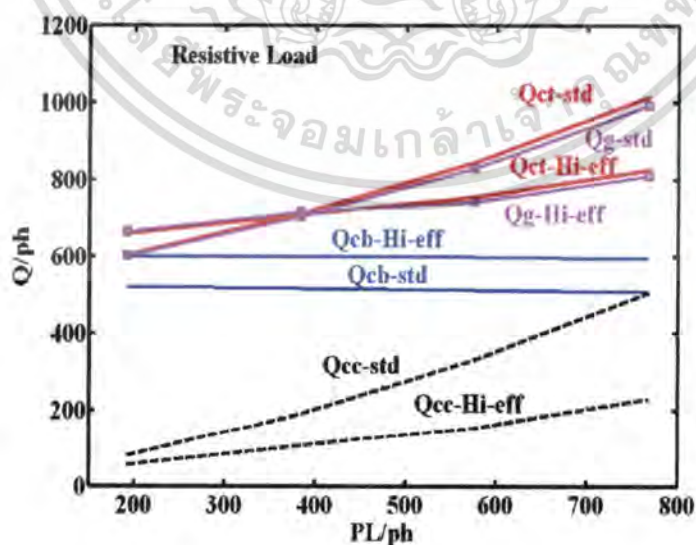
ชนิด	Total Harmonic Distortion of Voltage (%THDv)				
	No-load	On-load 192 W/ph	On-load 384 W/ph	On-load 576 W/ph	On-load 768 W/ph
มาตรฐาน	4.7	4.81	4.93	5.11	5.34
ประสิทธิภาพสูง	6.0	6.12	6.33	6.56	6.73

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 3.6 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับ  
ค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง

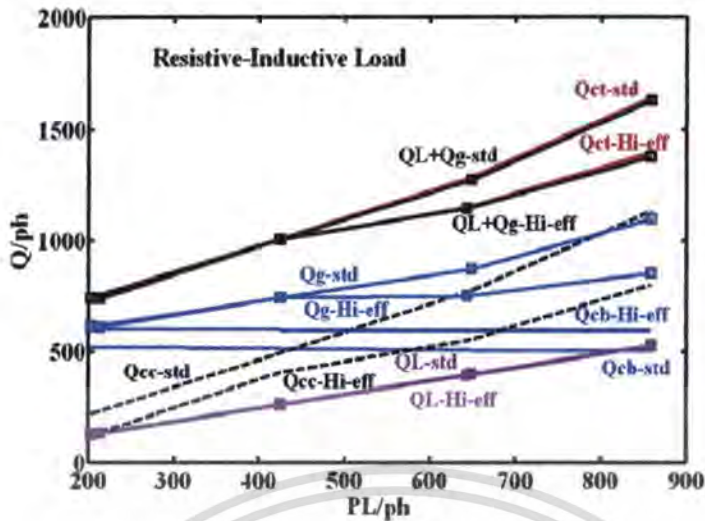
ชนิด	Total Harmonic Distortion of Voltage (%THDv)				
	No-load	On-load 213 W/ph	On-load 424 W/ph	On-load 648 W/ph	On-load 859 W/ph
มาตรฐาน	4.7	4.91	5.12	5.35	5.53
ประสิทธิภาพสูง	6.0	6.31	6.58	6.75	7.10

ตารางที่ 3.5-3.6 แสดงการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
ขณะมีภาระแบบความต้านทาน (Resistive-load) ซึ่งเป็นภาระแบบเป็นเชิงเส้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
เหนี่ยวนำแบบมาตรฐานจะการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิด  
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ว (%THDv) จะมีค่า  
เพิ่มขึ้นตามภาระ ซึ่งหมายความว่าถึงจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานในย่าน  
อิ่มตัว (Saturation region) ซึ่งส่งผลต่อการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
เหนี่ยวนำ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ  
(Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ  
มาตรฐานจะมีการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
แบบประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกับภาระแบบความต้านทาน



รูปที่ 3.15 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะมีภาระแบบความต้านทาน

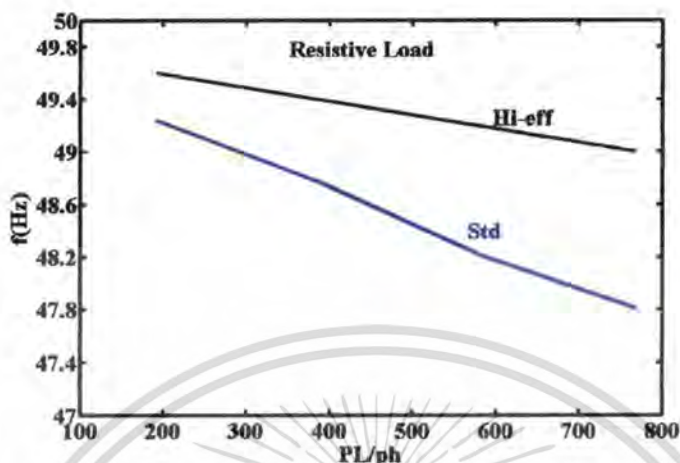
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



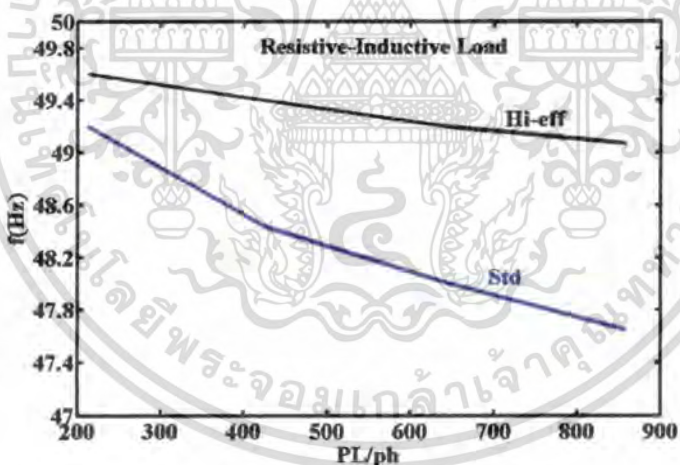
รูปที่ 3.16 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 3.15 - 3.16 แสดงผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงขณะมีภาระแบบความต้านทานและภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง เมื่อพิจารณาขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cb}$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงจะเห็นว่ามีค่าลดลงเนื่องจากผลกระทบของความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง ซึ่งขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cb}$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงจะมีค่าสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากขนาดของแมกนีโตซึ่งรีแอกแตนซ์ที่มีค่าต่ำกว่า ทำให้ต้องใช้ขนาดของตัวเก็บประจุมากกว่านั่นเอง ขณะเดียวกันขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ชดเชยสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cc}$ ) จะมีค่าสูงขึ้นตามภาระความต้านทานและภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง โดยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ชดเชยสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cc}$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงจะมีค่าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐาน เมื่อมีภาระแบบความต้านทานและภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง ทำให้ใช้ขนาดของตัวเก็บประจุชดเชยน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากอิมพีแดนซ์ทางด้านสเตเตอร์ต่ำรวมทั้งกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าน้อยกว่า ( $Q_G$ ) นั่นเอง ซึ่งผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมที่สร้างขึ้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกำลังไฟฟ้าเสมือนของภาระ



รูปที่ 3.17 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน



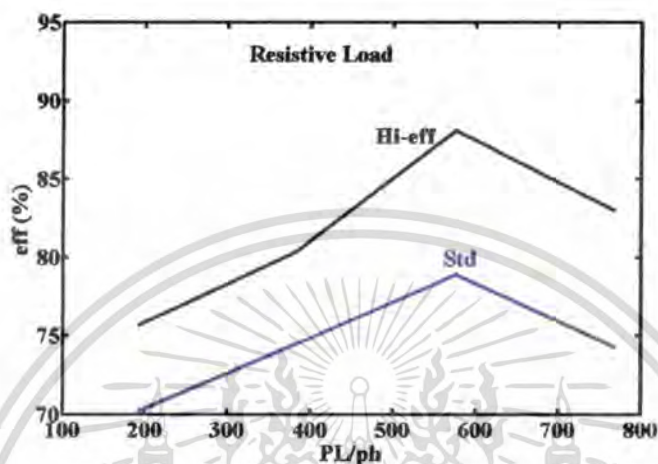
รูปที่ 3.18 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 3.17-3.18 แสดงกำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ถ้าหลัง จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากผลของค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ

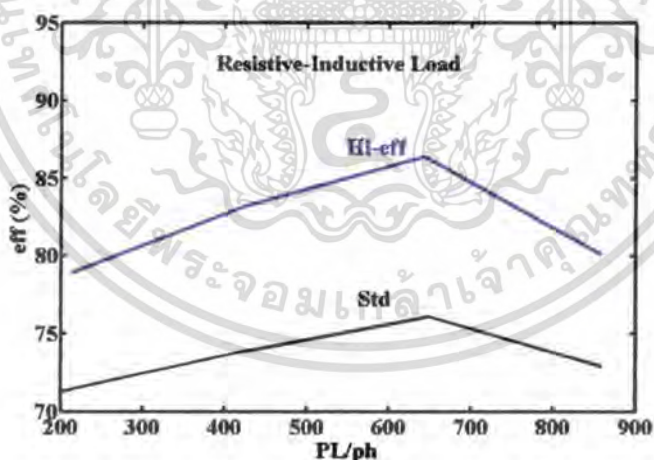
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพนม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพสูงน้อยกว่านั่นเอง ดังนั้นค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกเหนือจากนี้ยังมีความสำคัญต่อค่าความสูญเสียในขดลวดทางด้านโรเตอร์ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง



รูปที่ 3.19 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน



รูปที่ 3.20 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 3.19-3.20 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงจะมีค่าสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานเมื่อมีภาระทั้งสองแบบ เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงที่นำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อลดค่าความสูญเสียต่าง ๆ นั้นเอง

เอกรังสีไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 บทสรุป

จากการทดสอบและวิเคราะห์การนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในรายละเอียดของพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองแบบสามารถสรุปได้ตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 พฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและประสิทธิภาพสูง

พฤติกรรมและสมรรถนะต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	แบบมาตรฐาน	ประสิทธิภาพสูง
ประสิทธิภาพ	ต่ำ	สูง
คุณภาพไฟฟ้า	ดี	ไม่ดี
การเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้า	มาก	น้อย
ระดับแรงดันไฟฟ้า	สูง	ต่ำ
เวลาที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้า	น้อย	มาก
ความสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า ณ. ความเร็วรอบต่ำ	ไม่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้	สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้
ความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง	มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง	มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง
ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า	น้อย	มาก
ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า	มาก	น้อย
ขนาดตัวเก็บประจรวมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	มาก	น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การสืบสวนผลกระทบของการทำสกีวอ์บบนโรเตอร์ที่มีต่อ พฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

### 4.1 บทนำ

วิกฤตการณ์พลังงานเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ทำให้ต้องมีการทบทวนถึงมาตรการในการดูแลและรักษาสิ่งแวดล้อมเพื่อลดปัญหาข้างต้น โดยมีการสนับสนุนให้มีการค้นคว้าวิจัยพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานลม ซึ่งสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยไม่มีขีดจำกัดในส่วนของช่วงเวลาและฤดูกาล ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้มีความมุ่งหมายที่จะทำการวิเคราะห์ สืบสวน รวมทั้งใช้ไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบสองมิติ วิเคราะห์ผลกระทบของการเอียงร่องสล๊อคของโรเตอร์ที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.0 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก เมื่อมีการทำสกีวอ์บบน โรเตอร์มุม  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  และ  $10^\circ$  ผลที่ได้รับนำไปสู่การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม

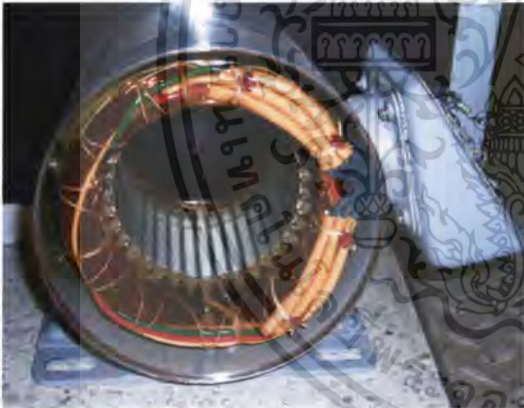
### 4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทความงานวิจัย [11] ได้นำเสนอผลของการทำสกีวอ์บบนโรเตอร์ที่มีต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ งานวิจัย [12] นำเสนอผลกระทบของการอิมตัวเมื่อมีการทำสกีวอ์บบนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และงานวิจัย [14] นำเสนอแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอ์บบนโรเตอร์ โดยงานวิจัยทั้งหมดล้วนเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสทั้งสิ้น จากประเด็นดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการวิจัยผลกระทบของการทำสกีวอ์บบนโรเตอร์ที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

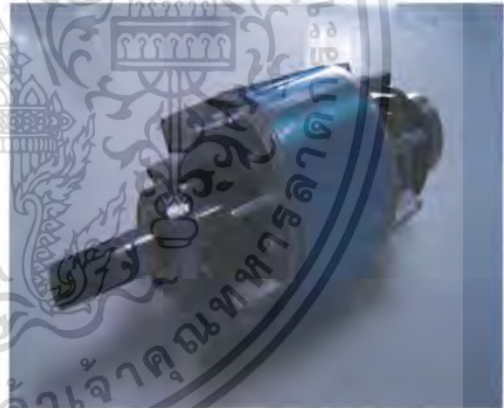
### 4.3 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่นิยมใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก ทนทานและไม่ต้องการซ่อมบำรุงรักษายานมาก โครงสร้างหลักประกอบด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้าง 2 ส่วนคือส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) ดังรูปที่ 4.1 โดยทั่วไปการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจะมีการเอียงร่องสลิตของโรเตอร์ เพื่อลดการสั่นของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขับภาระทางกล ลดการกระเพื่อมของแรงบิด การล๊อคของโรเตอร์รวมทั้งทำให้หมุนได้เรียบขึ้นดังรูปที่ 4.2 ซึ่งการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กและขนาดกลาง จะมีการออกแบบลักษณะโรเตอร์ดังรูปที่ 4.2 (ก) โดยเรียกชื่อโรเตอร์แบบนี้ว่า โรเตอร์แบบสกีว (Skewed rotor) ส่วนการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ จะมีการออกแบบลักษณะโรเตอร์ดังรูปที่ 4.2 (ข) เรียกโรเตอร์แบบนี้ว่า โรเตอร์มัลติสลิท (Multislice rotor) การออกแบบโรเตอร์ดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการการกระจายความร้อนที่ดี ในการออกแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจะพิจารณาถึงการสร้างแรงบิดทางกล กระแสไฟฟ้า และขนาดพิคคของกำลังไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้น (Excitation) ทางด้านสเตเตอร์ (Stator) จากแหล่งจ่ายที่เป็นสัญญาณไซน์ (Sinusoidally) เพื่อกำหนดขนาดโครงสร้างหลักของมอเตอร์ที่ประกอบด้วยส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) เงื่อนไขในการออกแบบเพื่อกำหนดจำนวนร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ (Stator,  $N_1$ ) และ โรเตอร์ (Rotor,  $N_2$ ) ที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จากหัวข้อหลักดังนี้ [31]



รูปที่ 4.1 (ก) ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator)



รูปที่ 4.1 (ข) ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor)

#### รูปที่ 4.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

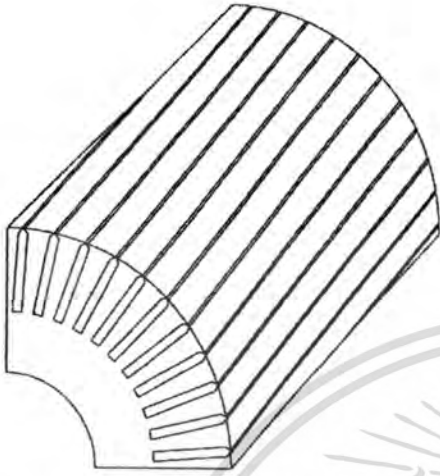
หลักเกณฑ์ในการพิจารณาในการออกแบบจำนวนร่องสลิตที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ดังนี้

- $N_1 - N_2 \neq \pm 1, \pm 2, \pm(p+1), \pm(p+2), \pm p, -2p, -5p, \pm 3p$
- $N_2 > 0.80 N_1$
- $N_2 \approx 0.90 N_1$

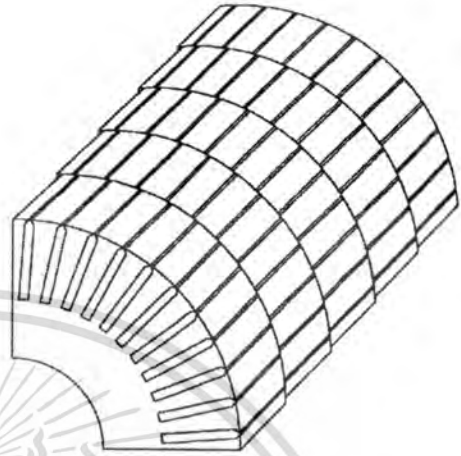
•  $N_2$  ไม่เป็นจำนวนคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $N_2 \leq 1.25 N_1 + p$  สำหรับชนิดกลับทางหมุนไม่ได้
- $N_2 \leq 1.25 N_1$  สำหรับชนิดกลับทางหมุนได้



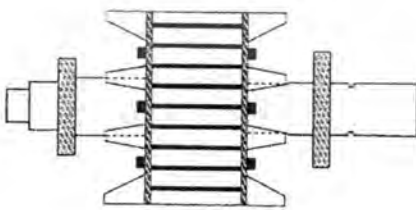
รูปที่ 4.2 (ก) โรเตอร์แบบสลิท



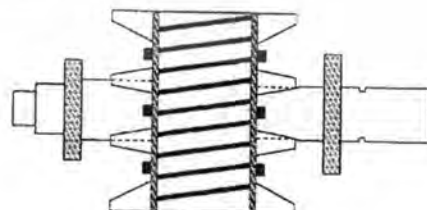
รูปที่ 4.2 (ข) โรเตอร์แบบมัลติสลิท

## รูปที่ 4.2 โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่างๆ

ในกรณีที่เลือกจำนวนร่องสลิตโรเตอร์ ( $N_2$ ) มีค่ามากกว่าจำนวนร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ ( $N_1$ ) ส่งผลต่อค่าความต้านทานและลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านโรเตอร์ต่ำ สำหรับการลดปริมาณฮาร์มอนิกอื่นเนื่องมาจากร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ไม่สามารถทำได้จากการพันขดลวด ไม่ว่าจะออกแบบการพันแบบพิชเต็มหรือแบบเศษส่วน แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการลดปริมาณฮาร์มอนิกอื่นเนื่องมาจากร่องสลิตสามารถทำได้จากการทำสกีวอึ่งทางด้านสเตเตอร์หรือโรเตอร์ โดยทั่วไปจะนิยมทำสกีวอึ่งทางด้านโรเตอร์มากกว่าทำสกีวอึ่งทางด้านสเตเตอร์ [29]



รูปที่ 4.3 (ก) โรเตอร์ที่ไม่มีการทำสกีวอึ่ง



รูปที่ 4.3 (ข) โรเตอร์ที่มีการทำสกีวอึ่ง

## รูปที่ 4.3 โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโรเตอร์รูปที่ 4.3 (ก) คือโรเตอร์ที่ไม่มีการทำสกีวอิ้งนั่นคือการฝังแท่งตัวนำในโรเตอร์แบบแนวตรง ขณะเดียวกันโรเตอร์รูปที่ 4.3 (ข) คือโรเตอร์ที่มีการทำสกีวอิ้งนั่นคือการฝังแท่งตัวนำในโรเตอร์แบบแนวเฉียงในทางปฏิบัติสามารถทำสกีวอิ้งสามารถทำได้โดยฝังแท่งตัวนำที่โรเตอร์ทำมุมกับร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นผลกระทบของการทำสกีวอิ้งส่งผลต่อค่าความต้านทานของแท่งตัวนำที่ฝังในโรเตอร์ที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานของแท่งตัวนำที่มีการทำสกีวอิ้งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.1) [24]



รูปที่ 4.4 การทำสกีวอิ้งบนโรเตอร์

$$r_{b,sk} = r_b \sqrt{1 + \left( \frac{\tau \alpha}{L_b \times 180} \right)^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ

- $r_{b,sk}$  ความต้านทานของแท่งตัวนำโรเตอร์เมื่อมีการทำสกีวอิ้ง, โอห์ม
- $r_b$  ความต้านทานของแท่งตัวนำโรเตอร์เมื่อไม่มีการทำสกีวอิ้ง, โอห์ม
- $\tau$  ระยะขั้วแม่เหล็ก, เมตร
- $\alpha$  มุมองศาของการเอียงร่องสลิต, เรเดียน
- $L_b$  ความยาวแท่งตัวนำ, เมตร

ดังนั้นค่าความต้านทานทางด้าน โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเมื่อทำสกีวอิ้งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.2)

$$R_{2,sk} = r_{b,sk} + r_{er} \quad (4.2)$$

เมื่อ

- $R_{2,sk}$  ความต้านทานทางด้าน โรเตอร์เมื่อทำสกีวอิ้ง, โอห์ม
- $r_{er}$  ความต้านทานของวงแหวนเชื่อมต่อ, โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำสกีวอินบนแท่งตัวนำทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีผลกระทบต่อ การลดลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแท่งตัวนำดังรูปที่ 4.5 จะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการทำสกีวอิน อัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ โรเตอร์มีการทำสกีวอินต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า เหนี่ยวนำที่ โรเตอร์ไม่มีการทำสกีวอินเรียกว่าสกีวแฟกเตอร์ (Skew factor,  $K_{sk}$ ) สามารถ พิจารณาได้จากสมการที่ (4.3) [11, 19, 24-26, 28-31, 34]

$$K_{sk} = \frac{\sin\left(\lambda \frac{\alpha}{2}\right)}{\lambda \frac{\alpha}{2}} \quad (4.3)$$

เมื่อ

$K_{sk}$  แฟกเตอร์ของการทำสกีวอิน

$\lambda$  อัตราส่วนระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการทำสกีวอินต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่ไม่มีการทำสกีวอิน

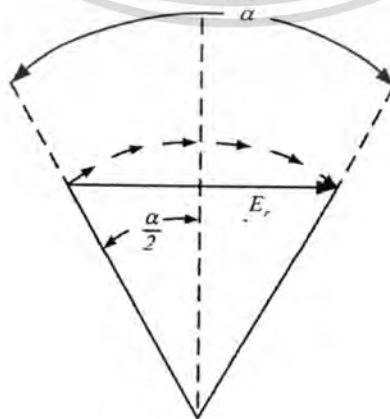
โดยแฟกเตอร์ของการทำสกีวอินนี้ทำให้วงจรแม่เหล็กที่เชื่อมต่อกันระหว่างสเตเตอร์กับ โรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance) ลดลง ในกรณีที่มีการ ทำสกีวอินบนโรเตอร์ดังสมการที่ (4.4) นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าลี้กเกจรีแอกแตนซ์ทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ [24]

$$M_{,sk} = K_{sk} M \quad (4.4)$$

เมื่อ

$M_{,sk}$  ค่าความเหนี่ยวนำร่วมเมื่อทำสกีวอิน, เฮนรี่

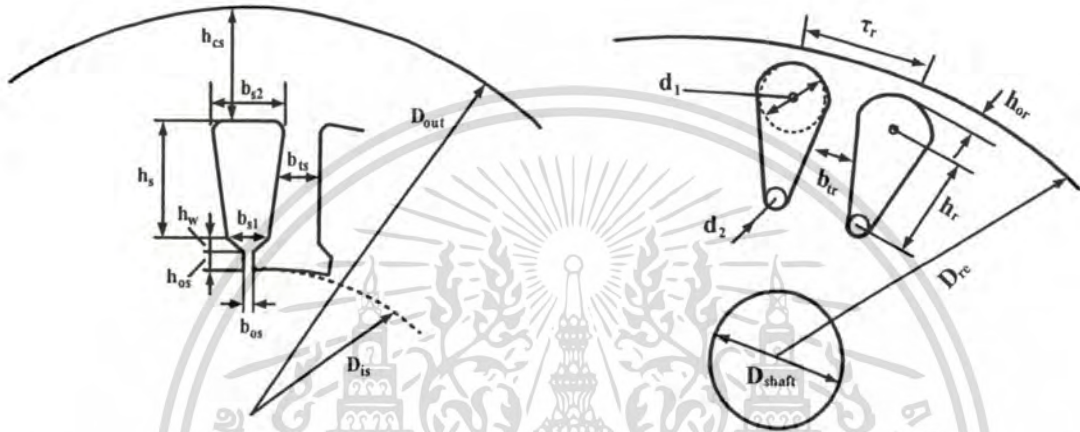
$M$  ค่าความเหนี่ยวนำร่วม, เฮนรี่



รูปที่ 4.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ที่มีการทำสกีวอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากประเด็นดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการวิจัยผลกระทบของการทำสกีวอิ่งที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยมีการทำสกีวอิ่งโรเตอร์มุม  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  และ  $10^\circ$  ในงานวิจัยได้ใช้แกนเหล็กชนิด B50A600 ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.0 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก รายละเอียดการออกแบบและสร้างแสดงดังรูปที่ 4.6-4.7 และตารางที่ 4.1-4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 (ก) ร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ รูปที่ 4.6 (ข) ร่องสลิตทางด้านโรเตอร์

รูปที่ 4.6 รูปร่างร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของร่องสลิต

Stator slot	Rotor slot
Dis 50 mm	Dshaft 16 mm
Dout 80 mm	Dre 50 mm
hcs 14 mm	d1 2.5 mm
hs 14 mm	d2 1.5 mm
hw 0.5 mm	hor 0.5 mm
hos 0.8 mm	hr 8 mm
bts 5 mm	btr 3.5 mm
bos 3 mm	
bs1 4 mm	
bs2 7 mm	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการทำสกีวอินบนโรเตอร์มุม  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  และ  $10^\circ$

Output power (kW)	2.2	Distribution factor	0.96
Phase voltage (V)	220	Skew angle	$0^\circ$ , $5^\circ$ and $10^\circ$
Phase current (A)	5	Winding factor	0.948
Number of phase (Phase)	3	Flux density shape factor	0.729
Frequency (Hz)	50	Form factor	1.08
Number of poles (Pole)	4	Slot fill factor	0.4
Insulation class	F	Stator outer diameter (mm)	156
Flux per pole (mWb)	4.06	Stator inner diameter (mm)	100
Number of stator turn per phase (Turns)	258	Stator tooth width (mm)	5
Stator current density ( $A/mm^2$ )	6.1	Stator slot depth (mm)	15
Rotor current density ( $A/mm^2$ )	3.95	Stator core depth (mm)	16.5
Number of layer	1	Stator slot depth (mm)	15
Slot/pole/phase	3	Rotor bar length (mm)	78, 79.5 and 82
Number of stator slot (slots)	36	Rotor outer diameter (mm)	99
Number of rotor slot (slots)	44	Rotor tooth width (mm)	3.5
Air - gap length (mm)	0.37	Rotor slot depth (mm)	12
Nett iron core length (mm)	77.4	Shaft diameter (mm)	32
Pole pitch (mm)	78.3	Rotor slot type	Trapezoidal
Aspect ratio	1.04	End ring outer diameter (mm)	97
Pitch factor	0.988	End ring inner diameter (mm)	60

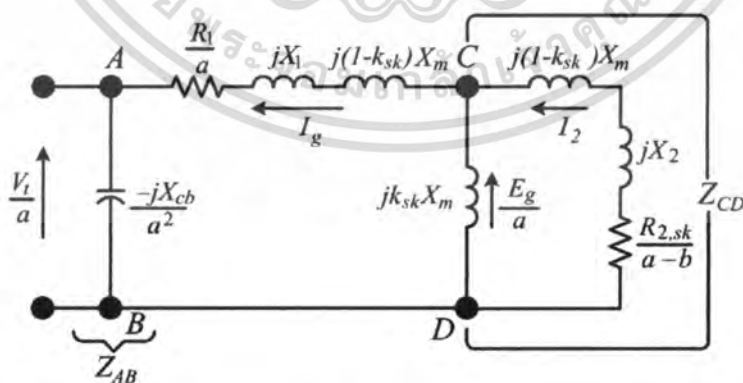
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่มีการทำสกีวอิงบน โรเตอร์มุม  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  และ  $10^\circ$

#### 4.4 ทฤษฎีวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุ

สำหรับการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิงสามารถแยกการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันประกอบด้วยวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุขณะไม่มีภาระ (No-load) และขณะมีภาระ (On-load) โดยการวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ (No-load) เมื่อโรเตอร์มีการทำสกีวอิงสามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.8 เมื่อไม่คิดผลกระทบของฮาร์มอนิกและค่าสูญเสียในแกนเหล็ก [7, 12, 19]



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิง

จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.8 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ โหนด C และ D สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.5) - (4.7) งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{CD} = R_{CD} + jX_{CD} \quad (4.5)$$

โดย

$$R_{CD} = \frac{(a-b)R_{2,sk}j(K_{sk}X_m)^2}{R_{2,sk}^2 + (a-b)^2(jK_{sk}X_m + jX_2 + j(1-K_{sk})X_m)^2} \quad (4.6)$$

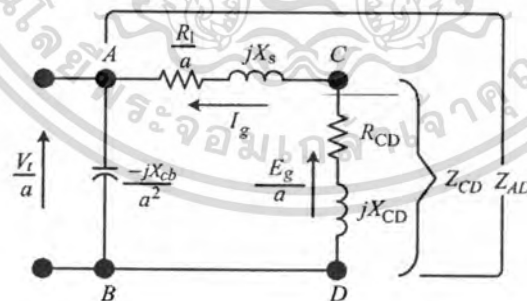
$$X_{CD} = \frac{R_{2,sk}^2 jK_{sk}X_m + (a-b)^2 jK_{sk}X_m(jX_2 + j(1-K_{sk})X_m)}{R_{2,sk}^2 + (a-b)^2} \cdot \frac{(jK_{sk}X_m + (jX_2 + j(1-K_{sk})X_m))}{(jK_{sk}X_m + jX_2 + j(1-K_{sk})X_m)^2} \quad (4.7)$$

เมื่อ

- $Z_{CD}$  ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่โหนด C และ D
- $R_{CD}$  ขนาดของความต้านทานที่โหนด C และ D
- $X_{CD}$  ขนาดของรีแอกแตนซ์ที่โหนด C และ D
- $a$  ค่าเปอร์ยูนิตของความถี่
- $b$  ค่าเปอร์ยูนิตของความเร็วรอบ

ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสวิตช์ใหม่ดัง

รูปที่ 4.9 ผลรวมของอิมพีแดนซ์ที่โหนด A และ D สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.8)-(4.12)



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสวิตช์

$$Z_{AD} = R_{AD} + jX_{AD} \quad (4.8)$$

$$R_{AD} = \frac{R_1}{a} + R_{CD} \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$jX_{AD} = jX_s + jX_{CD} \quad (4.10)$$

โดย

$$jX_s = jX_1 + j(1 - K_{sk})X_m \quad (4.11)$$

$$jX_r = jX_2 + j(1 - K_{sk})X_m \quad (4.12)$$

จากกฎของ Kirchoff's voltage law ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าในลูปมีค่าเท่ากับศูนย์จะได้  
 ดังสมการที่ (4.13)

$$I_g \left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_s \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (4.13)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.13) เงื่อนไขในการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 เหนี่ยวนำ  $I_g \neq 0$  ดังนั้นผลรวมของอิมพีแดนซ์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.14)

$$\left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_s \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.14) พิจารณาในส่วนของจำนวนจริงมีค่าเท่ากับศูนย์จะได้สมการที่  
 (4.15)

$$\frac{R_1}{a} + \frac{(a-b)R_{2,sk} j(K_{sk} X_m)^2}{R_{2,sk}^2 + (a-b)^2 (jK_{sk} X_m + jX_2 + j(1-K_{sk})X_m)^2} = 0 \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.15) สามารถหาค่า  $a_{max}$  ได้จากสมการที่ (4.16)

$$a_{max} = b - \frac{b}{2} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \left( \frac{b_c}{b} \right)^2}}{1 + \left( \frac{R_1}{R_{2,sk}} \right) \left( 1 + \frac{jX_2 + (1-K_{sk})X_m}{jK_{sk} X_m} \right)^2} \right] \quad (4.16)$$

เมื่อค่า  $b_c$  สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.17)

$$b_c = \frac{2R_1}{jK_{sk} X_m} \sqrt{\frac{R_{2,sk}}{R_1} + \left( 1 + \frac{jX_2 + j(1-K_{sk})X_m}{jK_{sk} X_m} \right)^2} \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

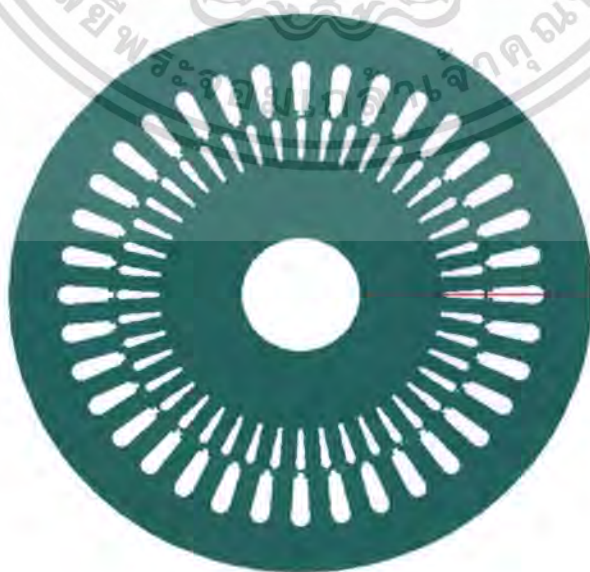
ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการทำสวิตชิงบนโรเตอร์ขณะไม่มีภาระ (No-load) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.18)

$$C_b = \frac{1}{2\pi f_b Z_b a_{\max}^2 (jX_s + jX_{CD})} \quad (4.18)$$

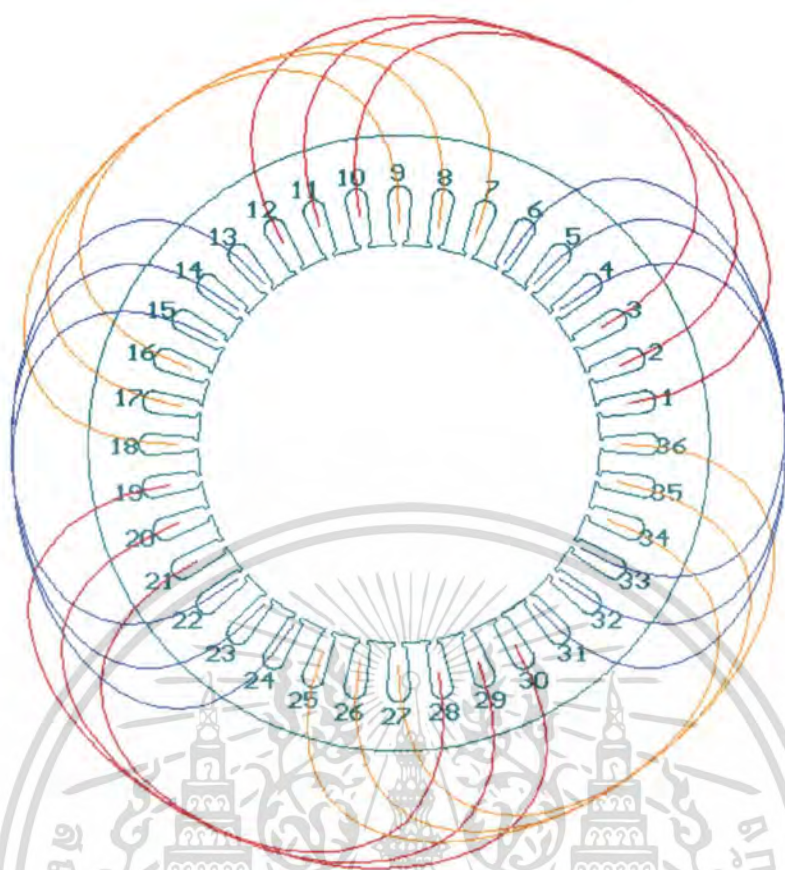
สำหรับการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระสามารถพิจารณาได้จากทฤษฎีการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุได้ในบทที่ 2

#### 4.5 การวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติ

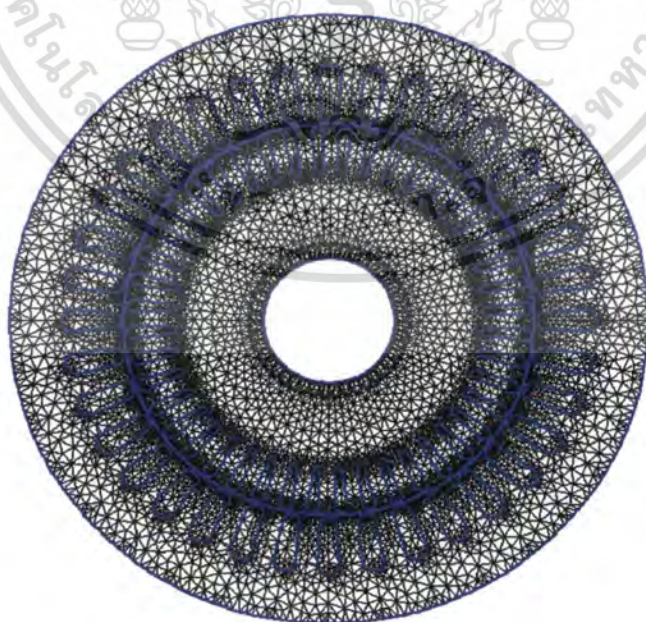
ในการวิเคราะห์และสืบสวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสวิตชิงบนโรเตอร์จะใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติโดยใช้โปรแกรม SPEED (Scottish Power Electronics and Electric Drives) [38] ในการวิเคราะห์ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.10-4.17 และตารางที่ 4.3 - 4.4 โดยรูปที่ 4.10 แสดงวงจรแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ที่มีจำนวนร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ 36 และ 44 ร่องสลิตตามลำดับ และรูปที่ 4.11 แสดงการพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการพันแบบชั้นเดียวโดยมีจำนวนรอบของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ 258 รอบต่อเฟส ส่วนรูปที่ 4.12 แสดงวงจรแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติ (2D-FEA) มีจำนวนโนดและเอลิเมนต์ทั้งหมด 17,692 และ 34,608 ตามลำดับ สอดคล้องกับรูปที่ 4.13 แสดงทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีจำนวนทั้งหมด 4 ขั้วแม่เหล็ก



เอกสารนี้รูปที่ 4.10 วงจรแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

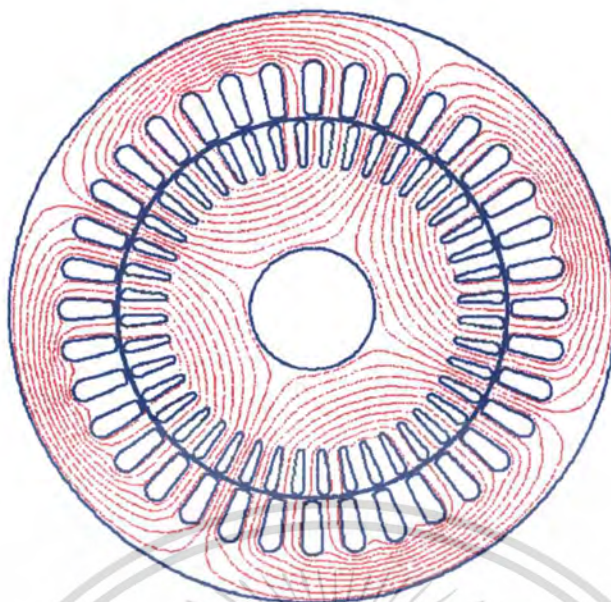


รูปที่ 4.11 การพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกรูอิงบน โรเตอร์



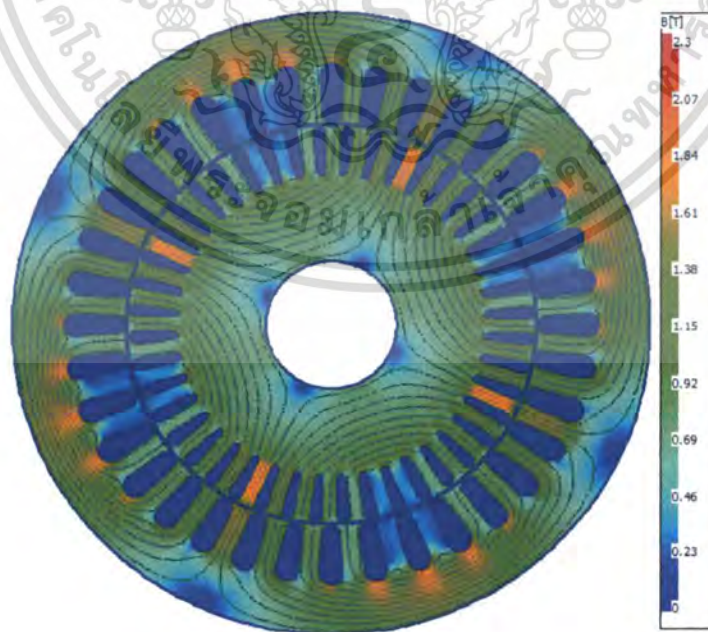
รูปที่ 4.12 โหนดและอติเมนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



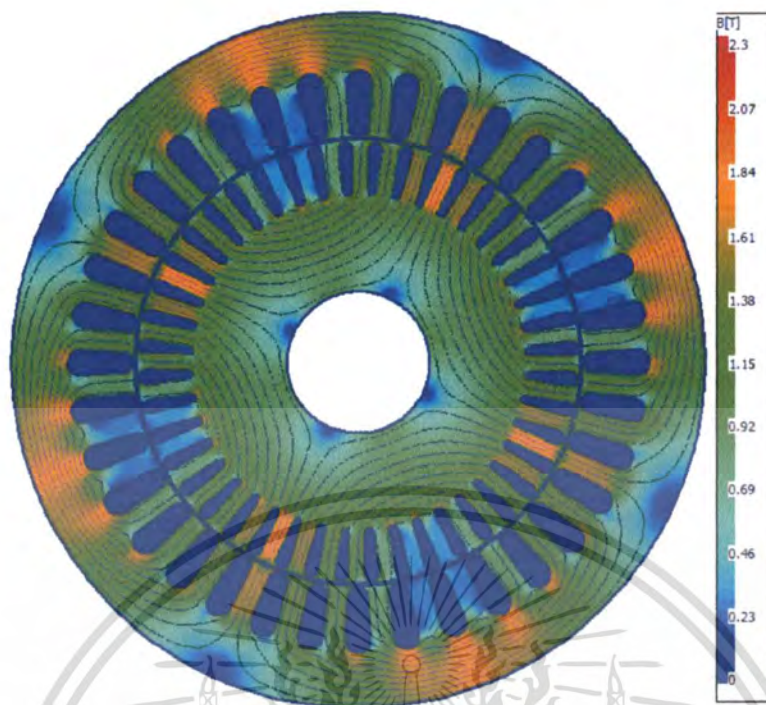
รูปที่ 4.13 ขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงการวิเคราะห์ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรมแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ จะเห็นได้ว่าผลกระทบของการทำสกีวอ็บบนโรเตอร์  $10^\circ$  จะทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ฟันของโรเตอร์ (Rotor teeth) มีค่า 1.68 Tesla ซึ่งมีค่าสูงกว่าการทำสกีวอ็บบนโรเตอร์  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  ซึ่งมีค่าเพียง 1.52 และ 1.43 Tesla

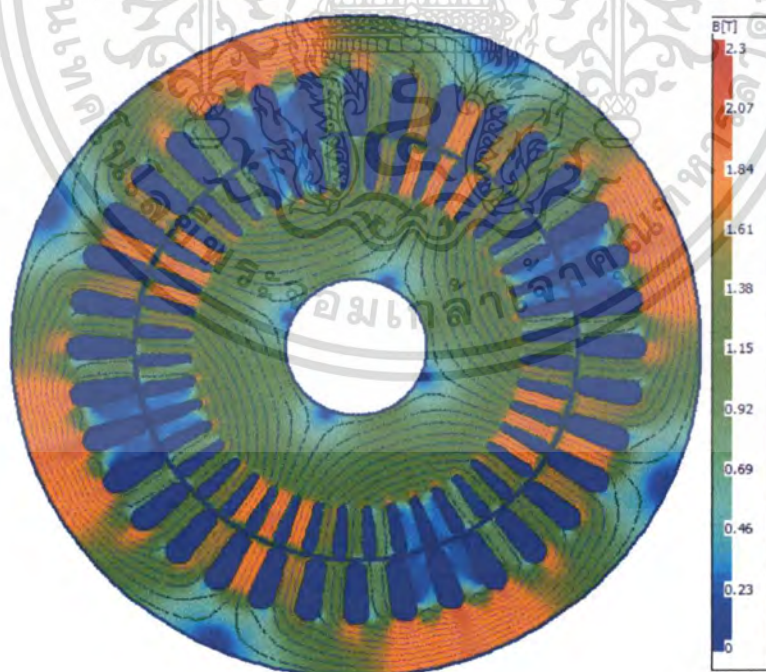


รูปที่ 4.14 ความหนาแน่นแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็น **เมื่อมีการทำสกีวอ็บบนโรเตอร์มุม  $0^\circ$**  การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

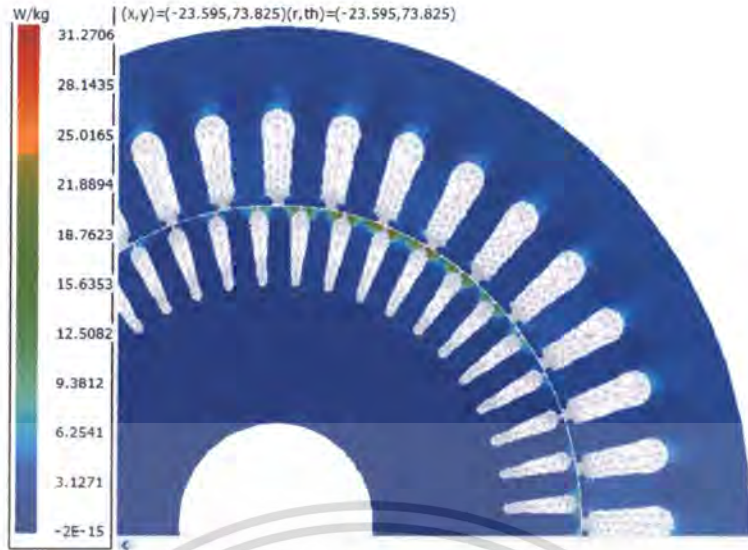


รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
เมื่อมีการทำสกีวอิงบน โรเตอร์มุม  $5^{\circ}$



รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
เมื่อมีการทำสกีวอิงบน โรเตอร์มุม  $10^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.17** ความสูญเสียของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.17 แสดงการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ (2D-FEA) ผลกระทบของการทำสกีวอิ่งดังกล่าวส่งผลต่อค่าความสูญเสียในแกนเหล็กให้มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของการทำสกีวอิ่ง  $10^\circ$  จะมีค่าสูงกว่าการทำสกีวอิ่งบนโรเตอร์  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  ตามลำดับ โดยค่าความสูญเสียของแกนเหล็กประกอบด้วยค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิสและค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนจะมีค่ามากกว่าค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิส ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กมาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กจึงควรเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงๆ ( $\rho$ ) มาออกแบบเพื่อลดค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ผลที่ได้ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่วนตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ่งโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ (2D-FEA) คำวนม จะเห็นได้ว่าผลกระทบของการทำสกีวอิ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ การเพิ่มขึ้นของมุมมองสาในการฝังแท่งตัวนำจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ นอกเหนือจากนี้ยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของมุมมองสาในการฝังแท่งตัวนำทางด้านโรเตอร์จะส่งผลต่อการลดลงของค่าแมกนีไคซิงรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าความสูญเสียแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ่งบนโรเตอร์

Skew angle	Hysteresis losses (W)		Eddy current losses (W)		Total losses (W)
	Stator core (W)	Rotor core (W)	Stator core (W)	Rotor core (W)	
0°	57.8	19.2	69.3	30.2	177.6
5°	59.3	20.4	70.4	31.5	181.6
10°	61.6	22.8	72.2	33	189.7

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ่งโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์คำนวณ

Skew angle	$R1(\Omega)$	$R2(\Omega)$	$Xs(\Omega)$	$Xr(\Omega)$	$Xm(\Omega)$
0°	3.06	2.47	3.69	3.53	85.47
5°	3.06	2.51	4.02	3.97	85.13
10°	3.06	2.89	5.12	4.83	84.81

#### 4.6 การทดสอบ

สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นจะมีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ่งบนโรเตอร์มุม 0°, 5° และ 10° โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์และค่าความสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ

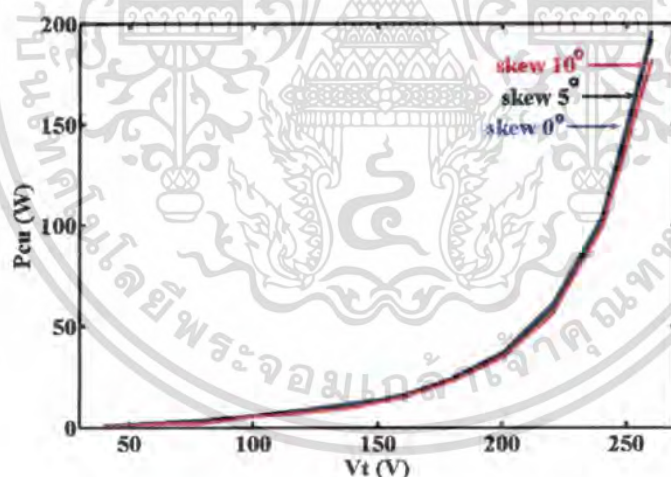
##### 4.6.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์และค่าความสูญเสีย

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้มาตรฐานการทดสอบอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 112-2004 Method F-F1 [37] เนื่องจากการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าวสามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณปริมาณค่าความสูญเสียในส่วนต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ประกอบด้วยการทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-load test) การทดสอบบล็อกโรเตอร์ (Blocked rotor test) การทดสอบโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC test) การทดสอบหาแรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียดทานและแรงลมประทะ(Friction and Windage test) พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 112-2004 Method F-F1 แสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าผลกระทบของการทำสกีวอิ้งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ นอกเหนือจากนี้ยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ ในทางกลับกันจะส่งผลต่อการลดลงของค่าแมกนีไคซิงรีแอกแตนซ์ โดยค่าที่ทดสอบสอดคล้องกับกับการวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนท์ลิเมนต์แบบสองมิติ (2D-FEA) รายละเอียดค่าความสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาผลการทดสอบดังรูปที่ 4.18 - 4.19

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้ง

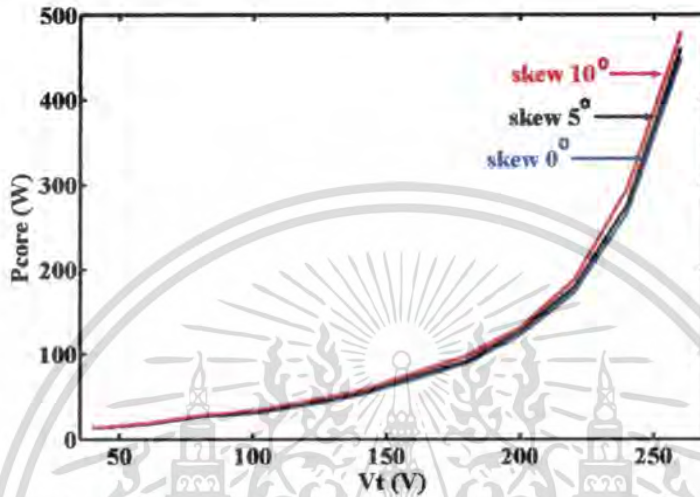
Skew angle	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	Xs ( $\Omega$ )	Xr ( $\Omega$ )	Xm ( $\Omega$ )
0°	3.18	2.56	3.88	3.88	86.62
5°	3.18	2.58	4.34	4.34	86.42
10°	3.18	2.96	5.94	5.54	86.20



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งมุม 10° จะมีค่าความสูญเสียของขดลวดทางด้านสเตเตอร์น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุม  $0^\circ$  และ  $5^\circ$  ตามลำดับ เนื่องจากผลกระทบของการทำสกีวอิ้งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของลิกเกจรี แอ็กแต็นซ์ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์รวมทั้งค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ ส่งผลต่อปริมาณ กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งมุม  $10^\circ$  ต่ำกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งมุม  $0^\circ$  และ  $5^\circ$  ตามลำดับ

