

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียวแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน
Self Excited Brushless 1-Phase Synchronous Generator

โดย

นายวิรัตน์ กู้เมือง
นายศุภชัย ศรีสวัสดิ์
นายสมศักดิ์ เกษมสุข

อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ พิชิต ถ้ายอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 033329

สารบัญ

ชื่อเรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
ขอบเขตและขั้นตอนของโครงการงาน	iii
สัญลักษณ์	iv
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
- แนวคิด	2
- การวิเคราะห์	2
- สนามแม่เหล็ก	3
- Rotating Field	8
- Generated Voltage	13
- Armature Winding	
- แฟคเตอร์การพันขดลวด (Wining Factor)	19
- แฟคเตอร์การกระจาย(Distribution Factor)	20
- แฟคเตอร์ระยะขดลวด (Picth Factor)	21
- การพันขดลวดสเตเตอร์	23
- การต่อขดลวดของโรเตอร์	25
- ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (Self-Inductance)	
- ค่าความเหนี่ยวนำของขดโรเตอร์	27
- ค่าความเหนี่ยวนำของขดสเตเตอร์	28
- วงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรซิงโครนัส	30
- Phasor Diagram ของ Synchronous Machines	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Open-circuit and short-circuit Characteristics	33
- Steady-state Power-angle Characteristics	38
- Voltage Regulation	40
- ผลของ Salent Pole	42
- Power-angle Characteristics ของ Salent Pole	45
- การทดสอบ Induction Motor	47
บทที่ 3 โครงสร้าง ของ Generator	
- โครงสร้างโรเตอร์	47
- โครงสร้างสเตเตอร์	48
บทที่ 4 การทดลอง และผลทดลอง	60
- รูปวงจรการทดลอง	60
- อุปกรณ์การทดลอง	61
- ตารางผลการทดลอง	62
- ลักษณะรูปคลื่น Output	81
- การหาค่าพารามิเตอร์	86
- ประสิทธิภาพของ Generator	87
- สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	88
กิตติกรรมประกาศ	I
เอกสารอ้างอิง	II
ภาคผนวก	III

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียวแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน

Self Excited Brushless 1 Phase Synchronous Generator

โดย

นายวิรัตน์ กู้เมือง
นายศุภชัย ศรีสวัสดิ์
นายสมศักดิ์ เกษมสุข

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ พิชิต ล้ายอง

บทคัดย่อ

โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการทำปริญญานิพนธ์เพื่อแสดงแนวคิดและการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสเฟสเดียว แบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน (Self excited Brushless 1 Phase Synchronous Generator) โดยการนำเอาตัวอย่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิด ขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient Pole) ที่สามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ และค่าเปอร์เซ็นต์เรกิวเรชั่นของศักดาไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงน้อยมาทำการผลิตเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อแสดงผลการศึกษาและการใช้งานให้ตรงกับแนวความคิดมากที่สุด โดยมีส่วนประกอบสำคัญคือ ส่วนสเตเตอร์ (Stator) จะมีขดลวด 2 ชุด ได้แก่ ขดลวดซาร์เมเจอร์หลัก (Main Armature Winding) สำหรับจ่ายไฟแก่ภาระ (Load) และ ขดลวดช่วย (Auxiliary Winding) เพื่อสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ โดยมีคาปาซิเตอร์เป็นตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้า หรือเรียกว่า "Synchronous Compensator" ส่วนโรเตอร์จะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (Field Winding) ซึ่งจะต่อกับไดโอดเพื่อเรียงไฟฟ้ากระแสตรง และกำหนดขั้วแม่เหล็กตามต้องการนอกจากนั้นโรเตอร์ยังได้ทำการสกีว (Skew) เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำในตัวขดลวดของโรเตอร์ลดลง ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Flux) ลดลงมีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กรวมแตกต่างจากเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำร่วมมาก ผลของฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวนลดลงด้วย ทำให้สัญญาณแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใกล้เคียงรูปคลื่น ไซน์ซอยด์ (Sinusoidal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SELF-EXCITED BRUSHLESS 1 ϕ SYNCHRONOUS GENERATOR