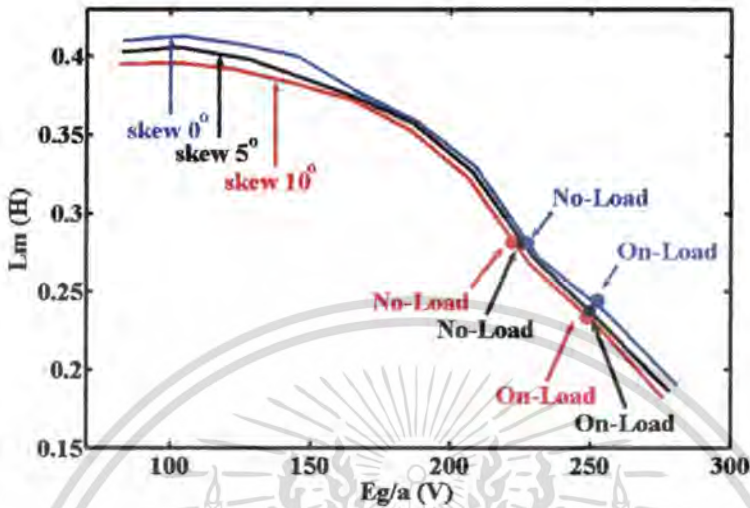


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียแกนเหล็กของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียแกนเหล็กของ เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ โดยอ้างอิงการทดสอบตามจะเห็นได้ว่า เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งมุม  $10^\circ$  จะมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสูงกว่า เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งมุม  $0^\circ$  และ  $5^\circ$  ตามลำดับ ผลการทดสอบดังกล่าว สอดคล้องกับการใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสองมิติในการวิเคราะห์ปริมาณค่าความสูญเสียในแกน เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่วนรูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า เหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศกับแมกนีไตซ์อิงอินดักแต็นซ์ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการ ทำสกีวอิ้งมุมต่างๆ โดยการทดสอบแบบซิงโครนัส (Synchronous test) จะเห็นได้ว่าเมื่อเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระจะส่งผลให้แรงเคลื่อน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ (Air-gap voltage) มี ค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าแมกนีไตซ์อิงอินดักแต็นซ์มีค่าลดลง นั่นหมายความว่าถึงปริมาณเส้นแรง แม่เหล็กภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้จุดทำงานของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า เหนี่ยวนำเปลี่ยนจากย่านไม่อิ่มตัว (Un-saturation region) ไปยังย่านอิ่มตัว (Saturation) เครื่อง กำนัด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งบน โรเตอร์มุม  $0^\circ$  จะมีการเปลี่ยนแปลงย่านการทำงาน ดังกล่าวน้อยกว่าเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ้งมุม  $5^\circ$  และ  $10^\circ$  ตามลำดับ ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อแจกจ่ายให้แก่นักเรียนและผู้สนใจเท่านั้น ไม่สามารถ  
 ใ้มีการนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางโรงเรียนได้  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิงบนโรเตอร์มุม  $0^\circ$  มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กน้อยกว่า รวมทั้งมีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ (Voltage regulation) นั้นเอง

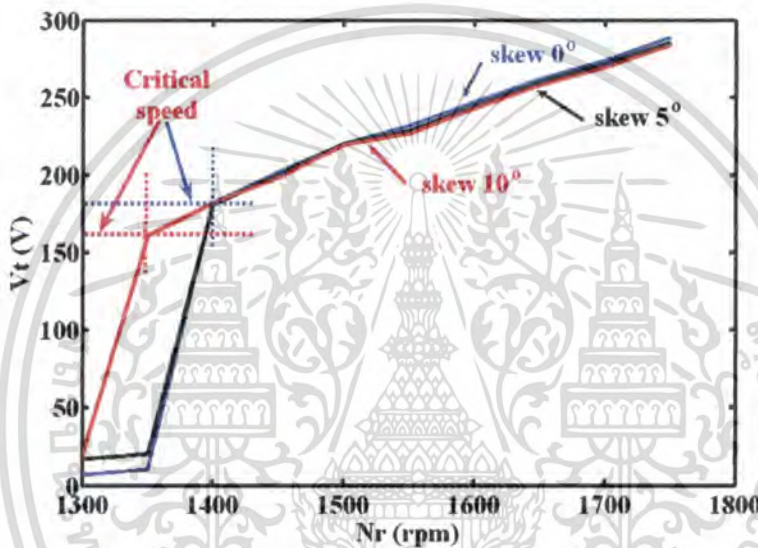


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศกับแมกนีโตซิงอินตักเต้นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิงมุมต่างๆ

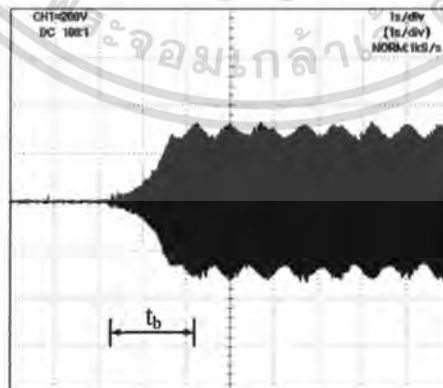
#### 4.6.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงาน

สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานจะประกอบด้วยการทดสอบขณะไม่มีภาระและขณะมีภาระ โดยการทดสอบขณะมีภาระจะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความเร็วให้คงที่ 220 โวลต์ 1500 รอบต่อนาที ใช้แทนทดสอบของบริษัท Siemens ร่วมกับการใช้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drive) เป็นต้นกำลังสำหรับขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมี Torque and Speed detectors สำหรับวัดสมรรถนะต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์และใช้ภาระแบบความต้านทานและความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำในการทดสอบ สามารถพิจารณาผลการทดสอบดังรูปที่ 4.21-4.36 โดยรูปที่ 4.21 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วรอบต้นกำลังจาก 1300-1750 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิงมุม  $10^\circ$  จะมีความเร็ววิกฤติต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิงมุม  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  ตามลำดับกล่าวคือ ณ ที่ความเร็ว 1350 รอบต่อนาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิงมุม  $10^\circ$  สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 164 โวลต์ ขณะเดียวกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิงมุม  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  จะสร้างแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 20 โวลต์และ 13 โวลต์ ตามลำดับโดยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขนาด 164 โวลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิงมุม  $10^\circ$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ 220 โวลต์ คุณลักษณะดังกล่าวแสดงถึงความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ณ. ที่ความเร็วลมต่ำๆ ซึ่งเป็นจุดเด่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ่งที่เหมาะสม ขณะเดียวกัน ณ. ที่ความเร็ว 1400-1750 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ่งมุม  $10^\circ$  จะมีค่าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากเมื่อเพิ่มมุมองศาของการฝังแท่งตัวนำในโรเตอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลกระทบต่อารลดลงของค่าแมกนีไตซิ่งรีแอกแตนซ์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าน้อยกว่านั่นเอง

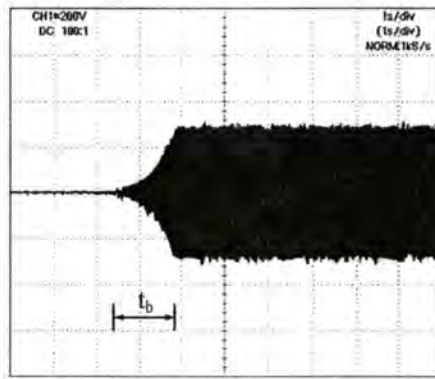


รูปที่ 4.21 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ

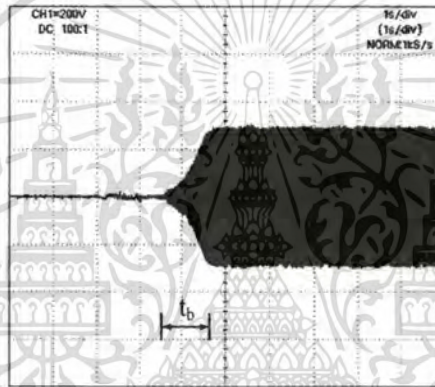


รูปที่ 4.22 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ่งมุม  $0^\circ$  ขณะไม่มีการสภาวะได้สภาวะชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



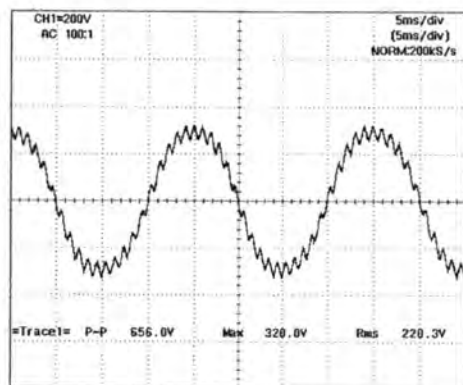
รูปที่ 4.23 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 5° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ



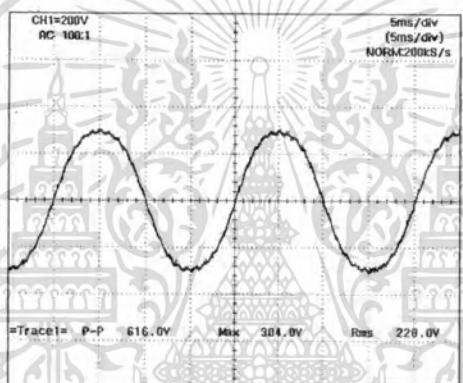
รูปที่ 4.24 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 10° ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ

รูปที่ 4.22-4.24 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 0°, 5° และ 10° ตามลำดับขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 10° จะใช้เวลาในการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build-up voltage time,  $t_b$ ) ที่น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 5° และ 0° ตามลำดับ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 10° จะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่พื้นโรเตอร์สูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 0° และ 5° ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.25-4.27 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 0°, 5° และ 10° ตามลำดับขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 10° จะมีสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ้อมุม 5° และ 0° ตามลำดับ เนื่องจากการทำสกีวอ้อมุม โรเตอร์ลดปริมาณฮาร์โมนิกเนื่องจากร่องสลิต (Slot harmonic) นั้นเอง

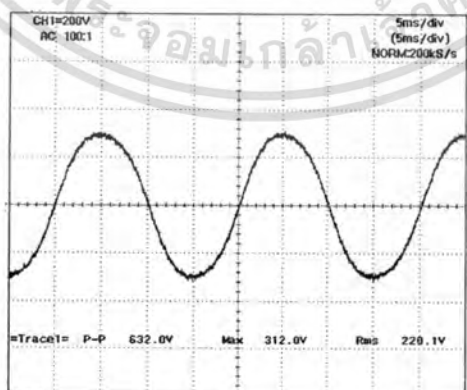
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา โดยผู้จัดทำเอกสารขอสงวนสิทธิ์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสทกอิ้งมุม  $0^{\circ}$  ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 9.0 %

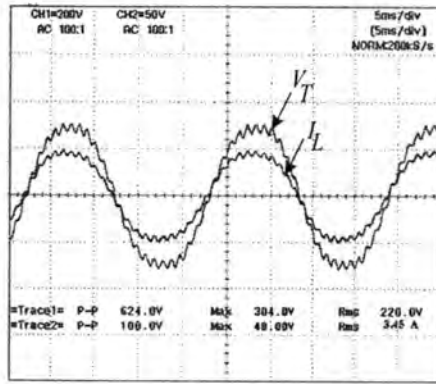


รูปที่ 4.26 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสทกอิ้งมุม  $5^{\circ}$  ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 4.7 %

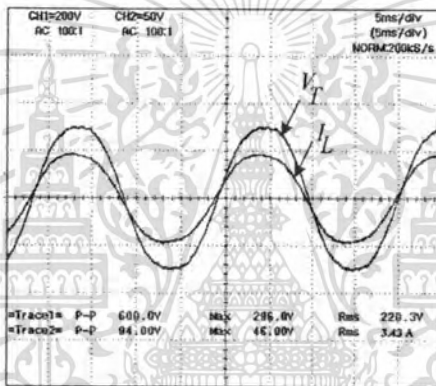


รูปที่ 4.27 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสทกอิ้งมุม  $10^{\circ}$  ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 3.9 %

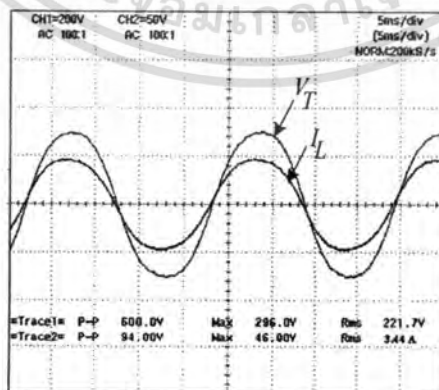
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแส ไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการ ทำสกีวอิมมูม  $0^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THDv = 9.89 %



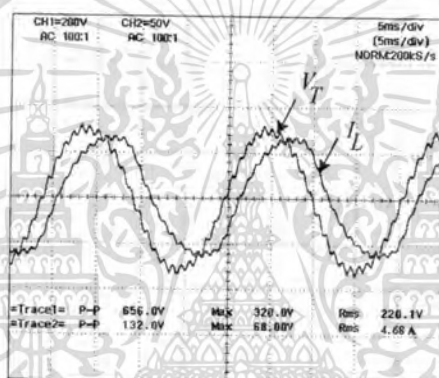
รูปที่ 4.29 แรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแส ไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการ ทำสกีวอิมมูม  $5^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THDv = 5.34 %



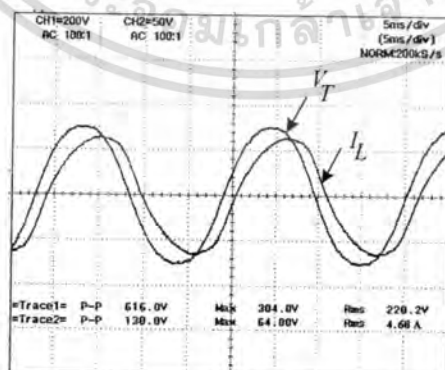
รูปที่ 4.30 แรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแส ไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการ

ทำสกีวอิมมูม  $10^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 768 W/ph, % THDv = 4.76 %  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.28-4.30 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  และ  $10^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทาน จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม  $10^\circ$  จะมีรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์มากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  ตามลำดับ เนื่องจากการทำสกีวอิมมูมบนโรเตอร์ลดปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากร่องสลิต (Slot harmonic) นั่นเอง โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของภาระ กล่าวคือเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปยังย่านอิ่มตัว (Saturation region) ส่งผลทำให้เกิดการอิ่มตัวบริเวณพื้นของร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ทำให้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการผิดเพี้ยนมากขึ้นนั่นเอง



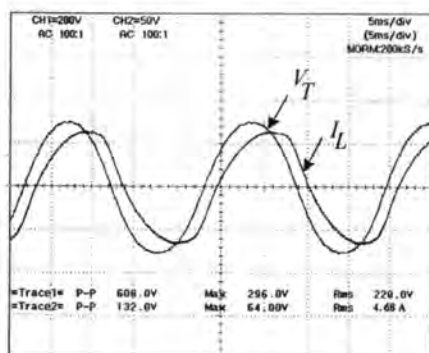
รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม  $0^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด  $868 \text{ W/ph}$ ,  $\% \text{ THD}_v = 9.96 \%$



รูปที่ 4.32 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม  $5^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

ขนาด  $868 \text{ W/ph}$ ,  $\% \text{ THD}_v = 5.54 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.33** แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $10^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ ขนาด 868 W/ph, % THDv = 4.82 %

รูปที่ 4.31- 4.33 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  และ  $10^\circ$  ขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ถ้าหาลัง ผลจากการทดลองจะเห็นได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $10^\circ$  จะการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  ตามลำดับ เหมือนกับภาระแบบความต้านทานเช่นเดียวกัน โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสรุปดังตารางที่ 4.6-4.7 ตารางที่ 4.6 แสดงการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน (Resistive-load) ซึ่งเป็นภาระแบบเป็นเชิงเส้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $10^\circ$  จะการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  ตามลำดับ เนื่องจากการทำสกีวอ็องบนโรเตอร์ลดปริมาณฮาร์มอนิกเนื่องจากร่องสลิต (Slot harmonic) นั้นเอง โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระ ซึ่งหมายความว่าความถี่จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation region) ซึ่งส่งผลต่อการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นเอง ส่วนตารางที่ 4.7 แสดงการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ถ้าหาลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $10^\circ$  จะมีการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  เหมือนกับภาระแบบความต้านทานเช่นเดียวกัน ดังนั้นผลจากการทำสกีวอ็องบนโรเตอร์ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีคุณภาพไฟฟ้าที่ดี (Power quality) จุดเด่นข้อนี้จะนำไปเป็นข้อมูลในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองในบทถัดไป

แม้ว่ากรณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะมีภาวะแบบความต้านทาน

Skew angles	Total Harmonic Distortion of Voltage (%THDv)				
	No-load	On-load 193 W/ph	On-load 384 W/ph	On-load 587 W/ph	On-load 768 W/ph
0°	9	9.21	9.43	9.68	9.89
5°	4.7	4.81	4.93	5.11	5.34
10°	3.9	4.12	4.32	4.54	4.76

ตารางที่ 4.7 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.85

Skew angles	Total Harmonic Distortion of Voltage (%THDv)				
	No-load	On-load 210 W/ph	On-load 428 W/ph	On-load 645 W/ph	On-load 868 W/ph
0°	9	9.25	9.49	9.74	9.96
5°	4.7	4.92	5.13	5.36	5.54
10°	3.9	4.15	4.36	4.60	4.82

ตารางที่ 4.8 แสดงขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทาน (Resistive-load) เมื่อใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าและรักษาระดับไฟฟ้าที่พิกัด 220 โวลต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0° จะใช้ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° และ 10° เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0° มีค่าลิกเกจรีแอกเต็นซ์ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ต่ำกว่านั่นเอง โดยขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้านั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของภาระเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์ทางด้านสเตเตอร์มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ส่วนตารางที่ 4.9 แสดงขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาวะแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง เมื่อใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าและรักษาระดับไฟฟ้าที่พิกัด 220 โวลต์ โดยขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับประเภทของภาระและขนาดของตัวประกอบกำลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0° จะใช้ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° และ 10° เหมือนกับภาวะแบบความต้านทาน โดยจะใช้ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่าภาวะแบบความต้านทานเนื่องจากภาระดังกล่าวดึงกำลังไฟฟ้า

เสมือนจากระบบนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาระแบบความต้านทาน

Skew angle	No-load $C_b$ ( $\mu\text{F}$ )	On-load ; $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )				
		193 W/ph	384 W/ph	587 W/ph	768 W/ph	Total $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )
0°	35	5	6	8	10	29
5°	35	5	7	9	12	33
10°	35	5	8	11	14	37

ตารางที่ 4.9 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง

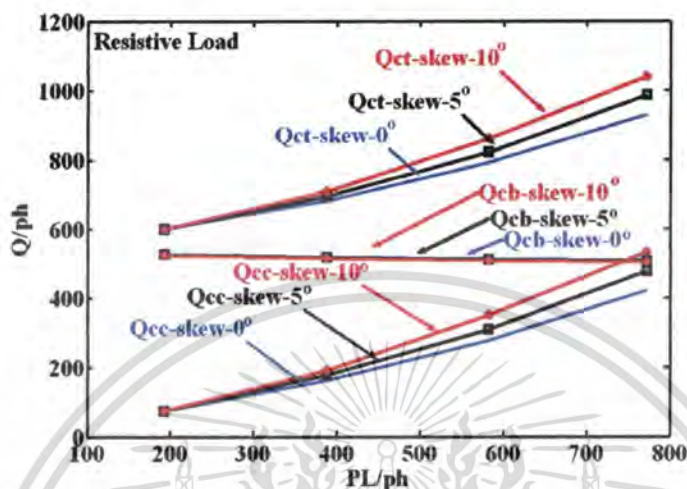
Skew angle	No-load $C_b$ ( $\mu\text{F}$ )	On-load ; $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )				
		210 W/ph	428 W/ph	645 W/ph	868 W/ph	Total $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )
0°	35	14	17	20	24	110
5°	35	15	18	21	26	115
10°	35	15	19	23	28	110

รูปที่ 4.34-4.35 แสดงกำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบขณะมีภาระแบบความต้านทาน เมื่อพิจารณาขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนจากตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cb}$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 0°, 5° และ 10° จะเห็นได้ว่าขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนจากตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเนื่องจากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าลดลง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 10° จะมีการลดลงของขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนจากตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° และ 0° ตามลำดับ เนื่องจากผลกระทบจากการทำสกีวอิมมูมส่งผลทำให้ค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง ขณะเดียวกันขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนจากตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cc}$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 10° จะมีค่ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมูม 5° และ 0° ตามลำดับ เนื่องจากผลกระทบจากการทำสกีวอิมมูมส่งผลทำให้ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง ทำให้ต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงขึ้นในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า โดยขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนรวม ( $Q_{\Sigma}$ ) จะเกิดจากกำลังไฟฟ้าเสมือนจากตัวเก็บประจุที่ใช้

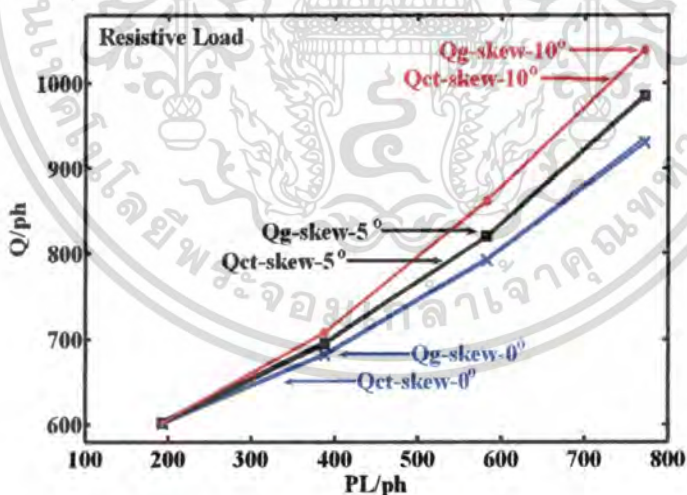
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cb}$ ) รวมกับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับรักษา ระดับแรงดันไฟฟ้า ( $Q_{cc}$ ) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ต้องการ ( $Q_g$ )



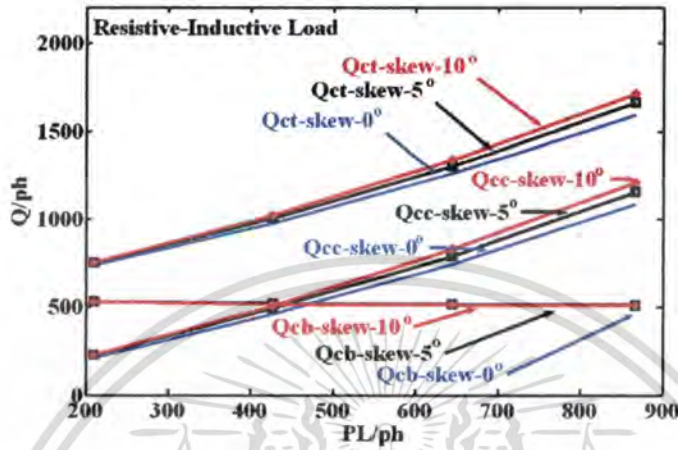
รูปที่ 4.34 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุขณะมีภาระแบบความต้านทาน



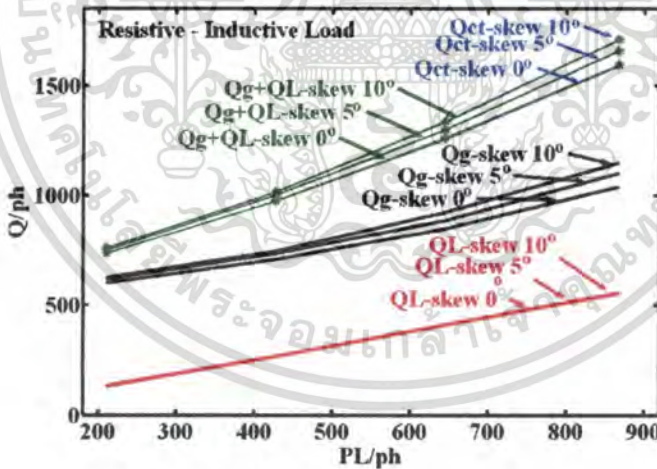
รูปที่ 4.35 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบขณะมีภาระแบบความต้านทาน

รูปที่ 4.36-4.37 ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำจะใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุรวม ( $Q_{ct}$ ) มากขึ้น เนื่องจากภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำจะดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบนั่นเอง โดยผลรวมของ กำลังไฟฟ้าเสมือนรวมของตัวเก็บประจุ ( $Q_{ct}$ ) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือนของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $Q_g$ ) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกำลังไฟฟ้าเสมือนของภาระนั่นเอง ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสมจึงควรออกแบบเพื่อลดค่าลิกเกจรีแอคแต้นซ์ให้มีค่าน้อยเพื่อลดขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้งานสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



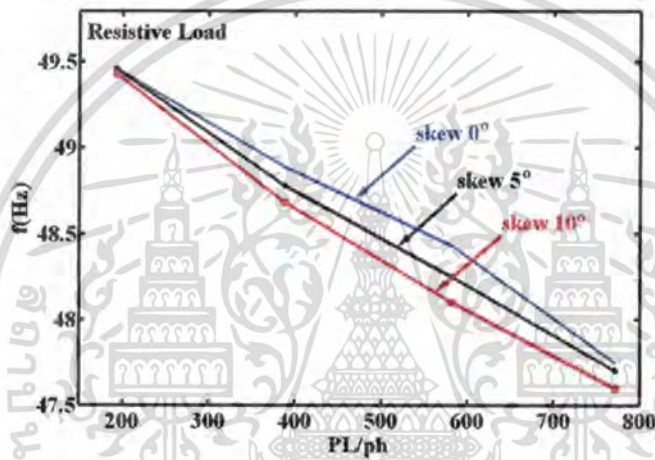
รูปที่ 4.36 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ



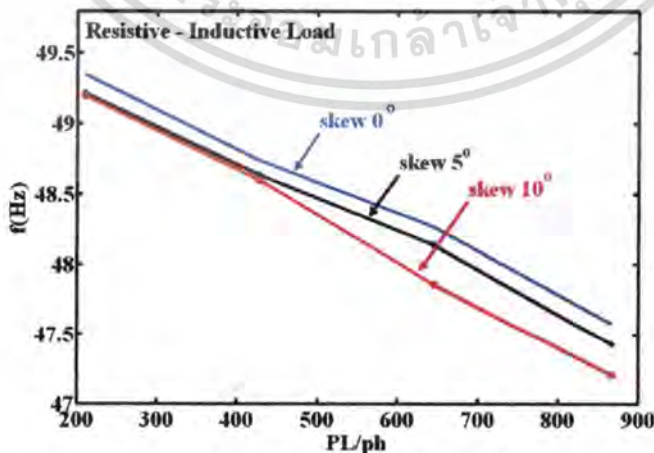
รูปที่ 4.37 กำลังไฟฟ้าของภาระและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.38-4.39 แสดงกำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานและภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ถ้าหลัง จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ่งมุม 10° จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $5^\circ$  และ  $0^\circ$  ตามลำดับ เนื่องจากการทำสกีวอ็อง โดยการฝังแท่งตัวนำเฉียงกับร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ ส่งผลทำให้ของค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอ็องมุม  $10^\circ$  มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกเหนือจากนี้ยังมีความสำคัญต่อค่าความสูญเสียในขดลวดทางด้านโรเตอร์ ดังนั้นหากออกแบบให้ค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ต่ำจะส่งผลต่อค่าความสูญเสียของขดลวดต่ำ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูงขึ้นรวมทั้งทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าน้อย

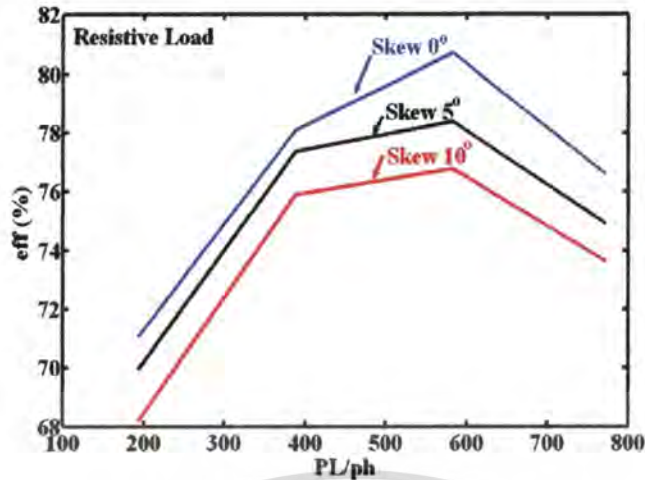


รูปที่ 4.38 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน

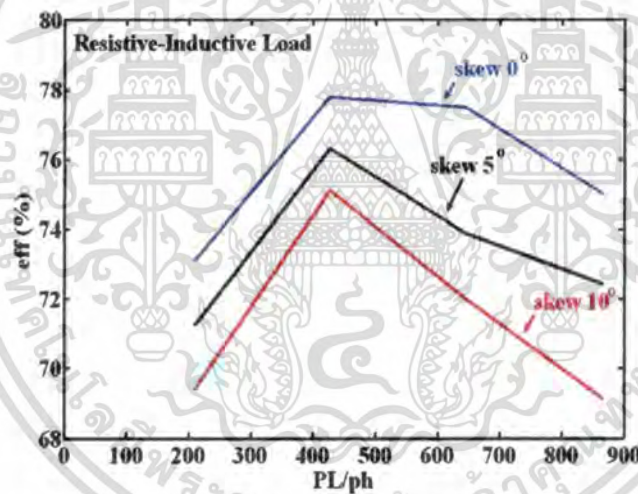


รูปที่ 4.39 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน



รูปที่ 4.41 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.40-4.41 แสดงกำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานและแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมุม 0° จะมีค่าสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมุม 5° และ 10° ตามลำดับ เมื่อมีภาระทั้งสองแบบ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิมมุม 0° มีค่าความสูญเสียในส่วนต่างๆ น้อยกว่านั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 บทสรุป

จากการทดสอบและสืบสวนการผลกระทบของการทำสกีวอิ่งบน โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมทั้งใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ (2D-FEA) ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กรวมทั้งพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ่งมุม  $0^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  และ  $10^{\circ}$  ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการทำสกีวอิ่งมุม  $0^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  และ  $10^{\circ}$  แสดงให้เห็นถึงจุดเด่นจุดด้อยที่แตกต่างกันสามารถสรุปดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 พฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีการทำสกีวอิ่ง

พฤติกรรมและสมรรถนะต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	$0^{\circ}$	$5^{\circ}$	$10^{\circ}$
ประสิทธิภาพ	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
คุณภาพไฟฟ้า	ไม่ดี	ปานกลาง	ดี
การเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้า	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
ระดับแรงดันไฟฟ้า	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
เวลาที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้า	มาก	ปานกลาง	น้อย
ความสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า ณ. ความเร็วรอบต่ำ	ไม่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้	ไม่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้	สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้
ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า	เท่ากัน	เท่ากัน	เท่ากัน
ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า	น้อย	ปานกลาง	มาก
ขนาดตัวเก็บประจรรวมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	น้อย	ปานกลาง	มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส แบบกระตุ้นภายในตัวเอง

### 5.1 บทนำ

การพัฒนาาระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้สามารถได้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดและรักษาสีแรงดันได้มากขึ้นเช่นกัน ผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะและพารามิเตอร์ที่สำคัญจากบทที่ผ่านมา นำไปสู่ขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมใช้งานกับพลังงานลม โดยเนื้อหาในบทนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ขนาดพิกัด 0.75 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 3.46/2.0 แอมแปร์ ( $\Delta/Y$ ) 4 ขั้วแม่เหล็ก รวมทั้งใช้ไฟในทอิลิเมนต์แบบสองมิติวิเคราะห์ผลการออกแบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ผลที่ได้รับจากการวิจัยจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาาระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

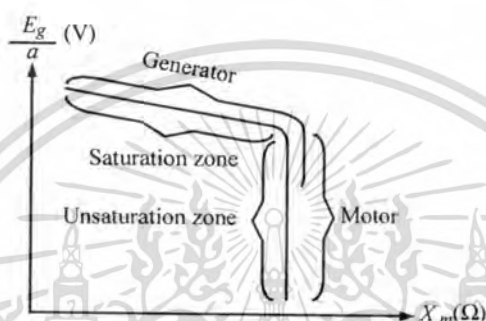
### 5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทความงานวิจัย [10] ได้นำเสนอการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในงานวิจัยไม่ได้นำผลจากการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ไปสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมทั้งไม่ได้นำเสนอรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองเช่น การทำสกีวอ็องบนโรเตอร์ การสร้างแรงดันไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ งานวิจัย [6] นำเสนอการปรับปรุงคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยในงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองเช่น ค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับนักออกแบบที่จะออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง แต่ในงานวิจัยไม่ได้มีการทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจริงจากประเด็นดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการวิจัยการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่เหมาะสมใช้งานกับพลังงานลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ทฤษฎีการออกแบบ

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้น ผู้ออกแบบควรมีความเข้าใจในหลักการงานและพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะสามารถทำให้สามารถออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองได้ บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองจะมีจุดทำงานอยู่ 2 ย่านคือย่านการทำงานแบบไม่อิ่มตัว (Un-saturation) และ ย่านอิ่มตัว (Saturation) ดังรูปที่ 2 [10, 20]



รูปที่ 5.1 ย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

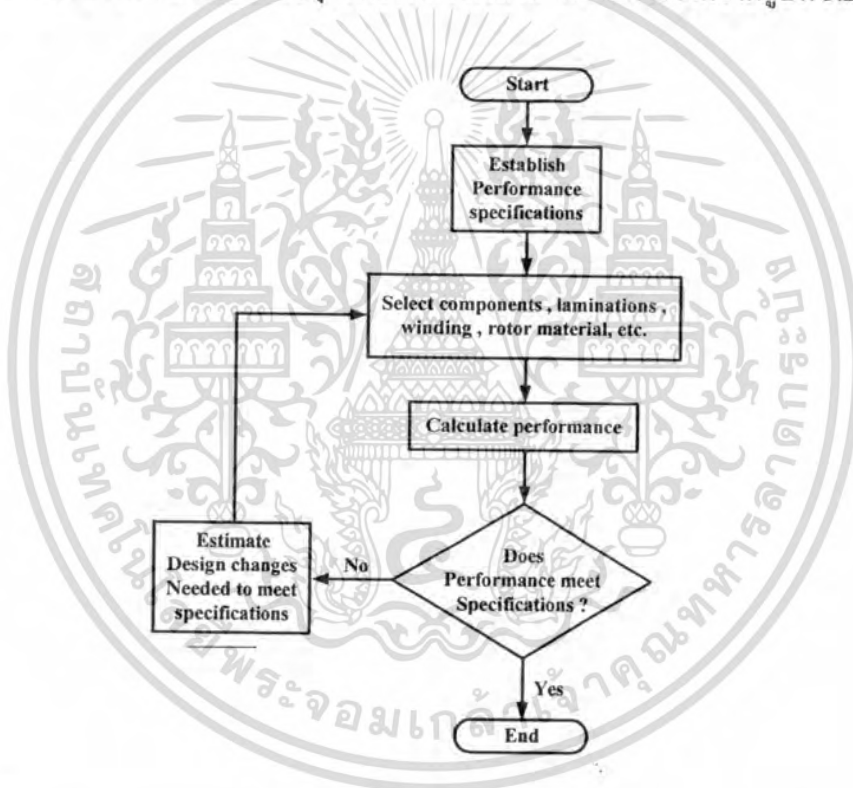
โดยคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่เหมาะสมกับประยุกต์ใช้กับพลังงานลมควรมีคุณสมบัติดังนี้ [18-20]

- ประสิทธิภาพสูง นั้นหมายความว่าปริมาณค่าความสูญเสียของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่ำ โดยค่าความสูญเสียหลักภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยค่าความสูญเสียในขดลวดและค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมมีประสิทธิภาพสูง ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น
- มีความสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า ณ. ที่ความเร็วลมต่ำ นั้นหมายความว่าความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ณ. ที่ความเร็วลมต่ำ ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น
- โวลต์เตจเรกกูเรชันต่ำ นั้นหมายความว่าถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงน้อยขณะมีภาระ ทำให้ใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าน้อยลง ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุในกรณีที่นำไปสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลม
- แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำควรมีรูปร่างสัญญาณไซน์ ซึ่งหมายความว่าคุณภาพไฟฟ้าที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความถี่ของแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อย นั้นหมายความว่าถึงระดับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงน้อยขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระ
- ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้งานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าน้อย นั้นหมายความว่าค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมต่ำ รวมทั้งมีค่าความสูญเสียในระบบต่ำอันเนื่องมาจากความสูญเสียไดอิเล็กตริกภายในตัวเก็บประจุ

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจะใช้หลักการเดียวกันกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากมีโครงสร้างหลักที่เหมือนกัน [20] รายละเอียดขั้นตอนการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

รายละเอียดโครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Main dimension) จะประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์ (Stator core) และ ความยาวของสเตเตอร์ (Stator core) ขณะเดียวกันเส้นแรงแม่เหล็กรวมในช่องว่างอากาศ (Air-gap) ทั้งหมดจะถูกเรียกว่า ผลรวมภาระแม่เหล็ก (Total magnetic loading) และค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านช่องอากาศ (Air-gap) เรียกว่า ภาระแม่เหล็กจำเพาะ (Specific magnetic loading,  $B_{av}$ ) โดยผลรวมภาระแม่เหล็ก (Total magnetic loading) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.1) [28] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Total magnetic loading} = p\phi \quad (5.1)$$

และ

$$B_{av} = \frac{p\phi}{\pi DL} \quad (5.2)$$

เมื่อ

$B_{av}$  ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องอากาศ, เทสลา

$p$  จำนวนขั้วแม่เหล็ก, ขั้ว

$\phi$  สนามแม่เหล็กต่อขั้ว, เวเบอร์

$D$  เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์, เมตร

$L$  ความยาวของสเตเตอร์, เมตร

ผลรวมของภาระทางไฟฟ้า (Specific electric loading,  $ac$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.3)-(5.4)

$$\text{Total electric loading} = I_z Z \quad (5.3)$$

และ

$$ac = \frac{I_z Z}{\pi D} \quad (5.4)$$

เมื่อ

$I_z$  กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ, แอมแปร์

$Z$  จำนวนตัวนำทั้งหมดของสเตเตอร์

โดยขั้นตอนแรกในการออกแบบต้องทราบค่า  $D^2L$  ซึ่งเป็นสัดส่วนกับปริมาตรแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการเลือกใช้ค่าภาระแม่เหล็กจำเพาะ (Specific magnetic loading,  $B_{av}$ ) และผลรวมของภาระทางไฟฟ้า (Specific electric loading,  $ac$ ) ที่เหมาะสมในการออกแบบ

### 5.3.1 สมการเข้าที่พู่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

สมการเข้าที่พู่ที่มีความสัมพันธ์กันกับเทอมของโครงสร้างหลัก (Main dimension) ภาระแม่เหล็กจำเพาะ (Specific magnetic loading,  $B_{av}$ ) ผลรวมของภาระทางไฟฟ้า (Specific electric loading,  $ac$ ) และความเร็วรอบสามารถพิจารณาดังสมการที่ (5.5)

$$S = m(\sqrt{2}\pi f \phi N_{ph} K_w)(I_{ph}) \times 10^{-3} \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$f = \frac{pn_s}{2}; I_z = I_{ph} \text{ (เมื่อคิดค่าต่อเฟส) และ } Z = 2mN_{ph}$$

ดังนั้นจัดรูปสมการที่ (5.5) ใหม่แสดงดังสมการที่ (5.6)

$$S = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} [\pi DLB_{av} ] \pi Dac ] n_s K_w \times 10^{-3} \quad (5.6)$$

$$= (1.11\pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3}) D^2 L n_s \quad (5.7)$$

$$S = C_o D^2 L n_s \quad (5.8)$$

โดย

$$C_o = 1.11\pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3} \quad (5.9)$$

เมื่อ

$S$	พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกล, เคลวีเอ
$m$	จำนวนเฟส
$f$	ความถี่, เฮิร์ตซ์
$N_{ph}$	จำนวนรอบของขดลวดที่ต่ออนุกรมต่อเฟส
$K_w$	แฟกเตอร์การพันขดลวด
$I_{ph}$	กระแสไฟฟ้าต่อเฟส, แอมแปร์
$n_s$	ความเร็วเชิงโคโรนัส, รอบต่อนาที
$a_c$	ภาระไฟฟ้าจำเพาะ
$C_o$	สัมประสิทธิ์ทางด้านเอาท์พุท

ดังนั้นหากถ้าพิจารณาออกแบบตามหลักเศรษฐศาสตร์ ควรเลือกใช้ค่า  $C_o$  ค่าสูงๆ เพราะจะทำให้ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเล็กลง ทำให้ต้นทุนในการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลง

### 5.3.2 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องว่างอากาศ

สำหรับการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้น จะต้องคำนึงถึงการเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากผลกระทบของการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กส่งผลต่อค่าความสูญเสียในแกนเหล็กให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงรวมทั้งส่งผลต่อการผิผิวของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยความหนาแน่นสูงสุดในเครื่องกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้ใช้เอกสารฉบับนี้เพื่อประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่ควรเกินย่านการอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ ซึ่งความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องว่างอากาศสามารถพิจารณาได้จากสมการ (5.10)

$$B_{av} \pi D L = B_t W_t L N_t \quad (5.10)$$

เมื่อ

- $B_{av}$  ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องว่างอากาศ, เทสลา
- $B_t$  ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่พื้น
- $W_t$  ความกว้างที่เล็กที่สุดของซี่สเตเตอร์
- $N_t$  จำนวนของร่องสเตเตอร์

โดยความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่บริเวณพื้นของร่องสลอต อัตราส่วนของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นต่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องว่างอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5-3.0 อัตราส่วนดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (5.11)

$$\frac{B_t}{B_{av}} = \frac{\pi D}{W_t N_t} \quad (5.11)$$

ในการออกแบบจะต้องหลีกเลี่ยงมิให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศสูงมากเกินไป เพราะจะทำให้ค่ากระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็กสูง ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูง โดยค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศใช้ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีพิกัดไม่เกิน 22 กิโลวัตต์ โดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.35 ถึง 0.6 T

### 5.3.3 ภาวะไฟฟ้าจำเพาะ

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น ค่าเฟลคเตอร์ที่ใช้กำหนดในการเลือกค่าภาวะไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electric loading,  $ac$ ) คือค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดจากค่าความสูญเสียในขดลวด (Copper losses) โดยค่าความสูญเสียในขดลวดเกิดจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในตัวนำเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระ ดังนั้นจึงเลือกตัวนำที่ทนความร้อนได้สูง เมื่ออุณหภูมิความร้อนได้สูงก็จะทำให้ค่าภาวะไฟฟ้าจำเพาะสูงขึ้น นอกจากนี้การออกแบบการระบายความร้อนที่ดีจะทำให้สามารถกำหนดค่าภาวะไฟฟ้าจำเพาะได้สูงขึ้น การกำหนดค่าภาวะไฟฟ้าจำเพาะสูงๆ จะส่งผลให้ค่าความสูญเสียในขดลวด (Copper losses) สูงตามไปด้วยและส่งผลให้อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าภาวะไฟฟ้าจำเพาะ ( $ac$ ) จะต้องคำนึงถึงระบบระบายความร้อนและฉนวนที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกรณีของเครื่องกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การสงวนลิขสิทธิ์โดย กอ.กส.ท. เมื่อผู้ยืมได้ทำแบบขอรับใช้เป็นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีพิกัดไม่เกิน 22 กิโลวัตต์ โดยปกติแล้วจะกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการออกแบบมีค่าอยู่ระหว่าง 8,000 - 25,000 ampere-conductors /m

### 5.3.4 จำนวนของขั้วแม่เหล็ก

จำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาจากสมการที่ (5.12)

$$p = \frac{120f}{n_s} \quad (5.12)$$

เมื่อ

$n_s$  ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน, รอบต่อนาที

### 5.3.5 โครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

หลังจากที่เลือกค่าของกระแสไฟฟ้าจำเพาะ ภาระแม่เหล็กจำเพาะ ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพและค่าสัมประสิทธิ์เอาท์พุท จะสามารถคำนวณค่าโครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (5.8) ดังนั้นเมื่อทราบค่าของโครงสร้างหลักแล้ว แพลตเตอร์ที่จะต้องนำมาพิจารณาหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว จะพิจารณาจากอัตราส่วนแอสเปค (Aspect ratio,  $L/\tau$ ) โดยระยะขั้วแม่เหล็ก (Pole pitch,  $\tau$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.13)

$$\tau = \frac{\pi D}{p} \quad (5.13)$$

โดยอัตราส่วน  $L/\tau$  อยู่ระหว่าง 1-1.25 จะให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ดีและถ้าอยู่ระหว่าง 1.5-2 จะลดราคาต้นทุนในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [10, 20] หากกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงจรมแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีขนาดใหญ่ จะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์เอาท์พุท (Output coefficient,  $C_o$ ) ให้มีค่าสูงขึ้นรวมทั้งสามารถลดค่าความสูญเสียในขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผู้ออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องมีความมั่นใจว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าตัวประกอบกำลังสูงเป็นที่น่าพอใจ นั้นหมายความว่าสามารถลดขนาดกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ใช้สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลง ทำให้ใช้ขนาดตัวเก็บประจุลดลง ซึ่งจะทำให้ลดต้นทุนในการสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม เนื่องจากราคาของตัวเก็บประจุนั้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า

### 5.3.6 ความยาวช่องว่างอากาศ

ค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะเป็นตัวสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในช่องว่างอากาศ โดยจะแปรผันตรงกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว หากออกแบบความยาวช่องว่างอากาศมีค่ามากเกินไปจะเป็นเสียสละกำลังแม่เหล็กซึ่งหมายถึงการสูญเสียพลังงานและเพิ่มต้นทุนในการคำนวณการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมทั้งส่งผลต่อตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีค่าต่ำลง ซึ่งทำให้ต้องใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่สูงขึ้น ข้อดีของความยาวช่องว่างอากาศที่มีค่ามากคือช่วยให้การระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดีขึ้น ดังนั้นในการออกแบบค่าความยาวของช่องว่างอากาศจะต้องให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ความยาวของช่องว่างอากาศสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.14)

$$I_g = 3.06 - \frac{6560}{D + 2280} \tag{5.14}$$

**5.3.7 จำนวนรอบของขดลวดทางด้านสเตเตอร์**

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศต่อเฟสจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วร่วมกับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ทำงานอยู่ในย่านอิ่มตัว (Saturation region) ทำให้ส่งผลต่อการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นของร่องสลักทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่งผลต่อค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มสูงมากขึ้น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ต่ำ นอกเหนือจากนี้ยังส่งผลต่อการผิบนองแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อภาระ ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดทางด้านสเตเตอร์เมื่อคิดผลกระทบของการทำสกีวจึงสามารถพิจารณาได้จากสมการ (5.15) [20]

$$N_{ph} = \frac{E_g}{4K_f \phi f K_w K_{sk}} \tag{5.15}$$

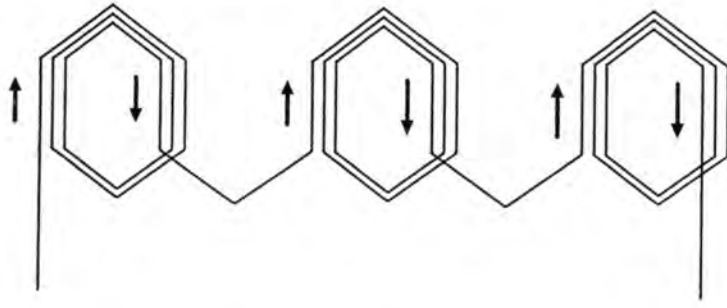
เมื่อ

- $E_g$  แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศต่อเฟส, โวลต์
- $K_f$  ค่าฟอร์มแฟคเตอร์ขึ้นอยู่กับการอิ่มตัวบริเวณพื้นมีค่า  $1.02 < K_f < 1.11$
- $K_w$  ตัวประกอบการพันขดลวด

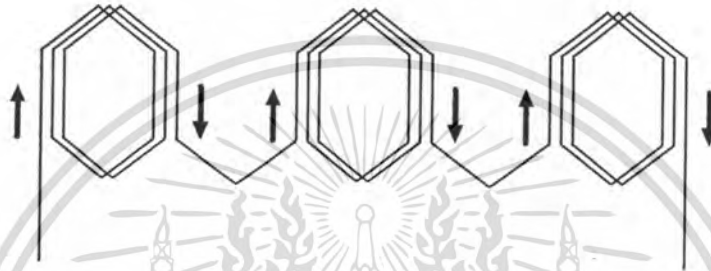
**5.3.8 การพันขดลวด**

ลักษณะของขดลวดที่ใช้ในการพันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสนั้น สามารถแบ่งแยกลักษณะการพันขดลวดออกได้เป็นหลายแบบด้วยกัน โดยการออกแบบการพันขดลวดนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นหลัก โดยการพันขดลวดทุกแบบต่างก็มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกันทุกประการดังรูป 5.3-5.5 ตามลำดับ

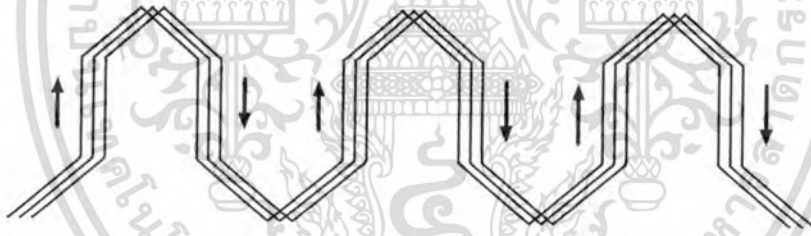
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ลักษณะของการพันขดลวดแบบ Spiral



รูปที่ 5.4 ลักษณะของการพันขดลวดแบบ Lap



รูปที่ 5.5 ลักษณะของการพันขดลวดแบบ Wave

จำนวนชั้นของขดลวดที่ได้ลงไปในแต่ละช่องของร่องสลีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือแบบชั้นเดียว (Single-layer) จะมีจำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละช่อง 1 ชั้น หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แบบครึ่งหนึ่งของขดลวด และแบบสองชั้น (Double-layer) จะมีจำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละช่อง 2 ชั้น โดยจะเห็นว่าทั้ง 2 แบบดังกล่าวต่างก็มีหลักการในการต่อขดลวดเพื่อทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกันไป

### 5.3.9 ตัวประกอบระยะขดลวด

ระยะขดลวดหมายความว่าระยะห่างระหว่างขดลวดด้านหนึ่งกับขดลวดอีกด้านหนึ่งของขดลวดเดียวกัน ระยะของขดลวดแบ่งออกเป็น 2 แบบตามตำแหน่งการวางขดลวดประกอบด้วยแบบระยะเต็ม (Full pitch) การพันขดลวดแบบระยะเต็มนั้นหมายถึงการพันขดลวดเท่ากับระยะห่างขดลวดพอดี (หรือเท่ากับจำนวนขดลวดต่อขั้ว) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างขั้วแม่เหล็ก (Pole pitch) หรือขดลวดทั้งสองด้านมีมุมห่างกัน  $180^\circ$  ทางไฟฟ้า และแบบระยะเศษส่วน (Fractional pitch) การพันขดลวดแบบเศษส่วนหมายถึงการพันขดลวดที่มีค่าเป็นเศษส่วนของแบบระยะเต็ม ความกว้างของขดลวดมีค่าน้อยกว่า  $180^\circ$  ทางไฟฟ้า โดยการพันขดลวดแบบเศษส่วน (Fractional pitch) จะนิยมกันมากกว่าเพราะว่ามีข้อดีคือประหยัดลวดทองแดงที่ใช้พัน ปรับปรุงรูปสัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงสัญญาณไซน์ กำจัดคลื่นรบกวนความถี่สูง ลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสให้มีค่าน้อยลง ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตัวประกอบระยะขดลวด (Pitch factor,  $k_p$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.16) [28-30]

$$k_p = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5.16)$$

เมื่อ

$\alpha$  มุมระหว่างขั้วแม่เหล็กกับขดลวด

### 5.3.10 ตัวประกอบการกระจาย

กรณีการพันขดลวดเฟสเดียวกันนั้น ขดลวดไม่ได้วางรวมกันอยู่ในเพียงสลิตเดียวกันเท่านั้นแต่จะมีอยู่ในหลายสลิต จำนวนขดลวดต่อเฟสจะกระจายกันอยู่และมีมุมห่างเท่าๆกัน ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละด้านของขดลวดนั้นจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ซึ่งจะแตกต่างกันโดยมุมเท่ากับมุมระยะสลิต ตัวประกอบการกระจาย (Distribution factor,  $k_d$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.17) - (5.18) [28-30]

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{q\beta}{2}\right)}{m \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (5.17)$$

เมื่อ

$q$  จำนวนสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส

และ

$$\beta = \frac{180^\circ}{\text{slot / pole}} \quad (5.18)$$

### 5.3.11 ตัวประกอบการพันขดลวด

สำหรับตัวประกอบการพันขดลวดสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะประกอบด้วยตัวประกอบการพันขดลวดทางด้านสเตเตอร์ โดยการพันขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพันขดลวดแบบเศษส่วน (Fractional pitch) ซึ่งความกว้างของขดลวดมีค่าน้อยกว่า 180 องศาทางไฟฟ้า เนื่องจากมีข้อดีดังที่กล่าวมาในข้างต้น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและคุณภาพไฟฟ้าที่ดี ดังนั้นตัวประกอบการพันขดลวดสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $K_w$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.19) [20]

$$K_w = K_d K_p \quad (5.19)$$

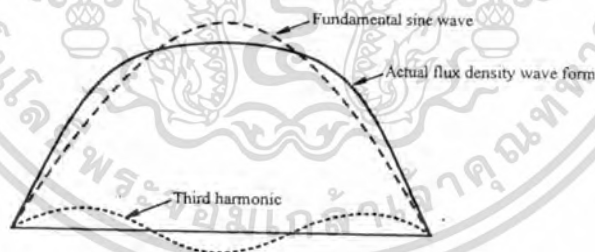
เมื่อ

$K_d$  ตัวประกอบการกระจาย

$K_p$  ตัวประกอบระยะขดลวด

### 5.3.12 เส้นแรงแม่เหล็ก

สำหรับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะพิจารณาต่อขั้วแม่เหล็ก ซึ่งจะเป็นค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ ( $B_{av}$ ) ระยะขั้วแม่เหล็ก ( $\tau$ ) และค่าความยาวจริงของแกนเหล็ก ( $L_i$ ) รวมทั้งพิจารณาเฟลคเตอร์รูปร่างของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับกำม่อมตัวของวงจรมแม่เหล็กบริเวณพื้นของร่องสลอต ผลกระทบจากการอ้อมตัวดังรูปที่ 5.6 ส่งผลต่อการบิดเบี้ยวของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการบิดเบี้ยว [20] ดังนั้นค่าของเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก ( $\phi$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.20)



รูปที่ 5.6 ผลกระทบของการอ้อมตัวที่มีต่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ

$$\phi = \alpha_i \tau L_i B_{av} \quad (5.20)$$

เมื่อ

$\phi$  เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก, เวเบอร์

$B_{av}$  ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, เทสลา

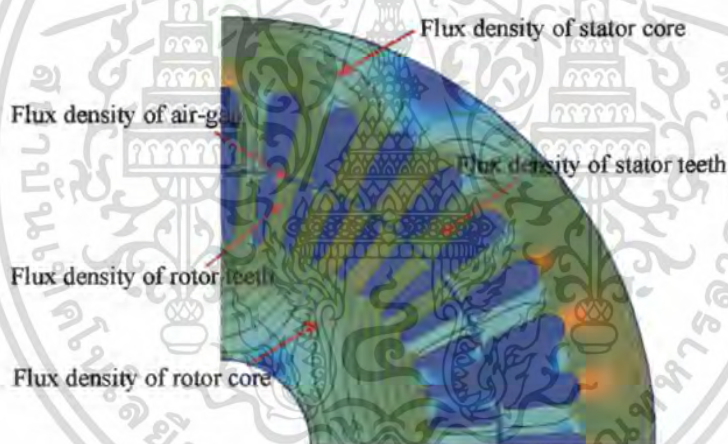
$L_i$  ความยาวจริงของแกนเหล็ก, เมตร

$\alpha_i$  เฟลคเตอร์รูปร่างของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับกำม่อมตัวของวงจรมแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.13 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก

ลักษณะของวงจรแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กส่วนต่างๆ ได้แก่ ช่องว่างอากาศ (Air-gap) ฟันโรเตอร์ (Rotor teeth) แกนโรเตอร์ (Rotor core) ฟันสเตเตอร์ (Stator teeth) และแกนสเตเตอร์ (Stator core) โดยการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งในการออกแบบคือการเกิดการอิ่มตัวของวงจรแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง เนื่องจากผลกระทบของการอิ่มตัวของวงจรแม่เหล็กดังกล่าวจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก ซึ่งจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ต่ำ ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยลง นอกเหนือจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการบิดเบี้ยวจากสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของภาระทางไฟฟ้า โดยรายละเอียดของเนื้อหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากหัวข้อดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.7 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### 5.3.13.1 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณฟันสเตเตอร์

ขนาดของร่องสลิตสเตเตอร์จะเป็นตัวกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของฟันของร่องสลิต การที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในฟันร่องสลิตสูงจะทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าสูงตามไปด้วย ดังนั้นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยที่ฟันสเตเตอร์ควรจะมีค่าไม่เกิน 1.7 Tesla หรือค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กที่เลือกใช้ ดังนั้นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในฟันสเตเตอร์ ( $B_s$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.21) [20, 30, 34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_{cs} = \frac{\phi}{\frac{N_1}{p} \times L_i \times b_{cs}} \quad (5.21)$$

เมื่อ

- $N_1$  จำนวนร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์  
 $L_i$  ความยาวสุทธิแกนเหล็กสำหรับแผ่นเหล็กลามิเนตอัดซ้อนกัน  
 $b_{cs}$  ความกว้างของฟันสเตเตอร์

### 5.3.13.2 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กแกนสเตเตอร์

จากรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นถึงลักษณะเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์ โดยจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กสเตเตอร์ควรจะมีค่าไม่เกิน 1.5 Tesla ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.2-1.4 Tesla ดังนั้นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กสเตเตอร์ ( $B_{cs}$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.22) [20, 30, 34]

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2 \times L_i \times d_{cs}} \quad (5.22)$$

เมื่อ

- $d_{cs}$  ความลึกของแกนเหล็กสเตเตอร์

### 5.3.13.3 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณฟันโรเตอร์

ขนาดความกว้างของร่องสลิตทางด้านโรเตอร์นั้น ควรจะมีค่าที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของฟันโรเตอร์มีค่าสูงเกินกว่า 1.7 Tesla ดังนั้นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในฟันโรเตอร์ ( $B_r$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.23) [20, 30, 34]

$$B_r = \frac{\phi}{\frac{N_2}{p} \times L_i \times b_r} \quad (5.23)$$

เมื่อ

- $N_2$  จำนวนร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์  
 $b_r$  ความกว้างของฟันโรเตอร์

### 5.3.13.4 ความหนาแน่นสร้างเส้นแรงแม่เหล็กแกนโรเตอร์

สำหรับการพิจารณาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กทางด้านโรเตอร์นั้น โดยทั่วไปจะออกแบบให้มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์เป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตเตอร์ ดังนั้นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กทางด้านโรเตอร์ ( $B_{cr}$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.24) [20, 30, 34]

$$B_{cr} = \frac{\phi}{2 \times L_i \times h_{or}} \quad (5.24)$$

เมื่อ

$h_{or}$  ความลึกของแกนเหล็กของโรเตอร์

### 5.3.14 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ ฟลักซ์ของร่องสลิตสเตเตอร์และโรเตอร์และแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.25) รายละเอียดแรงเคลื่อนแม่เหล็กส่วนต่างๆสามารถพิจารณาได้จากหัวข้อถัดไป [30]

$$AT_p = AT_g + AT_{ls} + AT_{rc} + AT_{cs} + AT_{cr} \quad (5.25)$$

#### 5.3.14.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ

สำหรับขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กบริเวณช่องว่างอากาศนั้น สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.26)

$$AT_g = \frac{1.36 B_{av} l_g K_g}{\mu_o} \quad (5.26)$$

เมื่อ

$K_g$  ตัวประกอบสำหรับปรับปรุงช่องว่างอากาศ

#### 5.3.14.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ฟันสเตเตอร์

สำหรับขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กบริเวณฟันสเตตอร์นั้น สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.27)

$$AT_{ls} = H_{ls} \times d_{ss} \quad (5.27)$$

เมื่อ

$H_{ls}$  ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฟันสเตเตอร์

$d_{ss}$  ความลึกของร่องสลิตสเตเตอร์, เมตร

#### 5.3.14.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ฟันโรเตอร์

สำหรับขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ฟันโรตอร์นั้น สามารถพิจารณาได้จากสมการที่

(5.28) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AT_{lr} = H_{lr} \times d_{sr} \quad (5.28)$$

เมื่อ

$H_{lr}$  ความเข้มสนามแม่เหล็กที่พื้นโรเตอร์

$d_{sr}$  ความลึกของร่องสลอตโรเตอร์, เมตร

#### 5.3.14.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์

สำหรับขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์นั้น สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.29)

$$AT_{cs} = H_{cs} \times l_{cs} \quad (5.29)$$

เมื่อ

$H_{cs}$  ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แกนสเตเตอร์

$l_{cs}$  ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์, เมตร

โดยการคำนวณแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังกล่าวจำเป็นต้องทราบค่าความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.30)

$$l_{cs} = \frac{\pi(D + 2d_{ss} + d_{cs})}{2p} \quad (5.30)$$

#### 5.3.14.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แกนเหล็กทางด้านโรเตอร์

สำหรับขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แกนเหล็กทางด้านโรเตอร์นั้น สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.31)

$$AT_{cr} = H_{cr} \times l_{cr} \quad (5.31)$$

เมื่อ

$H_{cr}$  ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แกนสเตเตอร์

$l_{cr}$  ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์, เมตร

โดยการคำนวณแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังกล่าวจำเป็นต้องทราบค่าความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็กทางด้านโรเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.32)

$$l_{cr} = \frac{\pi(D_r - 2d_{sr} - d_{cr})}{2p} \quad (5.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.33)

$$D_r = D - 2l_g \quad (5.33)$$

เมื่อ

$D_r$ , เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์, เมตร

### 5.3.15 กระแสไฟฟ้าและขนาดตัวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สำหรับกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (No-load current,  $I_o$ ) นั้นจะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้า 2 ส่วนคือกระแสไฟฟ้ากระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing current,  $I_m$ ) ที่มีมุมห่างเฟสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $90^\circ$  และกระแสไฟฟ้าของค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (Core loss current,  $I_{core}$ ) ที่มีมุมเฟสตรงกันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังสมการที่ (5.34) [30]

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_{core}^2} \quad (5.34)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้ากระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นมีความสำคัญต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากหากกระแสไฟฟ้ากระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กมีค่าสูงเกินไป จะส่งผลต่อขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงมากขึ้น ขนาดของกระแสไฟฟ้ากระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.35)

$$I_m = \frac{0.427 pAT_p}{N_s K_w} \quad (5.35)$$

เมื่อ

$AT_p$ , แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ขณะเดียวกันค่าแมกนีไตซิงรีแอกแตนซ์ (Magnetizing reactance,  $X_m$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.36)

$$X_m = \frac{E_g}{I_m} \quad (5.36)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าของค่าความสูญเสียของแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากหากค่ากระแสไฟฟ้าของค่าความสูญเสียของแกนเหล็กมีค่าสูงเกินไป จะส่งผลทำให้ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูญเสียของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์มีค่ามากขึ้นรวมทั้งเกิดการอิมตัวบริเวณพื้น ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการผิดเพี้ยน ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถคำนวณจากผลคูณของค่าความสูญเสียแกนเหล็กกับน้ำหนักของแกนเหล็ก ขนาดของกระแสไฟฟ้าของค่าความสูญเสียของแกนเหล็กสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.37)

$$I_{core} = \frac{P_c}{3E_g} \quad (5.37)$$

เมื่อ

$P_c$  ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก, วัตต์

ขณะเดียวกันค่าความต้านทานของแกนเหล็ก (Core losses resistance,  $R_c$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.38)

$$R_c = \frac{E_g}{I_{core}} \quad (5.38)$$

ขณะเดียวกันค่ากระแสไฟฟ้าขณะมีภาระที่พิกัดทางด้านสเตเตอร์ (On-load current,  $I_g$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.39)

$$I_g = \frac{P_o}{3\eta V_s \cos \phi} \quad (5.39)$$

ขนาดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของขดลวดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3-6 A/mm<sup>2</sup> ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ได้จากสมการที่ (5.40) [30]

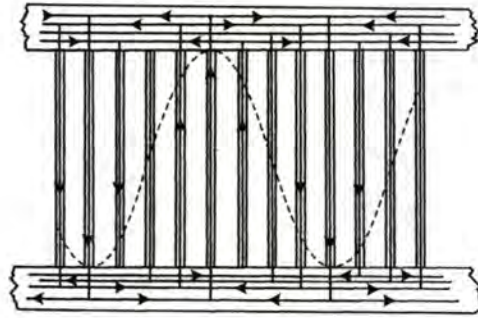
$$a_s = \frac{I_g}{\delta_s} \quad (5.40)$$

เมื่อ

$\delta_s$  ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของขดลวดทางด้านสเตเตอร์, แอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร

สำหรับกระแสไฟฟ้าทางด้าน โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแท่งตัวนำและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนเชื่อมต่องดรูปที่ 5.8 การไหลของกระแสไฟฟ้าในแท่งตัวนำจะแบ่งการไหลออกเป็น 2 ส่วนครึ่งหนึ่งจะไหลผ่านแท่งตัวนำและระยะขั้วแม่เหล็กไปทางขวา ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะไหลผ่านแท่งตัวนำและระยะขั้วแม่เหล็กไปทางซ้าย โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแท่งตัวนำ ( $I_b$ ) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.41) [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การไหลของกระแสไฟฟ้าในแท่งตัวนำและวงแหวนเชื่อมต่อ

$$I_b = \frac{2mK_w N_s}{N_2} I_g \cos \phi \tag{5.41}$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวนำที่ฝังในร่องสลิตทางด้านโรเตอร์ได้จากสมการที่ (5.42)

$$a_b = \frac{I_b}{\delta_b} \tag{5.42}$$

เมื่อ

$\delta_b$  ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของแท่งตัวนำ

ขณะเดียวกันขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนเชื่อม ( $I_{er}$ ) ต่อสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.43)

$$I_{er} = \frac{N_2 I_b}{\pi p} \tag{5.43}$$

โดยปกติแล้วกระแสไฟฟ้าที่วงแหวนเชื่อมต่อจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแท่งตัวนำหรืออาจจะมากกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจะเลือกความหนาของวงแหวนเชื่อมต่อเพื่อให้ค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์มีค่าต่ำ โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตจะใช้ขนาดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงแหวนเชื่อมต่อจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2-6 A/mm<sup>2</sup> ดังนั้นขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนเชื่อมต่อสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.44) โดยแท่งตัวนำและวงแหวนเชื่อมต่อที่นำมาสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้ลูมิเนียมเคลวกลัดขึ้นรูปในร่องสลิต

$$a_{er} = \frac{I_{er}}{\delta_{er}} \tag{5.44}$$

เมื่อ

$\delta_{er}$  ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของวงแหวนเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการฝึกอบรมเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.16 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สำหรับพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะประกอบด้วยค่าความต้านทานและลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะบ่งบอกถึงคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเช่น ค่าความต้านทานโรเตอร์จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์จะส่งผลต่อขนาดตัวเก็บประจุ ผู้ที่จะออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการจำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รายละเอียดของพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 5.3.16.1 ความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นเกิดจากขดลวดทองแดงซึ่งพันอยู่ในร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การหาค่าความยาวโดยประมาณของขดลวดทองแดงที่พันอยู่ในร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.45) [30]

$$L_{ms} = 2L + 2.3\tau \quad (5.45)$$

เมื่อ

$L_{ms}$  ความยาวเฉลี่ยของขดลวด

การหาค่าความต้านทานต่อเฟสทางด้านสเตเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.46)

$$R_1 = \frac{\rho N_s L_{ms}}{a_s \times 10^{-6}} \quad (5.46)$$

เมื่อ

$a_s$  พื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดง, มิลลิเมตร

$\rho$  ความนำไฟฟ้าของวัสดุ, โอห์ม-เมตร

ขณะเดียวกันค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วยค่าความต้านทานสองส่วนประกอบด้วยค่าความต้านทานของแท่งตัวนำ ( $r_b$ ) และค่าความต้านทานของวงแหวนเชื่อมต่อ ( $r_{er}$ ) เมื่อคิดค่าความต้านทานทั้งหมดบนโรเตอร์ของแท่งตัวนำซึ่งฝังไว้ในร่องสลิตทางด้านโรเตอร์ ( $N_2$ ) ดังนั้นค่าความต้านทานของแท่งตัวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.47)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_b = N_2 \frac{\rho L_b}{a_b} \quad (5.47)$$

เมื่อ

$L_b$  ความยาวของแท่งตัวนำ, เมตร

$a_b$  พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวนำ, ตารางเมตร

$N_2$  จำนวนร่องสลิตทางด้านโรเตอร์

ส่วนค่าความต้านทานของวงแหวนเชื่อมต่อคือค่าความต้านทานของตัวนำรูปวงแหวนที่ใช้สำหรับลัดวงจรด้านหัวและด้านท้ายของแท่งตัวนำ (Rotor bar) สามารถหาได้จากสมการที่ (5.48)

$$r_{er} = 2 \frac{\rho \pi D_{er}}{a_{er}} \quad (5.48)$$

เมื่อ

$D_{er}$  เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวงแหวนเชื่อมต่อ, เมตร

$a_{er}$  พื้นที่หน้าตัดของวงแหวนเชื่อมต่อ, ตารางเมตร

ค่าความต้านทานของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.49)

$$R_2 = \rho N_2 \left[ \frac{L_b}{N_2 a_b} + \frac{2D_{er}}{\pi \rho^2 a_{er}} \right] \quad (5.49)$$

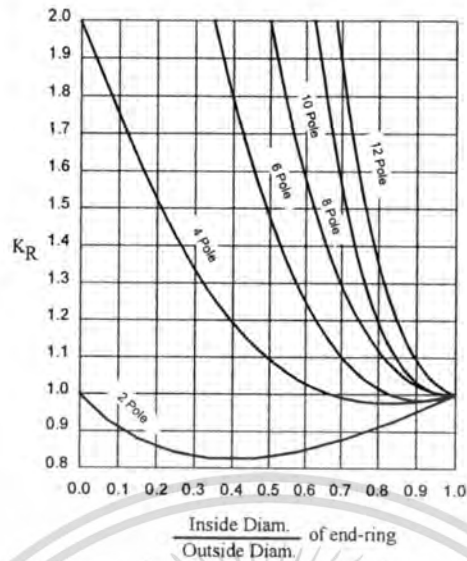
ดังนั้นค่าความต้านทานของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่ออ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ โดยคิดผลกระทบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลกระจายอย่างไม่เป็นรูปแบบ (Non-uniform) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.50) โดยค่าของตัวประกอบวงแหวนเชื่อมต่อ ( $K_R$ ) สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.9 [30]

$$R_2 = 12 N_s^2 \rho K_w^2 \left[ \frac{L_b}{N_2 a_b} + \frac{2D_{er}}{\pi \rho^2 a_{er}} K_R \right] \quad (5.50)$$

เมื่อ

$K_R$  ตัวประกอบวงแหวนเชื่อมต่อ

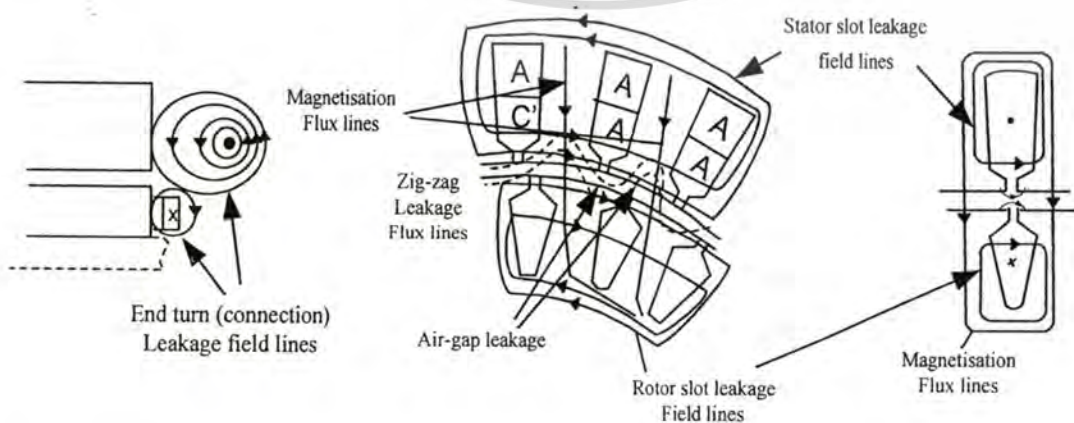
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



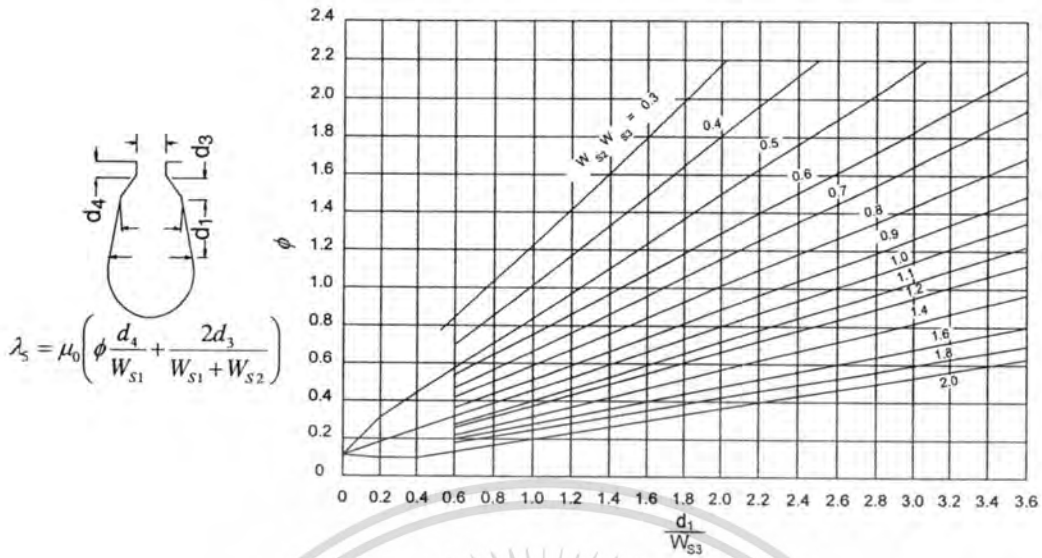
รูปที่ 5.9 ตัวประกอบวงแหวนเชื่อมต่อ

5.3.16.2 ลิกเกจรแอกเต้นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ลิกเกจรแอกเต้นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลตลอดความยาวและพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก สำหรับลิกเกจรแอกเต้นซ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วยลิกเกจรแอกเต้นซ์ของร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ (Stator slot leakage reactance) ลิกเกจรแอกเต้นซ์ของร่องสลิตทางด้านโรเตอร์ (Rotor slot leakage reactance) ซิกแซกลิกเกจรแอกเต้นซ์ (Zig-zag leakage reactance) โอเวอร์แฮงลิกเกจรแอกเต้นซ์ (Overhang leakage reactance) และสกีวลิกเกจรแอกเต้นซ์ (Skew leakage reactance) ดังรายละเอียดดังรูปที่ 5.10 [34] โดยขนาดลิกเกจรแอกเต้นซ์ของสลิตนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความลึกต่อความกว้างของร่องสลิต ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความนำแม่เหล็ก (Permeance coefficient)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.10 ลิกเกจรแอกเต้นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 สัมประสิทธิ์ค่าความนำแม่เหล็กของร่องสลิต

ดังรูปที่ 5.11 จะใช้อ้างอิงในการคำนวณ ค่าของลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้าน โรเตอร์ (Rotor leakage reactance) เมื่ออ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.51) [30]

$$\lambda_s = \lambda_{ss} + \lambda_{sr} \frac{K_{ws}^2 N_1}{K_{wr}^2 N_2} \tag{5.51}$$

เมื่อ

- $\lambda_{ss}$  สัมประสิทธิ์ค่าความนำแม่เหล็กของร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์
- $\lambda_{sr}$  สัมประสิทธิ์ค่าความนำแม่เหล็กของร่องสลิตทางด้านโรเตอร์

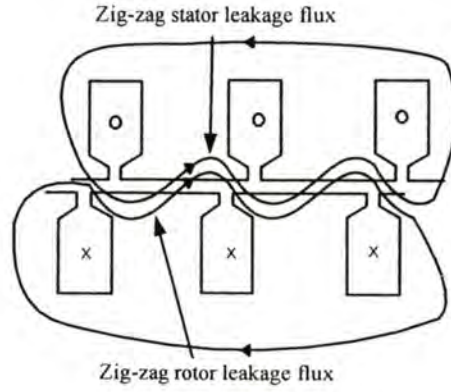
ค่าของลิกเกจรีแอกแตนซ์รวมต่อเฟสของร่องสลิตนั้น สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.52)

$$X_s = \frac{8\pi f N_s^2 L}{pq} \lambda_s \tag{5.52}$$

ซิกแซกลิกเกจรีแอกแตนซ์ (Zig-zag leakage reactance,  $X_z$ ) เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายอยู่บริเวณพื้นของร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ดังรูปที่ 5.12 [34] ค่าดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.53) - (5.54)

$$X_z = \frac{8\pi f N_s^2 L}{pq} \lambda_z \tag{5.53}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลแบบซิกแซก

โดย

$$\lambda_s = \mu_o \frac{b_{is} b_{ir} (b_{is}^2 + b_{ir}^2)}{12 l_g \tau_s^2 \tau_r^2} \tag{5.54}$$

เมื่อ

- $b_{is}$  ความกว้างของฟันสเตเตอร์, เมตร
- $b_{ir}$  ความกว้างของฟันโรเตอร์, เมตร
- $\tau_s$  ระยะสลอตที่สเตเตอร์, เมตร
- $\tau_r$  ระยะสลอตที่โรเตอร์, เมตร

สำหรับ โอเวอร์แสงค์ลิกเกจรีแอกเต็นซ์ (Overhang leakage reactance,  $X_o$ ) หมายถึง ลิกเกจรีแอกเต็นซ์ที่เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่เหนี่ยวนำบริเวณปลายของขดลวดทั้งสอง ด้านดังรูปที่ 5.13 [34] ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระยะของขดลวด ดังนั้นในการคำนวณจะต้องใช้ตัวประกอบ โอเวอร์แสงค์ (Overhang factor) ดังรูปที่ 5.14 [30] ร่วมในการคำนวณค่าโอเวอร์แสงค์ลิกเกจรีแอกเต็นซ์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.55) - (5.56)

$$X_o = \frac{8\pi f N_s^2 L_o}{pq} \lambda_o \tag{5.55}$$

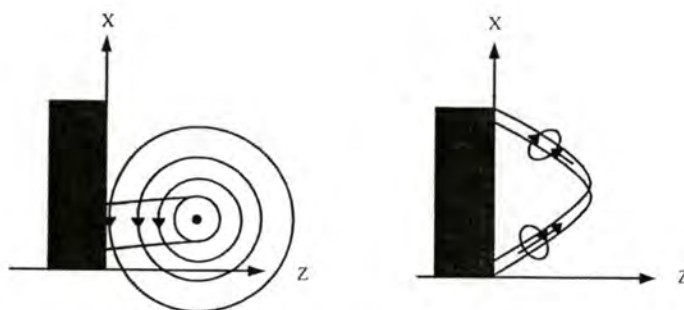
โดย

$$\lambda_o = \mu_o \frac{K_o \tau^2}{\pi L_o \tau_s^2} \tag{5.56}$$

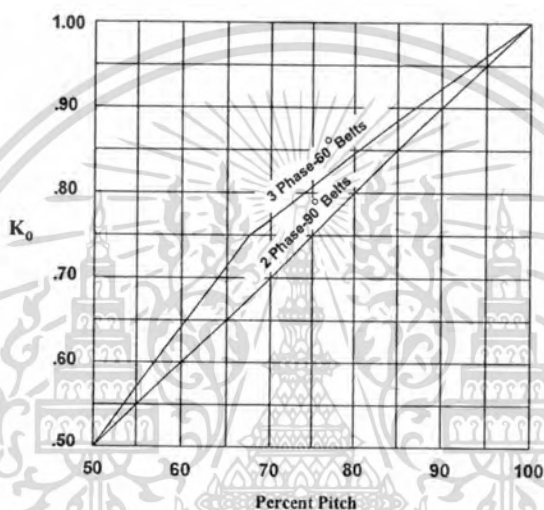
เมื่อ

- $\lambda_o$  สัมประสิทธิ์ความนำแม่เหล็กโอเวอร์แสงค์ (Overhang permeance coefficient)
- $K_o$  ตัวประกอบโอเวอร์แสงค์ (Overhang factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

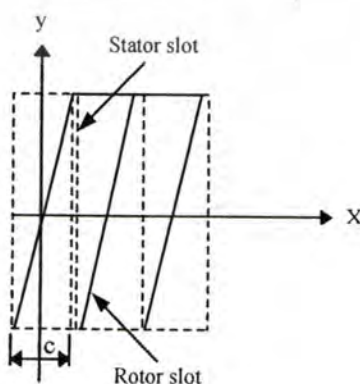


รูปที่ 5.13 ลีกลีเกอริแอกเต็นซ์ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายของขดลวดทั้งสองด้าน



รูปที่ 5.14 ตัวประกอบโอเวอร์แสกต์

สกีวลีกลีเกอริแอกเต็นซ์ (Skew leakage reactance,  $X_{sk}$ ) คือลีกลีเกอริแอกเต็นซ์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการฝังแท่งตัวนำที่โรเตอร์เรียงทำมุมกับร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์ดังรูปที่ 5.15 [34] ค่าดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.57) [30]



รูปที่ 5.15 การทำสกีวอินบน โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

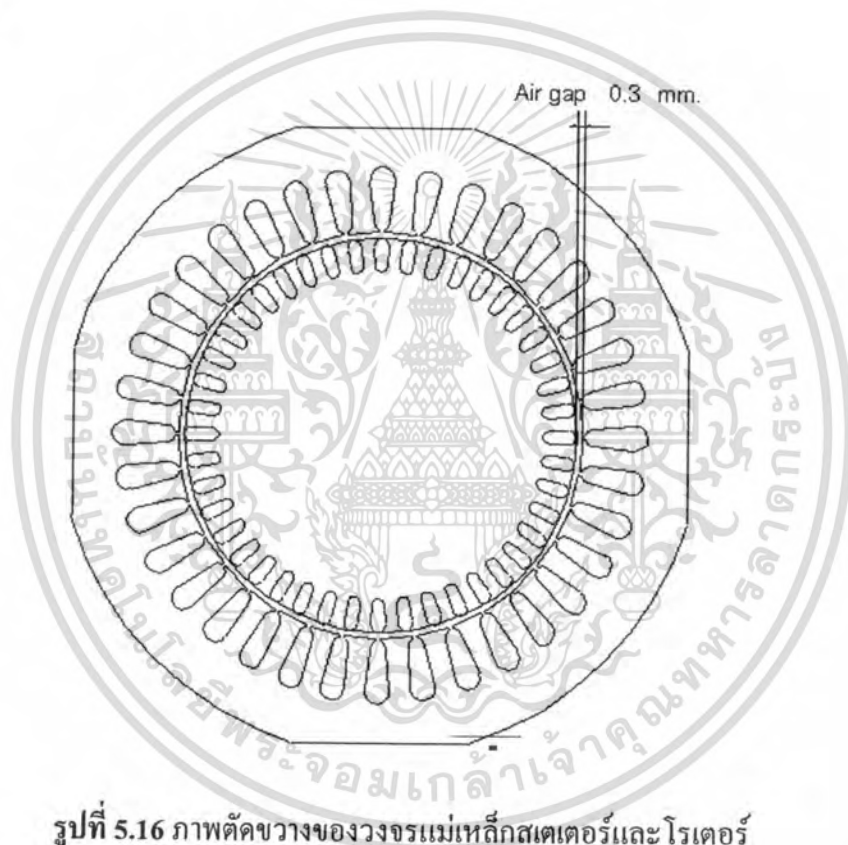
$$X_{st} = \frac{X_m \alpha^2}{12} \quad (5.57)$$

เมื่อ

$\alpha$  มุมองศาของการเอียงร่องสลิต, เรเดียน

$X_m$  แมกนีโตซิงรีแอกแตนซ์, โอห์ม

สำหรับรายละเอียดของการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.16 - 5.17 และตารางที่ 5.1 ใช้แกนเหล็กชนิด B50A600 ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 0.75 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 3.46/2.0 แอมแปร์ ( $\Delta/Y$ ) 4 ขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 5.16 ภาพตัดขวางของวงจรมแม่เหล็กสเตเตอร์และโรเตอร์



รูปที่ 5.17 (ก) สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ



รูปที่ 5.17 (ข) โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ

รูปที่ 5.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

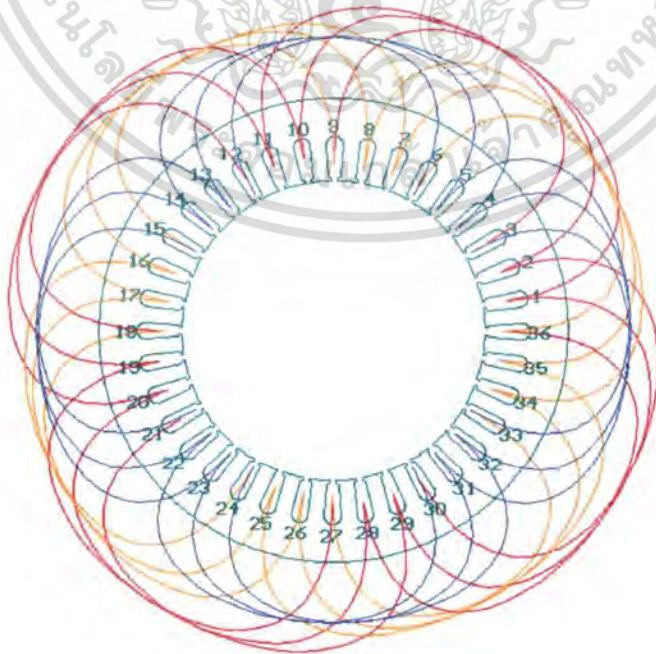
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Output power (kW)	0.75	Distribution factor	0.959
Phase voltage (V)	220	Skew angle	10°
Phase current (A)	2	Winding factor	0.935
Number of phase (Phase)	3	Flux density shape factor	0.729
Frequency (Hz)	50	Form factor	1.08
Number of poles (Pole)	4	Slot fill factor	0.4
Insulation class	F	Stator outer diameter (mm)	156
Flux per pole (mWb)	3.2	Stator inner diameter (mm)	100
Number of stator turn per phase (Turns)	352	Stator tooth width (mm)	5
Stator current density (A/mm <sup>2</sup> )	5	Stator slot depth (mm)	15
Rotor current density (A/mm <sup>2</sup> )	2	Stator core depth (mm)	16.5
Number of layer	2	Stator slot depth (mm)	15
Slot/pole/phase	3	Stator slot type	Rounded semiclosed
Number of stator slot (slots)	36	Rotor outer diameter (mm)	99
Number of rotor slot (slots)	44	Rotor tooth width (mm)	3.5
Air - gap length (mm)	0.3	Rotor slot depth (mm)	12
Nett iron core length (mm)	77.4	Shaft diameter (mm)	32
Pole pitch (mm)	78.3	Rotor slot type	Trapezoidal
Aspect ratio	1.04	End ring outer diameter (mm)	97
Pitch factor	0.99	End ring inner diameter (mm)	60

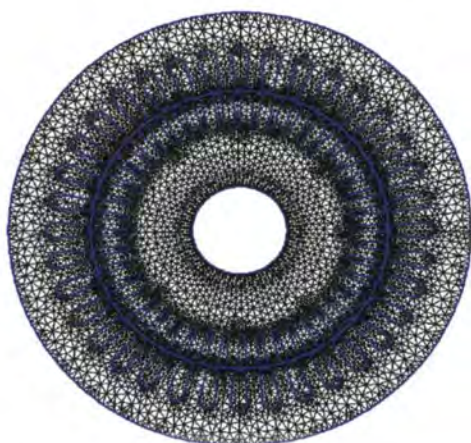
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การวิเคราะห์การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์

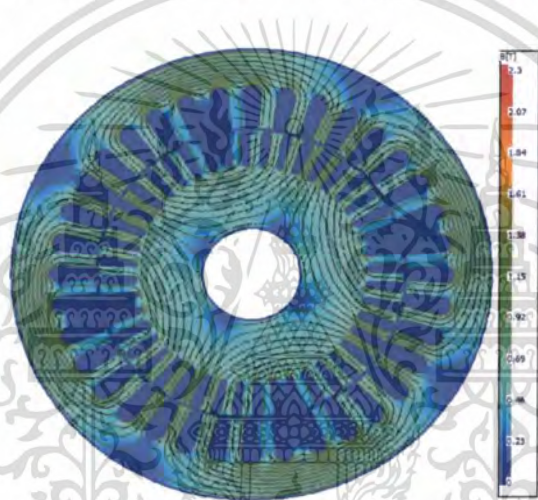
การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้บรรลุวัตถุประสงค์นั้นจะใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์ (SPEED PC-FEA) [38] ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ พารามิเตอร์ และค่าความสูญเสียของแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ออกแบบดังรูปที่ 5.18-5.22 โดยรูปที่ 5.18 แสดงการพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยมีการพันขดลวดแบบสองชั้น จำนวนขดลวดทางด้านสเตเตอร์ 352 รอบต่อเฟส และรูปที่ 5.19 แสดงโครงสร้างสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่วิเคราะห์โดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์มีจำนวน โหนดและอิลิเมนต์ทั้งหมด 17,692 และ 34,608 ตามลำดับ สอดคล้องกับรูปที่ 5.20-5.21 แสดงการใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์สองมิติในการวิเคราะห์ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและเวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ออกแบบ จะเห็นได้ว่าหากปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยเกินไป จะส่งผลต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้ไม่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ ในทางกลับกันปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นโรเตอร์มีค่าสูงเกินไปจะส่งผลต่อค่าความสูญเสียแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นโรเตอร์มีค่า 1.14 Tesla ซึ่งมีค่าไม่เกิน 1.7 Tesla ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กชนิด B50A600



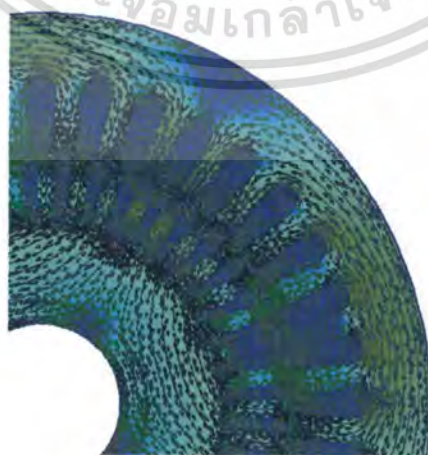
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 5.18 การพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 โหนดและอิลิเมนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.20 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ



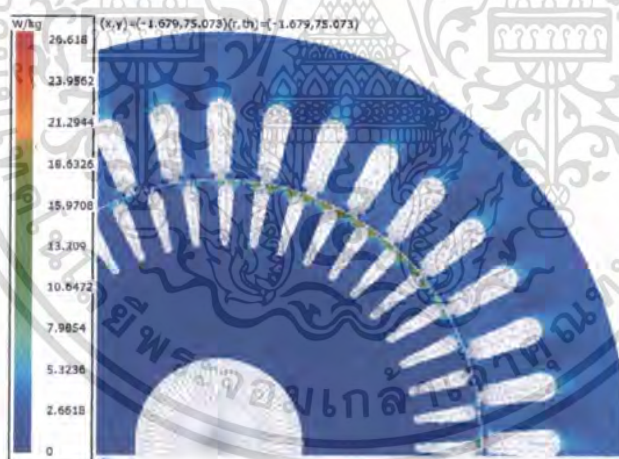
รูปที่ 5.21 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและเวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็น **เหนี่ยวนำที่ออกแบบ** วิชาการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้ไฟในทอติเมนต์คำนวณ

ชนิด	R1	R2	X1	X2	Xm
ออกแบบ	6.13 Ω	3.48 Ω	7.83 Ω	7.68 Ω	172.39 Ω

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยใช้ไฟในทอติเมนต์แบบสองมิติ รูปที่ 5.22 แสดงผลการใช้ไฟในทอติเมนต์วิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยค่าความสูญเสียของแกนเหล็กประกอบด้วยค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิสและค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนแสดงดังตารางที่ 5.3 ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนจะมีค่ามากกว่าค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิส ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กมาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กจึงควรเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงๆ ( $\rho$ ) มาออกแบบเพื่อลดค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ผลที่ได้ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น



รูปที่ 5.22 ความสูญเสียของแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ

ตารางที่ 5.3 ค่าความสูญเสียแกนเหล็กเมื่อใช้ไฟในทอติเมนต์คำนวณ

Core losses	Stator core (W)	Rotor core (W)
Hysteresis losses	10.4	4.5
Eddy current losses	13.2	5.8
<b>Total losses</b>	<b>23.6</b>	<b>10.3</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับโครงการใช้ในงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 การทดสอบ

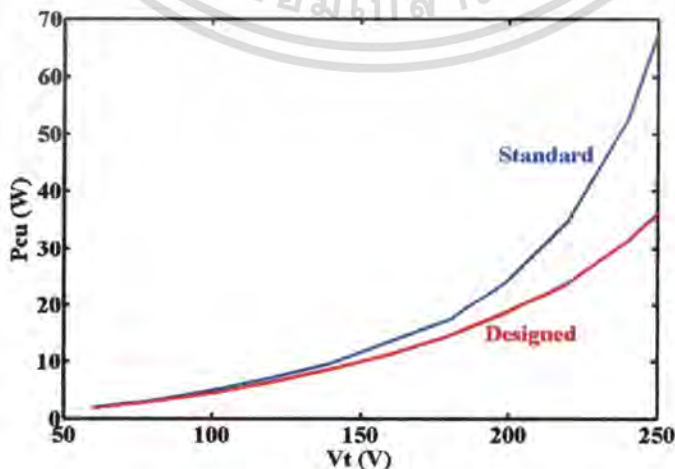
สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นจะมีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและค่าสูญเสียรวมทั้งการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงาน

### 5.5.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์และค่าความสูญเสีย

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้มาตรฐานการทดสอบอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 112-2004 Method F-F1 [37] เนื่องจากการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าวสามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณปริมาณค่าความสูญเสียในส่วนต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ประกอบด้วย การทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-load test) การทดสอบบล็อกโรเตอร์ (Blocked rotor test) การทดสอบโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC test) การทดสอบหาแรงเสียดทานและแรงลมประทะ (Friction and Windage test) พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 112-2004 Method F-F1 แสดงดังตารางที่ 5.4 โดยค่าที่ทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์ลิเมนต์แบบสองมิติ สามารถพิจารณาผลการทดสอบดังรูปที่ 5.23-5.39

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

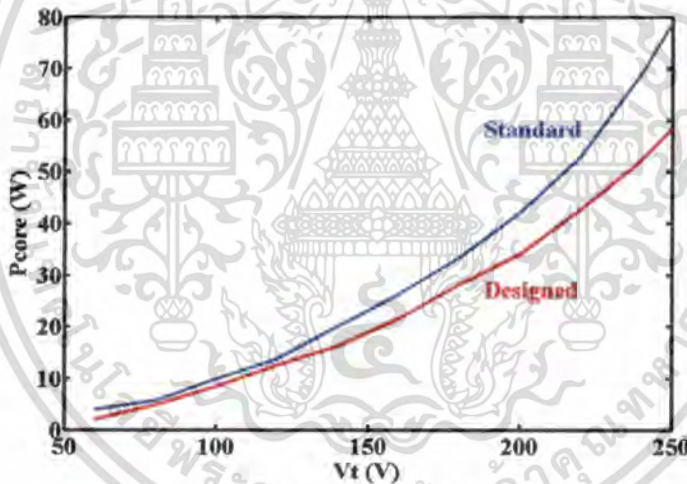
ชนิด	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
แบบมาตรฐาน	10.4	13.8	14.27	14.27	189.76
ออกแบบ	6.77	3.76	8.56	8.56	176.20



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียในขดลวดทางด้านสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียในขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและที่ออกแบบ อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ IEEE 112-2004 จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีค่าความสูญเสียของขดลวดทางด้านสเตตอร์น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบมีค่าความต้านทานทางด้านสเตตอร์น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานนั่นเอง รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและที่ออกแบบ จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากในการออกแบบคำนึงถึงค่าความสูญเสียในแกนเหล็กรวมทั้งลดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นสเตเตอร์และ โรเตอร์ ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับการใช้ไฟในที่อิลิมินต์แบบสองมิติในการวิเคราะห์ปริมาณค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

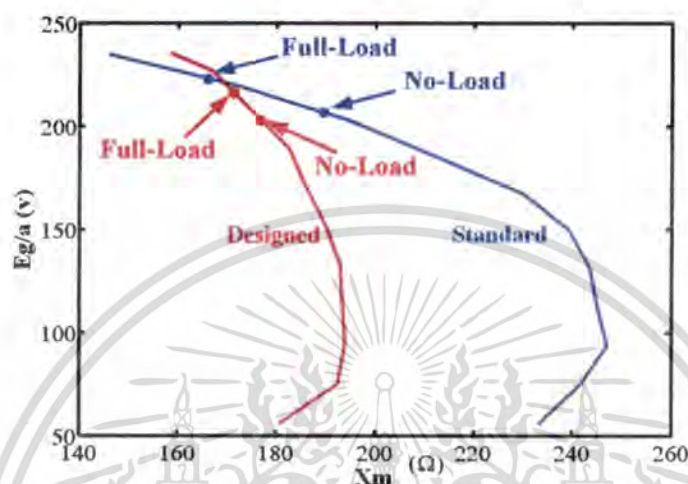


รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศกับแมกนีโตซิงรีแอกเต็นซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและที่ออกแบบ โดยการทดสอบแบบซิงโครนัส (Synchronous test) จะเห็นได้ว่าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ (Air-gap voltage) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าแมกนีโตซิงรีแอกเต็นซ์มีค่าลดลง นั่นหมายความว่าปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนจากย่านไม่อิ่มตัว (Un-saturation region) ไปยังย่านอิ่มตัว (Saturation) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีการเปลี่ยนแปลงย่านการทำงานดังกล่าวน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กน้อยกว่า  
 นั่นเอง รวมทั้งมีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ (Voltage regulation) นอกเหนือจากนี้ยังมีคุณภาพไฟฟ้า  
 (Power quality) ที่ดีกว่า ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบมีความสามารถผลิตพลังงาน  
 ไฟฟ้าได้มากขึ้น

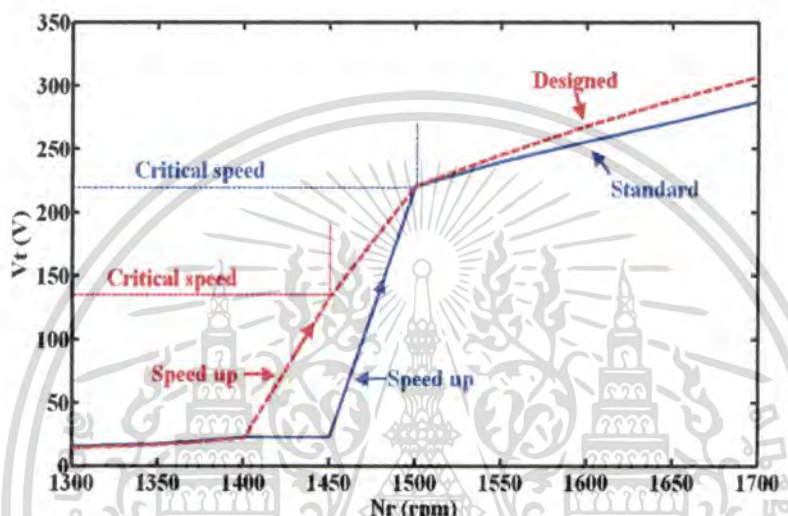


รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศกับ  
 แมกนีไทซ์รีแอกแตนซ์

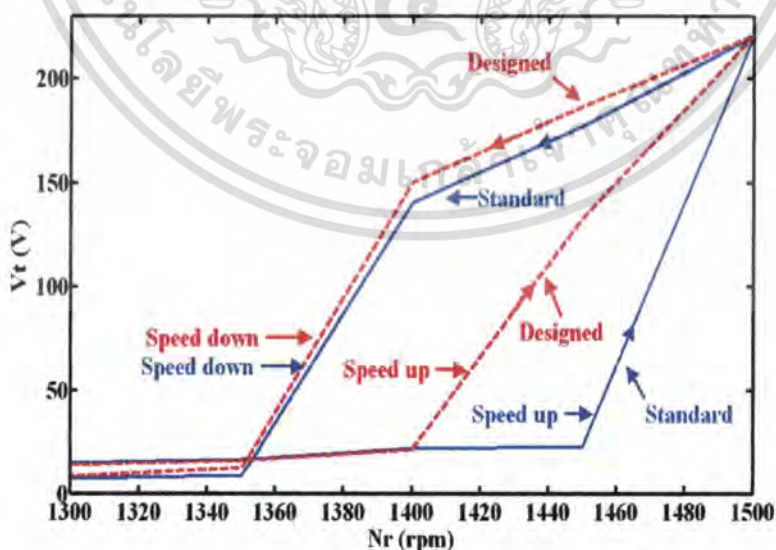
### 5.5.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงาน

สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานจะประกอบด้วยการทดสอบ  
 ขณะไม่มีภาระและขณะมีภาระ โดยการทดสอบขณะมีภาระจะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ  
 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความเร็วให้คงที่ 220 โวลต์ 1500 รอบต่อนาที ใช้แทนทดสอบของ  
 บริษัท Siemens ร่วมกับการใช้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drive) เป็นต้นกำลัง  
 สำหรับขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยมี Torque and Speed detectors สำหรับทดสอบ  
 สมรรถนะ ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสตาร์และใช้ภาระแบบความต้านทานและความ  
 ต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำในการทดสอบ ผลการทดสอบสามารถพิจารณาได้จากรูปที่  
 5.26-5.39 โดยรูปที่ 5.26 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่ม  
 ความเร็วรอบต้นกำลังจาก 1300-1700 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่  
 ออกแบบจะมีความเร็ววิกฤติต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานกล่าวคือ ณ ที่  
 ความเร็ว 1450 รอบต่อนาทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ถึง  
 138 โวลต์ ขณะเดียวกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานจะสร้างแรงดันไฟฟ้าได้เพียง  
 25 โวลต์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขนาด 138 โวลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ  
 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกเพื่อรักษาระดับการค่า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าให้คงที่ 220 โวลต์ คุณลักษณะดังกล่าวแสดงถึงความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ณ. ที่ความเร็วลมต่ำๆ ซึ่งเป็นจุดเด่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบขณะเดียวกัน ณ. ที่ความเร็ว 1500-1700 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีค่าสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบมีการอิมตัวของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานนั่นเอง



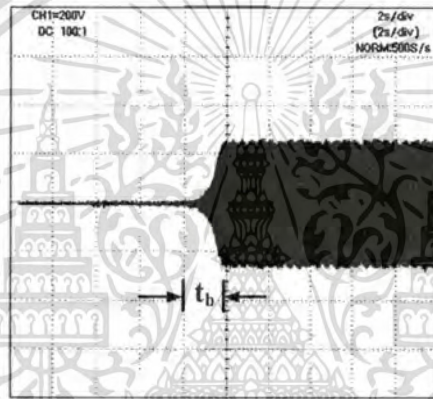
รูปที่ 5.26 การสร้างแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ



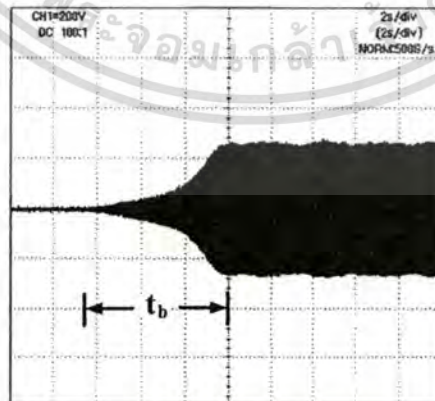
รูปที่ 5.27 การสร้างแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและลดความเร็วรอบลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.27 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบและลดความเร็วยรอบลง จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีการลดลงของแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน คุณลักษณะดังกล่าวเกิดจากฮีสเทอรีซิสลูปของวัสดุแม่เหล็กที่นำมาใช้งาน วัสดุแม่เหล็กที่เหมาะสมนำมาใช้ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นควรเลือกวัสดุแม่เหล็กที่มีฮีสเทอรีซิสลูปที่กว้าง ทั้งนี้เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ดี ผลดังกล่าวเมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (Static Var Compensator) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ 220 โวลต์ ส่งผลทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมได้ในกรณีความเร็วลมต่ำ



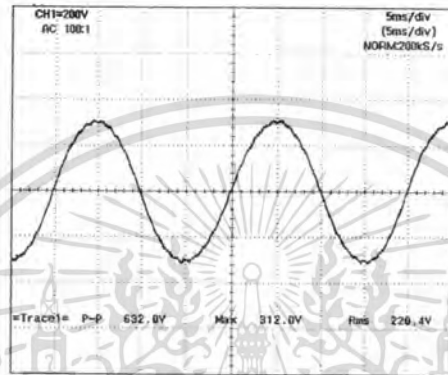
รูปที่ 5.28 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานภายใต้สภาวะชั่วขณะ