NAME	WIRAT SUPACHAI SOMSAK	KUMAUNG SRISWAT KASAMSUK
ADVISOR	PHICHIT	LAMYANG

ABSTRACT

This project presents the theoretical concept and principle of brushless self-excited 1-phase synchronous generator are true and based on the combination method of efficient salient pole type and less variable value of voltage regulation to be provided for some particular work, especially the display of educational result. This generator is designed to meet with the users requirements. This component parts of it consist of stator and rotor there are two set of stator winding : One called main armature winding to supply load, the other called auxiliary winding for which the generator can build up e.m.f. on rotor, assisted by in order to serve as "Synchronous compensator". In case of rotor it has field winding to build up magnetic than with diode to rectify it to dc. This helps make out easily the number of poles. Further, skew rotor can be decrease e.m.f. the mutual flux. Therefore, may lead to have mutual flux to be more different than magnetic flux. Also, the result of harmonics interference suppression come out very less this output voltage is similar to sinusoidal waveform.

ขอบเขตและขั้นตอนของโครงการงาน

วัตถุประสงค์ เพื่อให้โครงการปริญญาโทขั้นนี้สามารถแสดงผลตามที่ต้องการและทันเวลา
ที่กำหนดจึงได้จัดวางขั้นตอนการทำงานไว้ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาและแสดงทฤษฎีหลักการทำงานของ Synchronous Compansator
- ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบและดำเนินการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ
- ขั้นตอนที่ 3 พันขลวดและประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน
- ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบผลที่ได้ตามทฤษฎี
- ขั้นตอนที่ 5 ประมวลผลและปรับปรุงแก้ไข
- ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการทดลอง