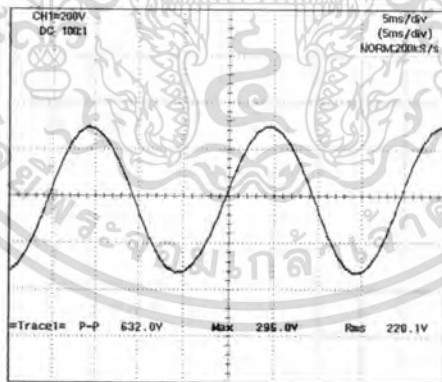
รูปที่ 5.29 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบภายใต้สภาวะชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.28 - 5.29 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและที่ออกแบบภายใต้สภาวะชั่วขณะ จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะใช้เวลาในการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build-up voltage time,  $t_b$ ) ที่มากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะออกแบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่น้อยเพื่อลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก รวมทั้งลดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กนั่นเอง



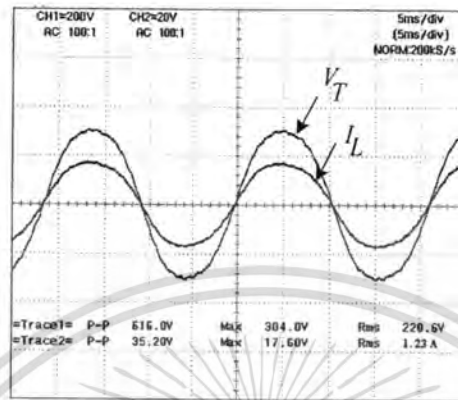
รูปที่ 5.30 แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน ภายใต้สภาวะคงตัว % THDv = 3.10 %



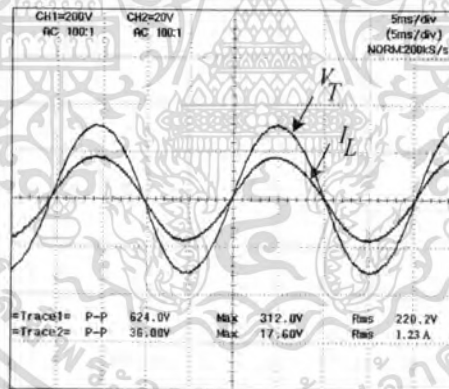
รูปที่ 5.31 แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบ ภายใต้สภาวะคงตัว % THDv = 1.0 %

รูปที่ 5.30-5.31 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะไม่มีภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและที่ออกแบบภายใต้สภาวะคงตัว จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์ ทำให้มีคุณภาพไฟฟ้าที่ดีทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบมีการพันขดลวดทางด้านสเตอไรโอเมทริกซ์ที่หนาแน่นขึ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์แบบเศษส่วน ขณะเดียวกันมีการทำสกีวอินบน โรเตอร์ เพื่อลดปริมาณฮาร์มอนิก รวมทั้งในการออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีอัตราส่วนแอสเปคต์ที่เหมาะสม ทำให้มีปริมาณฮาร์มอนิกน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานนั่นเอง



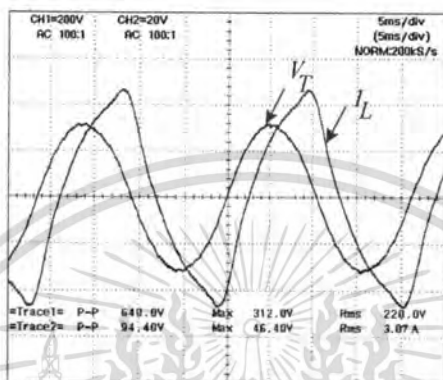
รูปที่ 5.32 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาวะขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 796 W, % THD<sub>v</sub> = 5.30 %



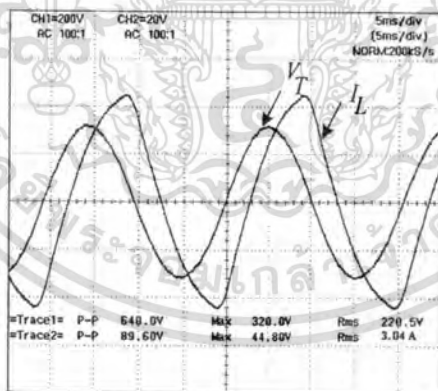
รูปที่ 5.33 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาวะขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบขณะมีภาระแบบความต้านทานขนาด 796 W, % THD<sub>v</sub> = 1.60 %

รูปที่ 5.32-5.33 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาวะขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและออกแบบขณะมีภาระแบบความต้านทาน จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์มากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบคำนึงถึงผลกระทบจากการอ้อมตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นของร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ จึงทำให้มีปริมาณฮาร์มอนิกน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของภาระ กล่าวคือเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปยังย่านอิ่มตัว (Saturation region) ส่งผลทำให้เกิดการอิ่มตัวบริเวณพื้นของร่องสลิตทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ทำให้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการผิดเพี้ยนมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 5.34 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 1079 W, % THD<sub>v</sub> = 5.53 %



รูปที่ 5.35 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำขนาด 1079 W, % THD<sub>v</sub> = 1.84 %

รูปที่ 5.34-5.35 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแสไฟฟ้าของภาระขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.55 ส้าหลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THD<sub>v</sub>) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานเหมือนกับภาระ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษา เมื่อผู้ใช้งานพิมพ์เอกสารนี้เป็นการค้า  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบความต้านทานเช่นเดียวกัน โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสรุปดังตารางที่ 5.5-5.6 โดยตารางที่ 5.5 แสดงการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน (Resistive-load) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากผลจากการทำสวิตชิงบนโรเตอร์ การพันขดลวดแบบเศษส่วนและอัตราส่วนแอสเพลทที่เหมาะสมนั่นเอง โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระ ซึ่งหมายความว่าถึงจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation region) ซึ่งส่งผลต่อการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั่นเอง ส่วนตารางที่ 5.6 แสดงการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับความเหนี่ยวนำ (Resistive-Inductive load) ที่ตัวประกอบกำลัง 0.55 ล้าหลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (%THDv) น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานเหมือนกับภาระแบบความต้านทานเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 5.5 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะมีภาระแบบความต้านทาน

ชนิด	Total Harmonic Distortion of Voltage (%THDv)				
	No-load	On-load 200 W	On-load 384 W	On-load 604 W	On-load 796 W
มาตรฐาน	3.10	3.70	4.2	4.71	5.30
ออกแบบ	1.0	1.12	1.25	1.47	1.60

ตารางที่ 5.6 การผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.55 ล้าหลัง

ชนิด	Total Harmonic Distortion of Voltage (%THDv)				
	No-load	On-load 268 W	On-load 535 W	On-load 807 W	On-load 1079 W
มาตรฐาน	3.10	3.73	4.27	4.76	5.53
ออกแบบ	1.0	1.26	1.47	1.62	1.84

สำหรับตารางที่ 5.7-5.8 แสดงขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระทั้งสองแบบจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะใช้ตัวเก็บประจุน้อยกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะลดค่าล็กเกจรีแอกแตนซ์ส่วนต่างๆภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีค่าต่ำ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนน้อยลง รวมทั้งมีระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulation) ที่ต่ำส่งผลให้ใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่น้อยนั่นเอง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลม รวมทั้งมีค่าความสูญเสียในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม อันเนื่องมาจากความสูญเสียไดอิเล็กตริกภายในตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 5.7 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาระแบบความต้านทาน

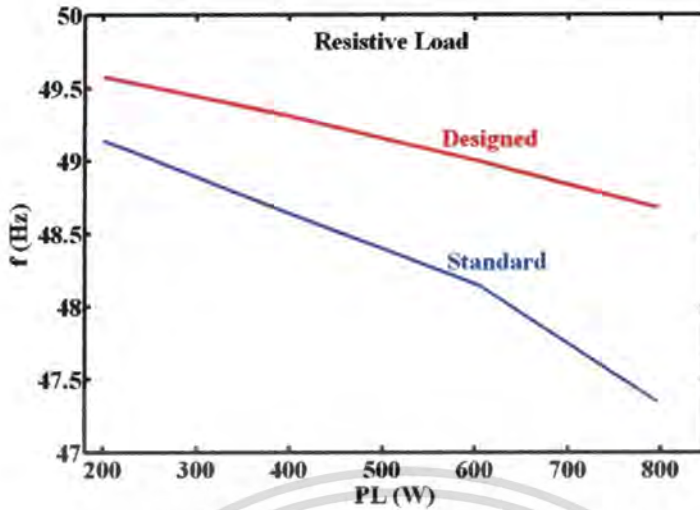
ชนิด	No-load $C_b$ ( $\mu\text{F}$ )	On-load ; $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )					$C_T$ ( $\mu\text{F}$ )
		200 (W)	400 (W)	604 (W)	796 (W)	Total $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )	
มาตรฐาน	16.33	2	2.50	2.67	3.83	11	27.3
ออกแบบ	17.5	1	1.33	1.5	1.67	5.5	23

ตารางที่ 5.8 ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำที่ตัวประกอบกำลัง 0.55 ล้าหลัง

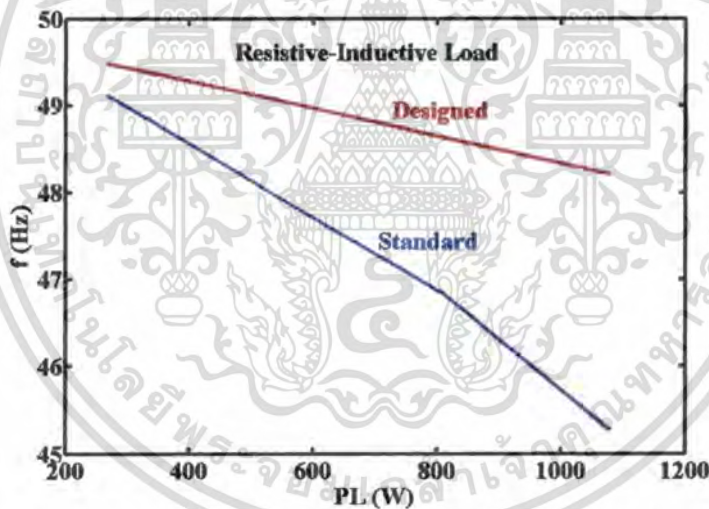
ชนิด	No-load $C_b$ ( $\mu\text{F}$ )	On-load ; $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )					$C_T$ ( $\mu\text{F}$ )
		268 (W)	535 (W)	807 (W)	1079 (W)	Total $C_c$ ( $\mu\text{F}$ )	
มาตรฐาน	16.33	11.7	14.47	17.83	23.5	67.5	91
ออกแบบ	17.5	9.80	11.2	11.83	12.67	45.5	63

รูปที่ 5.36-5.37 แสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน เนื่องจากค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมุ่งเน้นลดค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ ผลดังกล่าวทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าต่ำ นอกเหนือจากนี้ยังลดค่าความสูญเสียของขดลวดทางด้านโรเตอร์ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



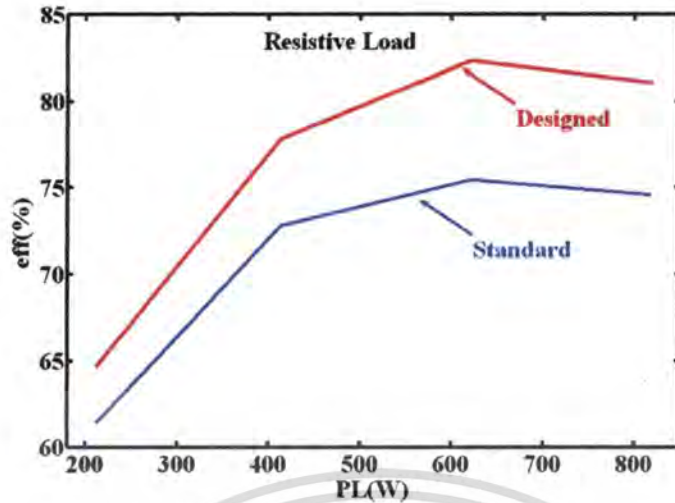
รูปที่ 5.36 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน



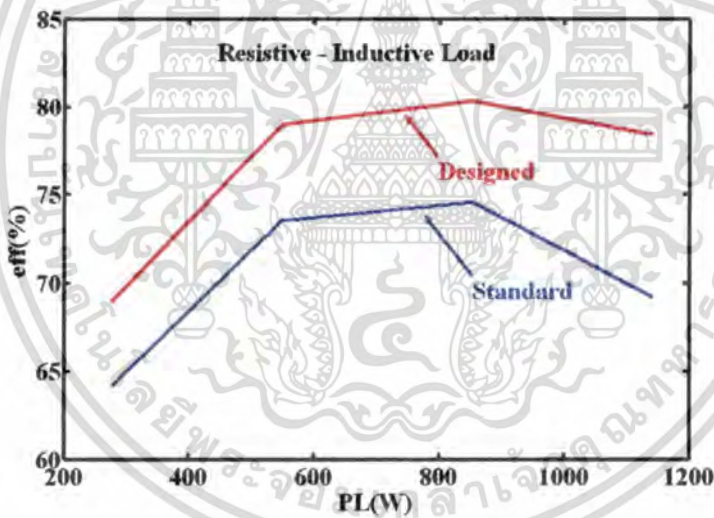
รูปที่ 5.37 กำลังไฟฟ้าของภาระและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.38-5.39 แสดงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานเนื่องจากค่าความสูญเสียต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีค่าต่ำ โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่านั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.38 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทาน



รูปที่ 5.39 กำลังไฟฟ้าของภาระและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระแบบความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ

## 5.6 บทสรุป

ผลจากการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมทั้งใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบสองมิติวิเคราะห์การออกแบบเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม รายละเอียดของพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองแบบสามารถสรุปได้ตารางที่ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 พฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและออกแบบ

พฤติกรรมและสมรรถนะต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	แบบมาตรฐาน	ออกแบบ
ประสิทธิภาพ	ต่ำ	สูง
คุณภาพไฟฟ้า	ปานกลาง	ดี
การเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้า	มาก	น้อย
ระดับแรงดันไฟฟ้า	สูง	ต่ำ
เวลาที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้า	น้อย	มาก
ความสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า ฉ. ความเร็วรอบต่ำ	ไม่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้	สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้
ความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง	มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง	มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง
ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า	น้อย	มาก
ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า	มาก	น้อย
ขนาดตัวเก็บประจุรวมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	มาก	น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ตามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้า เสมือนแบบสแตติก

### 6.1 บทนำ

การใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบส่งผ่านกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่มีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ กว่า 30 ปี โดยส่วนใหญ่การใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้จะอยู่ในส่วนของระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Power System) และอุตสาหกรรม (Industrial) อย่างไรก็ตามนับเป็นเวลากว่า 15 ปีแล้วที่ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (Static Var Compensator, SVC) ได้เข้าไปอยู่ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแก่ระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อปรับปรุงระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulation) ตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction) ลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage fluctuations) และเพิ่มเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง (System Stability) [9, 27] ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมานั้นล้วนเป็นการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสิ้น สิ่งที่น่าสนใจศึกษาวิเคราะห์คือการประยุกต์ใช้งานตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (Static Var Compensator, SVC) ในระบบพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม

### 6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

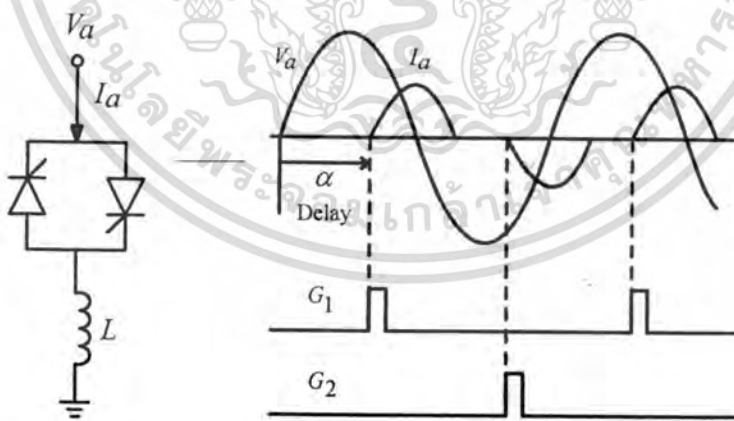
ในบทความงานวิจัย [4] นำเสนอการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมโดยใช้หลักการของตัวชดเชยสแตติกแบบไทรสเตอร์คอนโทรลเลอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) งานวิจัย [15] นำเสนอการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้หลักการของตัวชดเชยสแตติกแบบไทรสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor-Thyristor Switch Capacitor, FC-TSC) แต่ในงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้นำเสนอพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองภายใต้สภาวะชั่วขณะและสภาวะคงตัวรวมทั้งความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของการรักษาระดับแรงดันแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก จากประเด็นดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการวิจัยในการใช้ตัวชดเชยแบบต่างๆ ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ดังนั้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 หลักการของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (Static Var Compensator)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (Static Var Compensator, SVC) หมายความว่า ตัวชดเชยแบบที่ไม่มีการเคลื่อนที่เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถประยุกต์ใช้งานในการปรับปรุง การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบเมื่อโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อย หรือใช้ในการปรับปรุง ตัวประกอบกำลัง ตัวชดเชยแบบสแตติก (SVC) ในทางอุดมคติเป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชย กำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหน่วงของเวลาตอบสนองและ ยังมีความสามารถในการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อีกด้วย อุปกรณ์หลักของตัวชดเชย แบบสแตติกประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง อุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์ที่สามารถรับ หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่ระบบ ซึ่งสามารถแบ่งแยกออกเป็น 3 ประเภทประกอบด้วย [33]

#### 6.3.1 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor, TCR)

ไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์นี้ประกอบด้วยรีแอคเตอร์และไทรสเตอร์ ซึ่งรีแอคเตอร์ จะต่ออนุกรมกับไทรสเตอร์แบบสองทิศทาง (Bidirectional Thyristor) ดังรูปที่ 6.1 ซึ่ง TCR เปรียบ เสมือนซัสเซปแตนซ์ (Susceptance) ที่สามารถปรับค่าได้และถูกควบคุมด้วยมุมจุดชนวน (Firing angle,  $\alpha$ ) ที่เป็นตัวกำหนดให้ไทรสเตอร์ทำงานตั้งแต่มุม  $90^\circ$ - $180^\circ$  โดยไทรสเตอร์แต่ละตัวจะมีการ ทำงานในแต่ละตัวจะมีการทำงานในแต่ละครึ่งคาบเวลาทั้งซีกบวกและลบ สำหรับการ วิเคราะห์การทำงานของ TCR ประเภทนี้สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 6.2

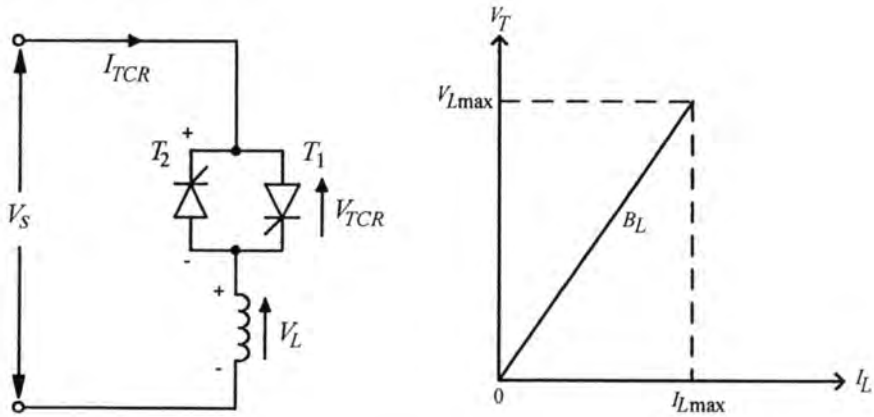


รูปที่ 6.1 ไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์และชุดควบคุม

โดยแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.1) [27]

$$v_s(t) = V \sin \omega t \quad (6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร TCR สามารถพิจารณาแรงดันไฟฟ้าในรูปดังสมการที่ (6.2)

$$L \frac{di}{dt} - v_s(t) = 0 \tag{6.2}$$

เมื่อ

$L$  ค่าอินดักแตนซ์ของ TCR

จากสมการที่ (6.2) สามารถหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร TCR ได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ (6.2) ผลที่ได้ดังสมการที่ (6.3) - (6.4)

$$i(t) = \frac{1}{L} \int v_s(t) dt + C \tag{6.3}$$

เมื่อ

$C$  ค่าคงที่

$$i(t) = -\frac{V}{\omega L} \cos \omega t + C \tag{6.4}$$

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)  $\omega t = \alpha = 0$  ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร TCR สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (6.5)

$$i(t) = -\frac{V}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \tag{6.5}$$

เมื่อ

ใช้คณิตศาสตร์ฟูรีเยร์ในการวิเคราะห์ (Fourier analysis) ขนาดกระแสฟลักซ์ตามแกนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร TCR สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.6)

$$I_1(\alpha) = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (6.6)$$

เมื่อ

$$a_1 = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(x) \cos \frac{2\pi x}{T} dx$$

$$b_1 = 0$$

ผลจากการใช้คณิตศาสตร์ฟูรีเยร์ในการวิเคราะห์ (Fourier analysis) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.7)

$$I_1(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (6.7)$$

จากสมการที่ (6.7) สามารถเขียนใหม่ดังสมการที่ (6.8)

$$I_1(\alpha) = VB_{TCR}(\alpha) \quad (6.8)$$

เมื่อ

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{\max} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right)$$

$$B_{\max} = \frac{1}{\omega L}$$

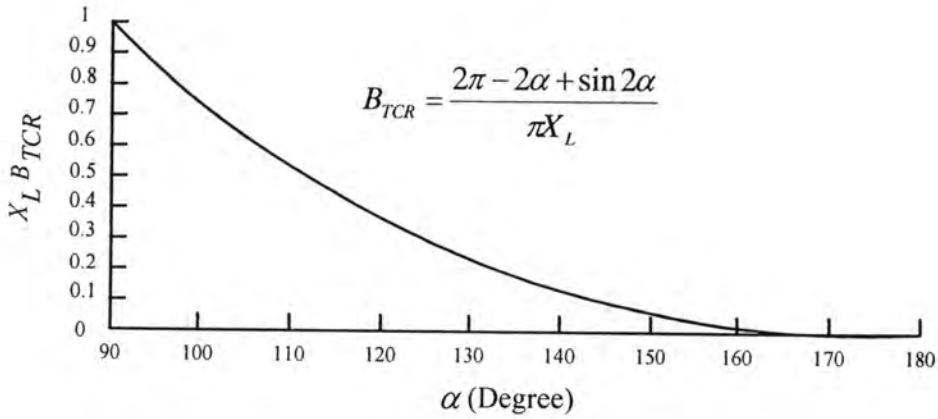
โดยมุมจุดชนวน (Firing angle,  $\alpha$ ) มีความสัมพันธ์กับมุมของการนำกระแสไฟฟ้า (Conduction angle) ดังสมการที่ (6.9)

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (6.9)$$

แทนค่าสมการที่ (6.9) ลงในสมการที่ (6.7) จะได้ขนาดกระแสฟลักซ์ตามแกนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร TCR สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.10) - (6.11) โดยคุณลักษณะของการความสัมพันธ์ของการควบคุมโดยใช้ TCR สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.3

$$I_1(\sigma) = VB_{\max} \left( \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (6.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมจุดชนวนกับค่าชั้บแซมเต็มช้ของการควบคุมโดยใช้ TCR

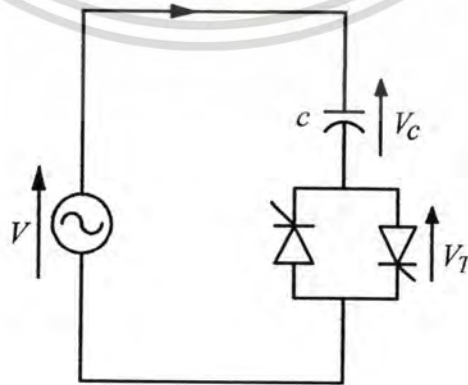
เมื่อ

$$I_1(\sigma) = VB_{TCR}(\alpha) \tag{6.11}$$

$$B_{TCR}(\sigma) = B_{max} \left( \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right)$$

6.3.2 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนไทรสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์ (Thyristor Switched Capacitor, TSC)

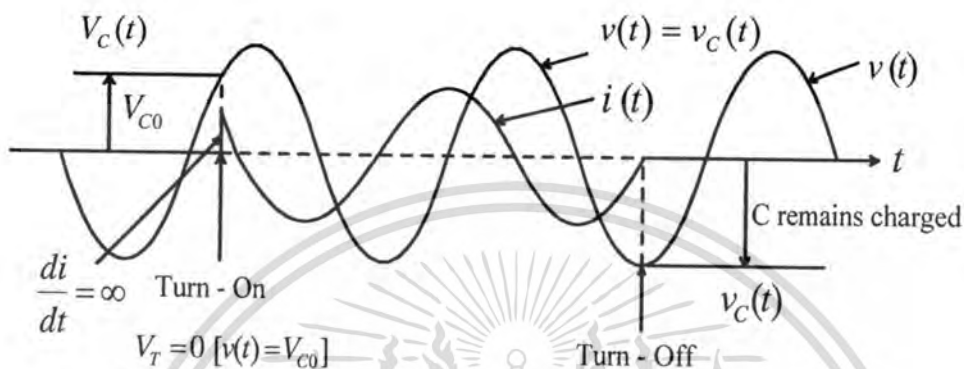
ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนไทรสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์นี้จะประกอบด้วยตัวเก็บประจุและไทรสเตอร์ โดยตัวเก็บประจุจะต่ออนุกรมกับไทรสเตอร์แบบสองทิศทาง (Bidirectional Thyristor) ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งลักษณะของการต่อดังกล่าวจะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีดังรูปที่ 6.5 [27]



รูปที่ 6.4 ไทรสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีแรกแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย เมื่อวงจรควบคุม จุกมุดจุดขนวนไทริสเตอร์ (Turn on) ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่ออัตราการ เปลี่ยนแปลงของเวลา ( $\frac{di}{dt}$ ) จะมีค่าสูงมาก ซึ่งอาจล้มเหลวในการจุดขนวนของไทริสเตอร์หรืออาจ ทำให้ไทริสเตอร์เสียหาย



รูปที่ 6.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีการควบคุมโดยใช้ TSC

กรณีที่สองขณะแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย เมื่อวงจร ควบคุมหยุดจุดขนวนไทริสเตอร์ (Turn off) ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อ อัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลา ( $\frac{di}{dt}$ ) จะมีค่าสูงมากซึ่งอาจล้มเหลวในการจุดขนวนของไทริสเตอร์ หรืออาจทำให้ไทริสเตอร์เสียหายได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงใช้ค่าความเหนี่ยวนำขนาดเล็กลงมาต่อ อนุกรมในวงจรควบคุมแบบ TSC ดังรูปที่ 6.6 ซึ่งวิเคราะห์ห้วงจรควบคุมแบบ TSC ที่ใช้รีแอก เตอร์ต่ออนุกรมเพิ่มในวงจรโดยใช้ Laplace transform ดังสมการที่ (6.12) - (6.13)

$$V(s) = \left[ L_s + \frac{1}{Cs} \right] I_s + \frac{V_{co}}{s} \quad (6.12)$$

โดยแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายมีค่าดังสมการที่ (6.13)

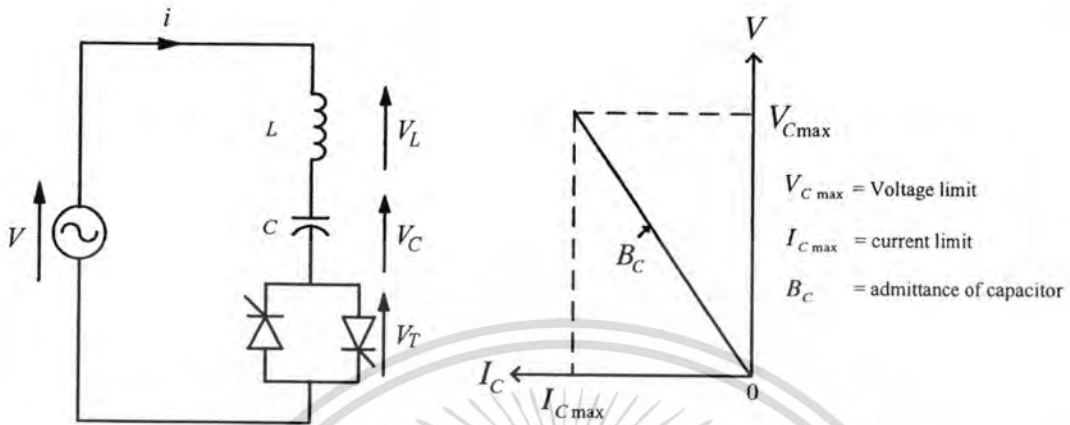
$$v(t) = V \sin(\omega_o t + \alpha) \quad (6.13)$$

เมื่อ

$\omega_o$  Nominal frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ขนาดของกระแสไฟฟ้าหลังจากไทรสเตอร์ทำงาน ณ.ที่เวลา  $t = 0$  ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับคาบเวลาสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.14)-(6.15)



รูปที่ 6.6 ไทรสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์ที่ใช้รีแอกเตอร์ต่ออนุกรมเพิ่มในวงจร

$$i(t) = I_{AC} \cos(\omega_o t + \alpha) - nB_c \left( V_{co} - \frac{n^2}{n^2 - 1} V \sin \alpha \right) \sin \omega_n t - I_{AC} \cos \alpha \cos \omega_n t \quad (6.14)$$

$$\omega_n = n\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6.15)$$

โดยค่าเปอร์ยูนิตของความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.16)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad (6.16)$$

$$I_{AC} = V \frac{B_C B_L}{B_C + B_L} \quad (6.17)$$

สำหรับการวิเคราะห์ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับคาบเวลานั้น จะแบ่งแนวทางในการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย เทอมแรกของสมการที่ (6.14) ซึ่งเป็นสมการที่ประกอบด้วยความถี่พื้นฐาน (Frequency fundamental,  $\omega_o$ ) ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-state) กระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้า  $90^\circ$  ขนาดของกระแสไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.18)

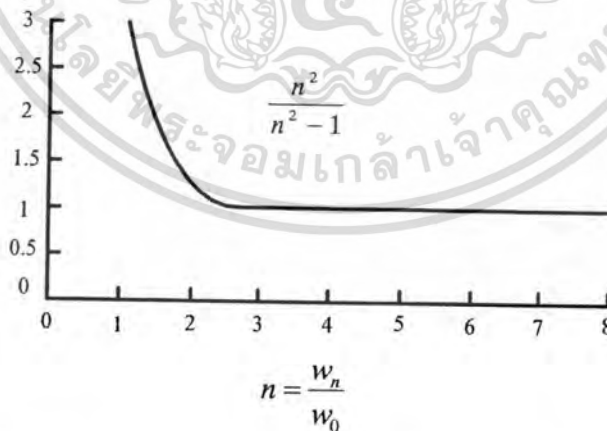
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{AC} = VB_C \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (6.18)$$

โดยปกติแล้วค่าของ Fundamental-frequency susceptance จะเป็นสัดส่วนของค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ ( $B_C \frac{n^2}{n^2 - 1}$ ) และการขยายตัวของกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับเทอมของ  $\frac{n^2}{n^2 - 1}$  สิ่งที่น่าสนใจคือการศึกษาคoefficientของการขยายตัวที่เป็นฟังก์ชันของการจูนค่าในการควบคุมโดยใช้ TSC ดังรูปที่ 6.7 เทอมที่สองและเทอมที่สามของสมการที่ (6.14) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดการเรโซแนนซ์จากธรรมชาติ (Natural resonance frequency,  $\omega_n$ ) สามารถแบ่งแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี โดยกรณีแรกจะไม่พิจารณาการสวิตช์ช่วงสภาวะชั่วขณะ (Transient free switching) ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการออสซิลเลตในสมการที่ (6.14) มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถพิจารณาออกเป็น 2 เงื่อนไขดังสมการที่ (6.19) - (6.20) โดยสมการที่ (6.19) บ่งบอกถึงการหลีกเลี่ยงสภาวะชั่วขณะสวิตช์ที่ค่าสูงสุดทั้งด้านบวกและลบของแรงดันไฟฟ้าสมการที่ (6.20) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ซาร์จตัวเก็บประจุ ณ.ที่ค่าต่างๆ พฤติกรรมดังกล่าวของการควบคุมโดยใช้ TSC สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6.8

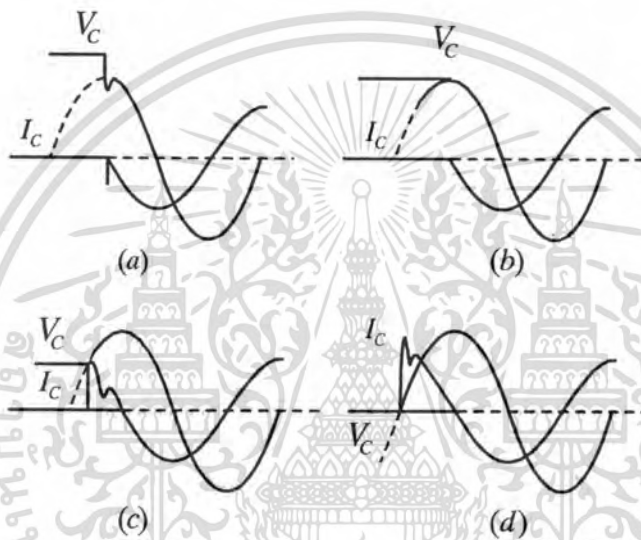
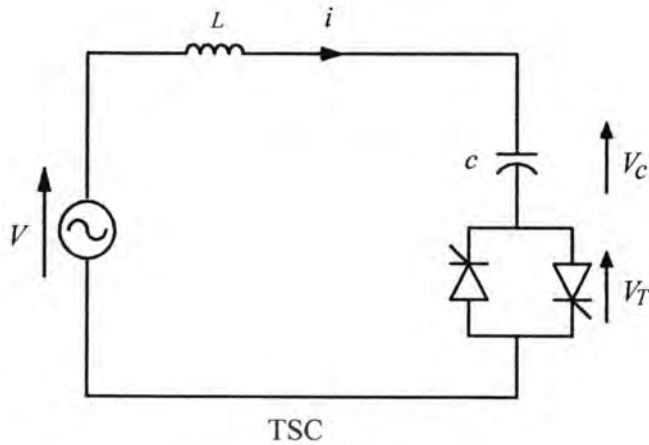
$$\cos \alpha = 0 \text{ (i.e. } \sin \alpha = \pm 1) \quad (6.19)$$

$$V_{co} = \pm V \frac{n^2}{n^2 + 1} = \pm I_{AC} X_c \quad (6.20)$$



รูปที่ 6.7 แฟกเตอร์ของการขยายตัวสำหรับความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

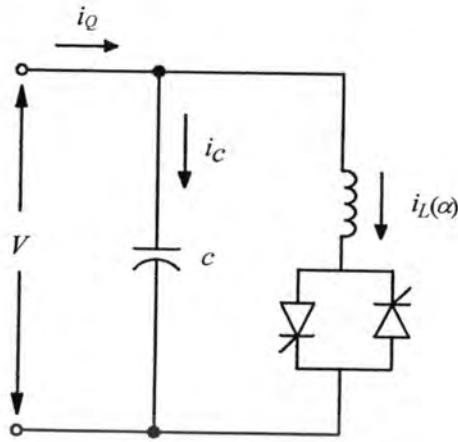


รูปที่ 6.8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการควบคุมโดยไทรสเตอร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์

### 6.3.3 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR)

สำหรับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) เป็นการควบคุมที่ผสมกันระหว่างการใช้ไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์กับตัวเก็บประจุดังรูปที่ 6.9 ระบบดังกล่าวสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากตัวเก็บประจุ ( $Q_c$ ) และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ที่ต่อร่วมกับรีแอคเตอร์ ( $Q_L$ ) ซึ่งทำให้สามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ( $Q$ ) ผู้ระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 6.10 [32] การควบคุมแบบนี้ในปัจจุบันนิยมใช้งานในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแก่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ( $Q$ ) ผู้ระบบไฟฟ้ากำลังได้โดยการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ ซึ่งค่าความสูญเสียในตัวชดเชยแบบนี้ประกอบด้วยค่าความสูญเสียของไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์จะขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ดังรูปที่ 6.11

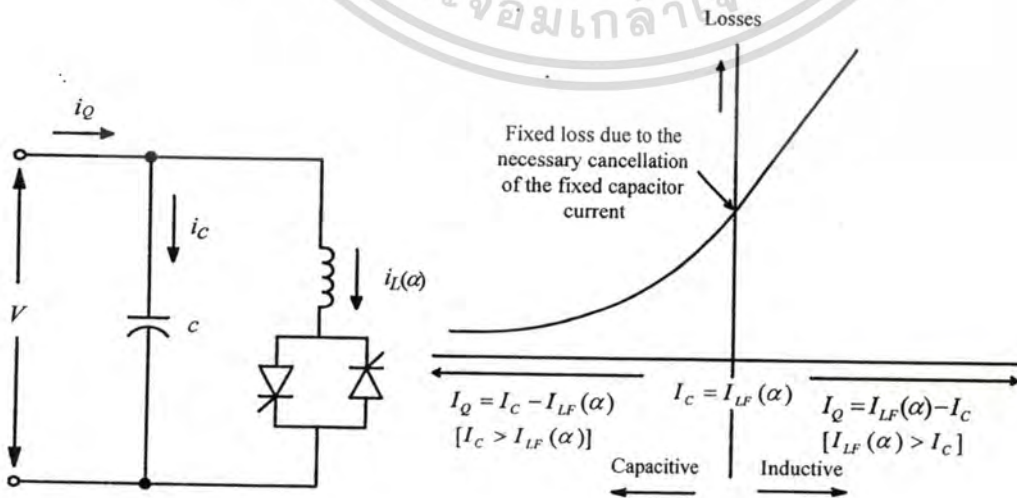
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR)



รูปที่ 6.10 การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟของ FC-TCR

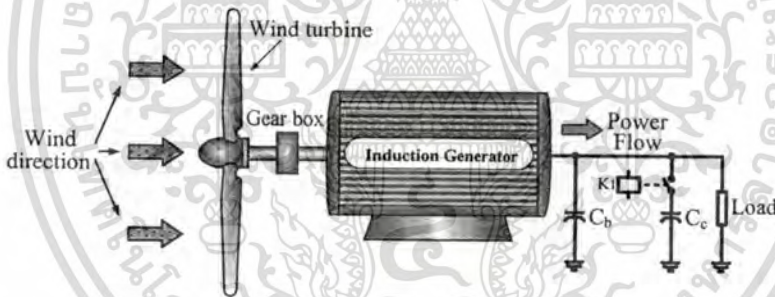


รูปที่ 6.11 ค่าความสูญเสียของการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟแบบ FC-TCR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

สำหรับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้น ระบบดั้งเดิมดังรูปที่ 6.12 จะใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contractor) ในการตัดต่อตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Compensating capacitor) ต่อร่วมเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้คงที่ วิธีการดังกล่าวส่งผลต่อการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ไม่ต่อเนื่อง ทำให้ส่งผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสูงหรือต่ำ (Over or Under voltage) ในกรณีที่ภาระมีการเปลี่ยนแปลง รวมทั้งมีการอาร์คที่หน้าสัมผัสของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contractor) ซึ่งส่งผลเสียในแง่ของความปลอดภัย รวมทั้งต้องใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contractor) จำนวนมากเพื่อควบคุมการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ทำให้ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมแบบกระตุ้นภายในตัวเองสูงขึ้น

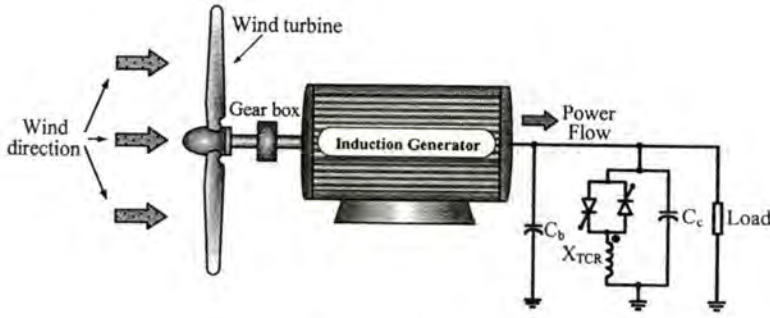


รูปที่ 6.12 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงมีความจำเป็นที่มีการปรับปรุงระบบดังกล่าว โดยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนั้นคือ การใช้หลักการของตัวชดเชยแบบสแตติก (Static Var Compensators, SVC) ดังแสดงในรูปที่ 6.13 เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ FC-TCR ที่ชดเชยแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองดังรูปที่ 6.13 นั้นจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเกิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุและรีแอคเตอร์ ทำให้มีความสามารถที่รับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ ขนาดของอิมพีแดนซ์ของไทรสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.21) [35]

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2\pi + 2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (6.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อ  $X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2\pi + 2\alpha + \sin 2\alpha}$  ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

เมื่อต่อชุดไทรสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ขนานกับตัวเก็บประจุ อิมพีแดนซ์รวมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.22)

$$X_{svc} = \frac{\pi X_L X_C}{X_C (2\pi - 2\alpha + \sin \alpha) - \pi X_L} \quad (6.22)$$

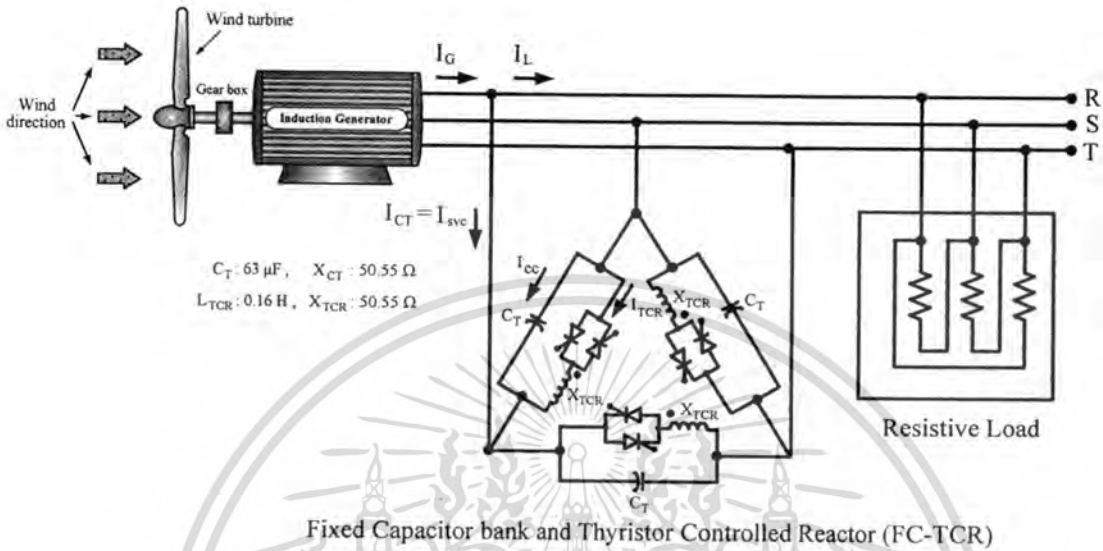
ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนชดเชยแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.23)

$$Q_{svc} = \frac{V_L^2}{X_{svc}} \quad (6.23)$$

6.4.1 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR)

รูปที่ 6.14 แสดงตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) ซึ่งใช้การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ตัวเก็บประจุ (FC) หรือ ตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด ( $C_c$ ) ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเมื่อมีภาระ โดยขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเกิดจากผลรวมของกำลังเสมือนของตัวเก็บประจุ (FC) หรือ ตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด ( $C_c$ ) ที่สร้างขึ้นและกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (TCR) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ) โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เหมาะสมแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ๆพิกัดนั่นเอง



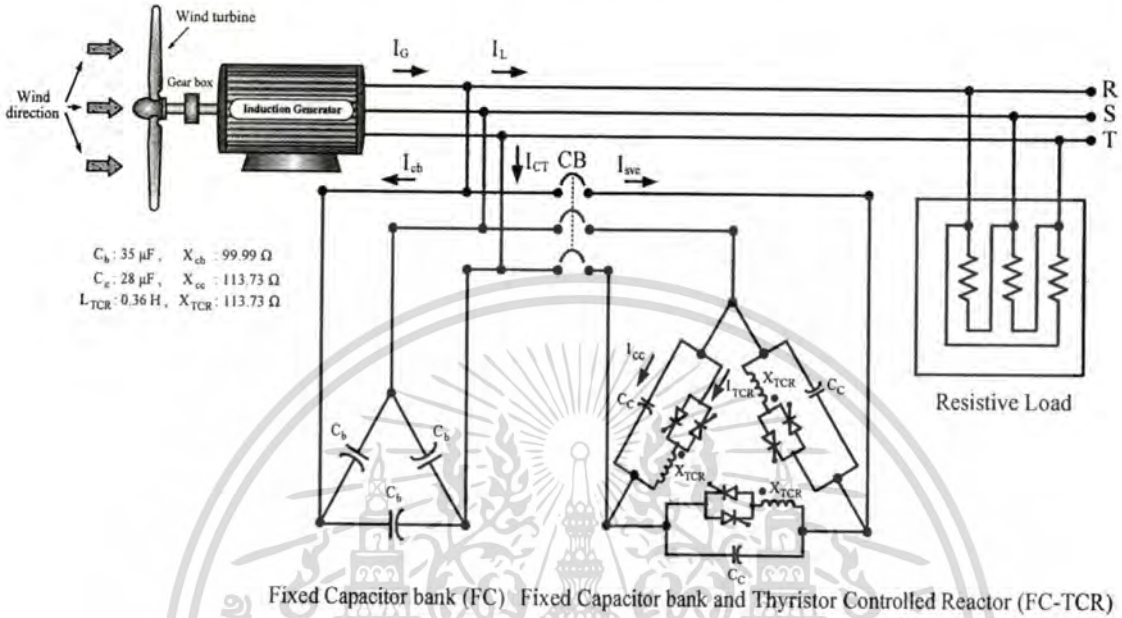
รูปที่ 6.14 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR)

6.4.2 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ คาปาซิเตอร์ (FC) และไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR)

ขณะเดียวกันรูปที่ 6.15 แสดงตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC) และไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC - TCR) ที่ใช้งานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยตัวเก็บประจุชุดแรก (FC) หรือตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $C_b$ ) ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะไม่มีภาระ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองมีภาระ จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองให้คงที่ สามารถทำได้โดยการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

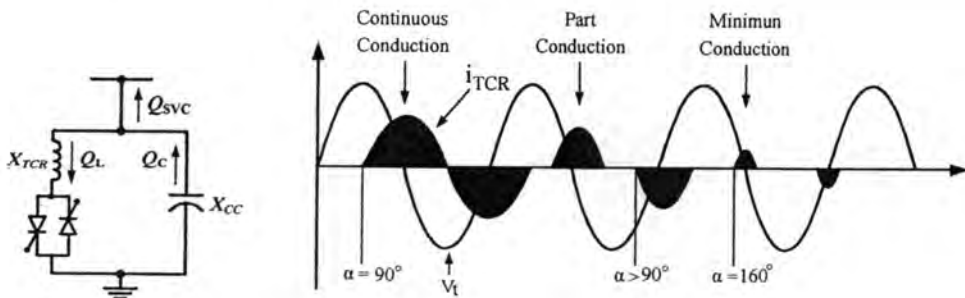
กระตุ้นภายในตัวเองเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นเกิดจากผลรวมของกำลังเสมือนของตัวเก็บประจุ (FC) หรือตัวเก็บประจุสำหรับชดเชย ( $C_c$ ) ที่สร้างขึ้นและกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (TCR) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ ( $\alpha$ )



Fixed Capacitor bank (FC) Fixed Capacitor bank and Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR)

รูปที่ 6.15 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC) และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR)

การควบคุมมุมจุดชนวนของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ) นั้น จะมีมุมจุดชนวนอยู่ระหว่าง  $90^\circ$ - $180^\circ$  ดังแสดงคังรูปที่ 6.16 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวนจะส่งผลต่อรูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นสัญญาณไซน์



รูปที่ 6.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อเฟสของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์

เอกสารนี้เป็นที่มุงจุดชนวนค่าต่างๆการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental current) ต่อเฟสของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ที่สัมพันธ์กับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.24) [16, 27, 32-33]

$$I_{TCR} = \frac{V_i/a}{\pi\omega L} [2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)] \quad (6.24)$$

การเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ) นั้นส่งผลกระทบต่อที่สำคัญ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือกำลังไฟฟ้าสูญเสียในไทรสเตอร์และรีแอกเตอร์จะมีค่าลดลง ส่วนที่สองรูปร่างของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นไซน์นั่นหมายความว่าความถี่เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้น ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกที่มีอันดับเป็นเลขคี่ โดยการวิเคราะห์ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้คณิตศาสตร์ฟูเรียร์ (Fourier) แสดงสมการที่ (6.25) [16, 27, 32-33]

$$I_n(\alpha) = \frac{4V_i/a}{\pi X_{TCR}} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad (6.25)$$

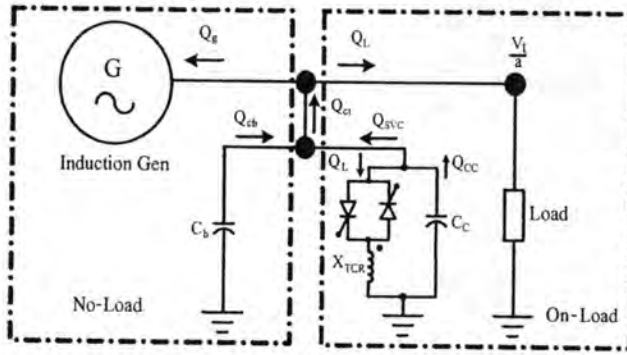
เมื่อ  $n = 3, 5, 7, 9, 11, 13, \dots$

สำหรับการนำตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกหนึ่งเฟสไปประยุกต์ใช้งานในระบบสามเฟส สามารถทำได้โดยการนำตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก 3 ชุดต่อแบบเดลต้า ฮาร์มอนิกอันดับที่หารด้วยสามลงตัว (Triplen harmonics) จะไหลอยู่ในลูบของการต่อแบบเดลต้า ดังนั้นจะมีเพียงฮาร์มอนิกอันดับ 5, 7, 11 และ 13 เพียงเท่านั้นที่ไหลเข้าสู่ระบบ

## 6.5 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุรีแอกเตอร์และค่าความสูญเสียของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

### 6.5.1 การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุและรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

สำหรับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกนั้น อุปกรณ์หลักที่สำคัญคือขนาดของตัวเก็บประจุและขนาดของรีแอกเตอร์ โดยการวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองดังรูปที่ 6.17 จะแบ่งแยกการวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเป็น 2 ส่วนประกอบด้วยตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า (Built-up,  $C_b$ ) และตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Compensating capacitor,  $C_c$ ) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 โดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง

ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองไม่มีภาระ (No-load) จะใช้ตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า (Built-up,  $C_b$ ) ขณะเดียวกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองมีภาระ (On-load) จะใช้ตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Compensating capacitor,  $C_c$ ) ร่วมกับตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า (Built-up,  $C_b$ ) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองไม่มีภาระ (No-load) สามารถวิเคราะห์ได้จากเนื้อหาในบทที่ 2 สำหรับการวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระนั้น เมื่อมีภาระแบบความต้านทานจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสต่อลง ดังนั้นการวิเคราะห์ขนาดของตัวเก็บประจุและขนาดของรีแอคเตอร์ของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยแบบสแตติกสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.26)

$$Q_{svc} = Q_{cc} - Q_{cb} \tag{6.26}$$

นอกจากนี้ขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.27)

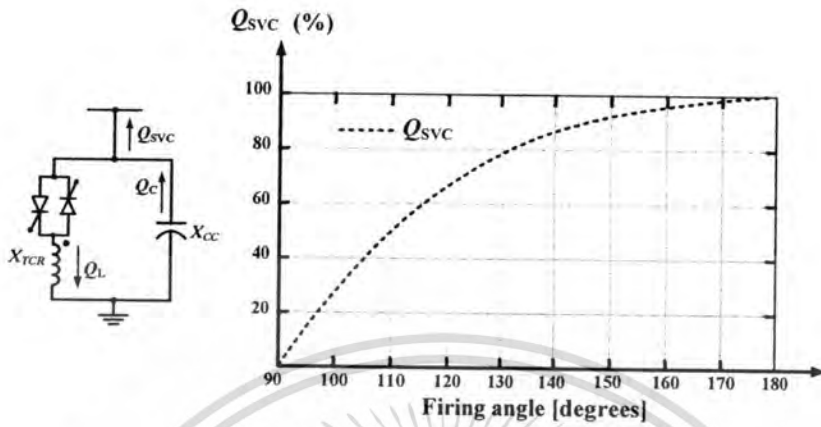
$$Q_{cb} = 2\pi \frac{V_L^2}{\omega} (fC_b) \tag{6.27}$$