สัญลักษณ์

\vec{E}_c	เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ที่โรเตอร์
\vec{E}_m	เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดช่วย
$X_{s,m}$	ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (Synchronous Reactance) ของขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก
$X_{s,c}$	ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (Synchronous Reactance) ของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย
X_c	คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance)
$\vec{F}_{c,1}$	เวกเตอร์ Fundamental ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดช่วย
$\vec{F}_{m,1}$	เวกเตอร์ Fundamental ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดหลัก
V_L หรือ V_{tm}	แรงดันที่โหลด หรือ แรงดันที่อาร์เมเจอร์หลัก
V_c หรือ V_{tc}	แรงดันที่คร่อมคาปาซิแตนซ์ หรือ แรงดันที่ขั้วขดลวดช่วย
I_L หรือ I_M	กระแสของโหลด หรือ กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก
I_c	กระแสของคาปาซิเตอร์ หรือ กระแสในขดลวดช่วย
R_L	ค่าความต้านทานของโหลด
X_L	ค่ารีแอกแตนซ์ของโหลด
Z_L	ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$p.f$	เพาเวอร์แฟคเตอร์ (POWER FACTOR) หรือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
I_{sc}	กระแสลัดวงจร
θ_m	มุมระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก
θ_c	มุมระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย
Z_s	ซิมโครนัสอิมพีแดนซ์
α	มุมระหว่างสลอตท (Slot)
P	จำนวนขั้วแม่เหล็ก
f	ความถี่
N	ความเร็วรอบ
K_w	ไวน์ดิงแฟคเตอร์ (Winding Factor) หรือ ค่าตัวประกอบของการพันแบบกระจาย
K_p	พิชแฟคเตอร์ (Pick Factor) หรือ ค่าตัวประกอบของระยะห่างระหว่างขดลวด
K_d	ดิสทริบิวชันแฟคเตอร์ (Distribution Factor) หรือ ค่าตัวประกอบการพันแบบกระจาย
E	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
n	จำนวนสล็อต (Slot) ต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กต่อหนึ่งเฟส
E_f	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_f	กระแสไฟฟ้าคีซี (D.C) ที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กผ่านไดโอด
N_f	จำนวนรอบของขดลวดอามเจอร์ช่วย
$I_{A, M}$	กระแสที่ไหลในขดลวดอามเจอร์ช่วย
X_{Lf}	รีแอกแตนซ์ (Reactance)
$i(T)$	กระแสที่แปรตามเวลา
N_c	จำนวนรอบในขดลวดช่วย
N_f	จำนวนรอบในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
N_m	จำนวนรอบในขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก
δ	มุม Power Angle
δ_{RF}	มุม Torque Angle
λ_m	เป็นค่า Flux Linkage ของขดลวดชุด Main
λ_c	เป็นค่า Flux Linkage ของขดลวดชุด Auxiliary
λ_{fm}	เป็นค่า Flux Linkage ที่ขดลวด Field Winding ถูกกระทำจากขดลวด Main
λ_{fc}	เป็นค่า Flux Linkage ที่ขดลวด Field Winding ถูกกระทำจากขดลวด Auxiliary
L_{mf}, L_{cf}	เป็นค่า Stator-to-Rotor Mutual Inductance
L_{ff}	เป็นค่า Rotor Self Inductance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Generator) ชนิดขั้วขั้วโพล (Salient Pole) ใช้หลักการทำงานโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง(D.C)เข้าไปที่ตัวขดลวดของโรเตอร์ (Rotor) เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาจาก หลักการทำงานเบื้องต้นนั้น จะเห็นได้ว่าการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ตัวขดลวดของโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งสามารถหมุนได้จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ประกอบคือใช้แปรงถ่านและวงแหวนลื่น (Brush and Slip Ring) เป็นสะพานไฟนำกระแสจากภายนอกจ่ายเข้าที่ขดลวดของโรเตอร์วิธีนี้ออกจะยุ่งยากในการ จัดเตรียมแหล่งจ่ายกระแสไฟตรงอีกทั้งยังมีอายุใช้งานสั้นที่ตัวแปรงถ่าน เพราะเกิดการสึกกร่อนของตัว แปรงถ่านเอง อันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลผ่านตัวแปรงถ่านดังนั้นทำให้ต้องมีการตรวจสอบสภาพบำรุงรักษาชุดแปรงถ่านและวงแหวนลื่นให้อยู่ในสภาพดีพร้อมใช้งานอย่างสม่ำเสมอด้วยสาเหตุ ดังกล่าวจึงมีการพัฒนารูปแบบการสร้างไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน (Self-Excited Brushless) ซึ่งมีหลักการทำงานและวิธีการควบคุมหลายวิธี โดยวิธีที่จะกล่าวถึงนี้อาศัยหลักการใช้สนาม แม่เหล็กย้อนกลับ (Backward Rotating Field) จากขดลวดช่วย (Auxiliary Winding) ที่พันอยู่ใน Stator ไปเหนี่ยวนำขดลวดของโรเตอร์ซึ่งต่ออยู่กับชุดเรียงกระแส(Diode) เพื่อทำให้เกิดกระแสขึ้นที่ขดลวด ของโรเตอร์การทำงานเกิดขึ้น เมื่อโรเตอร์หมุนจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดอาร์เมเจอร์สามารถนำไปใช้ ประโยชน์ได้ ซึ่งหลักการใช้สนามแม่เหล็กย้อนกลับนี้จะศึกษาและแสดงผลเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับ 1 เฟสเท่านั้น จุดประสงค์ของโครงการนี้เพื่อศึกษาและแสดงผลถึงความเป็นไปได้ของแนว คิดทางทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นดังกล่าว

เพื่อให้การศึกษและแสดงผลคุณลักษณะต่างๆ ได้อย่างครบถ้วนเป็นจำเป็นต้องนำแบบตัวอย่าง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิดขั้วโพล 1 เฟสแรงดัน 220 โวลต์ 2 โพล ความถี่ 50Hz. มาผลิตเป็น โครงสร้างของเครื่องจักรเพื่อทำการพันขดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ตามแนวคิด

บทที่ 2

แนวความคิดและทฤษฎี

แนวความคิด

องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน จะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 3 ส่วนคือ ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก (Main Winding) ขดลวดช่วย (Auxiliary winding) และ ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (Field)