เมื่อ

- $Q_{svc}$  กำลังไฟฟ้าเสมือนต่อเฟสของตัวชดเชยแบบสแตติก
- $Q_{cb}$  กำลังไฟฟ้าเสมือนต่อเฟสของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกจากรูปที่ 6.18 จะเห็นได้ว่าเกิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในการคำนวณการคำนวณค่าไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรีแอกเตอร์ ขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยแบบสแตติกจะมีค่าสูงสุด เมื่อมีมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ) ที่มุม  $180^\circ$  [21]



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยแบบสแตติกและมุมจุดชนวน

ดังนั้นขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.28)

$$Q_{cc} = Q_{svc} \tag{6.28}$$

กระแสไฟฟ้าต่อเฟสของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.29)

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t/a} \tag{6.29}$$

คาปาซิแตนซ์ต่อเฟสของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.30)

$$X_{cc} = \frac{V_t/a}{I_{cc}} \tag{6.30}$$

ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบสแตติกสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.31)

$$C_c = \frac{1}{2\pi f(jX_{cc})} \tag{6.31}$$

ขณะเดียวกันขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อมีมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ) ที่มุม  $90^\circ$  นั่นหมายความว่าถึงขนาดของอีกด้านเป็นขั้วกำลังที่ตรงกัน แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เพราะการนำขั้วตรงกันมาใช้งานไม่ได้ทั้งหมัดให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจะหักล้างกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากรีแอกเตอร์ ดังนั้นขนาดอิมพีแดนซ์ของรีแอกเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.32)

$$X_{TCR} = X_{cc} \quad (6.32)$$

ขนาดของรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบสแตติกสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.33)

$$L_{TCR} = \frac{X_{cc}}{2\pi f} \quad (6.33)$$

### 6.5.2 ค่าความสูญเสียของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

ค่าความสูญเสียของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งขั้วนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอานั้นจะประกอบด้วยค่าความสูญเสียของไทรสเตอร์และรีแอกเตอร์ดังสมการที่ (6.34)

$$P_{loss,SVC} = P_{loss,thy} + P_{loss,react} \quad (6.34)$$

เมื่อ

$P_{loss,SVC}$  ค่าความสูญเสียรวมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

$P_{loss,thy}$  ค่าความสูญเสียของ ไทรสเตอร์

$P_{loss,react}$  ค่าความสูญเสียของรีแอกเตอร์

โดยค่าความสูญเสียของไทรสเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.35)

$$P_{loss,thy} = P_{cvalve} + P_{Tsw} + P_{vd} + P_{sn} \quad (6.35)$$

เมื่อ

$P_{cvalve}$  ค่าความสูญเสียเนื่องจากการนำไฟฟ้าของไทรสเตอร์

$P_{Tsw}$  ค่าความสูญเสียเนื่องจากเกิดสวิตช์ซึ่งในไทรสเตอร์ขณะทำงานและไม่ทำงาน

$P_{vd}$  ค่าความสูญเสียในวงจรแบ่งแรงดัน

$P_{sn}$  ค่าความสูญเสียของวงจรสับเบอร์

และค่าความสูญเสียของรีแอกเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.36)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{loss, reac} = P_{core} + P_{cu} \quad (6.36)$$

เมื่อ

$P_{core}$    ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

$P_{cu}$      ค่าความสูญเสียของขดลวด

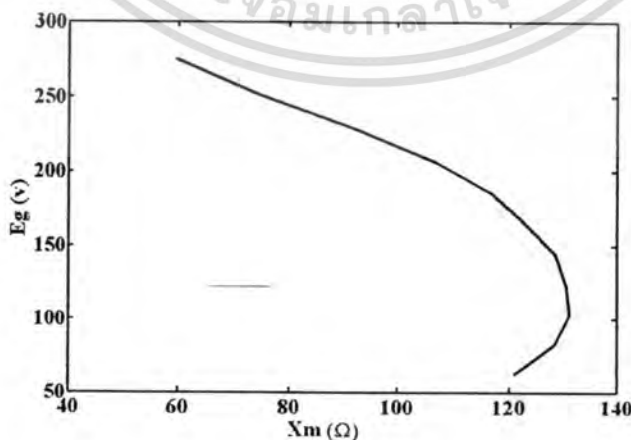
## 6.6 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 6.6.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของตัวเก็บประจุเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง ประกอบด้วยการทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-load test) การทดสอบต็อกโรเตอร์ (Blocked rotor test) ที่ความถี่ 12.5 Hz (i.e. 25 % rated frequency) การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC test) และการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแรงเสียดทานและลม (Friction and Windage loss test) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ IEEE std 112-2004 Method F-F1 [37]. ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

พิกัด	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
2.2 kW	3.17	2.56	3.48	3.48	93.43



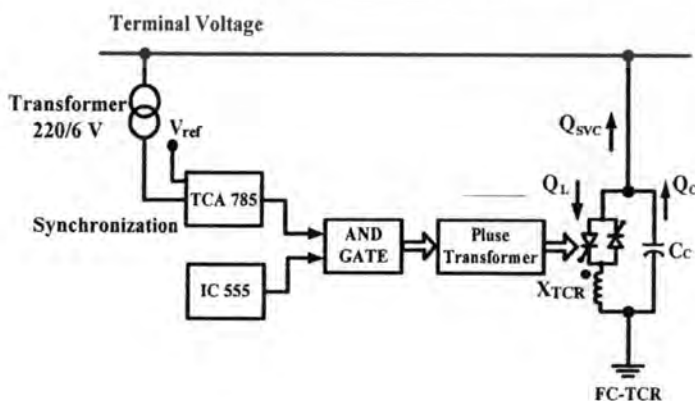
รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แมกนีไคซังรีแอกเต็นซ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.19 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ ( $E_g$ ) และแมกนีโตซิงรีแอคแตนซ์ ( $X_m$ ) ซึ่งได้มาจากการทดสอบ Synchronous test จะเห็นว่าค่าแมกนีโตซิงรีแอคแตนซ์ ( $X_m$ ) จะมีค่าลดลง ในขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ ( $E_g$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าถึงเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระ

### 6.6.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

สำหรับการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง โดยใช้ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้านั้นจะประกอบด้วย การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) และการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC) และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) การทดสอบนี้จะใช้ภาระแบบเป็นเชิงเส้น (Resistive load) ในการสืบสวนพฤติกรรมและการฝึกเขียนแรงดันฮาร์มอนิกของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะช่วงขณะและสภาวะคงตัวภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ ทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้แทนทดสอบของบริษัท Siemens คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและต่อตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบเคลด้า ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาทีที่คงที่และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดคงที่ 220 V โครงสร้างของชุดควบคุมไทรสเตอร์แสดงดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 โครงสร้างวงจรจุดขนวนต่อเฟสของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวงจรจุดชนวนต่อเฟสของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก ตัวเก็บประจุและรีแอคเตอร์ที่ออกแบบสร้างแสดงดังรูปที่ 6.21 - 6.22



รูปที่ 6.21 วงจรจุดชนวนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก



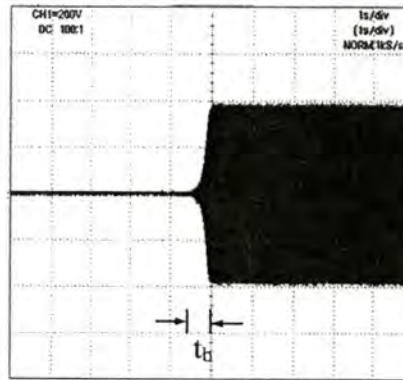
รูปที่ 6.22 ตัวเก็บประจุและรีแอคเตอร์

#### 6.6.2.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยแบบ FC-TCR

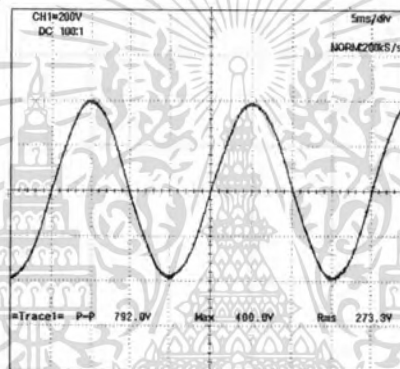
รูปที่ 6.23 - 6.27 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ เมื่อใช้ตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) โดยรูปที่ 6.23 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ ภายใต้สภาวะชั่วขณะโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $63 \mu\text{F}$  จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าสูงมาก นั่นหมายความว่าขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงมาก ซึ่งหมายความว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ ( $E_g$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นใน ขณะที่ขนาดของแมกนีไทซิงรีแอคแตนซ์ ( $X_m$ ) มีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนย่านการทำงานจากย่านไม่อิ่มตัว (Unsaturated region) ไปยังย่านอิ่มตัว (Saturated region) ซึ่งทำให้ใช้ช่วงเวลาในการสร้างแรงดันไฟฟ้า

เอ ( $t_d$ ) น้อยกว่านั่นเอง

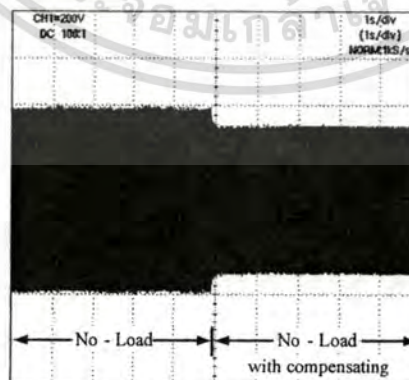
สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ

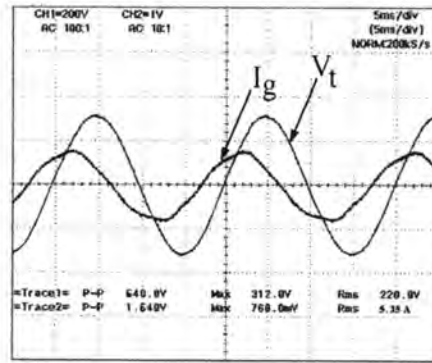


รูปที่ 6.24 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, % THD<sub>v</sub> = 2.43 %

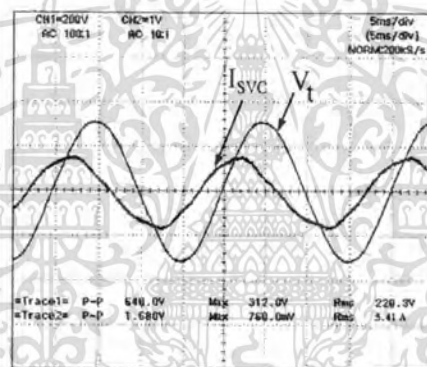


รูปที่ 6.25 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชานวนของไทรสเตอร์ 108° นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



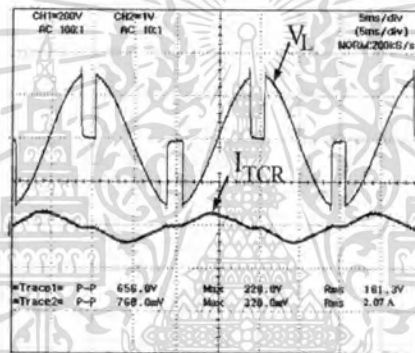
รูปที่ 6.26 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ เมื่อใช้ตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัว เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์  $108^\circ$ , % THD<sub>v</sub> = 2.11 %



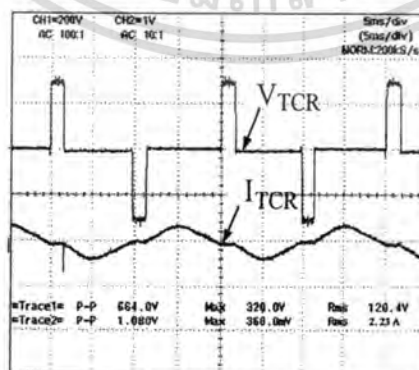
รูปที่ 6.27 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์มุม  $108^\circ$ , THD<sub>v</sub> = 2.11 %

สอดคล้องกับรูปที่ 6.24 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะคงตัว ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วภายใต้สภาวะคงตัวที่มีค่าสูงเกินพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (273 V<sub>rms</sub>) ผลกระทบดังกล่าวส่งผลเสียต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแง่ค่าความสูญเสีย ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและภาระ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีค่าคงที่พิกัด ดังรูปที่ 6.25 ซึ่งเป็นการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ สอดคล้องกับรูปที่ 6.26 ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ รูปที่ 6.27 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์เมื่อการดำเนินงานนี้แล้ว วิศวกรจำเป็นต้องมีการศึกษาและตรวจสอบในแง่ของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่าไม่วารณี่ใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สแต็คคอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม นั้นหมายความว่า การควบคุมมุมจุดชนวนของชุดไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ไทรสเตอร์เพื่อหักล้างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากชุดคาปาซิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 6.27 ผลที่ได้ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าที่พิกัด สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่รีแอกเตอร์ ไทรสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 6.28-6.29 โดยการเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวนจะส่งผลต่อรูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นสัญญาณไซน์ นั้นหมายความว่าปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากชุดไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ที่ทำการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

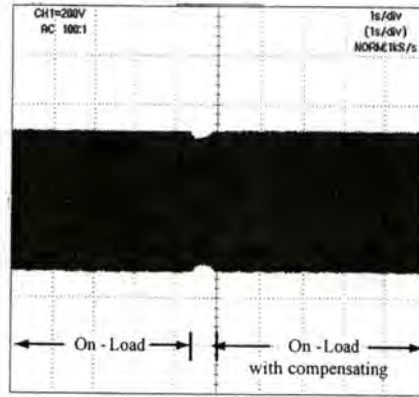


รูปที่ 6.28 แรงดัน ไฟฟ้าที่รีแอกเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่มีภาระ เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์  $108^\circ$ ,  $THDi = 21.3\%$



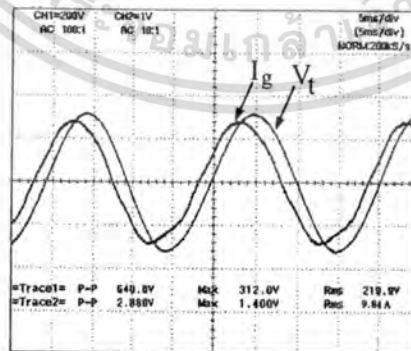
รูปที่ 6.29 แรงดัน ไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่มีภาระ เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์  $108^\circ$ ,  $THDi = 21.3\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



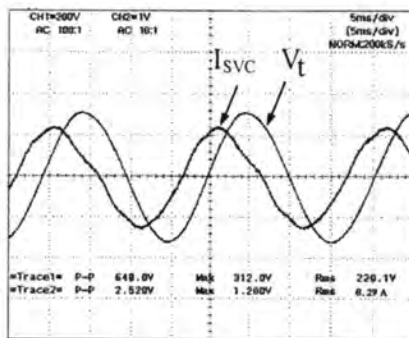
รูปที่ 6.30 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะชั่วขณะ เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์  $126^\circ$

โดยรูปที่ 6.30 แสดงการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะชั่วขณะ โดยการควบคุมมุมจุดชนวนของของไทรสเตอร์  $126^\circ$  สอดคล้องกับรูปที่ 6.31 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า (% THDv) เท่ากับ 2.34 % ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระเนื่องจากผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ) นั้นส่งผลต่อรูปร่างของกระแสไฟฟ้ามักลักษณะไม่เป็นไซน์และย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีจุดทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation region)

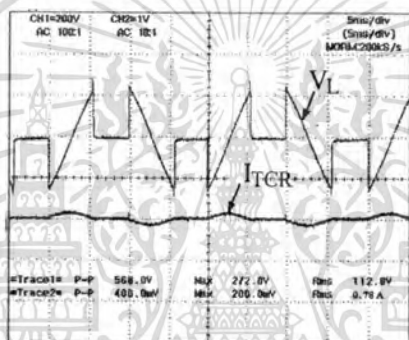


รูปที่ 6.31 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระขนาด 1800 W เมื่อใช้ตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทร

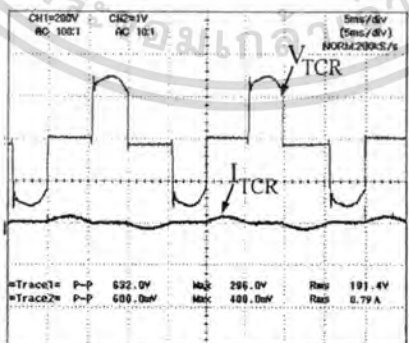
สเตอร์  $126^\circ$ ; % THDv = 2.34 %  
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบ  
 ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายได้  
 สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์  $126^\circ$ , % THDv = 2.34 %



รูปที่ 6.33 แรงดันไฟฟ้าที่รีแอกเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทริ  
 สเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมี  
 ภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์  $126^\circ$ ,  
 % THDi = 64.3 %



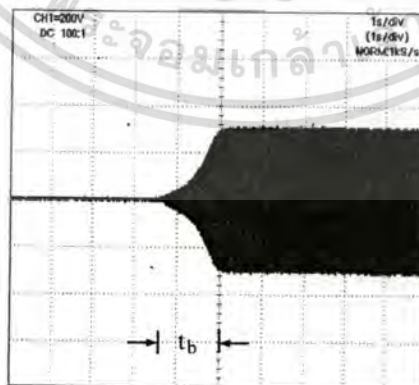
รูปที่ 6.34 แรงดันไฟฟ้าที่ไทริสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทริ  
 สเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมี  
 ภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์  $126^\circ$ ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.32 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของของไทรสเตอร์  $126^\circ$  การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสม นั้นหมายความว่า การควบคุมมุมจุดชนวนของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ไทรสเตอร์เพื่อหักล้างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากชุดคาปาซิเตอร์ ผลที่ได้ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าที่พิกัด สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่รีแอคเตอร์ไทรสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ของตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์แสดงในรูปที่ 6.33-6.34 โดยการเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวนจะส่งผลต่อรูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นสัญญาณไซน์มากขึ้น

#### 6.6.2.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ตัวชดเชยแบบ FC ต่อร่วมกับ FC-TCR

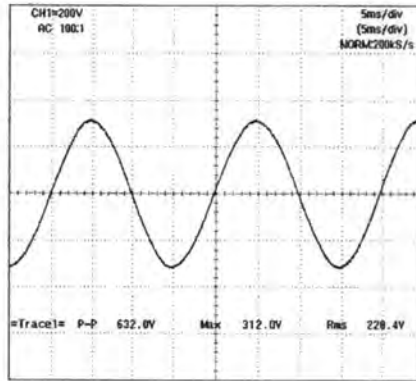
รูปที่ 6.35 แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะชั่วขณะ โดยใช้ตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ โดยใช้ตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $C_b$ ) ขนาด  $35 \mu\text{F}$  จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่สร้างจะมีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าที่พิกัด นั้นหมายถึงขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อใช้ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กนั่นเอง สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $t_b$ ) นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้า



#### รูปที่ 6.35 การสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้

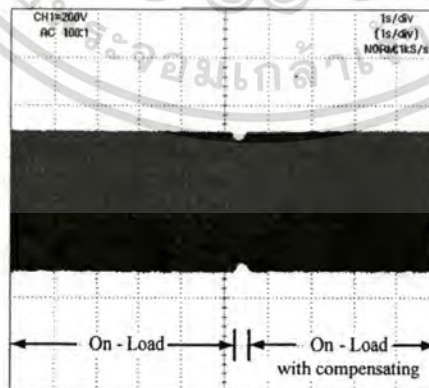
สภาวะชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



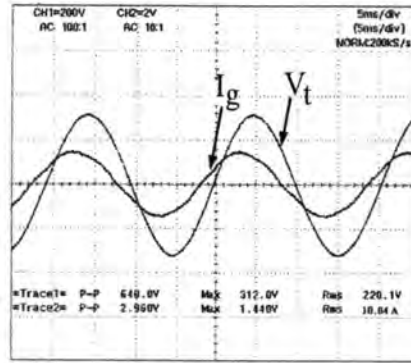
รูปที่ 6.36 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะไม่มีภาระภายใต้สภาวะคงตัว, %THD<sub>v</sub> = 1.92 %

ซึ่งหมายความว่าถึงขนาดของตัวเก็บประจุที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $t_b$ ) สอดคล้องกับขนาดของตัวเก็บประจุ ส่วนรูปที่ 6.36 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะคงตัวที่ ซึ่งมีค่าที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่ารูปร่างสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าจะใกล้เคียงสัญญาณไซน์กว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ตัวชดเชยแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์มีการแบ่งแยกตัวเก็บประจุตามสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั่นเอง



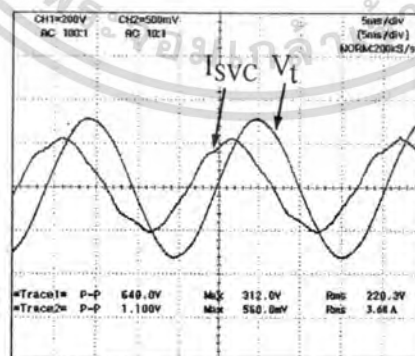
รูปที่ 6.37 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะชั่วขณะเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ 144°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 6.38** แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระขนาด 1800 W เมื่อใช้ตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ รั้งาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์  $144^\circ$ , % THD<sub>v</sub> = 2.51 %

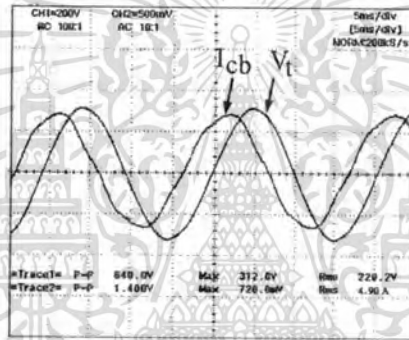
โดยรูปที่ 6.37 แสดงการรั้งาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะชั่วขณะ โดยการควบคุมมุมจุดชนวนของของไทรสเตอร์  $144^\circ$  สอดคล้องกับรูปที่ 6.38 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า (% THD<sub>v</sub>) เท่ากับ 2.51 % ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระ เนื่องจากผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ) นั้นส่งผลต่อรูปร่างของกระแสไฟฟ้ามึลักษณะไม่เป็นไซน์และย่านการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีจุดทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation region)



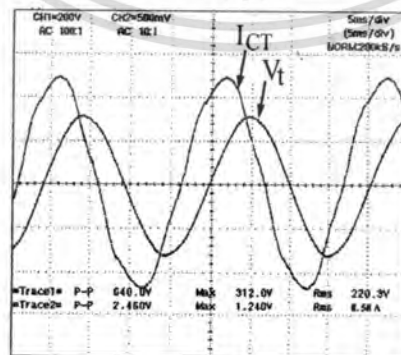
**รูปที่ 6.39** แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W รั้งาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของ

ไทรสเตอร์  $144^\circ$ , % THD<sub>v</sub> = 2.51 % การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

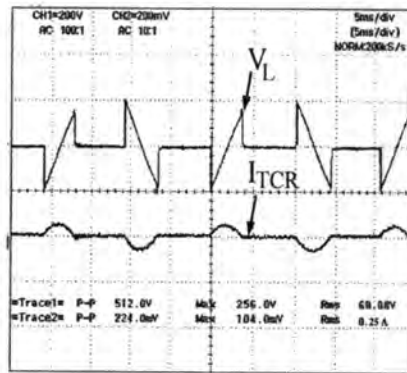
รูปที่ 6.39 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะคงตัวเมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของของไทรสเตอร์  $144^\circ$  การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสมหมายความว่า การควบคุมมุมจุดชนวนของชุดไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ไทรสเตอร์เพื่อหักล้างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ( $C_c$ ) ซึ่งจะรวมกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ( $C_s$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6.40 โดยผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงดังแสดงในรูปที่ 6.41 ผลที่ได้ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด



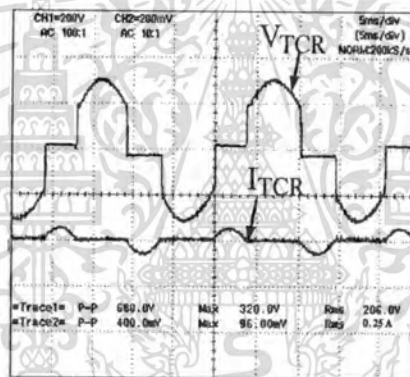
รูปที่ 6.40 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้าของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 2.51 %



รูปที่ 6.41 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปา  
 เอกสารนี้เป็ชิตเตอร์ขณะมีภาระขนาด 1800 W ภายใต้สภาวะคงตัว, % THDv = 2.51 % ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.42 แรงดันไฟฟ้าที่รีแอคเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์  $144^\circ$ , % THDi = 103.7 %



รูปที่ 6.43 แรงดันไฟฟ้าที่ไทรสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีภาระขนาด 1800 W เมื่อมีการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์  $144^\circ$ , % THDi = 103.7 %

สำหรับรูปที่ 6.42-6.43 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่รีแอคเตอร์ ไทรสเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ของตัวชดเชยแบบคาปาซิเตอร์และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ การเพิ่มขึ้นของมุมจุดชนวนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั้นจะส่งผลต่อรูปร่างของกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นสัญญาณไซน์มากขึ้น ผลดังกล่าวก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง สำหรับการบิดเบี้ยวของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองเมื่อใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกส์

เอ็กสลาเรียนเป็นเอ็กสลาเรียนที่ส่งงานให้บริษัทซึ่งในพอมีการทำให้งานนั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิกทั้งสองแบบแสดงดังตารางที่ 6.2 การบิดเบี้ยวของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองจะมีค่ามากขึ้นตามภาระ โดยจะมีความสัมพันธ์กับมุมจุดชนวนของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ที่มีค่ามากขึ้นเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองนั่นเอง

ตารางที่ 6.2 การบิดเบี้ยวของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Types	Total Harmonic Distortion of Voltage (%THDv)		
	No-load	On-load, 900 W	On-load, 1800 W
FC-TCR	2.11	2.23	2.34
FC and FC-TCR	1.92	2.3	2.51

ส่วนกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์ของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง เมื่อใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกทั้งสองแบบแสดงดังตารางที่ 6.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์จะมีค่าลดลงตามภาระ โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์จะมีค่าลดลง ในขณะที่มุมจุดชนวนของชุดไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์มีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 6.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์

Types	Power Losses (W)		
	No-load	On-load, 900 W	On-load, 1800 W
FC-TCR	258	221	64
FC and FC-TCR	-	186	33

## 6.7 บทสรุป

ผลจากการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนทั้ง 2 แบบ เมื่อพิจารณาการบิดเบี้ยวแรงดันฮาร์มอนิกของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะมีภาระจะเห็นได้ว่าบิดเบี้ยวแรงดันฮาร์มอนิก (%THDv) ของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองมีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งมีค่าไม่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไฟฟ้า ขณะเดียวกันถ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูญเสียในไทรสเตอร์และรีแอกเตอร์ของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC) และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) จะมีค่าน้อยกว่าตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) โดยค่าความสูญเสียดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของรีแอกเตอร์และมุมจุดชนวน ดังนั้นเมื่อมองทางด้านการจัดการพลังงาน ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC) และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์ สืบสวน ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดเล็กและการควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้าที่จำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม ผลจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานและแบบประสิทธิภาพสูงเมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็กในบทที่ 3 นั้นแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นจุดด้อยที่แตกต่างกันกล่าวคือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบมาตรฐานที่นำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองจะมีจุดเด่นในส่วนของคุณภาพทางไฟฟ้า มีความสามารถในการรักษาแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเร็วรอบที่ลดลง รวมทั้งใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้สร้างแรงดันไฟฟ้าน้อย แต่มีจุดด้อยในเรื่องของประสิทธิภาพ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงมากและใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้รักษาแรงดันไฟฟ้ามาก ขณะเดียวกันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบประสิทธิภาพสูงที่นำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองจะมีจุดเด่นในส่วนของคุณภาพ มีความสามารถในการสร้างแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเร็วรอบต่ำ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงน้อยรวมทั้งใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้รักษาแรงดันไฟฟ้าน้อย แต่มีจุดด้อยในเรื่องของคุณภาพทางไฟฟ้า ใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้สร้างแรงดันไฟฟ้ามากและขาดความสามารถในการรักษาแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเร็วรอบที่ลดลง ขณะเดียวกันผลของการสืบสวนผลกระทบของการทำสกีวอินบน โรเตอร์ที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาดพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็กในบทที่ 4 นั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อโรเตอร์มีการทำสกีวอินที่มุม  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  และ  $10^\circ$  แสดงให้เห็นถึงจุดเด่นจุดด้อยที่แตกต่างกันกล่าวคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อโรเตอร์มีการทำสกีวอินที่มุม  $0^\circ$  จะมีจุดเด่นในส่วนของคุณภาพ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงน้อยและใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้รักษาแรงดันไฟฟ้าน้อย—แต่มีจุดด้อยในเรื่องของการสั่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระ คุณภาพทางไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อโรเตอร์มีการทำสกีวอินที่มุม  $10^\circ$  จะมีจุดเด่นในส่วนของคุณภาพไฟฟ้า มีความสามารถในการสร้างแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเร็วรอบต่ำ แต่มีจุดด้อยในเรื่องของคุณภาพ ประสิทธิภาพ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงสูงรวมทั้งใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้รักษาแรงดันไฟฟ้ามาก ขณะเดียวกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อโรเตอร์มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำสกีวอริงที่มุม  $5^{\circ}$  จะมีจุดเด่นและจุดด้อยของคุณสมบัติอยู่ที่กลางระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อโรเตอร์มีการทำสกีวอริงที่มุม  $0^{\circ}$  และ  $10^{\circ}$  ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และสืบสวนนำไปสู่ขบวนการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองในบทที่ 5 มีการวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้ไฟไนท์เอลิเมนต์แบบสองมิติ ผลที่ได้รับนำไปสู่การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองต้นแบบขนาดพิกัด 0.75 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 3.46/2.0 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก ทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ออกแบบในสถานะต่างๆเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ประยุกต์ใช้งานจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานจะเห็นได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ออกแบบมีจุดเด่นของคุณสมบัติที่เหนือกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ประยุกต์ใช้งานจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานในทุกๆด้านกล่าวคือ มีประสิทธิภาพสูงกว่า ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ใช้ขนาดตัวเก็บประจุน้อย มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สถานะความเร็วรอบที่ลดลง รวมทั้งมีความสามารถในการสร้างแรงดันไฟฟ้าภายใต้สถานะความเร็วรอบต่ำนั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ภายใต้สถานะความเร็วลมต่ำ ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ผลของการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ออกแบบมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม ซึ่งส่งผลดีต่อการรักษาดังแวดล้อม ขณะเดียวกันในบทที่ 6 นำเสนอการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ FC-TCR และ FC ต่อร่วมกับ FC-TCR สำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้การทำงานต่างๆ ผลจากการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองขนาด 2.2 กิโลวัตต์ 220/380 โวลต์ 8.7/5.2 แอมแปร์ 4 ขั้วแม่เหล็กโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกทั้ง 2 แบบ เมื่อพิจารณาการผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อมีการจะเห็นได้ว่าผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (%THDv) ของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองทั้งสองแบบมีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งมีค่าไม่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไฟฟ้า ขณะเดียวกันค่าความสูญเสียในไทรสเตอร์และรีแอคเตอร์ของตัวชดเชยสแตติกแบบตัวเก็บประจุ (FC) และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับตัวเก็บประจุ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) จะมีค่าต่ำกว่าตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบแบบไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับตัวเก็บประจุ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) ซึ่งค่าความสูญเสียดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของรีแอคเตอร์และมุมจุดชนวน เมื่อพิจารณาในมุมมองทางด้านพลังงานตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบตัวเก็บประจุ (FC) และไทรสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับตัวเก็บประจุ (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor, FC-TCR) จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียในการคำนวณการดำเนินงาน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Controlled Reactor, FC-TCR) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ผลที่ได้รับจากการวิจัยทั้งหมดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นำไปสู่การประยุกต์ใช้งานสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับชนบทอย่างมีประสิทธิภาพตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน สำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยเพิ่มเติมสำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเองเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับชนบท สามารถทำได้โดยการเพิ่มวงจรเรียงไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์และวงจรกรองแรงดันเข้าไปเพิ่มเติมจากที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เนื่องจากในทางปฏิบัติความเร็วลมไม่คงที่ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้มีผลกระทบกับภาระ ความก้าวหน้าในงานวิจัยชิ้นนี้ ผู้เขียนจะนำเสนอต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พุทธพร เสวตสกุลานนท์. 2546. “การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุอย่างง่ายสำหรับอินดักชันเจนเนอเรเตอร์แบบกระตุ้นภายในตัวเอง.” หน้า 35-38 ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26. : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] พุทธพร เสวตสกุลานนท์. 2549. “การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง.” หน้า 129-132 ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29. : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [3] S.S. Murthy., O.P. Malik., A.K. Tandon. “Analysis of self-excited induction generators.” **IEE Proc. Pt.C**, Vol.129, no.6, November. 1982. pp. 260-265
- [4] G. Raina., O.P. Malik. “Wind Energy using A Self-Excited Induction Generator.” **IEEE Transactions on Power Apparatus and System**, Vol.PAS -102, no.12, December. 1983. pp. 3933-3936
- [5] S.S. Murthy., B.P. Singh., C. Nagmani., K.V.V. Satyanarayanna. “ Study on the use of conventional induction motors as self excited induction generators.” **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol.3, no.4, December. 1988. pp. 842-848
- [6] L. Shridhar., Bhim Singh., C.S. Jha. “A step towards improvements in the characteristics of Self excited Induction Generator.” **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol.8, no.1, March. 1993. pp.40-46
- [7] T.F. Chan. “Capacitance Requirements of Self-excited Induction Generators.” **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol.8, no.2, June. 1993. pp.304-310
- [8] S.P Singh., B.S Singh., M.P. Jain. “Comparative study on the performance of a commercially designed induction generator with induction motors operating as self excited induction generators.” **IEE Proc. Pt.C**, Vol.140, no.5, September. 1993. pp.374-380
- [9] Hua Jin., Geza Goos., Luiz Lopes. “An Efficient Switched-Reactor-Based Static Var Compensator.” **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol.30, no.4, July/August. 1994. pp.998-1005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] J. Faiz., A.A. Dadgari., S. Horning., A. Keyhani. "Design of a Three Phase Self-Excited Induction Generator." **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol.10, no.3, September. 1995. pp.516-523
- [11] S.L. Nau. "The influence of the skewed rotor slots on the magnetic noise of three phase induction motors." **IEE Proc. EMD97**, Vol.140, no.444, September. 1997. pp.396-399
- [12] S. Williamson., C.I.McClay. "The Effect of Axial Variations in Saturation Due to Skew on Induction Motor Equivalent-Circuit Parameters." **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol.35, no.6, November/December. 1999. pp.1323-1331
- [13] Li Wang., Ching-Huei Lee. "Long-Shunt and Short-Shunt Connections on Dynamic Performance of a SEIG Feeding an Induction Motor Load." **IEEE Transactions on Energy conversion**, Vol.15, no.1, March 2000. pp.1-7
- [14] A. Tenhunen., A.Arkkio. "Modelling of induction machines with skewed rotor slots." **IEE Proc. Electric Power Application**, Vol.148, no.1, January. 2001. pp.45-50
- [15] Tarek Ahmed., Osamu Noro., Eiji Hiraki., Mutsuo Nakaoka. "Terminal Voltage Regulation Characteristics by Static Var Compensator for a Three-Phase Self-Excited Induction generator." **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol.40, no.4, July/August. 2004. pp.978-988
- [16] Juan Dixon., Luis Moran., Jose Rodriguez., Ricardo Domke. "Reactive Power Compensation Technologies : State-of-the-Art Review." **Proceedings of the IEEE**, Vol.93, no.12, December. 2005. pp.2144-2164 .
- [17] B. Sawetsakulanond., V. Kinnares. "A simple Approach to Capacitance Determination of Self-Excited Induction Generators for Terminal Voltage Regulation." **Proc. IEEE-PEDS'2007, Bangkok, Thailand**, November. 2007. pp.1319-1324
- [18] B. Sawetsakulanond., V. Kinnares. "Analysis and Comparative Study on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Self-Excited Induction Generators." **Proc. IEEE-PEDS'2007, Bangkok, Thailand**, November. 2007. pp.1313-1318

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] B. Sawetsakulanond., V. Kinnares. "Investigation of Skew Effect on the Performance of Self-Excited Induction Generators." **Proc. IEEE-PEDS'2007, Bangkok, Thailand**, November. 2007. pp.1367-1373
- [20] B. Sawetsakulanond., P. Hothongkham., V. Kinnares. "Design and Construction of a Three Phase Self-Excited Induction Generator." **Proc. IEEE-ICSET'2008, Singapore**, November. 2008. pp.1373-1378
- [21] B. Sawetsakulanond., V. Kinnares. "Investigation on the Behavior and Harmonic Voltage Distortion of Terminal Voltage Regulation by Static Var Compensators for a Three Phase Self-Excited Induction Generator." **Proc. IEEE-ICSET'2008, Singapore**, November. 2008. pp.546-551
- [22] B. Sawetsakulanond., P. Hothongkham., V. Kinnares. "Investigation on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Grid Connected Induction Generators." **Proc. IEEE-ICSET'2008, Singapore**, November. 2008. pp.949-954
- [23] B. Sawetsakulanond and V. Kinnares, "Investigation on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Self-Excited Induction Generators feeding the non-linear loads" **Proc. IEEE-ICSET'2008, Singapore**, November. 2008. pp.955-960
- [24] A.F. Puchstien, T.C. Lloyd, A. G.Conrad. **Alternating-Current Machines**. John Willey & Sons, Inc, 1954. pp 313-317
- [25] Bedrich Heller, Vaclav Hamata. Cochran. **Harmonic Field Effects in Induction Machines**. Elsevier Scientific, Inc, 1977. pp. 256-274
- [26] Leander W. Matsch. **Electromagnetic and Electromechanical Machines**. Harper & Row, Inc, 1977. pp. 429-431
- [27] T.J.E. Miller. **Reactive Power Control in Electric Systems**. John Willey & Sons, Inc, 1982. pp 181-196
- [28] Enrico Levi. **Polyphase Motors**. John Willy & Sons, Inc, 1984. pp. 255-263
- [29] Paul L. Cochran. **Polyphase Induction Motors**. Marcel Deccer, Inc , 1989. pp. 527-536
- [30] Essam S. Hamdi. **Design of Small Electrical Machines**. John Willey & Sons, Inc, 1994. pp. 128-140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [31] Richard H. Engelmann, William H. Middendorf. **Handbook of Electric Motors**. Marcel Dekker, Inc. 1995. pp. 228-315
- [32] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugui. **Understanding FACTS**. IEEE Press, 2000. Pp. 135-163
- [33] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. **Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems**. John Willey & Sons, Inc, 2002. pp. 45-70
- [34] Ion Boldea, Syed A. Nasar. **The Induction Machine Handbook**. CRC Press, 2002. Chapter 7
- [35] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Cesar Angeles-Camacho. **FACTS Modelling and Simulation in Power Networks**. John Willey & Sons, Inc, 2004. pp 9-15
- [36] Mukund R. Patel. **Wind and Solar Power Systems**. CRC Press, 2006. pp 11-39
- [37] IEEE std 112-2004. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. IEEE Press, 2004. pp.28-53
- [38] คู่มือการใช้งาน โปรแกรม SPEED (Scottish Power Electronics and Electric Drives)

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพุทธพร เสวตสกุลานนท์  
วัน เดือน ปี 27 ตุลาคม 2516 ที่กรุงเทพมหานคร  
ที่อยู่ 68/1524 หมู่ 16 หมู่บ้านอมรทรัพย์ ถนนอู่วิทยา 16  
แขวงกระทู้มราช เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

ประวัติการศึกษา 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
2543 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) เครื่องจักรกลไฟฟ้า  
2) การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า  
3) การอนุรักษ์พลังงาน  
4) พลังงานทดแทน  
5) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2539-2540

ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า บริษัทซิโนไทยเอ็นจิเนียริงจำกัด  
- ผลงาน การควบคุมงานระบบโครงการเอเชียนเกมส์ ณ มหาวิทยาลัย  
ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

พ.ศ. 2540-ปัจจุบัน

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ผลงานวิจัย

ผลงานวิจัยในประเทศ

1) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และพิชิต ถ้ายอง, “ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน  
วงจรแม่เหล็ก” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 (EECON-21), มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 12-13 พฤศจิกายน 2541, หน้า 469-472.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

- 2) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และพิชิต ถ้ายอง, “การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 (EECON-22), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2-3 ธันวาคม 2542, หน้า 597-600.
  - 3) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และเปรมศักดิ์ ปรีชา, “อุปกรณ์ป้องกันฟอลต์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 (EECON-23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 23-24 พฤศจิกายน 2543, หน้า 237-240.
  - 4) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และเปรมศักดิ์ ปรีชา, “การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสภายใต้เงื่อนไขการเกิดฟอลต์หนึ่งเฟส” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 22-23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 211-216.
  - 5) พุทธพร เสวตสกุลานนท์ “บัลลาสต์กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 (EECON-25), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 21-22 พฤศจิกายน 2545, หน้า 51-55.
  - 6) พุทธพร เสวตสกุลานนท์ “การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับอินดักชันเจนเนอเรเตอร์แบบกระตุ้นภายในตัวเอง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 (EECON-25), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 21-22 พฤศจิกายน 2545, หน้า 56-60.
  - 7) พุทธพร เสวตสกุลานนท์ “อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับอินดักชันเจนเนอเรเตอร์แบบกระตุ้นภายในตัวเอง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON-26), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 29-34.
  - 8) พุทธพร เสวตสกุลานนท์ “การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุอย่างง่ายสำหรับอินดักชันเจนเนอเรเตอร์แบบกระตุ้นภายในตัวเอง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON-26), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 35-38.
  - 9) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และรุ่งโรจน์ สุริโยภาสุไร “อุปกรณ์ประหยัดพลังงานสำหรับระบบแสงสว่าง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON-26), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 6-7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 210-215.
  - 10) พุทธพร เสวตสกุลานนท์ “การวิเคราะห์และพิจารณาเลือกขนาดตัวเก็บประจุสำหรับอินดักชันเจนเนอเรเตอร์แบบกระตุ้นภายในตัวเอง ตอนที่ 1 : การระบอบความต้านทาน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27), มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน 2547, หน้า 13-16.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

11) พุทธพร เสวตสกุลานนท์ “การวิเคราะห์และพิจารณาเลือกขนาดตัวเก็บประจุสำหรับอินดักชันเจนเนอเรเตอร์แบบกระตุ้นภายในตัวเอง ตอนที่ 2 : การระบอบความต้านทาน-ความเหนี่ยวนำ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27), มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน 2547, หน้า 25-28.

12) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และรุ่งโรจน์ สุริโยภาสุไร “การทำนายขนาดตัวเก็บประจุสำหรับแรงดันไฟฟ้าของอินดักชันเจนเนอเรเตอร์โดยใช้เครือข่ายประสาท” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27), มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน 2547, หน้า 33-36.

13) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และรุ่งโรจน์ สุริโยภาสุไร “บัลลาสต์กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสำหรับหลอดแสงจันทร์ขนาด 125 วัตต์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27), มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน 2547, หน้า 257-260.

14) รุ่งโรจน์ สุริโยภาสุไรและพุทธพร เสวตสกุลานนท์ “การเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบแสงสว่างปกติกับระบบแสงสว่างที่อาศัยแสงจากธรรมชาติ” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 11-13 พฤษภาคม 2548, หน้า ECB03-1 - ECB03-6.

15) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และรุ่งโรจน์ สุริโยภาสุไร “การออกแบบและสร้างบัลลาสต์กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสำหรับหลอดแสงจันทร์ขนาด 80 วัตต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 11-13 พฤษภาคม 2548, หน้า ECB04-1 - ECB04-5.

16) พุทธพร เสวตสกุลานนท์, “การออกแบบและสร้างบัลลาสต์กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 18 วัตต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 11-13 พฤษภาคม 2548, หน้า ECB05-1 - ECB05-5.

17) พุทธพร เสวตสกุลานนท์, “วิธีการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่มีการต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะสลิปเกินพิกัด” , การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2549, หน้า 129-132.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

18) พุทธพร เสวตสกุลานนท์, “การวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2549, หน้า 125-128.

19) พุทธพร เสวตสกุลานนท์, “การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุสำหรับระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2549, หน้า 133-136.

20) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และวิจิตร กิณเรศ, “การวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ป้อนให้กับระบบกักเก็บพลังงาน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549, หน้า 129.

21) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และวิจิตร กิณเรศ, “การวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของการทำสวิตชิงที่มีต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเอง”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549, หน้า 129.

22) พุทธพร เสวตสกุลานนท์, “การวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549, หน้า 129.

23) B. Sawetsakulanond and V. Kinnares, “Comparative Performance Evaluation of Skew Effect on the Performance of Self-Excited Induction Generators”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2551, หน้า 85-88.

24) B. Sawetsakulanond and V. Kinnares, “Terminal Voltage Regulation by Static Var Compensator for a Three-Phase Self-Excited Induction generator”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2551, หน้า 89-92.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

25) B. Sawetsakulanond and V. Kinnares, "Investigation of Skew Effect on the Power Quality of Grid Connected Induction Generators", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2551, หน้า 185-188.

26) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และวิจิตร กิณเรศ, "การปรับปรุงปริมาณฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองที่ประยุกต์ใช้งานกับระบบกักเก็บพลังงาน", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2552, หน้า 144-148.

27) พุทธพร เสวตสกุลานนท์และวิจิตร กิณเรศ, "การสืบสวนความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโดยใช้ตัวชดเชยวาร์แบบสแตติกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นภายในตัวเอง", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2552, หน้า 153-156.

### ผลงานวิจัยต่างประเทศ

1) B. Sawetsakulanond and V. Kinnares, "A simple Approach to Capacitance Determination of Self-Excited Induction Generators for Terminal Voltage Regulation," in Proc. Power Electronics and Drive System, Bangkok, Thailand., pp.1319-1324, November 2007.

2) B. Sawetsakulanond and V. Kinnares, "Investigation on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Self-Excited Induction Generators feeding the non-linear loads," in Proceeding of the International Conference ICSET'2008, Singapore., pp.955-960, November 2008.

3) B. Sawetsakulanond and V. Kinnares, "Investigation on the Behavior and Harmonic Voltage Distortion of Terminal Voltage Regulation by Static Var Compensators for a Three Phase Self-Excited Induction Generator," in Proceeding of the International Conference ICSET'2008, Singapore., pp.546-551, November 2008.

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

งานบริการทางวิชาการ

1. ให้คำปรึกษาการออกแบบและติดตั้งสายล่อฟ้าแก่ผู้จัดการหนังสือพิมพ์ก้าวหน้า จังหวัดฉะเชิงเทรา
2. ให้คำปรึกษาการออกแบบและติดตั้งอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์แก่ผู้จัดการบริษัทสุพรีมาเซรามิกส์ จังหวัดลำปาง
3. ให้คำปรึกษาการติดตั้งระบบไฟฟ้าสำรองสำหรับเครื่องฟอกไตเทียม ศูนย์การแพทย์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดปทุมธานี



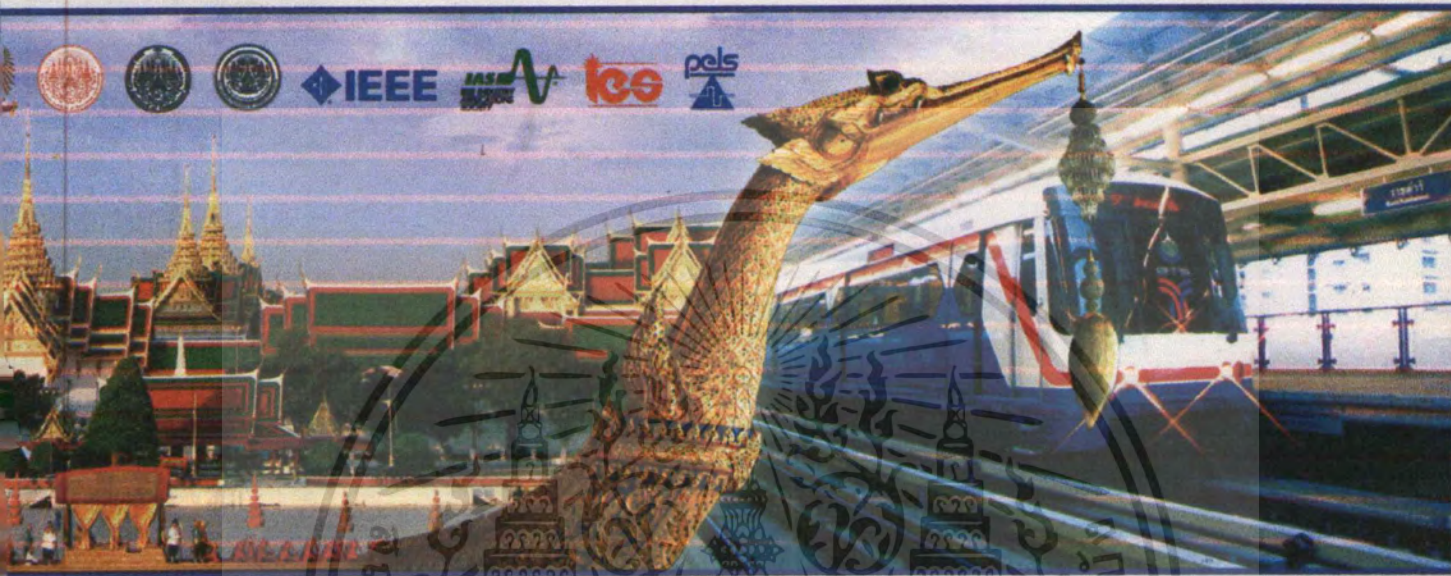
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Seventh International Conference on Power Electronics and Drive Systems



November 27-30, 2007, Bangkok, Thailand

เลือกสรรบัณฑิตยสถาน สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กรุงเทพมหานคร  
ในวาระที่ประเทศไทยมีพระมหากษัตริย์องค์ที่ 9 ในรัชกาลปัจจุบัน

# Analysis and Comparative Study on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Self – Excited Induction Generators

B. Sawetsakulanond and V. Kinnaraes

Dept. of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
 Fax 662-3269902 E-mail: Budhapon@hotmail.com, E-mail: kkwijit@kmitl.ac.th

**Abstract**--This paper proposes the performance analysis and comparative study between standard and high efficiency squirrel cage self – excited induction generators (SEIG). Consideration of capacitance of SEIG based on equivalent circuit model is given. Testing and performance comparison under dynamic and steady state conditions for both pure resistive and resistive – inductive load conditions have been made. The interpretation of experimental results can be guidelines for effective design and development of SEIG for wind energy applications.

**Index Terms**--self - excited induction generator, induction machines

## I. INTRODUCTION

Owing to the continuous increase in energy need, it is difficult to meet the growing demand by exploiting energy from the limit conventional source, such as coal, oil, gas, and so on. As a consequence, a greater emphasis is now being given to harness energy from non-conventional sources such as wind, biogas and small hydro heads[1,3]. A three phase induction machine can be made to work as a self - excited generator (SEIG) when its rotor is driven at suitable speed by wind energy and its excitation is provided by connecting a three phase capacitor bank at the stator terminals in order to build-up voltage and regulate terminal voltage. It offers various advantages over other machines such as reduced unit cost, brushless rotor (squirrel cage construction), absence of separate DC source and ease of maintenance. Numerous papers have attempted to analyze the SEIG using equivalent circuit approach [1-5]. Generally two different (but related) methods of capacitance value solution for voltage build-up and terminal voltage regulation have been employed, namely, the loop impedance method and nodal admittance method. Steady state analysis of such generators seems to be more interested than dynamic analysis. Excitation capacitors affects stator current. Therefore careful selection of this capacitor is required. Controlled static var compensator in conjunction with the ac load voltage regulator based on dynamic model can be found in [6]. These techniques are based on power electronic applications which provides good performance under a wide range of operation. However there are a few research works on investigation of various types of squirrel cage induction machines with suitable capacitance subject to load conditions based on separation of capacitors into built-up capacitor and compensating capacitor. Therefore this paper present the

analysis of capacitance with the proposed approach depending on load conditions and comparative study on the performance between standard and high efficiency machines operating as self – excited induction generators. The results will be graphically presented and discussed in order to provide guidelines for the designers.

## II. EQUIVALENT CIRCUIT ANALYSIS

For proposed capacitance consideration of the SEIG, the system can be shown in Fig 1. Capacitors are divided into two parts namely, a built-up or excitation capacitor ( $C_b$ ) and a compensating capacitor ( $C_c$ ) for terminal voltage regulation. The  $C_b$  is responsible for no-load operation whilst both  $C_b$  and  $C_c$  are responsible for on-load operation. For no-load operation, the per phase equivalent circuit is shown in Fig2. neglecting harmonic effect and core loss[3].

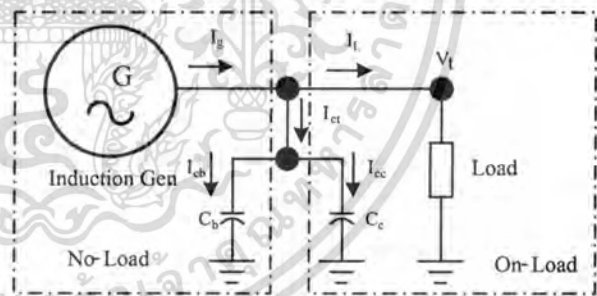


Fig.1. Single line diagram of the SEIG

From Fig.2, impedance,  $Z_{CD}$  can be written as equations (1) - (3)

$$Z_{CD} = R_{CD} + jX_{CD} \tag{1}$$

$$R_{CD} = \frac{(a-b)R_2 X_m^2}{R_2^2 + (a-b)^2(X_m + X_2)^2} \tag{2}$$

$$X_{CD} = \frac{R_2^2 X_m + (a-b)^2 X_m X_2 (X_m + X_2)}{R_2^2 + (a-b)^2(X_m + X_2)^2} \tag{3}$$

Where  $a$  is the per unit frequency  
 $b$  is the per unit speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

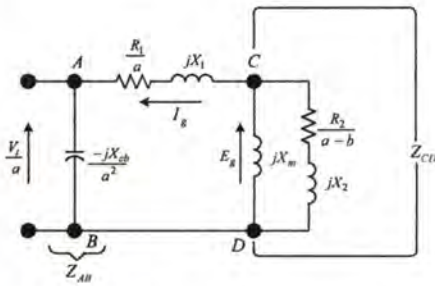


Fig.2. Per phase equivalent circuit of the SEIG at no - load

Using KVL results in

$$I_g \left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_{l1} \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (4)$$

Since  $I_g$  is not definitely zero during voltage build-up, as a consequence, equation (4) can be rewritten as

$$\left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_{l1} \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (5)$$

From equation (5), the real part is zero. Then

$$\frac{R_1}{a} + \frac{(a-b)R_2 X_m^2}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2} = 0 \quad (6)$$

According to equation (6), we can obtain  $a_{max}$  as

$$a_{max} = b - \frac{b}{2} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \left( \frac{b_c}{b} \right)^2}}{1 + \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \left( 1 + \frac{X_2}{X_m} \right)} \right] \quad (7)$$

Also,  $b_c$  can be determined as

$$b_c = \frac{2R_1}{X_m} \sqrt{\frac{R_2}{R_1} + \left( 1 + \frac{X_2}{X_m} \right)^2} \quad (8)$$

Where  $b_c$  is the critical speed

Therefore capacitance for built-up voltage during no-load can be determined as

$$C_b = \frac{1}{\left\{ 2\pi f_b Z_b a_{max}^2 (X_1 + X_{CD}) \right\}} \quad (9)$$

Where  $C_b$  is the per phase built-up capacitor value  
 $Z_b$  is the base impedance  
 $f_b$  is the base frequency

For analysis of the on - load operation,  $C_c$  is introduced. According to Fig.3, when supplying the resistive - inductive load, the terminal voltage level will be reduced since the load draws reactive power from the system. In order to maintain the terminal voltage constant,  $C_c$  can be determined as follows. Total reactive power of overall capacitors (i.e.  $C_b$  and  $C_c$ ) is

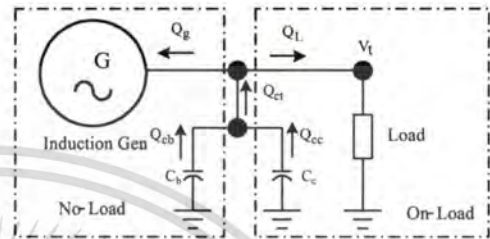


Fig.3. Power flow diagram

$$Q_{ct} = Q_g + Q_L \quad (10)$$

When

$$Q_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2} \quad (11)$$

$$Q_L = \frac{\left( \frac{V_t}{a} \right)^2}{X_L} \quad (12)$$

Where  $s_g$  is the per phase apparent power of the SEIG  
 $P_g$  is the per phase active power of the SEIG  
 $Q_g$  is the per phase reactive power of the SEIG  
 $Q_L$  is the per phase reactive power of load  
 $Q_{ct}$  is the per phase reactive power of total capacitor

Compensated reactive power is

$$Q_{cc} = Q_{ct} - Q_{cb} \quad (13)$$

When

$$Q_{cb} = 2\pi \left( \frac{V_t}{a} \right)^2 (f C_b) \quad (14)$$

Where  $Q_{cb}$  is the per phase reactive power of the built-up capacitor  
 $Q_{cc}$  is the per phase reactive power of the compensating capacitor

Per phase current of the compensating capacitor ( $C_c$ ) is determined from

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t/a} \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Per phase compensated capacitance is calculated as following equations

$$X_{cc} = \frac{V_t / a}{I_{cc}} \quad (16)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f (jX_{cc})} \quad (17)$$

Thus, total capacitor value for the SEIG is

$$C_t = C_b + C_c \quad (18)$$

Where  $C_c$  is the per phase compensating capacitor  
 $C_b$  is the per phase built – up capacitor  
 $C_t$  is the per phase total capacitor

The procedure for determining capacitor values for the SEIG under on – load conditions when supplying the resistive load can be performed as same as for the resistive – inductive load with  $Q_L = 0$

### III. EXPERIMENTAL TESTS AND DISCUSSION

The tests have been made for finding parameters and for investigation performance

#### A. Parameters Test

Three phase, 3kVA, 2.2 kW, 220/380 volt, 4 poles induction machines with standard and high efficiency types are used. Table 1 shows parameters of the under test machines obtained from the test complied with IEEE std. 112-1996 testing [7].

Table 1  
Parameters of the Machines

Type	R1	R2	Rc	X1	X2	Xm
Standard Machine	3.17 $\Omega$	2.56 $\Omega$	627.37 $\Omega$	3.48 $\Omega$	3.48 $\Omega$	93.43 $\Omega$
High Efficiency Machine	1.40 $\Omega$	1.81 $\Omega$	568.50 $\Omega$	3.31 $\Omega$	3.31 $\Omega$	75.76 $\Omega$

#### B. Operating Test

The capacitance analysis uses Maple program for determining capacitance under various load conditions and 0.85 lagging power factor. Tables 2-3 give results with constant speed of 1500 rpm and regulated terminal voltage of 220 V, Y connected. Figs. 4-16 show the SEIG performance in terms of voltage build – up, power quality, frequency variation and efficiency.

From Fig.4, it can be seen that characteristics between  $E_g$  and  $X_m$  for both SEIGs are different.  $X_m$  of the high efficiency SEIG is smaller than that of the standard SEIG.

Table 2  
Capacitance for resistive load

Type	No-Load $C_b$ ( $\mu F$ )	ON-Load ; $C_c$ ( $\mu F$ )				Total $C_c$ ( $\mu F$ )	$C_T$ ( $\mu F$ )
		192 (W/ph)	384 (W/ph)	576 (W/ph)	768 (W/ph)		
Standard	35	5	7	9	12	33	68
Hi-efficiency	40	3	4	5	6	18	58

Table 3  
Capacitance for resistive - inductive load

Type	No-Load $C_b$ ( $\mu F$ )	ON-Load ; $C_c$ ( $\mu F$ )				Total $C_c$ ( $\mu F$ )	$C_T$ ( $\mu F$ )
		213 (W/ph)	424 (W/ph)	648 (W/ph)	859 (W/ph)		
Standard	35	14	17	20	24	75	110
Hi-efficiency	40	10	13	16	20	59	99

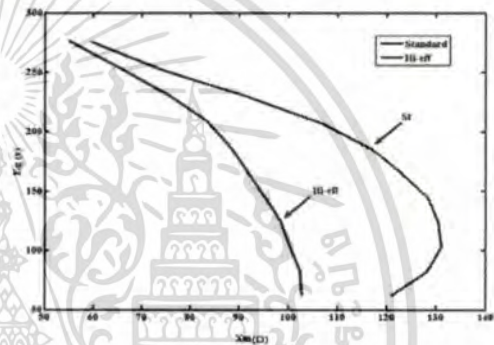


Fig.4. Characteristic between  $E_g$  and  $X_m$

It is true that in the design of the high efficiency machine, maximum flux density level is low in order to reduce core loss. As a result,  $X_m$  is low. For SEIG applications of the high efficiency induction machine,  $C_b$  for the high efficiency SEIG is higher than for the standard SEIG.

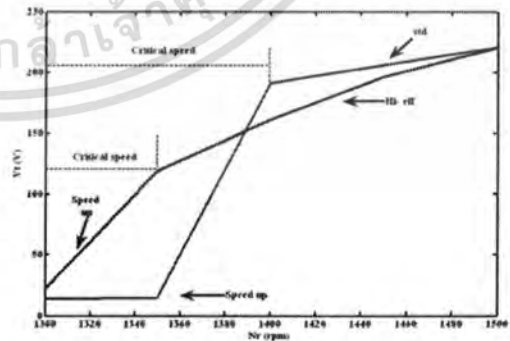


Fig.5. Variation of speed with terminal voltage for SEIG

Figs.5-6 demonstrate the impact of the speed change on built-up voltage. When increasing the speed of the prime mover, the high efficiency SEIG has a critical speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

point. which is lower than the standard SEIG. When decreasing the speed of the prime mover, built – up voltage of the high efficiency SEIG is decreased lower than the standard SEIG. The reason is that in the design of high efficiency machines, magnetic material type with narrow hysteresis loop is always selected in order to reduce the hysteresis losses. As a consequence, the capability of voltage regulation is influenced with this view point, the high efficiency SEIG requires improvement to overcome this problem.

high efficiency SEIG is longer than for the standard SEIG since the high efficiency SEIG is designed for low magnetic flux density.

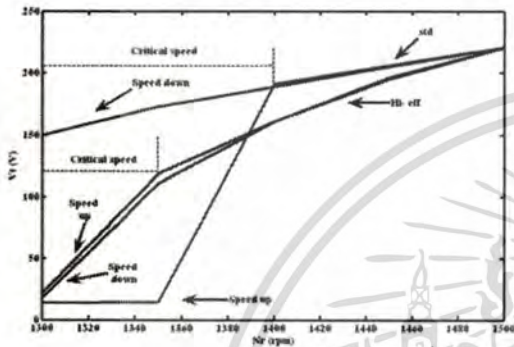


Fig.6. Variation of hysteresis voltage for SEIG

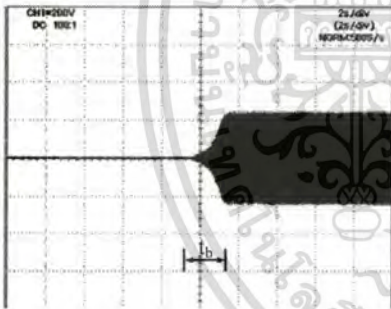


Fig.7. Built – up voltage of the standard SEIG

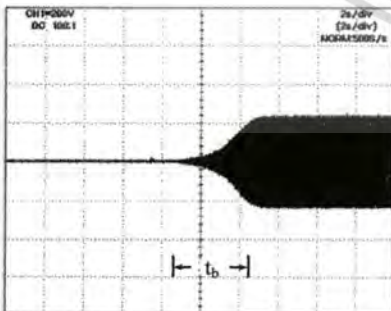


Fig.8. Built – up voltage of the high – efficiency SEIG

Figs.7-8 illustrate to duration (built – up voltage time,  $t_b$ ) of voltage build- up of the SEIG. The duration for the

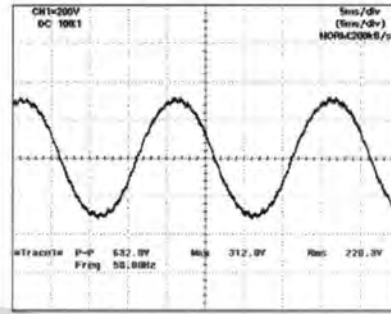


Fig.9. Terminal voltage waveform of the standard SEIG under steady – state , % THDv = 4.7 %

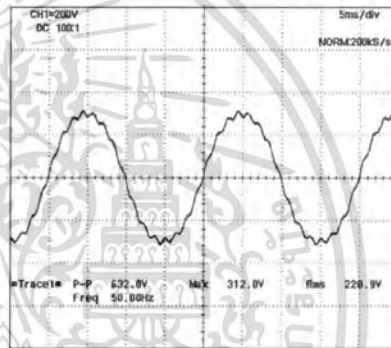


Fig.10. Terminal voltage waveform of the high efficiency SEIG under steady – state , % THDv = 6 %

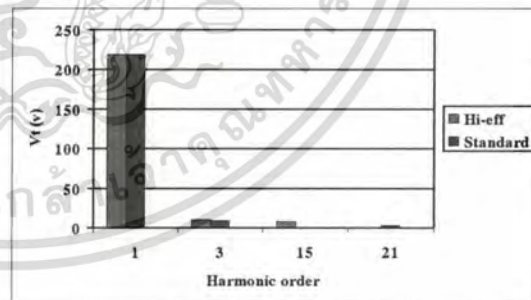


Fig.11. Harmonic Spectra of the SEIG terminal voltage

Figs. 9-11 show terminal voltage waveforms. The standard SEIG offers more nearly sinusoidal waveform than the high efficiency SEIG. Fig.11. confirms this point. According to this disadvantage the high efficiency SEIG should be improved. Figs. 12-13 show variation of reactive power with output power under various load conditions.  $Q_{cb}$  of the standard and high efficiency is decreased due to the impact of a reduction in frequency of induced voltage.  $Q_{cb}$  of the high efficiency SEIG is higher than that of the standard SEIG due to lower  $X_m$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

As a result, it needs higher capacitance.  $Q_{cc}$  is increased with increasing loads.  $Q_{cc}$  of the high efficiency SEIG under pure resistive load and resistive – inductive loads. As a consequence, it needs lower compensated capacitance since the high efficiency SEIG has voltage drop due to low stator impedance and low  $Q_G$ . The sum of reactive power of total capacitors is equal to the sum of reactive power of the SEIG and loads.

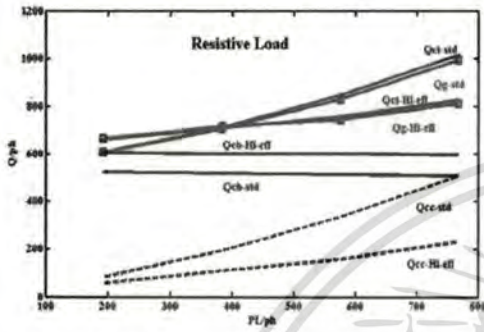


Fig.12. Variation of reactive power with output power for resistive load

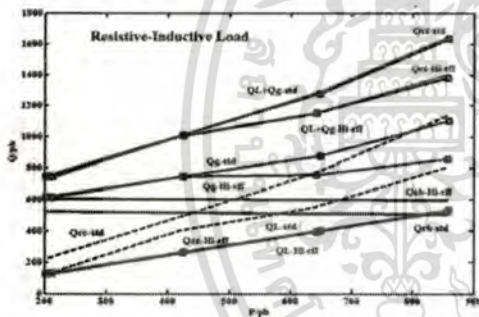


Fig.13. Variation of reactive power with output power for resistive - inductive loads

Figs.14-15 show a change in frequency of the SEIG. The high efficiency SEIG gives smaller change than the standard SEIG under various types of loads since the rotor resistance of the high efficiency SEIG is less than that of the standard SEIG.

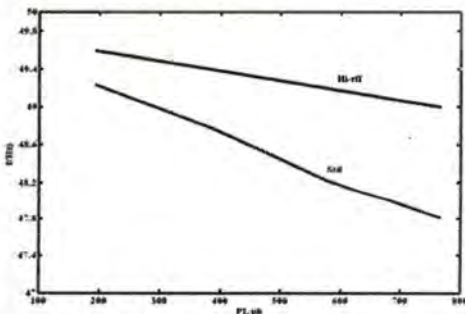


Fig.14. Variation of frequency with output power for resistive load

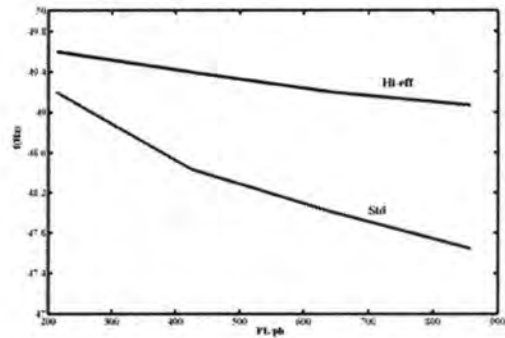


Fig.15. Variation of frequency with output power for resistive - inductive loads

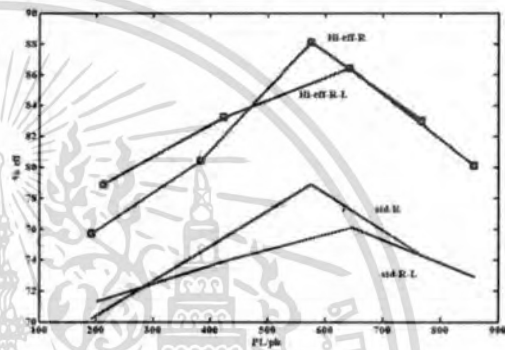


Fig.16. Variation of efficiency with output power for both SEIG

From Fig.16, it can be seen that the efficiency of the high efficiency SEIG is higher than that of the standard SEIG under various types of loads. The fact is that in the design of the high efficiency machine, a reduction in losses is the main objective. As a result, the high efficiency machine still produce low losses when operating as the SEIG.

#### IV. CONCLUSION

From the tests and analysis of the performance of the high efficiency and standard SEIG, it found that the high efficiency SEIG is suitable for generating electric power from wind energy. However, improvement and development are still required in term of capability of voltage regulation under a speed change, harmonic reduction of terminal voltage and start – up duration

#### APPENDIX

$V_b$ : 220 V,  $I_b$ : 5.2 A (standard machine) and 4.7 (high efficiency machine),  $P_b$ : 2.2 kW,  $Z_b$ : 42.30  $\Omega$  (standard machine) and 46.80  $\Omega$  (high efficiency machine),  $Z_L$ : per phase resistive load 242  $\Omega$  and resistive- inductive load 166.97+j103.45  $\Omega$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

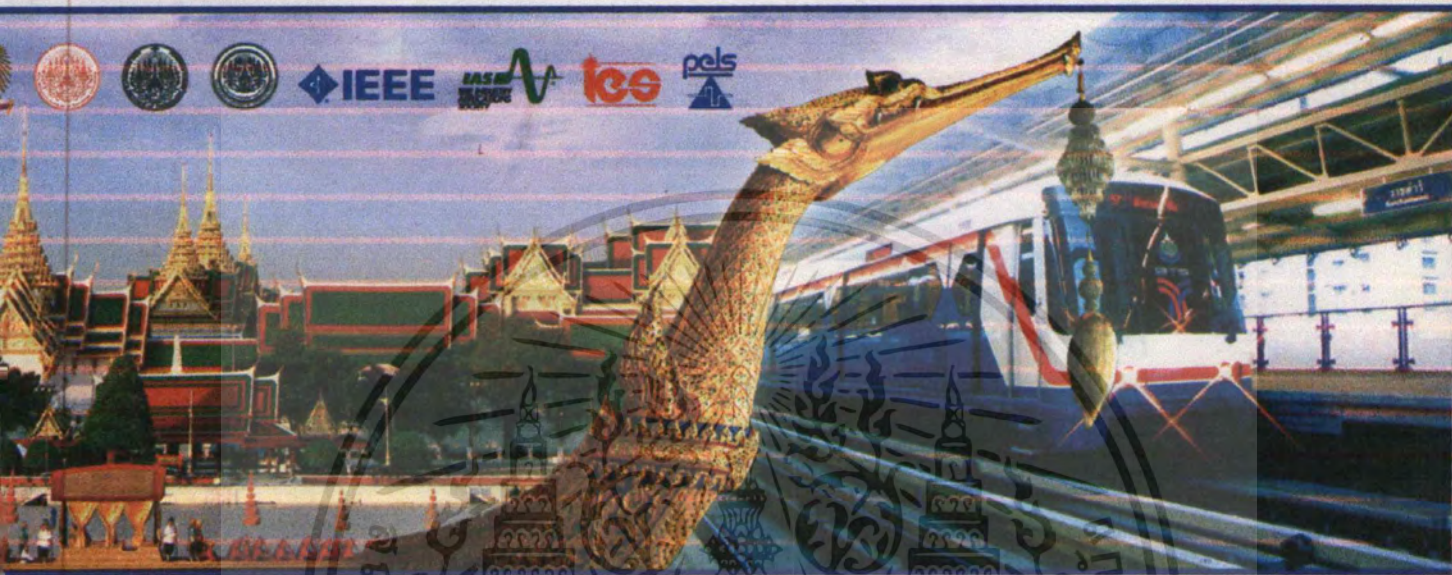
## REFERENCES

- [1] S.S. Murthy , O.P. Malik , and A.K. Tandon , “ Analysis of self – excited induction generators,” *Proceedings of the IEE* , Vol.129, No.6, pp.260-265, November 1982.
- [2] S.S. Murthy , B.P. Singh , C. Nagmani and K.V.V. Satyanarayanna , “ Study on the use of conventional induction motors as self excited induction generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.3, No.4, pp.842-848, December 1988.
- [3] T.F. Chan , “Capacitance Requirements of Self-excited Induction Generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.2, pp.304-310, June 1993.
- [4] S.P Singh , B.S Singh and M.P. Jain , “Comparative study on the performance of a commercially designed induction generator with induction motors operating as self excited induction generators,” *Proceedings of the IEE* , Vol.140, No.5, pp.374-380, September 1993.
- [5] L. Shridhar , Bhim Singh , C.S. Jha , “A step towards improvements in the characteristics of Self excited Induction Generator ,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.1, pp.40-46, March 1993.
- [6] Tarek Ahmed, Katsumi Nishida, Mutsou Nakaoka and Hyun Woo Lee, “Self - Excited Induction generator with Simple Voltage Regulation Scheme for Wind Energy,” *Proceedings of the 30 th Annual Conference of the IEEE*, Vol.140, No.5, pp.86-91, November 2004.
- [7] IEEE std 112 – 1996 , “*IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators* ;” pp.28-53, 1996.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Seventh International Conference on Power Electronics and Drive Systems



November 27-30, 2007, Bangkok, Thailand

## Investigation of skew effect on the Performance of Self – Excited Induction Generators

B. Sawetsakulanond and V. Kinnares

Dept. of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok 10520, Thailand

Fax 662-3269902 E-mail: Budhapon@hotmail.com E-mail: kkwijit@kmitl.ac.th

**Abstract**--This paper presents the investigation of skew effects on the performance of three phase, 2.2 kW 220/380 volt 4 poles self – excited induction generators (SEIG) with skewed squirrel cage rotor. Analysis of excitation capacitor of the SEIG based on a steady – state equivalent circuit model including rotor skew effect is given. Skewed rotor with angle of  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ , and  $10^\circ$  for the SEIG are employed. Testing and performance comparison under dynamic and steady – state operation with resistive and resistive – inductive loads have been performed. Results can be guidelines for development of effective wind induction generators.

**Index Terms**--Induction generator, self - excited

### I. INTRODUCTION

Owing to the continuous increase in energy need, it is difficult to meet the growing demand by exploiting energy from the limit conventional source, such as coal, oil, gas, and so on. As a consequence, a greater emphasis is now being given to harness energy from non-conventional sources such as wind, biogas and small hydro heads [1-2,5]. A three phase induction machine can be made to work as a self - excited generator when its rotor is driven at suitable speed by wind energy and its excitation is provided by connecting a three phase capacitor bank at the stator terminals in order to build-up voltage and regulate terminal voltage. It offers various advantages over other machines such as reduced unit cost, brushless rotor (squirrel cage construction), absence of separate DC source and ease of maintenance. Numerous papers have attempted to analyze the SEIG using equivalent circuit approach [1-3,5-7]. Generally two different (but related) methods of capacitance solution for voltage build-up and terminal voltage regulation have been employed, namely, the loop impedance method and nodal admittance method. Steady state analysis of such generators seems to be more interested than dynamic analysis. Excitation capacitors affects stator current. Therefore careful selection of this capacitor is required. Controlled static var compensator in conjunction with the ac load voltage regulator based on dynamic model can be found in [8]. These techniques are based on power electronic applications which provides good performance under a wide range of operation. However few research works have paid attention on performance of SEIG with skewed slot rotor type. Therefore this paper will present the investigation of

skew effect on the performance of SEIG such as build – up voltage, relationship between terminal voltage and speed, compensated reactive power

### II. EQUIVALENT CIRCUIT ANALYSIS

As shown in Fig.1, the skewed rotor slots are usually used to provide starting torque when the motors have the number of the stators slots equal to the rotor slots. It has proved that other negative influences could be reduced, such as asynchronous torque harmonics, oscillating torque and stray load losses when skewed rotor slots are used. The skewed slots generate an additional leakage flux in the machines, reducing the useful flux. Therefore, a reduction of the mutual flux between stator and rotor occurs. However, rotor - bar skewing causes a decrease in the voltage induced in the rotor winding, which can be understood by considering the voltage along a given rotor bar. As the rotating air gap flux wave passes the rotor bar, the peak of the fundamental component of the flux wave will see portions of that bar at successively later times. This causes the fundamental component of the rotating flux wave to appear smaller, that is, with a reduction in the rotor voltage. As shown in equation (1), the rotor voltage is reduced by a factor equal to the skew factor ( $K_{sk}$ ) [3].

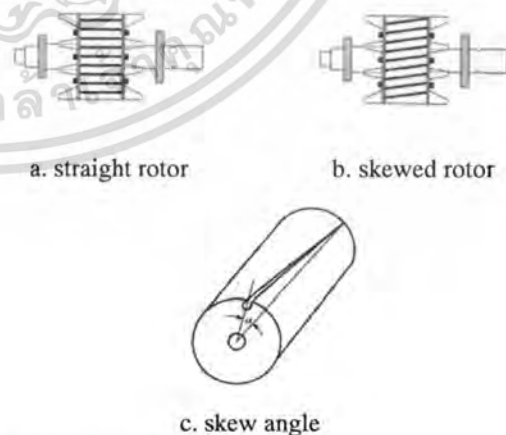


Fig.1. Slots skewing

$$K_{sk} = \frac{\sin\left(\frac{\lambda\alpha}{2}\right)}{\frac{\lambda\alpha}{2}} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Where  $K_{sk}$  is the skew factor

$\alpha$  is the skew angle

$\lambda$  is the ratio between the flux for skewed slots and without skewed slots

Skewing the rotor increases the rotor resistance due to increase in bar length. The increased resistance can be written as equations (2) – (3)[10].

$$R_{b,sk} = R_b \sqrt{1 + \left( \frac{\tau \alpha}{L_b \times 180} \right)^2} \quad (2)$$

$$R_{2,sk} = R_{b,sk} + R_r \quad (3)$$

Where  $\tau$  is the pole pitch

$L_b$  is the bar length

$R_b$  is the bar resistance without skewed slots

$R_{b,sk}$  is the bar resistance with skewed slots

$R_r$  is the end – ring resistance

$R_{2,sk}$  is the rotor resistance with skewed slots

Apart from mutual flux reduction the skewing increases leakage reactance which is proportional to skew factor. The interest subject for this work is the study and performance analysis of SEIG with skewed slot rotor type in conjunction with an excitation and compensating capacitor bank. For the proposed capacitance consideration for the SEIG, the system can be shown in Fig.2. Capacitors are divided into two parts such as a built-up capacitor ( $C_b$ ) and a compensating capacitor ( $C_c$ ) for terminal voltage regulation. The  $C_b$  is responsible for no-load operation whilst both  $C_b$  and  $C_c$  are responsible for on-load operation. For no-load operation, the per phase equivalent circuit is shown in Fig.3 neglecting harmonic effect and core loss [4-5].

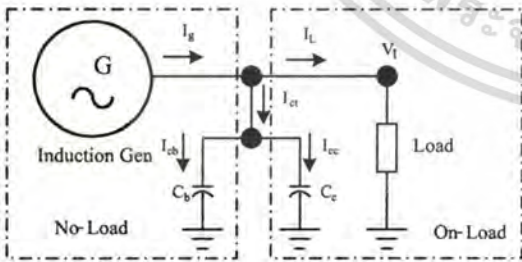


Fig.2. Single - line diagram of the SEIG

From Fig.3, impedance,  $Z_{CD}$  can be written as equations (4) - (6)

$$Z_{CD} = R_{CD} + jX_{CD} \quad (4)$$

$$R_{CD} = \frac{(a-b)R_{2,sk}j(K_{sk}X_m)^2}{R_{2,sk}^2 + (a-b)^2(jK_{sk}X_m + jX_2 + j(1-K_{sk})X_m)^2} \quad (5)$$

$$X_{CD} = \frac{R_{2,sk}^2 jK_{sk}X_m + (a-b)^2 jK_{sk}X_m jX_2 j(1-K_{sk})X_m}{R_{2,sk}^2 + (a-b)^2} \cdot \frac{(jK_{sk}X_m + (jX_2 + j(1-K_{sk})X_m))}{(jK_{sk}X_m + jX_2 + j(1-K_{sk})X_m)^2} \quad (6)$$

Where  $a$  is the per unit frequency

$b$  is the per unit speed

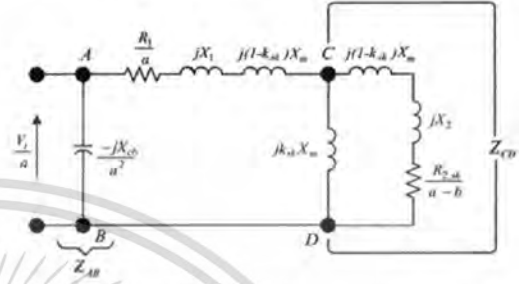


Fig.3. Per phase equivalent circuit of the SEIG with Skewing

With the reason of ease of analysis, Fig 3 can be reduced into Fig.4. impedance between nodes A and D can be expressed as following equations (5) – (8)

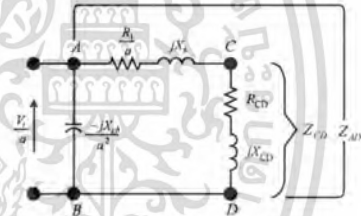


Fig.4. Simplified equivalent circuit

$$Z_{AD} = R_{AD} + jX_{AD} \quad (7)$$

$$R_{AD} = \frac{R_1}{a} + R_{CD} \quad (8)$$

$$jX_{AD} = jX_s + jX_{CD} \quad (9)$$

When

$$jX_s = jX_1 + j(1-K_{sk})X_m \quad (10)$$

Using KVL result in

$$I_g \left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_s \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (11)$$

Since  $I_g$  is not definitely zero during voltage build-up, as a consequence, equation (11) can be rewritten as

$$\left( \frac{-jX_{cb}}{a^2} + \left( \frac{R_1}{a} + jX_s \right) + Z_{CD} \right) = 0 \quad (12)$$

From equation (12), the real part is zero. Then

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_1}{a} + \frac{(a-b)R_{2,sk} j(K_{sk} X_m)^2}{R_{2,sk}^2 + (a-b)^2(jK_{sk} X_m + jX_2 + j(1-K_{sk})X_m)^2} = 0 \quad (13)$$

According to equation (13), we can obtain  $a_{max}$  as

$$a_{max} = b - \frac{b}{2} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{b_c}{b}\right)^2}}{1 + \left(\frac{R_1}{R_{2,sk}}\right) \left(1 + \frac{jX_2 + j(1-K_{sk})X_m}{jK_{sk} X_m}\right)^2} \right] \quad (14)$$

Also,  $b_c$  can be determined as

$$b_c = \frac{2R_1}{jK_{sk} X_m} \sqrt{\frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{jX_2 + j(1-K_{sk})X_m}{jK_{sk} X_m}\right)^2} \quad (15)$$

Where  $b_c$  is the critical speed

Therefore capacitance for built-up voltage during no-load can be determined as

$$C_b = \frac{1}{\{2\pi f_b Z_b a_{max}^2 (jX_s + jX_{CD})\}} \quad (16)$$

Where  $C_b$  is the per phase built-up capacitor value  
 $Z_b$  is the base impedance  
 $f_b$  is the base frequency

For the analysis of the on-load operation,  $C_c$  is included. According to Fig.5, when supplying the resistive-inductive load, the terminal voltage will be reduced since the load draws reactive power from the system. In order to maintain the terminal voltage constant,  $C_c$  can be determined as follows. Total reactive power of overall capacitors (i.e.  $C_b$  and  $C_c$ ) is

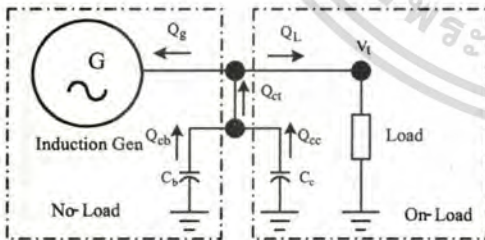


Fig.5. Power flow diagram

$$Q_{ct} = Q_g + Q_L \quad (17)$$

When

$$Q_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2} \quad (18)$$

$$Q_L = \frac{\left(\frac{V_t}{a}\right)^2}{X_L} \quad (19)$$

Where  $S_g$  is the per phase apparent power of the SEIG  
 $P_g$  is the per phase active power of the SEIG  
 $Q_g$  is the per phase reactive power of the SEIG  
 $Q_L$  is the per phase reactive power of load  
 $Q_{ct}$  is the per phase total reactive power of the capacitors

Compensated reactive power is

$$Q_{cc} = Q_{ct} - Q_{cb} \quad (20)$$

When

$$Q_{cb} = 2\pi \left(\frac{V_t}{a}\right)^2 (f C_b) \quad (21)$$

Where  $Q_{cb}$  is the per phase reactive power of the built-up capacitor  
 $Q_{cc}$  is the per phase reactive power of the compensating capacitor

Per phase current of the compensating capacitor ( $C_c$ ) is determined from

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t/a} \quad (22)$$

Per phase compensated capacitance is calculated as following equations

$$X_{cc} = \frac{V_t/a}{I_{cc}} \quad (23)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f (jX_{cc})} \quad (24)$$

Thus, total capacitor value for the SEIG is

$$C_t = C_b + C_c \quad (25)$$

Where  $C_c$  is the per phase value of the compensating capacitor  
 $C_b$  is the per phase value of the built-up capacitor  
 $C_t$  is the per phase value of the total capacitor

The procedure for determining capacitor values for the SEIG under on-load conditions when supplying the resistive load can be performed as same as for the resistive-inductive load with  $Q_L = 0$

### III. EXPERIMENTAL TESTS AND DISCUSSIONS

The tests have been performed in two parts. The first part is a parameter test of the SEIG and the second part is a performance test of the SEIG under load conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A. Parameters Test**

Three phase, 3kVA, 2.2 kW, 220/380 V, 8.7/5.0 A, 4 poles induction machines with skewed rotor types having slot angles of 0°, 5°, and 10°. Table 1 shows parameters of the under test machines obtained from the test complied with IEEE std. 112-1996 testing [9].

Table 1  
Parameters of the Machines

Skew angle	R1 (Ω)	R2 (Ω)	Rc (Ω)	X1 (Ω)	X2 (Ω)	Xm (Ω)
0°	3.18	2.56	905.12	3.88	3.88	86.62
5°	3.18	2.58	1037.53	4.34	4.34	86.42
10°	3.18	2.96	1089.96	5.94	5.94	86.20

**B. Operating Test**

The capacitance analysis uses Maple program for determining capacitance under various load conditions and 0.85 lagging power factor Tables 2-3 show capacitance for various load power per phase and different skew angle at constant speed of 1500 rpm and regulated terminal voltage of 220 V, Y connected. Figs. 6-22 show the SEIG performance in terms of voltage build-up, power quality, frequency variation and efficiency. The next section will be detail explanation and discussion.

Table 2  
Capacitance for resistive load

Skew angle	No-Load C <sub>s</sub> (μF)	ON-Load ; C <sub>r</sub> (μF)					C <sub>r</sub> (μF)
		193 ( W/ph)	384 ( W/ph)	587 ( W/ph)	768 ( W/ph)	Total C <sub>r</sub> (μF)	
0°	35	5	6	8	10	29	64
5°	35	5	7	9	12	33	68
10°	35	5	8	11	14	37	72

Table 3  
Capacitance for resistive - inductive load

Skew angle	No-Load C <sub>s</sub> (μF)	ON-Load ; C <sub>r</sub> (μF)					C <sub>r</sub> (μF)
		210 ( W/ph)	428 ( W/ph)	645 ( W/ph)	868 ( W/ph)	Total C <sub>r</sub> (μF)	
0°	35	14	17	20	24	75	110
5°	35	15	18	21	26	80	115
10°	35	15	19	23	28	85	120

Fig.6. illustrates the characteristic of air-gap induced voltage (E<sub>g</sub>) and magnetizing reactance (X<sub>m</sub>) for various skew angles. Skew angle of 0° produces slightly higher voltage than others since effect of skewing causes slightly reduced magnetizing reactance. According to Fig.7, when increasing the prime mover of the SEIG, the SEIG with 10° skew angle has lower critical speed point,

than the others. It shows the capability of better voltage build up at low speed. From Figs. 8-10 it can be seen that duration (built-up voltage time, t<sub>b</sub>) for voltage build-up of the SEIG with 10° skew angle is longer the others.

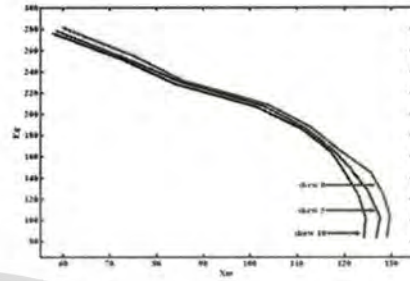


Fig.6. Characteristic of E<sub>g</sub> and X<sub>m</sub>

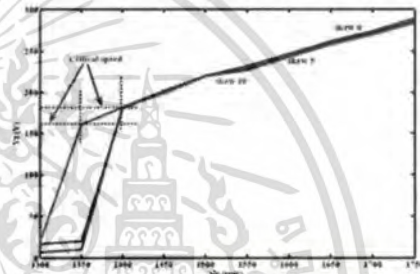


Fig.7. Variation of speed with terminal voltage for SEIG

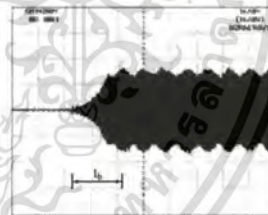


Fig.8. Built-up voltage waveform of 0° skew angle

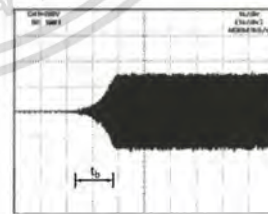


Fig.9. Built-up voltage waveform of 5° skew angle

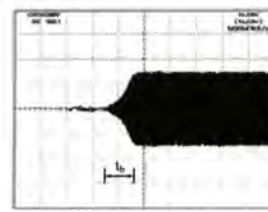


Fig.10. Built-up voltage waveform of 10° skew angle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

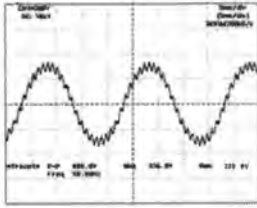


Fig.11. Steady state terminal voltage waveform at no load for 0° skew angle 0°, % THDv = 9.0 %

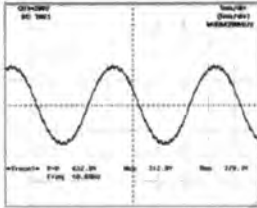


Fig.12. Steady state terminal voltage waveform at no load for 5° skew angle, % THDv = 4.7 %

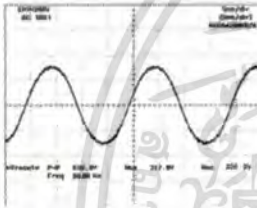


Fig.13. Steady state terminal voltage waveform at no load for 10° skew angle, % THDv = 3.9 %

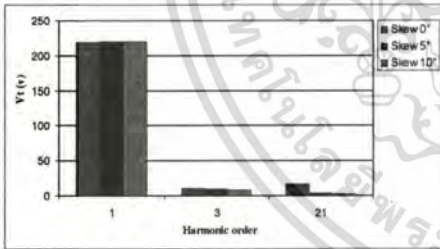


Fig.14. Harmonic voltage spectra for various skew rotor slots

As shown in Figs. 11-13, terminal voltage waveform for 10° skew angle is more nearly sinusoidal than others. The corresponding harmonic voltages are shown in Fig.14. The distortion of harmonic voltages is reduced for skewed rotor since skewing can reduce space harmonics. Figs. 15-18 illustrate reactive power supplied from the build up capacitors under various load conditions. Reactive power ( $Q_{cb}$ ) for 10° skewed angle rotor is reduced more than the others when increasing load level due to the effect of frequency reduction. Compensated reactive power ( $Q_{cc}$ ) for 10° skew angle is higher than for 5° skew angle and 0° skew angle respectively and is increased with a load increase. This results in using more compensated capacitance. The reason is that skew effect

causes an increase in stator leakage reactance and rotor leakage reactance. The sum of reactive power of the SEIG ( $Q_g$ ) and reactive power of load ( $Q_L$ ) is equal to total reactive power of the capacitors ( $Q_{ct}$ ). Total reactive power of the capacitors for 10° skew angle is higher than for 5° skew angle and 0° skew angle, respectively when increasing loads. This results in using higher total capacitance due to skew effect on an increase in stator leakage and rotor leakage reactance.

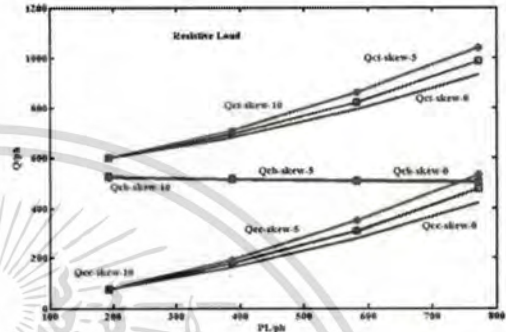


Fig.15. Variation of reactive power of capacitors with output power for resistive loads

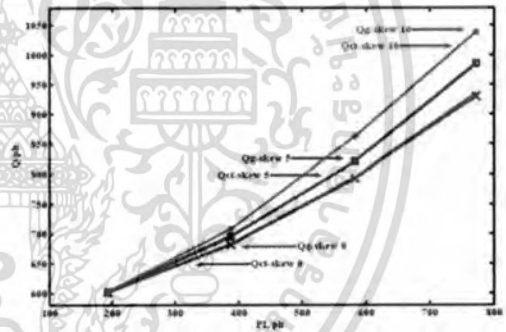


Fig.16. Variation of system reactive power with output power for resistive loads

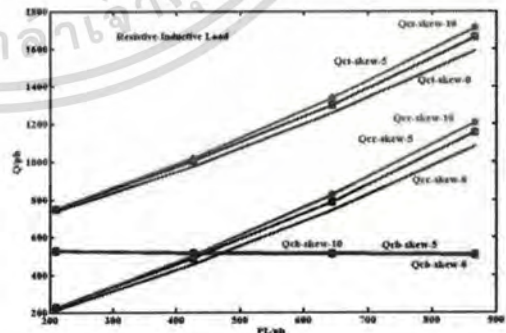


Fig.17. Variation of reactive power of capacitors with output power for resistive-inductive loads

Figs.19-20 show variation of the SEIG frequency. The change of frequency for 10° skew angle is higher than for others under resistive load and resistive-inductive loads due to skew effect on a rotor resistance increase.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

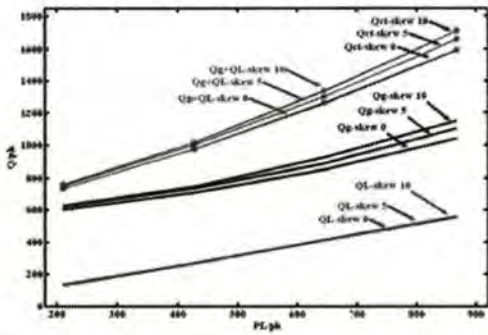


Fig.18. Variation of system reactive power with output power for resistive - inductive loads

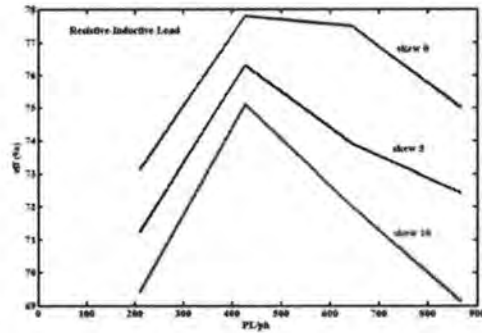


Fig.22. Variation of efficiency with output power for resistive - inductive loads

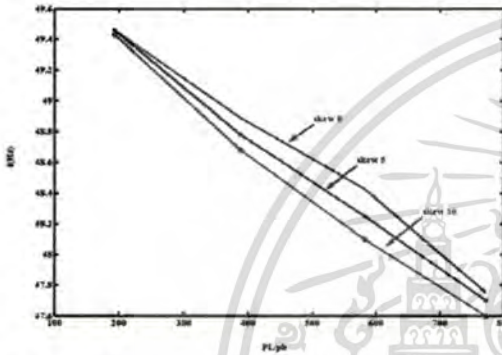


Fig.19. Variation of frequency with output power for resistive loads

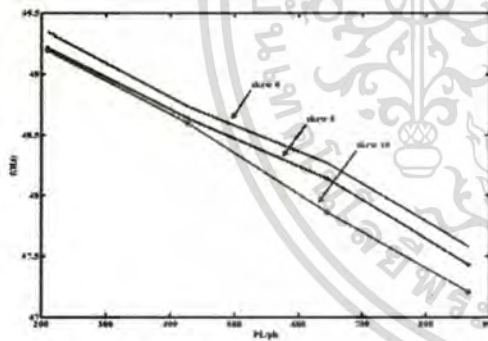


Fig.20. Variation of frequency with output power for resistive - inductive loads

From Figs.21-22, efficiency of the SEIG with 10° skew angle rotor is lower than others under resistive load and resistive-inductive loads due to skew effect on an increase in rotor resistance and core loss resistance. With increased resistances, the losses increase.

#### IV. CONCLUSION

This paper has dealt with testing and performance analysis of the SEIG having skewed rotor with angles of 0°, 5° and 10°. It has been found that the SEIG with 10° skew angle of rotor is suitable for guidelines in designing of SEIG. Improvement and development of rotor of induction generator with reduced rotor resistance by increasing machine size, reduced leakage reactance for reducing winding losses and reduced compensated capacitance are required.

#### APPENDIX

$V_b$ : 220 V,  $I_b$ : 5.2 A,  $P_b$ : 2.2 kW,  $Z_b$ : 42.30  $\Omega$ ,  $Z_L$ : per phase resistive load 242  $\Omega$  and resistive- inductive load 166.97+j103.45  $\Omega$

#### REFERENCES

- [1] S.S. Murthy , O.P. Malik , and A.K. Tandon , " Analysis of self - excited induction generators," *Proceedings of the IEE* , Vol.129, No.6, pp.260-265, November 1982.
- [2] S.S. Murthy , B.P. Singh , C. Nagmani and K.V.V. Satyanarayanna , " Study on the use of conventional induction motors as self excited induction generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.3, No.4, pp.842-848, December 1988.
- [3] S.L. Nau , "The influence of the skewed rotor slots on the magnetic noise of three phase induction motors," *Proceedings of the IEE* , Vol.140, No.444, pp.396-399, September 1997.
- [4] S. Williamson and C.I.McClay , "The Effect of Axial Variations in Saturation Due to Skew on Induction Motor Equivalent - Circuit Parameters ," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.35, No.6, pp.1323-1331, November/December 1999.

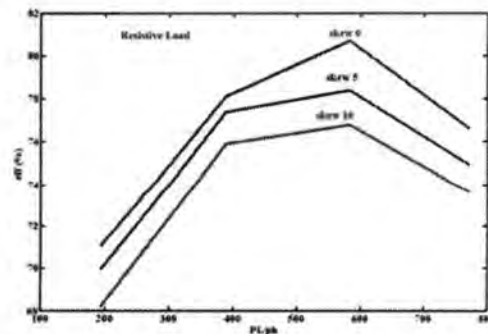


Fig.21. Variation of efficiency with output power for resistive loads

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [5] T.F. Chan, "Capacitance Requirements of Self-excited Induction Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.2, pp.304-310, June 1993.
- [6] S.P Singh , B.S Singh and M.P. Jain , "Comparative study on the performance of a commercially designed induction generator with induction motors operating as self excited induction generators," *Proceedings of the IEE* , Vol.140, No.5, pp.374-380, September 1993.
- [7] L. Shridhar , Bhim Singh , C.S. Jha , "A step towards improvements in the characteristics of Self excited Induction Generator ," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.1, pp.40-46, March 1993.
- [8] Tarek Ahmed, Katsumi Nisshida, Mutsou Nakaoka and Hyun Woo Lee, "Self - Excited Induction generator with Simple Voltage Regulation Scheme for Wind Energy," *Proceedings of the 30 th Annual Conference of the IEEE*, Vol.140, No.5, pp.86-91, November 2004.
- [9] IEEE std 112 – 1996 , "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators ," pp.28-53, 1996.
- [10] A.F. Puchstien T.C. Lloyd and A. G.Conrad "Alternating – Current Machines" John Willey & Sons, Inc, pp 313-317, 1954.

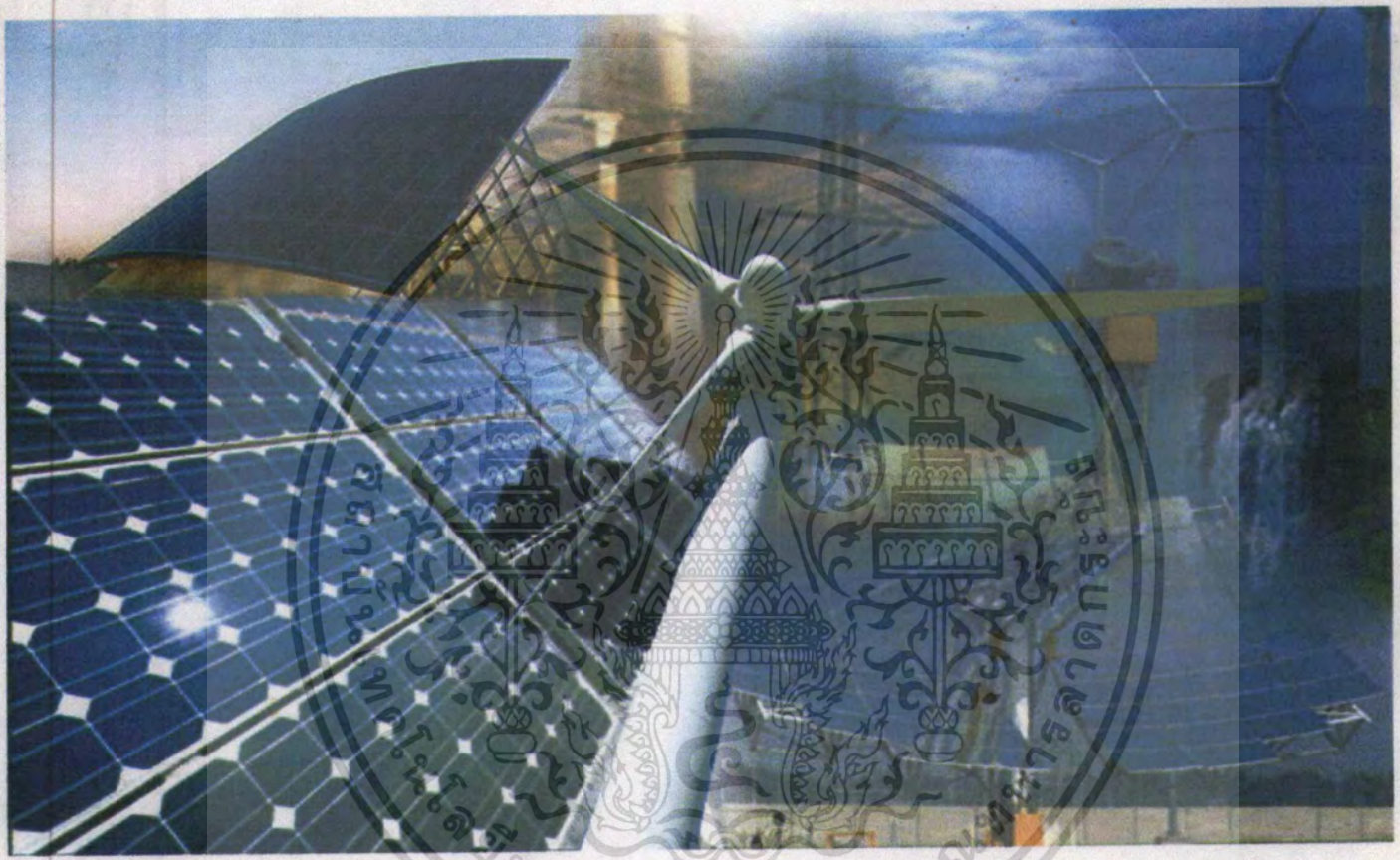


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ICSET 2008

## 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies

### PROGRAMME & ABSTRACTS



24 – 27 November 2008  
SMU Conference Centre, Singapore

Organised by



Sponsored by



IEEE Power Electronics Society



Industry Applications Society



Industrial Electronics Society



Power & Energy Society™

Supported by



# Investigation on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Grid Connected Induction Generators

B. Sawetsakulanond\* P. Hothongkham\*\* and V. Kinnares\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Fax. 662-3269902 E-mail: Budhapon@hotmail.com E-mail: kkwijit@kmitl.ac.th

\*\*Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Siam University  
235 Petkasem Road, Bangkok, Thailand, 10160

Tel.662-4570068 Ext.122 E-mail: prasopchok\_ho@yahoo.com

**Abstract**—This paper proposes the investigation on the performance between standard and high efficiency induction machines operating as grid connected induction generators having same rating of three phase, 2.2kW, 220/380V, 4-poles for supplying electric power to utility grid. Analysis and comparative study on operating of induction generators under transient and steady state conditions at no-load and full-load have been performed. Research results will be guidelines for an application of wind induction generator for electricity generation.

**Index Terms**-- induction generator, wind energy

## I. INTRODUCTION

OWING to the continuous increase in energy need, it is difficult to meet the growing demand by exploiting energy from the limit conventional source, such as coal, oil, gas, and so on. As a consequence, a greater emphasis is now being given to harness energy from non-conventional sources such as wind, biogas and small hydro heads [1-4]. Induction generators were used from the beginning of the 20<sup>th</sup> century until they were abandoned and almost disappeared in the 1960s. With the dramatic increase in petroleum prices in the 1970s, the induction generator returned to the scene. With such high energy costs, rational use and conservation implemented by many processes of heat recovery and other similar forms became important goals [11]. In recent years, the increased emphasis on renewable energy has caused a great interest in the development and use of alternative energy sources, such as wind and micro-hydro plant [3]. Several papers presented the important a wind induction generator in terms of performance analysis, operating control and protection [1, 2, 4, 6]. However, there are a few publications to demonstrate the performance such as power quality, reactive power consumption, efficiency of machine types suitable for grid connected wind applications.

The objective of this work is to present the comparative performance evaluation between standard and high efficiency induction machines operating as grid connected generators. The obtained results can be guidelines for the design of suitable induction generators for efficient wind energy applications.

## II. EQUIVALENT CIRCUIT ANALYSIS

Operating behavior of a grid connected induction generator as shown in Fig.1 can be determined under two

conditions namely, motoring mode and generating mode. Such important conditions can be considered from a slip value given in (1)-(2). When induction machines are applied to convert mechanical power into electrical power, the induction machine is called as an induction generator. The induction generator is, in fact, an induction motor which is driven above its synchronous speed to produce electrical energy. The same machine, operating as a motor, consumes electrical energy to drive a mechanical load at less than synchronous speed [1,3]. The phasor diagrams for operating conditions are shown in Fig.2. The motoring mode of operation occurs when the motor drives a mechanical load. As shown in Fig.2(a), with this motoring mode operation, angle  $\phi_1$ , which is the phase difference angle between terminal voltage and current, is  $0^\circ < \phi_1 < 90^\circ$ . The generating mode of operation occurs when the rotor speed is greater than synchronous speed (i.e. rotor bars move faster than synchronous speed), rotor bar current flows in a reverse direction resulting in flowing the real power converted mechanical energy from the wind turbine back to the utility grid. As shown in Fig.2(b), with this generating mode operation, angle  $\phi_1$  is between  $90^\circ < \phi_1 < 180^\circ$  [1, 2, 4-5, 6-7, 10]. Fig.3 shows the relationship between real power and reactive power as a function of rotor speed at rated voltage for an induction machine operated as a motor and as a generator.

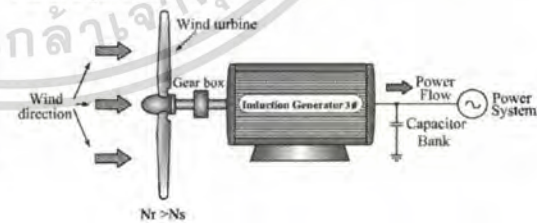


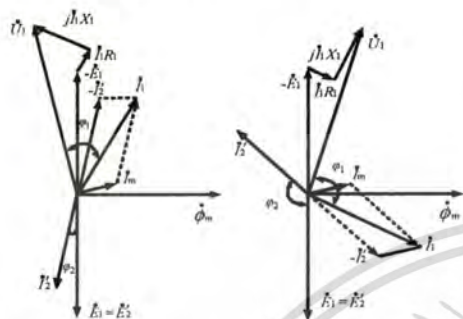
Fig.1. Grid - connected Induction Generator.

$$\text{motor} : N_r < N_s, s_m = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \text{Positive} \quad (1)$$

$$\text{generator} : N_r > N_s, s_g = \frac{N_r - N_s}{N_s} = \text{Negative} \quad (2)$$

when  $N_s$  is the synchronous speed =  $\frac{120f}{P}$ .

$N_r$  is the rotor speed.  
 $f$  is the frequency.  
 $P$  is the number of poles.  
 $S$  is the slip.



a) Induction motor      b) Induction generator

Fig.2. Phasor diagrams of an Induction machine.

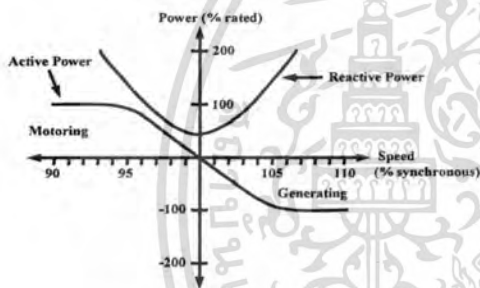


Fig.3. Motor and Generator electrical characteristic.

The induction generator requires an external source of reactive power. This reactive power can be supplied from the connected utility grid or from capacitors connected to the system. The capacitor bank as shown in Fig.1, is used for compensating the reactive power of the induction generator. The power flow diagrams for both conditions are shown in Fig.4 [9].

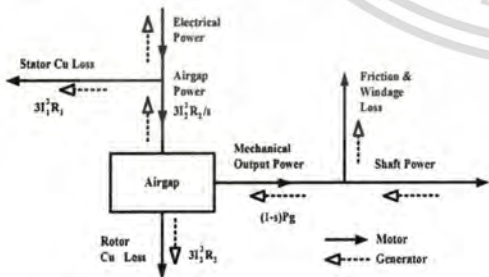


Fig.4. Power flow diagram of the Induction Machines.

The steady state equivalent circuit can be represented as Figs. 5-6 for determining power flow induction machines. Power flow diagram of induction generator can be written as equations (3)-(10)

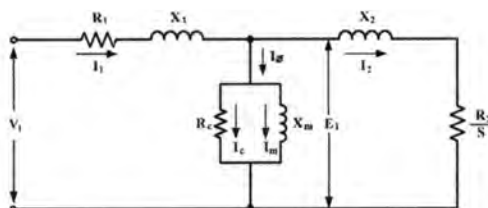


Fig.5. Per phase equivalent circuit of the Induction Motors.

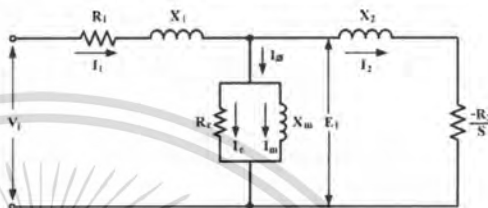


Fig.6. Per phase equivalent circuit of the Induction Generators.

The input power ( $P_i$ ) can be given as

$$P_i = T \omega_r \quad (3)$$

The mechanical power converted into electricity, or the power developed in the shaft ( $P_e$ ) for a negative slip can be rewritten as

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = (1-s)P_g \quad (4)$$

The rotor copper losses ( $P_{cu,2}$ ) can be determined as

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \quad (5)$$

The three phase power transferred from the rotor to stator through the air gap ( $P_g$ ) is

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (6)$$

The stator copper losses ( $P_{cu,1}$ ) is

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \quad (7)$$

The active power ( $P_o$ ) can be given as

$$P_o = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (8)$$

The reactive power ( $Q_o$ ) can be given as

$$Q_o = 3V_1 I_1 \sin \phi_1 = 3[I_1^2 X_1 + I_2^2 X_m + I_2^2 X_2] \quad (9)$$

The efficiency of the induction generator ( $\eta$ ) is

$$\eta = \frac{P_e}{P_i} \times 100 \quad (10)$$

Before considering the various comparative performance, we should consider harmonic effects on the several types of induction generators. In practice, the air-gap flux distribution contains a number of harmonics. These are produced due to: the concentration of mmf in a

finite number of slots (the winding harmonics), and the fact that the air-gap is not smooth because of the stator and rotor slot openings (the slot harmonics). Additionally, harmonics may be produced due to saturation and irregularity in the air-gap length. The order of winding harmonic  $n$  can be given by [8]

$$n = 6N \pm 1 \quad (11)$$

where  $N$  is an integer.

For a three phase winding, the order of slot harmonic  $n$  can be given by

$$n = 6Aq \pm 1 \quad (12)$$

where  $A$  is an integer.

$q$  is the slot/pole/phase.

### III. EXPERIMENTAL TESTS AND DISCUSSIONS

The detail of the grid connected induction generators under test is given in Table 1. Testing was performed for two parts namely, parameter and operation testing.

Table 1  
Name Plate of the Machines

Machine Type	Specifications
Standard Machine	2.2kW, 220/380V, 4-Pole, 8.7/5.2A, 1420rpm
High Efficiency Machine	2.2kW, 220/380V, 4-Pole, 8.2/4.7A, 1465rpm

#### A. Parameter Test

The parameter test was made with no-load test, blocked rotor test at 12.5Hz (i.e. 25% rated frequency), V-I method test, friction and windage loss in which the tests complied with the IEEE std 112-2004 Method F-F1 [12]. The results are illustrated in Figs 7-8 and Table 2.

Table 2  
Parameter of the Machines

Type	R1	R2	Rc	X1	X2	Xm
Standard Machine	3.17 $\Omega$	2.56 $\Omega$	627.37 $\Omega$	3.48 $\Omega$	3.48 $\Omega$	93.43 $\Omega$
High Efficiency Machine	1.40 $\Omega$	1.81 $\Omega$	568.5 $\Omega$	3.31 $\Omega$	3.31 $\Omega$	75.76 $\Omega$

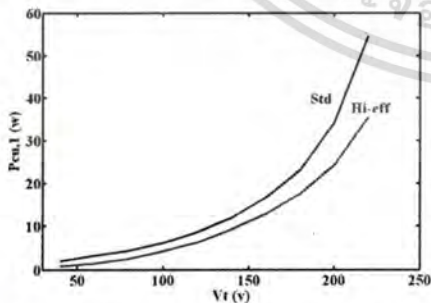


Fig.7 Variation of voltage with stator copper loss of the induction machines.

From Fig.7, it can be seen that characteristics between the terminal voltage and the stator copper loss for both

induction machines are different. The stator copper loss of the high efficiency induction machine is less than that of the standard induction machine since the designed high efficiency induction machine has lower stator resistance.

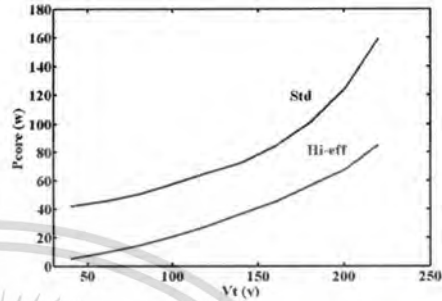


Fig.8 Variation of voltage with core loss of the induction machines.

From Fig.8, it can be seen that characteristics between the terminal voltage and the core loss for both SEIGs are different. The core loss of the high efficiency induction machine is less than that of the standard induction machine since the designed high efficiency induction machine has a good quality of the core type as well as the design of low flux density in both stator and rotor resulting in low core loss.

#### B. Operating Test

Transient and steady state operation were tested. The objectives are to analyze and study on comparative behavior between the standard and high efficiency induction generators. The experimental results are shown in Figs. 9-21.

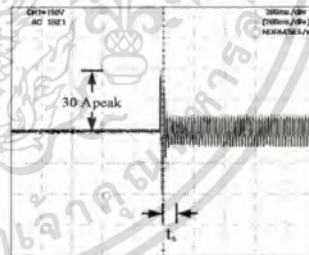


Fig.9. Transient stator current of the standard induction generator during grid connection at slip = 50%. (scale: 15A/div)

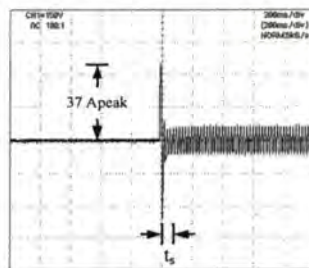


Fig.10. Transient stator current of the high efficiency induction generator during grid connection at slip = 50%. (scale: 15A/div)

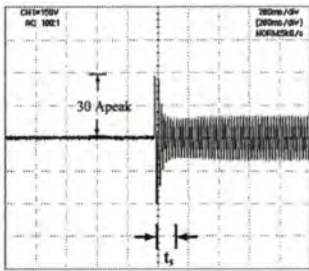


Fig.11. Transient stator current of the standard induction generator during grid connection at slip = 100%. (scale : 15A/div)

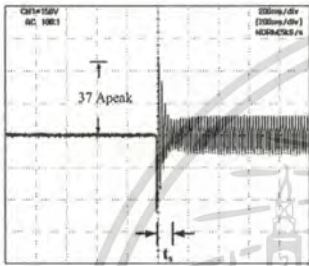


Fig.12. Transient stator current of the high efficiency induction generator during grid connection at slip = 100%. (scale: 15A/div)

According to Figs.9-12, during the grid connection transient current of the high efficiency induction generator is higher than that of the standard one since the high efficiency induction generator has low impedance due to the minimized loss design. As a consequence, duration in time ( $t_s$ ) of dynamic response of the high efficiency induction generator is also shorter. Therefore the suitable parameter setting of the protection equipment is needed for induction machines working as induction generators.

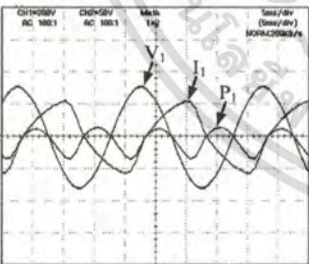


Fig.13. Steady-state voltage, current and real power waveforms of the standard induction generator during grid connection at slip = 50%, % THDi = 15.2%. (scale: 200V/div, 5A/div)

According to Figs.13-18 for the steady state condition, the current and active power waveforms of the standard induction generator are more nearly sinusoidal than those of the high efficiency induction generator. With this point of view, the machine design for a high efficiency induction generator is required in order to reduce a harmonic problem associated with a power system.

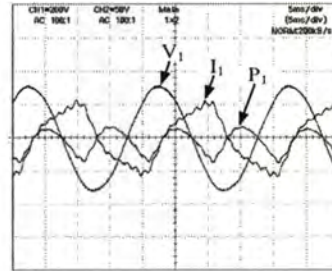


Fig.14. Steady-state voltage, current and real power waveforms of the high efficiency induction generator during grid connection at slip = 50%, % THDi = 16.6%. (scale: 200V/div, 5A/div)

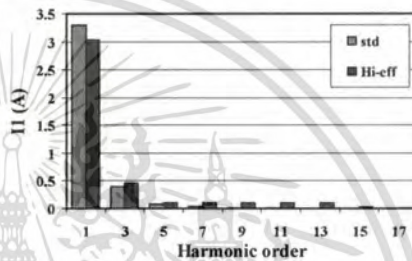


Fig.15. Harmonic current spectrum for various grid connected induction generators at slip = 50%.

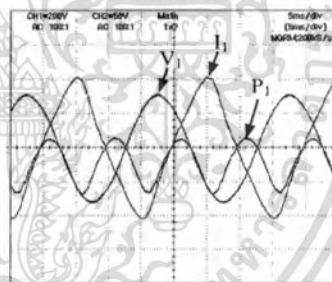


Fig.16. Steady-state voltage, current and real power waveforms of the standard induction generator during grid connection at slip = 100%, % THDi = 11.1%. (scale: 200V/div, 5A/div)

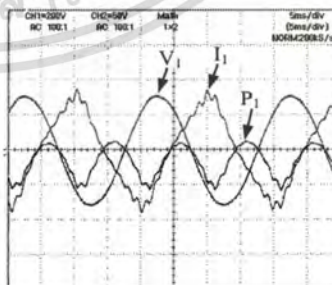


Fig.17. Steady - state voltage, current and real power waveforms of the high efficiency induction generator during grid connection at slip = 100%, % THDi = 13.1%. (scale: 200V/div, 5A/div)

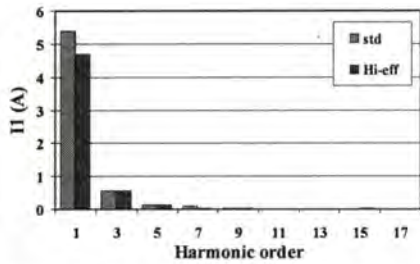


Fig.18. Harmonic current spectrum for various grid connected induction generators at slip = 100%.

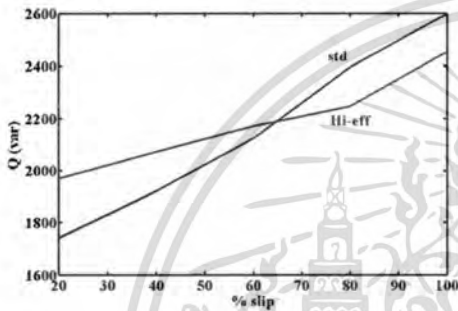


Fig.19. Variation of reactive power of the induction generators with slip values.

From Fig.19, the positive reactive power shows that the induction generators draw reactive power from the utility grid. At higher slip (i.e. approximately 65%), the high efficiency induction generator draws less reactive power than the standard induction generator due to a lower reactance value including stator leakage reactance, magnetizing reactance and rotor leakage reactance. Conversely however, at low slip (i.e. light load operation), the high efficiency induction generator draws more reactive power. The reason is that the stator current of the high efficiency induction generator is higher. Therefore, improvement for reducing stator current at light load of the high efficiency is required.

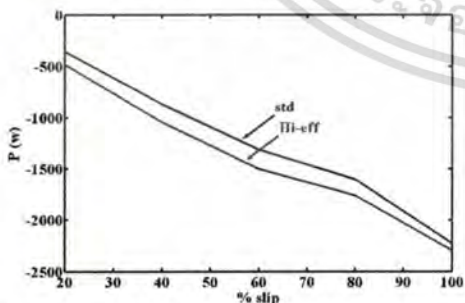


Fig.20. Variation real power of the induction generators with slip values.

From Fig.20, the negative real power shows that the induction generators deliver power to the utility grid. When considering operation at various slip, the high efficiency induction generator has more capability of

delivering real power to utility grid than the standard induction generators since the high efficiency induction generator is designed for reducing core losses and copper losses.

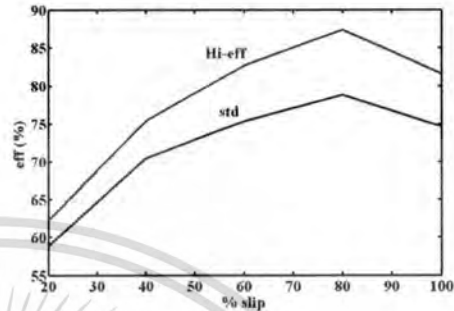


Fig.21. Variation efficiency of the induction generators with slip values.

Fig.21 shows the efficiency of both machines at various slip. Obviously it can be seen that the high efficiency induction generator has higher efficiency than the standard one since the high efficiency induction generator is designed for reducing core loss and copper loss.

#### IV. CONCLUSIONS

According to the tests and analysis of the performance standard and high efficiency induction machines operating as grid connected induction generators, it is found that characteristics of a suitable grid connected induction generators for wind energy should be as follows :

- High efficiency: The grid connected induction generator should have main low losses consisting of winding loss and core loss. The high efficiency induction generator is capability of an increase in electricity generation.
- Low capacitor values for the grid connected induction generator. It means the capacitor size for compensating reactive power.
- The active power of the grid connected induction generator should have sinusoidal waveform. It means the power quality. However, improvement for the design is required for reducing harmonics associated with windings and slotting, thus enhancing power quality of the utility grid.

Experimental results of this work can be guidelines for the effective design of a grid connected wind induction generator

#### REFERENCES

[1] Kinh D. Pham, "Cogeneration Application : Interconnection of Induction Generators with Public Electric Utility", *Proceedings of the IEEE*, pp D4-1-D4-7, 1991.  
 [2] Pankaj K sen and John P. Nelson, " Application Guidelines for Induction Generators," *Proceedings of the IEEE* ,pp wc1-5.1- wc1-5.3, 1997  
 [3] M. G. Simoes, B.K. Bose and R.J. Spiegel, "Design and Performance Evaluation of a Fuzzy-Logic Based Variable speed Wind Generation System" *Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Application*, Vol.33, No.4, July/August 1997.

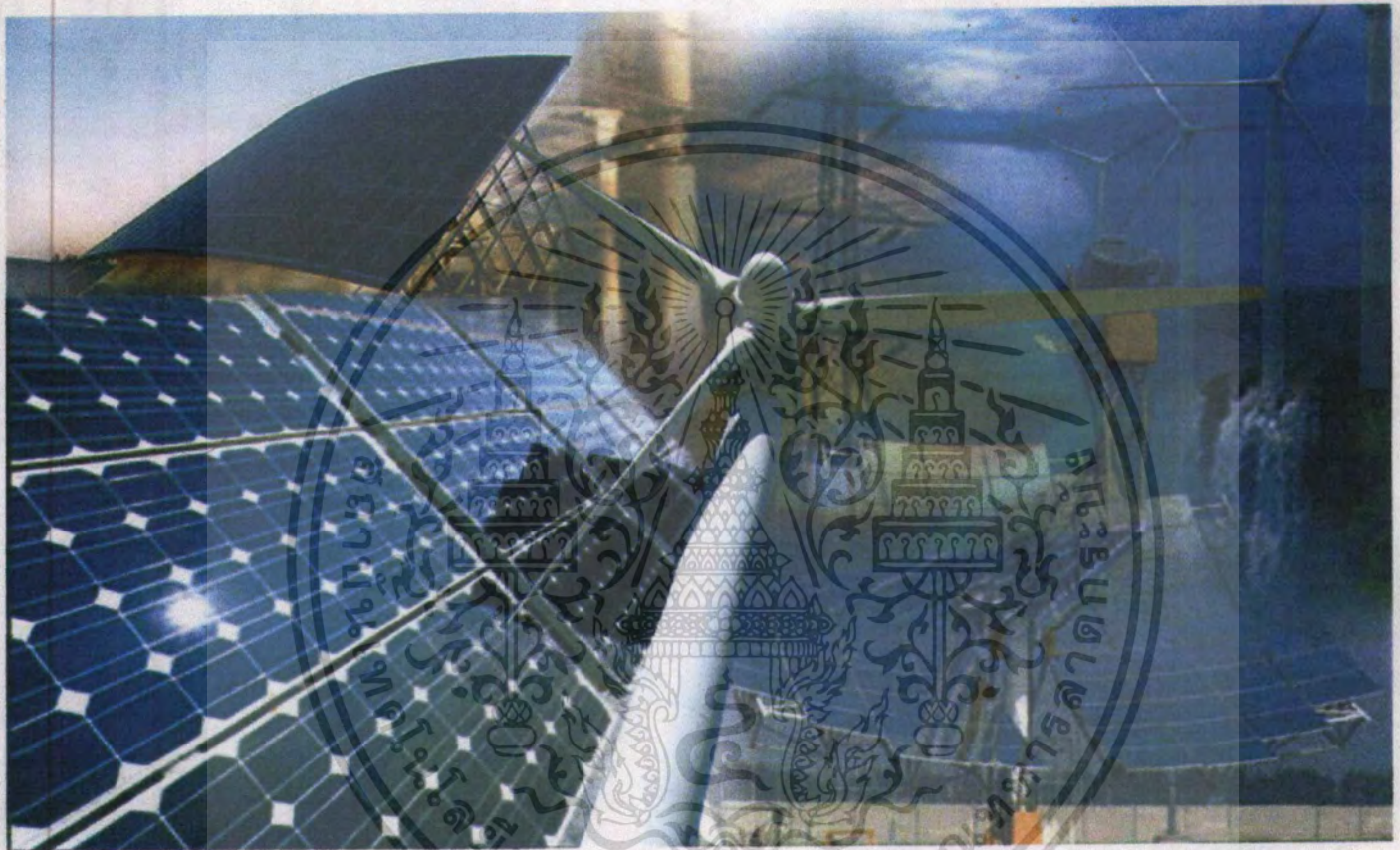
- [4] L.Wang and Ching - Chung Tsao, "Performance Analysis of A Three Phase Induction Generator Connected to A Utility Grid", *Proceedings of the IEEE*, pp.1398-1402, 2001.
- [5] Baoquan Kou, Liyi Li, Shunkang Cheng and Fanrong Meng, "Operating Control of Efficiently Generating Induction motor for Driving Hybrid Electric Vehicle", *Proceedings of the IEEE Transactions on Magnetic*, Vol.41, No.1, pp.488-491, January 2005.
- [6] P. Lumyong and C. Chat-uthai, "Power Minimization Technique for Induction Motor Test", *Proceedings of the IEEE*, pp.570-573, --.
- [7] M.Kostenko and L. Piotrovsky, "Electrical Machines" Mir Publishers Moscow, pp 447-449, 1977.
- [8] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines" John Willy & Sons, Inc, pp. 128-131, 1994.
- [9] Richard H. Engelmann and William H. Middendorf, "Handbook of Electric Motors" Marcel Dekker, Inc, pp 228-315, 1995.
- [10] Ion Boldea and Syed A. Nasar, "The Induction Machine Handbook" CRC Press, Chapter 7, 2002.
- [11] M.Godoy Simoes and FelixA. Farret, "Renewable Energy System" CRC Press, pp 21-27, 2004.
- [12] IEEE std 112-2004, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators", pp.24-73, 2004.



# ICSET 2008

## 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies

### PROGRAMME & ABSTRACTS



24 – 27 November 2008  
SMU Conference Centre, Singapore

Organised by



Sponsored by



IEEE Power Electronics Society



Industry Applications Society



Industrial Electronics Society



Power & Energy Society™

Supported by



singapore polytechnic



SINGAPORE EXHIBITION & CONVENTION BUREAU

## Design and Construction of a Three Phase of Self-Excited Induction Generator

B. Sawetsakulanond\* P. Hothongkham\*\* and V. Kinnares\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Fax 662-3269902 E-mail: Budhapon@hotmail.com E-mail: kkwjit@kmitl.ac.th

\*\*Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Siam University  
235 Petkasem Road, Bangkok, Thailand, 10160

Tel.662-4570068 Ext.122 E-mail: prasopchok\_ho@yahoo.com

**Abstract**--This paper proposes the design and construction of three phase, 220/380 V, 3.4/2.0 A,  $\Delta/Y$  connected, 4 poles, 0.75 kW a self-excited induction generator (SEIG). Analysis of the designed SEIG uses a finite element method. The designed SEIG has been tested and compared with a standard SEIG under operating conditions such as no-load and on-load with pure resistive load. Consideration of capacitance for the SEIG based on equivalent circuit model under steady-state load conditions and a power flow diagram is given. Research results can be guidelines for development of effective wind induction generators for electricity generation.

**Index Terms**--Induction generator, self-excited

### I. INTRODUCTION

Owing to the continuous increase in energy need, it is difficult to meet the growing demand by exploiting energy from the limit conventional source, such as coal, oil, gas, and so on. As a consequence, a greater emphasis is now being given to harness energy from non-conventional sources such as wind, biogas and small hydro heads. Steady-state analysis of such generators is of interest, both from the design and studying performance characteristic of SEIG [1-10, 15-17]. S.S. Murthy et. al [3] proposed the study on the use of conventional induction motors as self excited induction generators. S.S. Murthy et. al [4] have presented the effect of variation in the parameters on its performance using design based computation procedure. L. Shridhar et. al [7] proposed the improvements in the characteristics of self-excited induction generator. S.P Singh et al [9] have presented the computed performance characteristics of different induction machines of various ratings operating as SEIG. J. Faiz et al [10] proposed the design of a three phase self-excited induction generator but the detail of the rotor skewing was not mentioned in the design. Li Wang et. al [12] proposed the dynamic performances of SEIG under various loading Conditions. B. Sawetsakulanond et. al [17] proposed the guidelines for improving performance of the SEIG suitable for wind energy such as capability of built-up voltage at a low speed range, power quality which are the results of the investigation of skew effect on the performance.

This paper proposes the design and construction of three phase, 220/380V, 3.4/2.0A,  $\Delta/Y$  connected, 4 poles, 0.75kW of self-excited induction generators (SEIG). These research results are useful information of the development of effective wind induction generators for electricity generation.

### II. DESIGN

From Fig.1, a three phase induction motor can be made to work as a self-excited generator (SEIG) when its rotor is driven at suitable speed by wind energy and its excitation is provided by connecting a three phase capacitor bank at the stator terminals in order to build-up voltage and regulate terminal voltage.

However, The authors have investigated the performance [16-17]. The performance of this type of induction machines is very undesirable. The reason for the poor performance is that the designer optimized the performance operating as motor rather than generator. Moreover, it will have poorer voltage regulation and efficiency due to higher losses as its performance depends upon the operating zone.

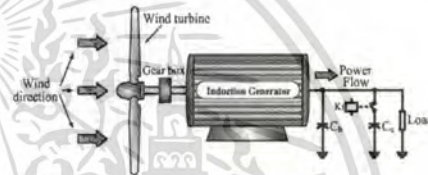


Fig.1. Self-excited induction generator driven by wind energy.

When considering the operation region as show in Fig. 2, an induction motor has only unsaturated (linear) region which is different from a SEIG which has two regions namely, unsaturated (linear) and saturated (non-linear) regions [10]. Therefore, the suitable SEIG is needed to be designed.

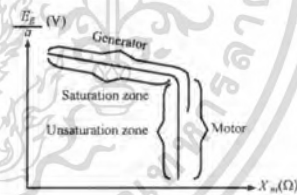


Fig.2. Operation of the induction machines.

Characteristics of a suitable SEIG for wind energy should be as follows [15-17].

- High efficiency. The SEIG should have main low losses consisting of winding loss and core loss. The high efficiency SEIG is capability of an increase in electricity generation.
- Low voltage regulation. It means that the level of terminal voltage of the SEIG should be have low variation during on loads. As a consequence, the SEIG requires less capacitor values for regulating the terminal voltage. The cost is reduced for the isolated induction wind energy.
- The terminal voltage of the SEIG should have sinusoidal waveform. It means the good power quality.
- Low frequency regulation. It means that low variation of the frequency of the terminal voltage during on loads.
- Low capacitor values for the SEIG. It means the capacitor size for generating and regulating the terminal voltage.

The design procedure for the SEIG involves several steps. The sequence for designing the SEIG is shown in the diagram of Fig.3.

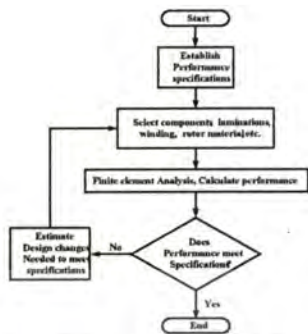


Fig. 3. Design procedure for the SEIG.

Theory in the SEIG design is the same as for an induction motor design due to the same structure. The SEIG design meets the objective depending on the researcher experience about the behavior of the SEIG. The output equation of ac machines is given [20, 22-23] as

$$S = C_o D^2 L n_s \quad (1)$$

where  $S$  is the generator's kVA input.  
 $C_o = 1.1 \pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3}$  is called the output coefficient.  
 $B_{av}$  is the average flux density in the air-gap.  
 $ac$  is the specific electric loading.  
 $D$  is the air-gap diameter.  
 $L$  is the core length.  
 $n_s$  is the synchronous speed.  
 $K_w$  is the winding factor.

The kVA input ( $S$ ) is determined in terms of rated output power ( $P_o$ ), efficiency ( $\eta$ ) and power factor as

$$S = \frac{P_o}{\eta \cos \phi} \quad (2)$$

$B_{av}$  and  $ac$  are the key parameters for a design of the SEIG since they identify the characteristics of the designed SEIG. High  $B_{av}$  results in the saturation region of the SEIG operation. As a consequence, it affects power quality, core loss and high magnetizing current. Also, it affects terminal voltage distortion, low SEIG efficiency including large capacitor values for induced voltage. The designed SEIG will have the lower capability of generating electricity as well as high cost in construction and installation of wind energy SEIG. Therefore, the SEIG design should know the characteristic of magnetic material for defining  $B_{av}$ . For the selection of the  $ac$  value, high  $ac$  affects the higher winding loss and high temperature rise. As a consequence, low efficiency and the requirement of the insulator stand high temperature are obtained. Finally, the cost of construction of SEIG is increased. When we obtained main dimension ( $D^2 L$ ), the important factor for determining  $D$  and  $L$  is aspect ratio. The ratio of the core length ( $L$ ) to pole pitch ( $\tau$ ) is called aspect ratio. This ratio is also chosen on the basis of several factors such as end winding leakage and cost of assembling the SEIG. The aspect may be selected [22] as equal to 1.0 (balanced design). Finally in order to obtain the most desirable design, it must be equal to one [10]. The ampere-turns required to pass the flux in the air-gap are directly proportional to its radial length and the flux density value. Even with low air-gap densities and short air-gap length, the air-gap ampere-turns are larger than the mmf required to pass the flux in the remainder of the magnetic circuit. In order to minimize the magnetizing current, which results in lower capacitor values for induced voltage, the approximate

minimum air-gap length can be determined by the following empirical formula [22]

$$l_g = 3.06 - \frac{6650}{D + 2280} \quad (3)$$

When SEIG has on-load it is operated in the saturation region. As a consequence the output waveform is non-sinusoidal, since the flux per pole has distortion. The flux per pole ( $\phi$ ) is determined [24] as

$$\phi = \alpha_i \tau_i B_{av} \quad (4)$$

where  $\tau$  is the pole pitch.  
 $L_i$  is the net core iron.  
 $\alpha_i$  is the flux density shape factor dependent on the magnetic saturation coefficient of teeth.

When the SEIG has on-load, the induced voltage per phase can be taken equal to the terminal voltage plus the product of the stator current and stator impedance. SEIG will have the operating point in the saturation region resulting in flux density saturation in the teeth. Thus, the number of stator turns per phase ( $N_s$ ) is given [24]

$$N_s = \frac{E_g}{4K_f \phi K_s} \quad (5)$$

where  $E_g$  is the induced voltage.  
 $f$  is the frequency.  
 $K_f$  is the form factor dependent on teeth saturation,  $1.02(K_f \approx 1.1)$

The winding factor for the SEIG consists of the stator windings and the rotor windings. The stator windings are designed to have fractional-pitch, with a span of less 180 electrical degrees, because this results in better designs [21]. The SEIG will cost less overall, since the total of copper in the winding is reduced. Moreover built-up voltage of the SEIG is sinusoidal waveform which mean good power quality and low voltage regulation. The rotor winding, that mean the slots and conductors laid in these slot are skewed with respect to parallelism with the axes of the SEIG's poles. The purpose behind skewing is the same as that of the stator winding. The winding factor ( $K_w$ ) is given as

$$K_w = K_d K_p K_{sk} \quad (6)$$

where  $K_d$  is the distribution factor.  
 $K_p$  is the pitch factor.  
 $K_{sk}$  is the skew factor.

For no-load operation, the designed SEIG should have the operating point in the un-saturation region because if in the SEIG design, we let the operating point in the saturation region, the stator current is increased. This means that the higher core loss results in higher core loss and higher magnetizing current results in larger capacitor values for induced voltage. Therefore, this will cause low efficiency. The rated of the stator current is obtained as

$$I_s = \frac{P_o}{3\eta V_f \cos \phi} \quad (7)$$

The cross-section area of the stator conductor ( $a_s$ ) is

$$a_s = \frac{I_s}{\delta_s} \quad (8)$$

where  $\delta_s$  is the current density in the stator conductors.

The stator current density must be chosen. This affects the required efficiency and voltage regulation of the SEIG. The current density in the stator winding may be assumed 3-6 A/mm<sup>2</sup> [22]. Several designers have presented certain empirical rules for choosing the number of rotor slots in relation to the number of stator slots. These are based on considerations such as vibration, noise, harmonic losses and others. If  $N_1$  and  $N_2$  are the numbers of stator and rotor slots, respectively, the number rotor should be selected such that [23].

•  $N_1 - N_2 \neq \pm 1, \pm 2, \pm(p \pm 1), \pm(p \pm 2), \pm p, -2p, -5p, \pm 3p$  or any multiple of  $\pm 3p$  for 3-phase

- $N_2 > 0.80N_1$
- $N_2 \equiv 0.90N_1$
- $N_2 \neq$  odd number

If the number of the rotor slots ( $N_2$ ) is larger than the number of the number of stator slot ( $N_1$ ), the referred values of the rotor leakage reactance and resistance will decrease [10]. Low rotor resistance results in high efficiency. It means low rotor copper loss. Additionally, the SEIG has low frequency regulation. Apart from this, rotor skewing should be made in order to reduce asynchronous torque harmonics, oscillating torque and stray load losses. The skewed slots generate an additional leakage flux in the SEIG, reducing the useful flux [11, 13-14]. However, in [17] the 10° skewed rotor slot has shown the capability of voltage build-up at low speed range as well as nearly sinusoidal waveform of the terminal voltage. Therefore, the SEIG rotor slot should be skewed with 10°. The rotor current of the SEIG consists of the rotor bar current and the end-ring current [22]. The rotor bar current is obtained as

$$I_b = \frac{2mK_s N_s}{N_2} I_s \cos \phi \quad (8)$$

where  $m$  is the number of phase.

The maximum value of end ring current is obtained as the product of the average bar current and half the number of bar per pole. The rms value of the end ring is obtained as

$$I_{er} = \frac{N_2 I_b}{\pi p} \quad (9)$$

The rotor bar current density and end-ring current density must be chosen. This affects the required efficiency and frequency regulation of the SEIG. These dimensions would be more suitable for manufacturing. The current density in the end-ring becomes only about 2-6 A/mm<sup>2</sup> [22]. The rotor will be die-cast using aluminum.

The flux density in the teeth is much larger the flux density in the air-gap. When SEIG has on-load, the flux density in the teeth is increases. As a consequence the saturation occurrence results in waveform distortion of the terminal voltage. Therefore, the level of the flux density in the teeth should not be greater than the maximum values of the selected magnetic material. The stator and rotor teeth flux density is given as follows [20, 22].

$$B_{st} = \frac{\phi}{N_1 L_s W_{st}} \quad (10)$$

$$B_{rt} = \frac{\phi}{N_2 L_r W_{rt}} \quad (11)$$

where  $W_{st}$  is the stator tooth width.  
 $W_{rt}$  is the rotor tooth width.

The used magnetic material for designed SEIG is a B50A600. Other details are the same as the design of an induction motor.

The detail of the designed can be summarized as Table 1 and Fig.4.

Table 1  
Description of designed

Output power (kW)	0.75	Distribution factor	0.959
Phase voltage (V)	220	Skew angle	10°
Phase current (A)	2	Winding factor	0.935
Number of phase (Phase)	3	Flux density shape factor	0.729
Frequency (Hz)	50	Form factor	1.08
Number of poles (Pole)	4	Slot fill factor	0.4
Insulation class	F	Stator outer diameter (mm)	156
Flux per pole (mWb)	3.2	Stator inner diameter (mm)	100
Number of stator turn per phase (Turns)	352	Stator tooth width (mm)	5
Stator current density (A/mm <sup>2</sup> )	5	Stator slot depth (mm)	15
Rotor current density (A/mm <sup>2</sup> )	2	Stator core depth (mm)	16.5
Number of layer	2	Stator slot depth (mm)	15
Slot/pole/phase	3	Stator slot type	Rounded semiclosed
Number of stator slot (slots)	36	Rotor outer diameter (mm)	99
Number of rotor slot (slots)	44	Rotor tooth width (mm)	3.5
Air-gap length (mm)	0.3	Rotor slot depth (mm)	12
Nett iron core length (mm)	77.4	Shaft diameter (mm)	32
Pole pitch (mm)	78.3	Rotor slot type	Trapezoidal
Aspect ratio	1.04	End ring outer diameter (mm)	97
Pitch factor	0.99	End ring inner diameter (mm)	60



Fig.4. Construction of the SEIG.

### III. EQUIVALENT CIRCUIT ANALYSIS

For no-load operation, the per phase equivalent circuit is shown in Fig.5 neglecting harmonic effect and core loss [8]. The capacitance for built-up voltage during no-load can be determined as

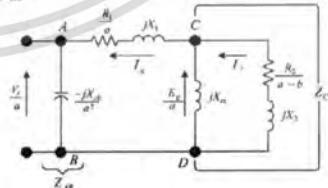


Fig.5. Per phase equivalent circuit of the SEIG at no-load.

$$C_b = \frac{1}{\left\{ 2\pi f_b Z_b a_{\max}^2 (X_1 + X_{CD}) \right\}} \quad (12)$$

where  $C_b$  is the per phase built-up capacitor value.  
 $Z_b$  is the base impedance.  
 $f_b$  is the base frequency.  
 $a_{\max}$  is the coefficient.

According to equation (12), we can obtain  $a_{\max}$  as

$$a_{\max} = b - \frac{b}{2} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{b_c}{b}\right)^2}}{1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)} \right] \quad (13)$$

Also,  $b_c$  can be determined as

$$b_c = \frac{2R_1}{X_m} \sqrt{\frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2} \quad (14)$$

where  $b_c$  is the critical speed.

For the analysis of the on-load operation,  $C_c$  is included. According to Fig.6, when supplying the resistive load. In order to maintain the terminal voltage constant,  $C_c$  can be determined as follows. Total reactive power of overall capacitors (i.e.  $C_b$  and  $C_c$ ) is [15-17].

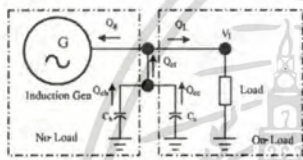


Fig.6. Power flow diagram of the SEIG.

$$Q_{cl} = Q_g + Q_l \quad (15)$$

$$Q_l = 0 \quad (16)$$

$$Q_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2} = I_g^2 x_1 + I_\phi^2 x_m + I_2^2 x_2 \quad (17)$$

where  $S_g$  is the per phase apparent power of the SEIG.

$P_g$  is the per phase active power of the SEIG.

$Q_g$  is the per phase reactive power of the SEIG.

$Q_l$  is the per phase reactive power of load.

$Q_{cl}$  is the per phase total reactive power of the capacitors.

Compensated reactive power is

$$Q_{cc} = Q_{cl} - Q_{cb} \quad (18)$$

where

$$Q_{cb} = 2\pi \frac{V_t^2}{a} (fC_b) \quad (19)$$

where  $Q_{cb}$  is the per phase reactive power of the built-up capacitor.

$Q_{cc}$  is the per phase reactive power of the compensating capacitor.

Per phase current of the compensating capacitor is determined from

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t/a} \quad (20)$$

Per phase compensated capacitance is calculated as following equations.

$$X_{cc} = \frac{V_t/a}{I_{cc}} \quad (21)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f (jX_{cc})} \quad (22)$$

Thus, total capacitor value for the SEIG is

$$C_t = C_b + C_c \quad (23)$$

where  $C_c$  is the per phase value of the compensating capacitor.

$C_b$  is the per phase value of the built-up capacitor.

$C_t$  is the per phase value of the total capacitor.

#### IV. EXPERIMENTAL TESTS AND DISCUSSIONS

Two induction machines with rating of 0.75 kW, 220/380 V, 3.4/2.0 A, 4 poles were tested as the SEIGs. An analysis and tests have been performed for three parts, namely a finite element analysis, parameter test and an operating test.

##### A. Finite element Analysis

For the designed SEIG, in order to carry out the objective, we need a Finite element method in the analysis of magnetic flux density in various parts of the stator and rotor of the SEIG as shown in Figs. 7-8. The principle of terminal voltage build-up of the SEIG is based on residual flux. In the design, if the magnetic flux density is too low, the SEIG is not able to build-up the terminal voltage. Conversely, if the magnetic flux density is too high, the SEIG has increased core loss resulting in the size of the capacitors and the efficiency as well as the saturation around the teeth. This results in the terminal voltage distortion. The teeth flux density should not be greater than 1.7 Tesla which is the maximum value of the B50A600 core type.



Fig.7 Flux density of the SEIG.



Fig.8 Flux density and magnetic flux vector of the SEIG.

##### B. Parameter Test

The parameter test has been made with no-load test, blocked rotor test at 12.5 Hz (i.e. 25 % rated frequency), V-I method test, friction and windage loss in which the tests complied with the IEEE std 112-2004 Method F-F1 [25]. The results are illustrated in Table 2. The objective of these tests is to obtain parameters for determining the capacitance.

Table 2  
Parameters of the Machines

Type	R1	R2	Ro	X1	X2	Xm
Standard	10.4 Ω	13.8 Ω	1308 Ω	14.27 Ω	14.27 Ω	189.76 Ω
Designed	6.77 Ω	3.76 Ω	2885 Ω	8.56 Ω	8.56 Ω	176.20 Ω

From Fig.9, it can be seen that characteristics between the terminal voltage and the stator copper loss for both SEIGs are different. The stator copper loss of the designed SEIG is smaller

than that of the standard SEIG since the designed SEIG has lower stator resistance.

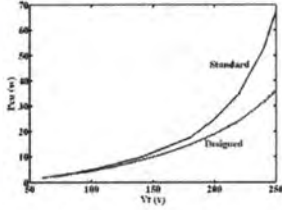


Fig.9 Variation of voltage with stator copper loss of the SEIG.

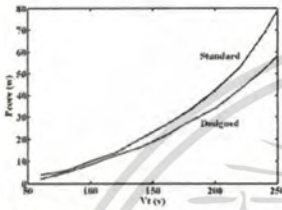


Fig.10 Variation of voltage with core loss of the SEIG.

From Fig.10, it can be seen that characteristics between the terminal voltage and the core loss for both SEIGs are different. The core loss of the designed SEIG is smaller than that of the standard SEIG since the designed SEIG has lower magnetic flux density resulting in lower core loss.

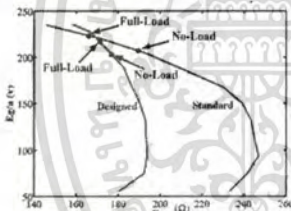


Fig.11. Experimental variation of  $\frac{E_g}{a}$  with  $X_m$ .

From Fig.11, it can be seen that characteristics between  $E_g$  and  $X_m$  for both SEIGs, obtained by synchronous test with a three-phase variable voltage supplied to the stator winding at the rated frequency of 50Hz. When SEIG has on-load, the air-gap voltage ( $E_g$ ) is increased whilst magnetizing reactance ( $X_m$ ) is decreased. This event results in changing the operating point from unsaturated region into saturated region. It means that the SEIG produces more magnetic flux. The operating range from no-load to full-load of the designed SEIG is shorter than that of the standard SEIG. This means that the designed SEIG has better voltage regulation than the standard SEIG.

**C. Operating Test**

The capacitance analysis uses Maple program for determining capacitance under resistive load. Speed was kept constant at 1500 rpm and the values of the capacitors connected in star, were chosen so as to keep the terminal voltage constant. Figs. 12-18 show the SEIG performance in terms of voltage build-up, power quality, frequency variation. The next section will be detail explanation and discussion.

Figs.12-13 illustrate duration (built-up voltage time,  $t_b$ ) of voltage build-up of the SEIG. The duration for the designed SEIG is longer than for the standard SEIG since the designed SEIG is designed for low magnetic flux density. The time

interval ( $t_b$ ) depends on the magnetic flux level for voltage build-up. This agrees with [16].

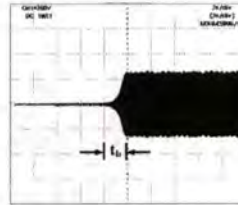


Fig.12. Built-up voltage waveform of the standard SEIG.

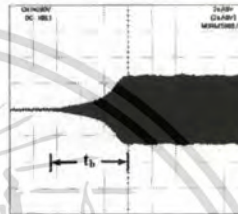


Fig.13. Built-up voltage waveform of the designed SEIG.

Figs. 14-15 show terminal voltage waveforms at no-load. The designed SEIG offers more nearly sinusoidal waveform than the standard SEIG. The distortion of harmonic voltages is reduced for skewed rotor since skewing can reduce space harmonics. This agrees with [17]. Apart from this, the stator windings are designed to have fractional-pitch resulting in reducing the terminal voltage distortion.

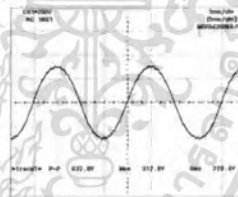


Fig.14. Steady state terminal voltage waveform at no load of the standard SEIG, %THDv= 3.1 %.

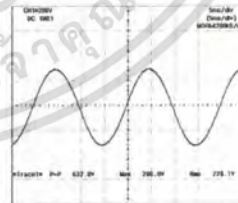


Fig.15. Steady state terminal voltage waveform at no load of the designed SEIG, %THDv= 1.0 %.

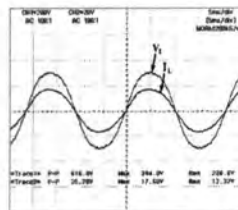


Fig.16. Terminal voltage and load current waveforms of the standard SEIG at on-load of 796 W, %THDv= 5.3 %.

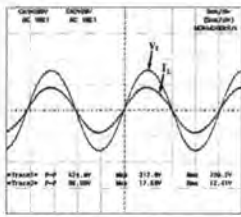


Fig.17. Terminal voltage and load current waveforms of the designed SEIG at on-load of 796 W, %THDv = 1.6 %.

Figs. 16-17 show terminal voltage waveforms at on-load. The designed SEIG offers more nearly sinusoidal waveform than the standard SEIG. The distortion of harmonic voltages increases with a load increase. As a consequence, the air-gap voltage ( $E_g$ ) is increased whilst magnetizing reactance ( $X_m$ ) is decreased. This event results in changing the operating point from unsaturated region into saturated region. Such effect results in the teeth saturation. This affects the terminal voltage distortion.

Table 3  
Capacitance for 0.75 kW SEIG  
under pure resistive-load

Type	No - Load $C_s$ ( $\mu$ F)	ON-Load, $C_s$ ( $\mu$ F)				Total $C_s$ ( $\mu$ F)	$C_r$ ( $\mu$ F)
		200 (W)	400 (W)	604 (W)	796 (W)		
Standard	16.33	2	2.5	2.67	3.83	11	27.3
Designed	17.5	1	1.33	1.5	1.67	5.5	23

Table 3 shows capacitance values for voltage build-up and voltage regulation of the standard and designed SEIG under on-load condition. The compensating capacitor for the standard SEIG is higher than for the designed SEIG under pure resistive load since the standard SEIG has higher stator resistance and stator leakage reactance than the designed SEIG. The test results show that the designed SEIG has better voltage regulation than the standard one. Apart from this the stator copper loss of the designed SEIG is less than that of the standard one. This means that designed SEIG has higher efficiency.

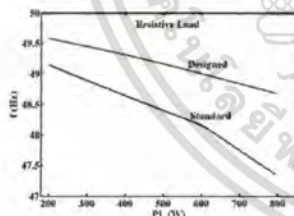


Fig.18. Variation of frequency with output power for resistive load.

Fig.18 shows variation of the SEIG frequency. The change of frequency for the standard SEIG is higher than for the designed SEIG under pure resistive load since the standard SEIG has higher rotor resistance than the designed SEIG. However, rotor resistance is the main parameter affected considerably by the frequency. A reduction in rotor resistance improves the frequency regulation and rotor copper loss of the SEIG. This agrees with [7].

## V. CONCLUSION

According to the design and construction of the SEIG, experimental results of the test under no-load and on-load conditions show characteristics of suitability for wind energy as follows

- High efficiency : The designed SEIG should have main low losses consisting of winding loss and core loss. The designed SEIG is capability of an increase in electricity generation.

- Low voltage regulation. The designed SEIG has low voltage regulation during on loads.

- requires less capacitor values for regulating the terminal voltage.

- The terminal voltage of the designed SEIG offers more nearly sinusoidal waveform. It means the good power quality.

- Low frequency regulation. The designed SEIG has low variation of the frequency of the terminal voltage during on load.

- Low capacitor values for the designed SEIG. It means the capacitor size for the isolated induction wind energy. The cost is reduced for the isolated induction wind energy.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Mr Traiphop Buarakod, Kun Thon Corby Co.Ltd, Thailand for the help in Finite element analysis.

## REFERENCES

- [1] S.S. Murthy, O.P. Malik, and A.K. Tandon, "Analysis of self-excited induction generators," *Proceedings of the IEE*, Vol.129, No.6, pp.260-265, November 1982.
- [2] A.K. Tandon, S.S. Murthy and G.J. Berg, "Steady state Analysis of Capacitor Self-Excited Induction Generators," *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-103, No.3, pp.612-618, March 1984.
- [3] S.S. Murthy, B.P. Singh, C. Nagmani and K.V.V. Satyanarayana, "Study on the use of conventional induction motors as self excited induction generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.3, No.4, pp.842-848, December 1988.
- [4] S.S. Murthy, H.S. Nagraj, and A. Kuriyan, "Design based Computational Procedure for Performance Prediction and Analysis of Self-Excited Induction Generators using Motor Design Packages," *Proceedings of IEE*, Vol.135, Pt. B, No.1, pp.8-16, January 1988.
- [5] A.K. Al Jabri and A.I. Alolah, "Capacitance Requirements for Self-excited Induction Generators," *Proceedings of IEE*, Vol.137, No.3, pp.154-159, May 1990.
- [6] N.H. Malik and A.H. Al Bahrani, "Influence of the Terminal Capacitor on the Performance Characteristics of a Self-Excited Induction Generator," *Proceedings of IEE*, Vol.137, No.2, pp.168-173, March 1990.
- [7] I. Shridhar, Bhim Singh, C.S. Jha, "A step towards improvements in the characteristics of Self-excited Induction Generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.1, pp.40-46, March 1993.
- [8] T.F. Chan, "Capacitance Requirements of Self-excited Induction Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.2, pp.304-310, June 1993.
- [9] S.P. Singh, B.S. Singh and M.P. Jain, "Comparative study on the performance of a commercially designed induction generator with induction motors operating as self excited induction generators," *Proceedings of the IEE*, Vol.140, No.5, pp.374-380, September 1993.
- [10] J. Faiz, A.A. Dadgari, S. Horning and A. Keyhani, "Design of a Three Phase Self-Excited Induction Generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.10, No.3, pp.516-523, September 1995.
- [11] S.L. Nau, "The influence of the skewed rotor slots on the magnetic noise of three phase induction motors," *Proceedings of the IEE*, Vol.140, No.444, pp.396-399, September 1997.
- [12] Li Wang and Jian-Yi Su, "Dynamic Performances of An Isolated Self-Excited Induction Generator under Various Loading Conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.14, No.1, pp.93-100, March 1999.
- [13] S. Williamson and C.I. McClay, "The Effect of Axial Variations in Saturation Due to Skew on Induction Motor Equivalent - Circuit Parameters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.35, No.6, pp.1323-1331, November/December 1999.
- [14] A. Tenhunen and A. Arkkio, "Modelling of induction machines with skewed rotor slots," *Proceedings of the IEE*, Vol.148, No.1, pp.45-50, January 2001.
- [15] B. Savetsakulnon, V. Kinnaree, "A simple Approach to Capacitance Determination of Self-Excited Induction Generators for Terminal Voltage Regulation," in *Proc. Power Electronics and Drive System*, Bangkok, Thailand, pp.1319-1324, November 2007.
- [16] B. Savetsakulnon, V. Kinnaree, "Analysis and Comparative Study on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Self-Excited Induction Generators," in *Proc. Power Electronics and Drive System*, Bangkok, Thailand, pp.1313-1318, November 2007.
- [17] B. Savetsakulnon, V. Kinnaree, "Investigation of Skew Effect on the Performance of Self-Excited Induction Generators," in *Proc. Power Electronics and Drive System*, Bangkok, Thailand, pp.1367-1373, November 2007.
- [18] Bedrich Heller and Vaclav Hamata Cochran, "Harmonic Field Effects in Induction Machines" Elsevier Scientific, Inc, pp.256-274, 1977.
- [19] Enrico Levi, "Polyphase Motors" John Wiley & Sons, Inc, pp.255-263, 1984.
- [20] A. K. Sawhney, "A Course in Electrical Machine Design" 5th Edition, Inc, pp.527-529, 1988.
- [21] Paul L. Cochran, "Polyphase Induction Motors" Marcel Dekker, Inc, pp.527-529, 1989.
- [22] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines" John Wiley & Sons, Inc, pp.128-131, 1994.
- [23] Richard H. Engelmann and William H. Middelorf, "Handbook of Electric Motors" Marcel Dekker, Inc, pp.228-315, 1995.
- [24] Ion Boldea and Syed A. Nasar, "The Induction Machine Handbook" CRC Press, Chapter 7, 2002.
- [25] IEEE std 112-2004, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," pp.24-73, 2004.

Elsevier Editorial System™ - Windows Internet Explorer

http://ees.elsevier.com/egy/default.asp

File Edit View Favorites Tools Help

Search

Options EPSON Web-To-Page Links

Elsevier Editorial System™

Contact us Help

home | main menu | submit paper | guide for authors | register | change details | log out

Username: loveloyv Role: Author

Version: EES 2010.1

**Submissions with an Editorial Office Decision for Author budhapon sawetsakulanond, M.Eng**

Page: 1 of 1 (1 total completed submissions) Display 10 results per page.

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status	Date Final Disposition Set	Final Disposition
<a href="#">View Submission R1</a> <a href="#">View Decision Letter</a> <a href="#">Send E-mail</a>	EGY-D-10-00382	Design, Analysis, and Construction of a Small Scale Self-Excited Induction Generator for a Wind Energy Application	May 05, 2010	Aug 17, 2010	Completed - Accept	Aug 17, 2010	Accept

Page: 1 of 1 (1 total completed submissions) Display 10 results per page.

<< Author Main Menu

You should use the free Adobe Acrobat Reader 6 or later for best PDF Viewing results.

Adobe Acrobat Reader

Help | Privacy Policy | Terms and Conditions

© 2006 - 2010 Elsevier BV

start Revision Hotmail Blank Pa... Elsevier ... EPSON ... Elsevier ... EN 100% 12:10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Windows Live™ Hotmail (4037) Messenger Office Photos | MSN budhapon

## Hotmail

New | Reply Reply all Forward | Delete Junk Sweep ▾ Mark as ▾ Move to ▾ |

## Inbox (4037)

Folders

Junk (21)

Drafts (14)

Sent

Deleted

New folder

## Quick views

Flagged

Photos (572)

Office docs (56)

## Messenger

Sign in to Messenger

Home

Contacts

Calendar

works like  
Outlook

## Your Submission

Back to messages |

Energy

8/17/2010

To budhapon@hotmail.com

Reply ▾

Ms. Ref. No.: EGY-D-10-00382R1

Title: Design, Analysis, and Construction of a  
Small Scale Self-Excited Induction Generator for  
a Wind Energy Application

Energy

Dear Mr. sawetsakulanond,

I am pleased to inform you that your paper  
"Design, Analysis, and Construction of a Small  
Scale Self-Excited Induction Generator for a  
Wind Energy Application" has been accepted for  
publication in Energy.

The publisher will send you the proofs as a PDF  
file when ready.

Thank you very much for expressing your interest  
in ENERGY.

Sincerely,

Henrik Lund  
Editor-in-Chief  
Energy

New | Reply Reply all Forward | Delete Junk Sweep ▾ Mark as ▾

Move to ▾ |

© 2010 Microsoft | Terms | Privacy | Advertise

Help Center |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Design, Analysis, and Construction of a Small Scale Self-Excited Induction Generator for a Wind Energy Application

B. Sawetsakulanond and V. Kinnares

Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok 10520, Thailand

Fax 662-3269902 E-mail : budhapon@hotmail.com E-mail : kkwijit@kmitl.ac.th

**Abstract--** This paper proposes the design, analysis, and construction of a three phase, 0.75 kW, 220/380 V, 3.4/2.0 A,  $\Delta/Y$  connected, 4 poles, self-excited induction generator (SEIG) based on empirical rules. The designed SEIG offers improved high efficiency and power quality. The design takes into consideration a skew effect and power quality. A 2 dimension finite element analysis (2D-FEA) is used to consider core loss, flux density and circuit parameters of the designed SEIG. The designed SEIG has been tested and compared with a standard SEIG under various operating conditions in terms of efficiency and power quality. Consideration of capacitance for the SEIG based on steady-state equivalent circuit model and a power flow diagram is also given. Research results can be guidelines and recommendations for development of small wind induction generators for effective electricity generation.

**Keywords--** self-excited induction generator, generator design, finite element analysis, wind energy

## 1. Introduction

Owing to the continuous increase in energy needs, it is difficult to meet the growing demand by exploiting energy from the limit conventional sources, such as coal, oil, gas, and so on. As a consequence, a greater emphasis is now being given to harness energy from non-conventional sources such as wind, biogas, solar and small hydro heads. Wind energy is one of the most important sustainable energy resources since it is clean and available in some areas like coasts, mountains, etc. Due to lower maintenance demands and simplified controls, an induction generator seems to be a good solution for small hydro and wind power plants. A small self-excited stand-alone induction generator is likely found in remote areas where extension of grid is not economically viable. It offers various advantages over other machines such as reduced unit cost, brushless rotor (squirrel cage construction), absence of DC excitation and ease of maintenance [1-9]. Steady-state analysis of such generators is useful for design and performance prediction. ไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying performance characteristics of SEIGs for ensuring good quality power and assessing the suitability of the configuration for a particular application can be found in [1-7, 9-10, 16-18]. S. S. Murthy et al. [3] proposed the study on the use of conventional induction motors as self excited induction generators. Moreover the effect of variation in the parameters on its performance using the design based on computation procedure was also presented [4]. L. Shridhar et al. [7] proposed the study of parameter effects towards improvements of SEIG which are useful for a practical design. S.P Singh et al. [9] have presented the computed performance characteristics of different induction machine ratings operating as SEIGs. J. Faiz et al. [10] proposed the design of a three phase self-excited induction generator based on computer software but the details of the rotor skewing and power quality were not mentioned in the design. Moreover practical results have not been given in order to verify the design effectiveness. Li Wang et al. [12] proposed the dynamic performances of SEIG under various loading conditions. B. Sawetsakulanond et al. [17] have proposed the guidelines for improving performance of the SEIG suitable for wind energy such as a capability of voltage build-up at a low speed range, power quality and importance of a skew effect on the performance. These results can be used to be a criteria in an effective design.

The organization of this paper is as follows. It starts with characteristics of the SEIG and requirements for the design. Then, the design procedure and construction of a three phase, 0.75 kW, 220/380 V, 3.4/2.0 A,  $\Delta/Y$  connected, 4 poles, self-excited induction generator (SEIG) are given. Analysis using a steady-state equivalent circuit and a finite element method for considering capacitance and for predicting performance such as core losses, magnetic flux density, parameters, etc., respectively has been performed to ensure that the obtained results meet the requirements. Research results are beneficial to designers and researcher to develop effective wind induction generators with a small rating range for electricity generation.

## 2. Characteristics of a SEIG

As shown in Fig.1, a three phase induction motor can be made to work as a self-excited generator (SEIG) when its rotor is driven at suitable speed by wind energy and its excitation is provided by connecting a three phase capacitor bank at the stator terminal in order to build up voltage and regulate at a terminal voltage nominal value. However, recently, we have fully investigated and reported the SEIG performance [16-17]. The performance of this type of induction machines is very undesirable for an induction generator. The reason for the poor performance is that in the part, the designer optimized the performance operating as motor rather than generator. Moreover, it has poorer voltage regulation and efficiency due to higher losses as its performance depends upon the operating zone.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When considering the operation region as shown in Fig. 2 which is the relationship between the air-gap voltage and frequency ratio and the magnetizing reactance, an induction motor operates in an un-saturation (linear) region different from a SEIG operating in two regions namely, both un-saturation (linear) and saturation (non-linear) regions. The higher degree of saturation, the higher increase in the induced voltage occur leading to the core loss increase and the voltage distortion. Therefore, a suitable SEIG is needed to be carefully designed.

Requirements of a suitable SEIG for a wind energy conversion system are as follows [15-18].

- **High efficiency:** The SEIG should have low main losses consisting of winding loss and core loss. The high efficiency SEIG has a capability of an increase in electricity generation.
- **Voltage build-up process capability :** The SEIG should have a capability of voltage build up at low speed.
- **Low voltage regulation :** The level of terminal voltage of the SEIG should be low variation during on loads. As a consequence, the SEIG requires less capacitor values for regulating the terminal voltage, thus reducing the cost for a wind energy conversion system.
- **Low total harmonic distortion of terminal voltage:** The reduced machine heating and good power quality for load systems can be obtained with low harmonic contents.
- **Low frequency regulation:** It needs a low variation of the frequency of the terminal voltage during an on load condition to ensure normal operation of the loads.
- **Low capacitor values for the SEIG:** The capacitor size for generating and regulating the terminal voltage should be small in order to reduce cost, system loss, etc.

### 3. Design

Theory in the SEIG design is similar to an induction motor design due to the same structure. Some design procedures of the induction motor can be used for the generator. The SEIG design will meet the objectives depending on the researcher experience in understanding of the behavior of the SEIG. Normally a design procedure for a SEIG involves several steps. Parameter calculations of the induction generator are performed using mathematical and empirical equations. The proposed procedure is shown in the diagram of Fig.3.

The output equations of a.c. machines are given [20-21, 23-24] as

$$S = C_o D^2 L n_s \tag{1}$$

$$C_o = 1.1 \pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3} \tag{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where  $S$  is the generator's kVA input,  $C_o$  is the output coefficient,  $B_{av}$  is the average flux density in the air-gap,  $ac$  is the specific electric loading,  $D$  is the air-gap diameter,  $L$  is the core length, and  $n_s$  is the synchronous speed,  $K_w$  is the winding factor.

The kVA input ( $S$ ) is determined in terms of rated output power ( $P_o$ ), efficiency ( $\eta$ ) and power factor as

$$S = \frac{P_o}{\eta \cos \phi} \quad (3)$$

$B_{av}$  and  $ac$  are the key parameters for the design of the SEIG since they identify the characteristics. If we select a high  $B_{av}$  value, the SEIG will operate in the saturation region. As a consequence, it results in poor power quality, high core loss and high magnetizing current. Subsequently a terminal voltage distortion and low SEIG efficiency as well as requirement of large capacitor for the induced voltage could be obtained. As a consequence the designed SEIG will have the lower capability of generating electricity as well as high unit cost in construction and installation of a wind energy SEIG system. Therefore, in the SEIG design, the characteristic of magnetic material for defining the  $B_{av}$  value should be known. For the selection of the  $ac$  value, we should realize that a high  $ac$  value causes high winding loss and high temperature rise. Subsequently, low efficiency of and the requirement of higher class of the insulator could be obtained leading to an increase in the construction cost.

After obtaining the main dimension ( $D^2L$ ), then  $L$  is calculated from an aspect ratio which is the ratio of a core length ( $L$ ) to a pole pitch ( $\tau$ ). This ratio is also chosen on the basis of several factors such as end winding leakage and cost of assembling the SEIG. The aspect ratio may be selected [23] as equal to 1.0 (balanced design). Generally, in order to obtain the most desirable design, it must be equal to one [10]. The ampere-turns required to pass the flux in the air-gap are directly proportional to its radial length and the flux density value. Even with low air-gap densities and short air-gap length, the air-gap ampere-turns are larger than the mmf (magneto-motive force) required to pass the flux in the remainder of the magnetic circuit. In order to minimize the magnetizing current, which results in lower capacitor values for the induced voltage, the approximate minimum air-gap length can be determined by the following empirical formula [23]

$$l_g = 3.06 - \frac{6650}{D + 2280} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When a SEIG is in an on-load condition, the operating point is likely to be in the saturation region. As a consequence the output waveform is non-sinusoidal, since the magnetic flux is distorted. The flux per pole ( $\phi$ ) is determined [25] as

$$\phi = \alpha_i \tau L_i B_{av} \quad (5)$$

where  $\tau$  is the pole pitch,  $L_i$  is the net core iron, and  $\alpha_i$  is the flux density shape factor dependent on the magnetic saturation coefficient of teeth.

When the SEIG operates on-load, the induced voltage per phase can be taken equal to the terminal voltage plus the product of the stator current and stator impedance. SEIG will have the operating point in the saturation region resulting in flux density saturation in the teeth. Thus, the number of stator turns per phase ( $N_s$ ) is given [25]

$$N_s = \frac{E_g}{4 K_f \phi f K_w} \quad (6)$$

where  $E_g$  is the induce voltage,  $f$  is the frequency, and  $K_f$  is the form factor dependent on teeth saturation which  $1.02 < K_f < 1.11$ .

The winding factor for the SEIG consists of the stator windings and the rotor windings. The stator windings are designed to have fractional-pitch, with a span less than 180 electrical degrees because this results in a better design [22]. The SEIG cost is reduced, since the total copper quantity in the winding is reduced. Moreover the build-up voltage of the SEIG is sinusoidal waveform which means good power quality and low voltage regulation. The rotor winding consists of conductors laid in slots skewed with respect to parallelism with the axes of the SEIG's poles. The purpose of skewing the rotor is the same as that of the stator winding. The winding factor ( $K_w$ ) is given as

$$K_w = K_d K_p K_{sk} \quad (7)$$

where  $K_d$  is the distribution factor,  $K_p$  is the pitch factor, and  $K_{sk}$  is the skew factor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For no-load operation, the designed SEIG should have the operating point in the un-saturation region otherwise the stator current is increased. If it is in the saturation region, the core loss current is high leading to higher core loss and higher magnetizing current. Subsequently, larger capacitor values for the induced voltage is required. Therefore, this will cause low efficiency. The no-load current of the SEIG must not be greater than 70 % of the rated stator current [10]. The rated stator current is obtained as

$$I_s = \frac{P_o}{3\eta V_l \cos \phi} \quad (8)$$

The cross section area of the stator conductor ( $a_s$ ) is

$$a_s = \frac{I_s}{\delta_s} \quad (9)$$

where  $\delta_s$  is the current density in the stator conductors.

The stator current density must be chosen at low value so that the required efficiency is high and voltage regulation is low. The current density in the stator winding may be assumed to be 3-6 A/mm<sup>2</sup> [23].

Several designers have presented certain empirical rules for choosing the number of rotor slots in relation to the number of stator slots. These are based on considerations such as vibration, noise, harmonic losses and others. If  $N_1$  and  $N_2$  are the numbers of stator and rotor slots, respectively, the number rotor should be selected such that [24]

- $N_1 - N_2 \neq \pm 1, \pm 2, \pm(p \pm 1), \pm(p \pm 2), \pm p, -2p, -5p, \pm 3p$  or any multiple of  $\pm 3p$  for 3-phase
- $N_2 > 0.80N_1$
- $N_2 \cong 0.90N_1$
- $N_2 \neq$  odd number.

If the number of the rotor slots ( $N_2$ ) is larger than that of the stator slot ( $N_1$ ), the referred values of the rotor leakage reactance and resistance will decrease [10]. It is noted that low rotor resistance causes low rotor copper loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

leading to high efficiency. With the low resistance characteristic, the designed SEIG has low frequency regulation as well.

Apart from this, rotor skewing should be made in order to reduce asynchronous torque harmonics, oscillating torque and stray load losses. The skewed slots generate an additional leakage flux in the SEIG, reducing the useful flux [11, 13-14, 19, 25]. However, in [17] the 10° skewed rotor slot has shown the advantages in term of the capability of voltage build-up at low speed range as well as nearly sinusoidal waveform of the terminal voltage. Therefore, the SEIG rotor slot should be skewed with 10°. The rotor current consists of the rotor bar current and the end-ring current [23].

The rotor bar current is obtained as

$$I_b = \frac{2mK_w N_s}{N_2} I_s \cos \phi \quad (10)$$

where  $m$  is the number of phase.

The maximum value of the end ring current is obtained as the product of the average bar current and half the number of bar per pole. The rms value (i.e. root mean square value or effective value used for analyzing an alternating current circuit) of the end ring current is obtained as

$$I_{er} = \frac{N_2 I_b}{\pi p} \quad (11)$$

The rotor bar current density and end-ring current density must be chosen so that the required efficiency is high and voltage regulation is low. These dimensions would be more suitable for manufacturing. The current density in the end-ring becomes only about 2-6 A/mm<sup>2</sup> [23]. The rotor should be die-cast using aluminum.

The flux density in the teeth is much larger the flux density in the air-gap. When SEIG operates on-load, the flux density in the teeth is increased. As a consequence the saturation occurrence results in a waveform distortion of the terminal voltage. Therefore, the level of the flux density in the teeth should not be greater than the maximum values of the selected magnetic material. The stator and rotor teeth flux density are given [21, 23] as

$$B_{tr} = \frac{\phi}{N_1 L W_m} \quad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_r = \frac{\phi}{\frac{N_2}{p} L_l W_r} \quad (13)$$

where  $w_s$  is the stator tooth width, and  $w_r$  is the rotor tooth width.

The used magnetic material for the designed SEIG is a B50A600 type. Other details are the same as the design of an induction motor. The detailed results of the designed SEIG are given in Table 1. Using the data from Table 1, we have constructed the SEIG prototype. Fig.4 shows the aspect of the designed SEIG following the mentioned procedure.

#### 4. Equivalent Circuit Analysis

Unlike other publications for capacitance determination, the proposed analysis has separated capacitors into two parts in order to obtain a better understanding of a capacitor effect on machine parameters leading to simple VAR compensation control. The proposed system can be shown in Fig.5. Capacitors are a voltage build-up capacitor ( $C_b$ ) and a compensating capacitor ( $C_c$ ) for terminal voltage regulation. The  $C_b$  is responsible for no-load operation whilst both  $C_b$  and  $C_c$  are responsible for on-load operation.

For no-load operation, the per-phase equivalent circuit is shown in Fig.6 neglecting harmonic effect and core loss [8].

The capacitance for the voltage build up process during no-load can be determined as

$$C_b = \frac{1}{\{2\pi f_b Z_b a_{\max}^2 (X_1 + X_{CD})\}} \quad (14)$$

where  $C_b$  is the per-phase voltage build-up capacitance,  $Z_b$  is the base impedance,  $f_b$  is the base frequency, and  $a_{\max}$  is the coefficient.

According to equation (14), we can obtain  $a_{\max}$  as

$$a_{\max} = b - \frac{b}{2} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{b_c}{b}\right)^2}}{1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2} \right] \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Also,  $b_c$  can be determined as

$$b_c = \frac{2R_1}{X_m} \sqrt{\frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2} \quad (16)$$

where  $b_c$  is the critical speed.

When the SEIG has successfully built up its voltage, the regulation of the terminal voltages during a load increase is needed. Although many researchers used the similar procedure to find out  $C_{min}$  for the terminal voltage regulation, it has much difficulty and needs numerical iterative techniques to obtain the capacitance required. Unlike other methods mentioned in the literature review, the proposed simple method determines the capacitance by including the determination of the power flow diagram for regulating the terminal voltage under a wide range of operating conditions. For the analysis of the on-load operation,  $C_c$  is included. Fig.7 shows the power flow diagram of the SEIG supplying a resistive load. In order to maintain the terminal voltage constant,  $C_c$  can be determined as follows [15-18]. Total reactive power of overall capacitors (i.e.  $C_b$  and  $C_c$ ) is

$$Q_{ct} = Q_g + Q_L \quad (17)$$

For a resistive load

$$Q_L = 0 \quad (18)$$

$$Q_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2} = I_g^2 x_1 + I_\phi^2 x_m + I_2^2 x_2 \quad (19)$$

where  $S_g$  is the per phase apparent power of the SEIG,  $P_g$  is the per phase active power of the SEIG,  $Q_g$  is the per phase reactive power of the SEIG,  $Q_L$  is the per phase reactive power of load, and  $Q_{ct}$  is the per phase total reactive power of the capacitors.

Compensated reactive power is

$$Q_{cc} = Q_{ct} - Q_{cb} \quad (20)$$

where

$$Q_{cb} = 2\pi \frac{V_t^2}{a} (fC_b) \quad (21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where  $Q_{cb}$  is the per-phase reactive power of the voltage build-up capacitor, and  $Q_{cc}$  is the per-phase reactive power of the compensating capacitor.

Per-phase current of the compensating capacitor is determined from

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t/a} \quad (22)$$

Per-phase compensated capacitance is calculated as following equations.

$$X_{cc} = \frac{V_t/a}{I_{cc}} \quad (23)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f(jX_{cc})} \quad (24)$$

Thus, total capacitor value for the SEIG is

$$C_t = C_b + C_c \quad (25)$$

where  $C_c$  is the per-phase compensating capacitance,  $C_b$  is the per-phase voltage build-up capacitance, and  $C_t$  is the per-phase total capacitance.

## 5. Calculated, Experimental Results and Discussions

### 5.1 Finite element Analysis

For the designed SEIG, in order to carry out the objectives, we need a 2D finite element analysis using SPEED PC-FEA software package for analyzing magnetic flux density in various parts of the stator and rotor of the SEIG as shown in Figs.8-10. The 2D mesh is shown in Fig.8. It contains 17,692 nodes and 34,608 elements. Figs.9-10 demonstrate the flux density and magnetic flux vector of the SEIG. The process of terminal voltage build-up of the SEIG depends upon residual flux. In the design, if the magnetic flux density is too low, the SEIG is not able to build-up the terminal voltage. Conversely, if the magnetic flux density is too high, the SEIG has increased the core loss

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resulting in a requirement of larger size of the capacitors and a decrease in the efficiency as well as the saturation around the teeth. This leads to the terminal voltage distortion. According to results of the 2D-FEA, the maximum flux density of the stator and rotor teeth, as shown in Figs. 9 and 10 is 1.14 Tesla. Note that the maximum teeth flux density should not be greater than 1.7 Tesla which is the maximum value of the B50A600 core type. Table 2 illustrates the calculated results of the designed SEIG parameters using the 2D-FEA. Fig.11 illustrates the use of the finite element method in determining core losses of the designed SEIG stator and rotor. The hysteresis and eddy current losses of the stator core and the rotor core are shown in Table 3. It has been found that the eddy current losses are higher than hysteresis losses. It implies that a used magnetic material should have high resistivity for reducing eddy current losses leading to an increase in efficiency.

## 5.2. Parameter and loss Tests

The parameter tests were conducted with a no-load test, a blocked rotor test, a DC test, and a friction and windage losses test in which the tests are complied with the IEEE std 112-2004 Method F-F1 [26]. The results are illustrated in Table 4. The rotor and stator resistances of the designed SEIG are less than those of the standard SEIG which meet the objectives of the design for reducing losses. With these characteristics, the high efficiency and good frequency regulation are achieved. The parameters will be used for determining capacitance in the next section.

From Fig.12, as can be seen that characteristics between the terminal voltage and the stator copper loss for both SEIGs are different. The stator copper loss of the designed SEIG is less than that of the standard SEIG since the designed SEIG has lower stator resistance.

From Fig.13, it can be seen that characteristics between the terminal voltage and the core loss for both SEIGs are different. The core loss of the designed SEIG is lower than that of the standard SEIG since the designed SEIG has lower magnetic flux density resulting in lower core loss.

Fig.14 shows characteristics between  $\frac{E_g}{a}$  and  $X_m$  for both SEIGs, obtained by a synchronous speed test with a three-phase variable voltage supplied to the stator winding at the rated frequency of 50Hz. When the SEIG is on-load, the air-gap voltage is increased whilst magnetizing reactance is decreased. This event results in changing the operating point from the un-saturation region into the saturation region. It means that the SEIG produces higher magnetic flux. The variation of the induced voltage of the designed SEIG is shorter than that of the standard SEIG. This means that the designed SEIG has better voltage regulation than the standard SEIG. Generally, the operating point of a standard type is likely to be in a saturation region. Note that the saturation causes harmonic voltages. As a consequence total

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

harmonic distortion increases with the degree of the saturation. Therefore the designed SEIG offers advantages in terms of power quality due to the low degree of the saturation.

### 5.3. Operating Test

In a preliminary test, the SEIGs under test were connected with a prime mover using a variable speed drive in order to investigate the voltage build-up capability during speed changes namely a speed increase and a speed decrease.

Fig.15 demonstrates the impact of the speed change on voltage build-up during a speed increase. It is found that at a certain speed range the build-up voltage is increased rapidly. The critical speed point can be identified by this certain range. Note that the critical speed point is the point that the SEIG is able to build up enough high level of the terminal voltages. With this critical speed point, a VAR (volt-ampere reactive) compensation technique is possibly used to reach the rated voltage. When the speed is over this point the higher induced voltage can be easily generated. The critical speed for the designed SEIG is lower than that for the standard one. It can be seen that at the speed of 1450 rpm, the designed SEIG is able to generate voltage at 138 V whilst the standard SEIG generates considerably low voltage of 25 V. At this voltage value for the designed SEIG, a static VAR compensator (i.e. a component set for supplying volt-ampere reactive power such as thyristor controlled reactor (TCR), thyristor switched capacitor (TSC), instantaneous reactive power controller, etc.) could be used for voltage regulation. This characteristic has proved the capability of the designed SEIG in electricity generation at low speed. This capability results partly from the skewed rotor. This characteristic agrees with [17]. Fig.16 demonstrates the impact of the speed change for both speed increase and decrease. When decreasing the speed of the prime mover, the build-up voltage of the standard SEIG is decreased lower than that of the designed SEIG. Again this confirms the capability of the designed SEIG at low speed. Note that when decreasing the speed, the terminal voltage is higher than during the speed increase. This is because of the core hysteresis loop.

The further operating tests are concerned with power quality and efficiency. Maple program is used for the capacitance determination. The values of the capacitors connected in star, were chosen so as to keep the terminal voltage constant. The speed was kept constant at 1500 rpm by the Siemens DC drive equipped with torque and speed detectors.

Figs.17-18 illustrate the transient self-excitation voltage process. The time interval of the build-up process  $t_b$  for the designed SEIG is longer than for the standard SEIG since the designed SEIG is designed for low magnetic flux density. The time interval ( $t_b$ ) depends upon the magnetic flux level for voltage build-up. This agrees with [16].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figs. 19-20 show terminal voltage waveforms at no-load. The terminal voltage waveform of the designed SEIG is more nearly sinusoidal than that of the standard SEIG. The distortion of harmonic voltages is reduced due to skewed rotor since skewing can reduce space harmonics. This agrees with [17]. Apart from this, the stator windings are designed to have fractional-pitch resulting in reducing the terminal voltage distortion.

Figs. 21-22 show terminal voltage waveforms at on-load. The designed SEIG provides more nearly sinusoidal waveform than the standard SEIG. The distortion of harmonic voltages increases with a load increase. As a consequence, the air-gap voltage is increased whilst magnetizing reactance is decreased. This event results in changing the operating point from un-saturation region into saturation region. Such effect results in the teeth saturation. This affects the terminal voltage distortion. The total harmonic distortion of terminal voltages for both types is shown in Table 5. These results confirm the operating points from Fig.14.

Table 6 shows capacitor values for voltage build-up and voltage regulation of the standard and the designed SEIGs for the on-load condition. The compensating capacitor value for the standard SEIG is higher than that for the designed SEIG under a pure resistive load since the standard SEIG has higher stator resistance and stator leakage reactance than the designed SEIG. The test results show that the designed SEIG has better voltage regulation than the standard one. Apart from this the stator copper loss of the designed SEIG is less than that of the standard one. This implies that the designed SEIG has higher efficiency. As a consequence, the cost of the capacitors is reduced for stand-alone SEIG. Dielectric loss of the capacitors due to a smaller size is also reduced leading to a reduction in power loss in the renewable source system.

Fig.23 shows a variation of the SEIG frequency with output power. The change of frequency for the standard SEIG is more than for the designed SEIG under the pure resistive load since the standard SEIG has higher rotor resistance than the designed SEIG. However, the rotor resistance is the main parameter affecting considerably the frequency. A reduction in the rotor resistance improves the frequency regulation and rotor copper loss of the designed SEIG. This agrees with [7].

Fig.24 shows the efficiency of the designed generator. The maximum efficiency is about 82% and 75% for the designed and standard SEIGs, respectively. The designed SEIG has higher efficiency throughout the load variation particularly at heavy load. This is because the design is carefully paid attention in the loss reduction in the SEIG particularly in the rotor copper loss. In addition, with the loss reduction, the frequency regulation is better. Subsequently the capability of electricity generation is higher.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. Conclusions

This paper has dealt with the design, analysis and construction of a small SEIG using empirical rules together with a finite element analysis in order to improve power quality and efficiency. The parameters, core loss, magnetic flux distribution have been determined by the 2D Finite element analysis. The calculated core loss results have been compared with experimental results. They are in good agreement. The proposed analysis of the capacitor separation for supplying the reactive power to the SEIGs for regulating the terminal voltage is included for the use in protection and simple VAR control. The proposed design procedure and recommendations could be of benefit to researchers and designers. According to calculation and experimental results, they have shown characteristics of suitability of the designed SEIG for a small-scale wind energy conversion system in rural areas. The performances of the designed SEIG have met objectives as follows.

- High efficiency ; The designed SEIG has main low losses consisting of winding loss and core loss. With the improved efficiency, the designed SEIG is able to increase electricity production. The obtained maximum efficiency is 82% which is higher than that of the standard type. The higher efficiency of the designed SEIG is obtained over a wide range of loading compared to that of the standard type.
- Voltage build up capability at low speed ; The designed SEIG offers the capability at low speed sufficient to cooperate with a VAR compensator.
- Low voltage regulation ; The designed SEIG has low voltage regulation during on-load. The designed SEIG requires less capacitor values for regulating the terminal voltage. As a consequence, the cost is reduced for a wind energy SEIG.
- Low frequency regulation ; The designed SEIG has low variation of the frequency of the terminal voltage during on load.
- Good power quality ; The terminal voltage waveform of the designed SEIG is nearly sinusoidal. The THD (total harmonic distortion) of voltage (i.e. the value of the square root of the sum of squared harmonic voltages over the fundamental) is less than 2 % complying with the standards.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Mr. Traiphop Buarakod, Kulthorn Kirby Public Company Limited, Thailand for software support and would like to thank the Mitsubishi Electric Motor (Thailand) for constructing the SEIG. Also, the authors gratefully acknowledge the scholarship support received from Mahanakorn University of Technology.

## References

- [1] S.S. Murthy, O.P. Malik, A.K. Tandon, Analysis of self-excited induction generators, IEE Proc., Generation, Transm. Distribution 129 (6) (1982) 260-265.
- [2] A.K. Tandon, S.S. Murthy, G.J. Berg, Steady state Analysis of Capacitor Self-Excited Induction Generators, IEEE Trans. Power Apparatus Sys. 103 (3) (1984) 612-618.
- [3] S.S. Murthy, B.P. Singh, C. Nagmani, K.V.V. Satyanarayanna, Study on the use of conventional induction motors as self excited induction generators, IEEE Trans. Energy Conversion 3 (4) (1988) 842-848.
- [4] S.S. Murthy, H.S. Nagraj, A. Kuriyan, Design based Computational Procedure for Performance Prediction and Analysis of Self-Excited Induction Generators using Motor Design Packages, IEE Proc., 135 (1) (1988) 8-16.
- [5] A.K. Al Jabri, A.I. Alolah, Capacitance Requirements for Self-excited Induction Generators, IEE Proc., 137 (3) (1990) 154-159.
- [6] N.H. Malik, A.H. Al Bahrani, Influence of the Terminal Capacitor on the Performance Characteristics of a Self-Excited Induction Generator, IEE Proc., 137 (2) (1990) 168-173.
- [7] L. Shridhar, Bhim Singh, C.S. Jha, A step towards improvements in the characteristics of Self excited Induction Generator, IEEE Trans. Energy Conversion 8 (1) (1993) 40-46.
- [8] T.F. Chan, Capacitance Requirements of Self-excited Induction Generators, IEEE Trans. Energy Conversion 8 (2) (1993) 304-310.
- [9] S.P. Singh, B.S. Singh, M.P. Jain, Comparative study on the performance of a commercially designed induction generator with induction motors operating as self-excited induction generators, IEE Proc., 140 (5) (1993) 374-380.
- [10] J. Faiz, A.A. Dadgari, S. Horning, A. Keyhani, Design of a Three Phase Self-Excited Induction Generator, IEEE Trans. Energy Conversion 10 (3) (1995) 516-523.
- [11] S.L. Nau, The influence of the skewed rotor slots on the magnetic noise of three phase induction motors, IEE Proc., 140 (4) (1997) 396-399.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Li Wang, Jian-Yi Su, Dynamic Performances of An Isolated Self-Excited Induction Generator under Various Loading Conditions, IEEE Trans. Energy conversion 14 (1) (1999) 93-100.
- [13] S. Williamson, C.I. McClay, The Effect of Axial Variations in Saturation Due to Skew on Induction Motor Equivalent-Circuit Parameters, IEEE Trans. Industry Applications, 35 (6) (1999) 1323-1331.
- [14] A. Tenhunen, A. Arkkio, Modelling of induction machines with skewed rotor slots, IEE Proc., 148 (1) (2001) 45-50.
- [15] B. Sawetsakulanond, V. Kinnares, A simple Approach to Capacitance Determination of Self-Excited Induction Generators for Terminal Voltage Regulation, in: Proceeding of the International Conference PEDS'2007, Bangkok, Thailand, 2007, p.1319-1324.
- [16] B. Sawetsakulanond, V. Kinnares, Analysis and Comparative Study on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Self-Excited Induction Generators, in: Proceeding of the International Conference PEDS'2007, Bangkok, Thailand, 2007, p.1313-1318.
- [17] B. Sawetsakulanond, V. Kinnares, Investigation of Skew Effect on the Performance of Self-Excited Induction Generators, in: Proceeding of the International Conference PEDS'2007, Bangkok, Thailand, 2007, p.1367-1373.
- [18] B. Sawetsakulanond, P. Hothongkham, V. Kinnares, Design and Construction of a Three Phase Self-Excited Induction Generator, in: Proceeding of the International Conference ICSET'2008, Singapore, 2008, p.1373-1378.
- [19] Bedrich Heller, Vaclav Hamata, Cochran, Harmonic Field Effects in Induction Machines, Elsevier Scientific, Inc. ; 1997. p. 256-274.
- [20] Enrico Levi, Polyphase Motors John Willy & Sons, Inc. ; 1984. p. 255-263.
- [21] A. K. Sawhney, A Course in Electrical Machine Design. 5 th ed, Inc. ; 1988. p. 527-529.
- [22] Paul L. Cochran, Polyphase Induction Motors" Marcel Dekker, Inc. ; 1989. p. 527-529.
- [23] E. S. Hamdi, Design of Small Electrical Machines, John Willy & Sons, Inc. ; 1994. p. 128-131.
- [24] Richard H. Engelmann, William H. Middendorf, Handbook of Electric Motors, Marcel Dekker, Inc. ; 1995. p. 228-315.
- [25] Ion Boldea, Syed A. Nasar, The Induction Machine Handbook, CRC Press, Chapter 7; 2002.
- [26] IEEE std 112-2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators ; 2004 . p. 24-73.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Biographies



B. Sawetsakulanond was born on October 27, 1973 in Bangkok. He received the B.Eng and M.Eng. degrees from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 1996 and 2000. He is currently pursuing his D.Eng degree at King Mongkut's Institute of

Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His field of interest includes Power Electronics, Electrical Machines and Drives.



Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnarates received the B.Eng and M.Eng. (Electrical Engineering) degrees from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, and the Ph.D. degree from the University of Nottingham, U.K. He is currently an associate professor at King Mongkut's

Institute of Technology Ladkrabang. His research interests include Power Electronics, Electrical Machines and Drives.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

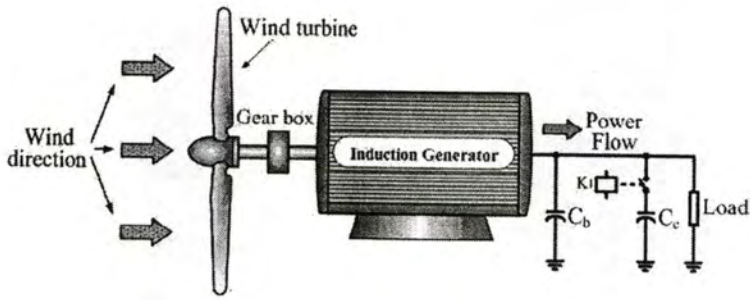


Fig.1. Self - excited induction generator driven by wind energy

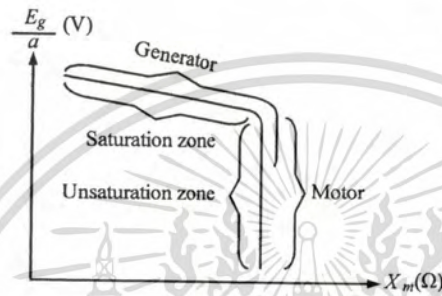


Fig.2. Variation of  $\frac{E_g}{a}$  with  $X_m$  for induction machine operation.

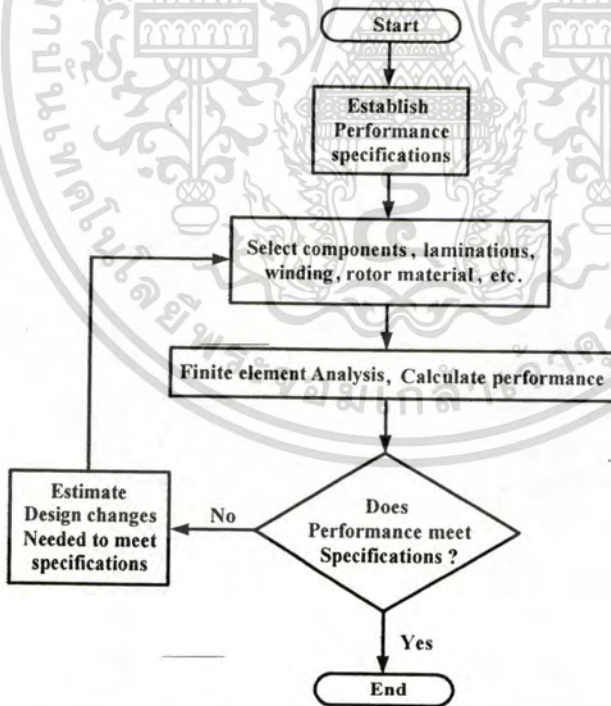
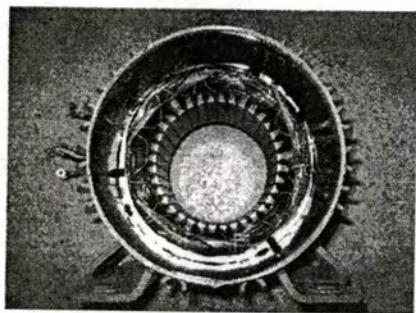
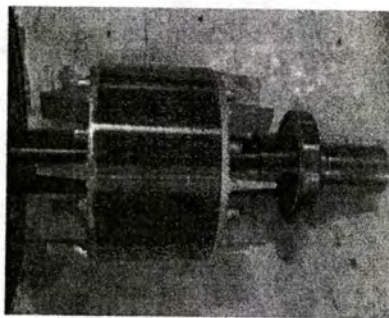


Fig.3. Design procedure for the proposed SEIG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Stator



(b) Rotor

Fig.4. Photograph of the designed SEIG structure



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

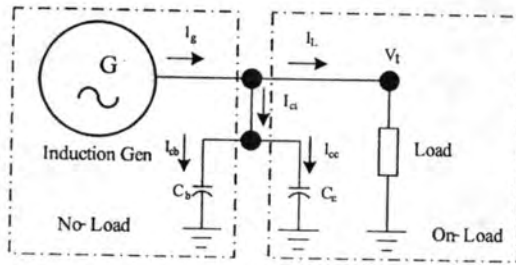


Fig.5. Single line diagram of the SEIG

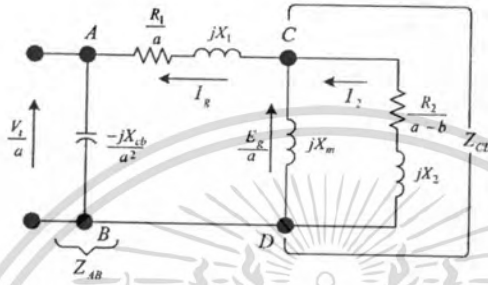


Fig.6. Per phase equivalent circuit of the SEIG at no-load

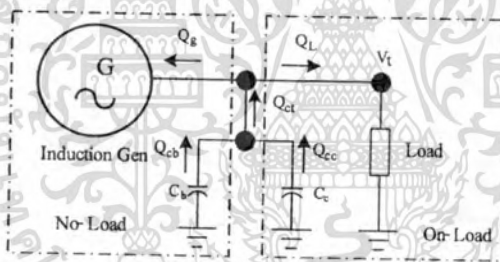


Fig.7. Power flow diagram of the SEIG

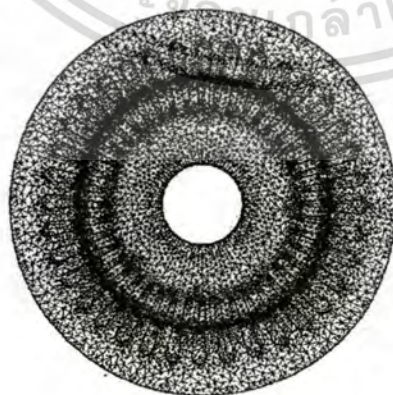


Fig.8. Geometry and mesh of the computation domain of the designed SEIG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

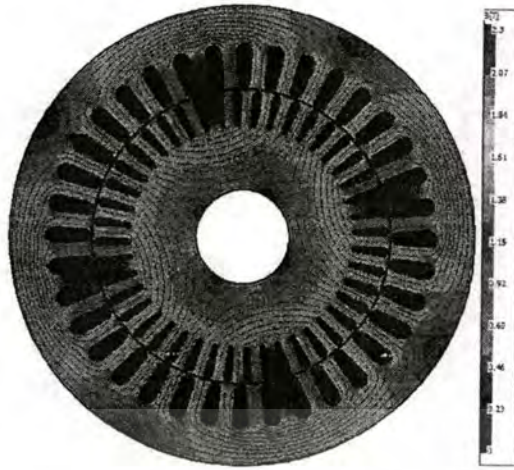


Fig.9. Flux density of the designed SEIG



Fig.10. Flux density and magnetic flux vector of the designed SEIG

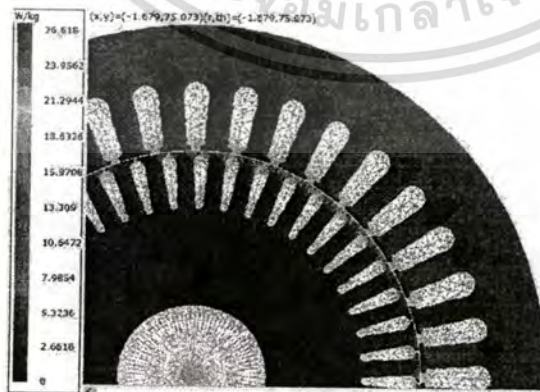


Fig.11. Stator and rotor core losses

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

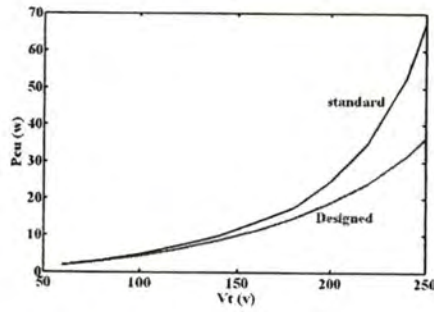


Fig.12. Variation of stator copper losses with terminal voltage of the SEIGs under test

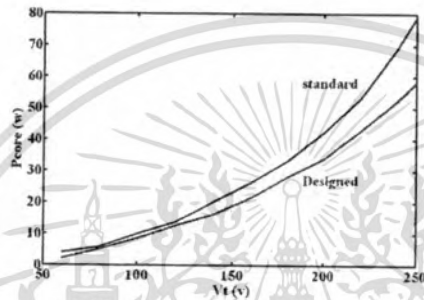


Fig.13. Variation of core losses with terminal voltage of the SEIGs under test

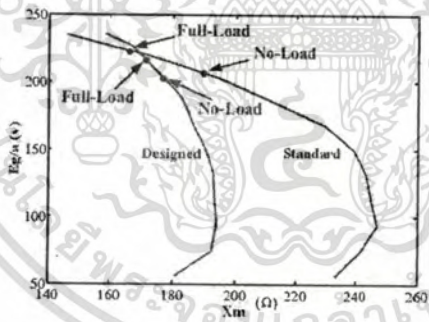


Fig.14. Experimental variation of  $\frac{E_g}{a}$  with  $X_m$

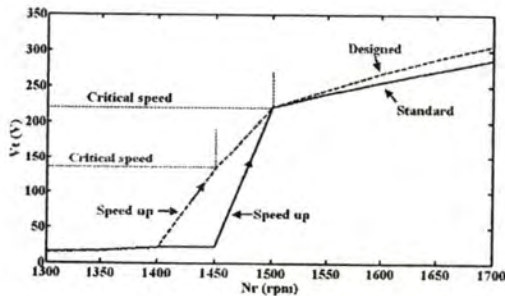


Fig.15. Variation of terminal voltage with speed during a speed increase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

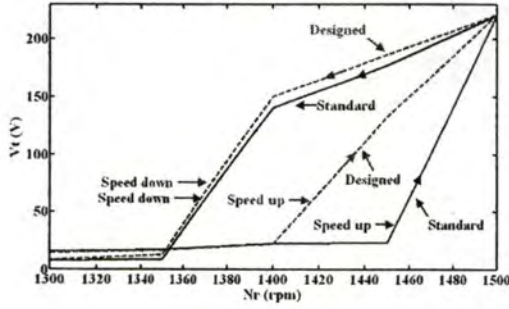


Fig.16. Variation of terminal voltage during speed increase and decrease

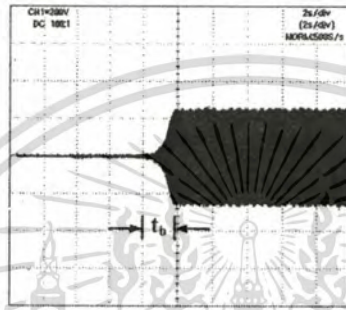


Fig.17. Voltage growth during self-excitation process of the standard SEIG at no-load

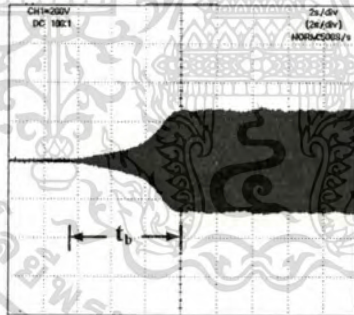


Fig.18. Voltage growth during self-excitation process of the designed SEIG at no load

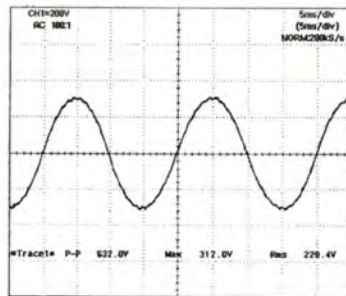


Fig.19. Steady-state terminal voltage waveform at no load of the standard SEIG, % THD<sub>v</sub> = 3.1 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

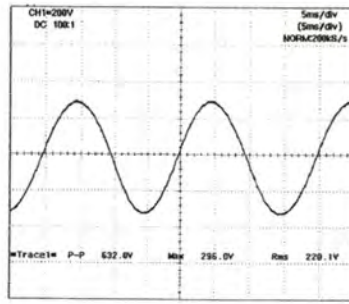


Fig.20. Steady state terminal voltage waveform at no load of the designed SEIG, % THD<sub>v</sub> = 1.0 %

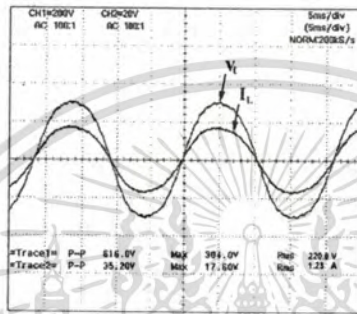


Fig.21. Terminal voltage and load current waveforms of the standard SEIG at 796 W load power, % THD<sub>v</sub> = 5.3 %

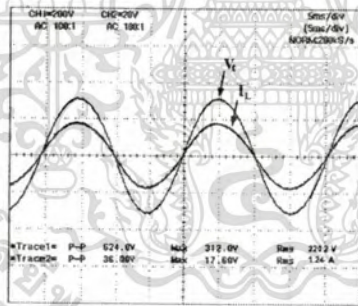


Fig.22. Terminal voltage and load current waveforms of the designed SEIG at 796 W load power, % THD<sub>v</sub> = 1.6 %

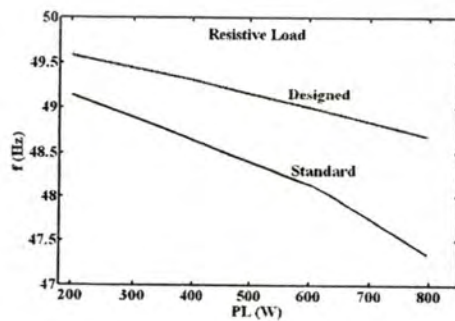


Fig.23. Variation of frequency with output power for a resistive load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

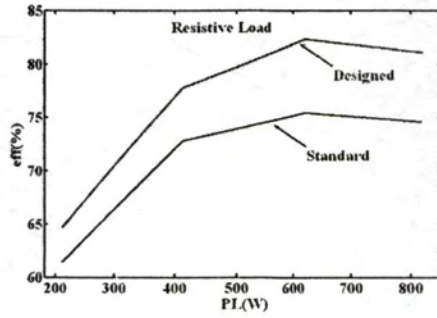


Fig.24. Variation of efficiency with output power for a resistive load



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้