เริ่มต้นการทำงานเมื่อสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux) บนโรเตอร์หมุนตัดกับขดลวดบน อารเมเจอร์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Induced emf.) ขึ้นที่ขดลวดช่วย (Auxiliary Winding) เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field) ทั้งทิศทางเดียวกัน และตรงกันข้ามกันข้ามกันกับทิศทางการหมุนของ โรเตอร์สนามแม่เหล็กหมุนที่มีทิศทางเดียวกับโรเตอร์ จะมีความเร็วสัมพันธ์กับโรเตอร์เป็นศูนย์ส่วนสนามแม่เหล็กหมุนที่มีทิศทางตรงกันข้ามหรือสนามแม่เหล็กย้อนกลับกับโรเตอร์จะมีความเร็วสัมพันธ์กับโรเตอร์เป็น 2 เท่า ของความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) สนามแม่เหล็กย้อนกลับนี้ จะทำให้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้น เมื่อมีการต่อไดโอดเพื่อที่จะเรียงกระแสและกำหนด ขั้วแม่เหล็กก็จะเกิดกระแสไหลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแปรตามค่ากระแสหมุนตัดกับขดลวดอาร์เมเจอร์ หลัก (Main winding) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น

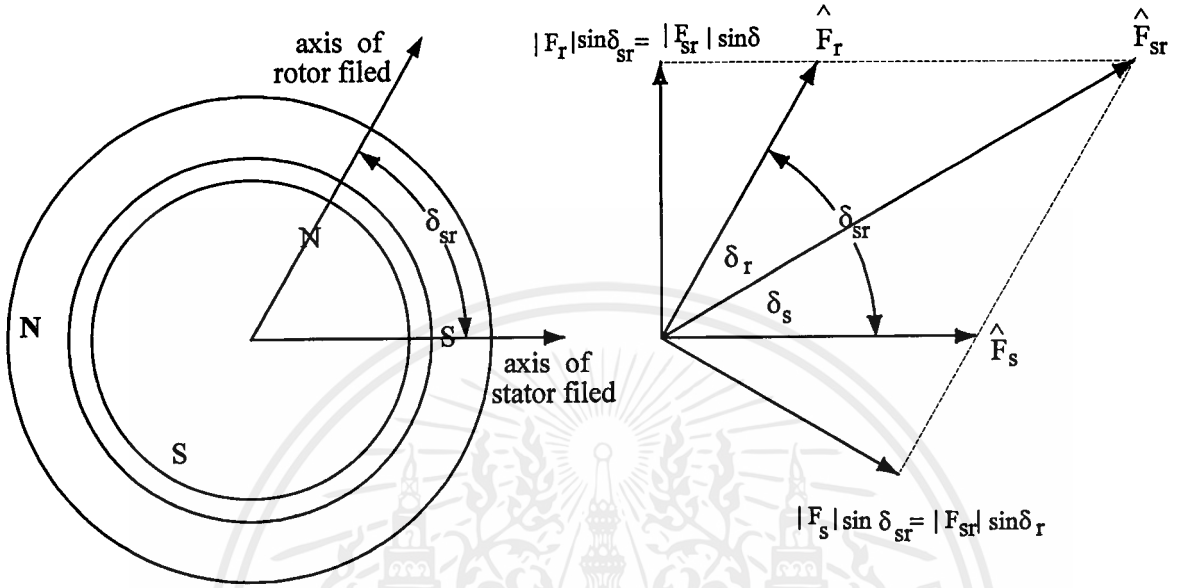
การวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ ให้มีสมมุติฐานดังต่อไปนี้คือ

1. โรเตอร์ (Rotor) จะต้องหมุนด้วยความเร็วคงที่
2. ค่า R ของขดลวดในสเตเตอร์และขดลวดในโรเตอร์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่ารีแอคแตนซ์
3. ไม่คิดผลของฮาร์โมนิก (Harmonic) กล่าวคือ mmf ของขดลวดที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณรูปไซน์
4. ไม่มีการอิ่มตัวเกิดขึ้นในวงจรผลทำให้ค่า Self และ Mutual Inductance ของขดลวดคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าของกระแส
5. สักคาไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแสน้อยมากให้คิดว่ามีค่าเป็นศูนย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Magnetic Field Viewpoint



รูปที่ 1 หลักการเบื้องต้นของการเกิดสนามไฟฟ้าและเฟเซอร์ไดอะแกรม

mmf Wave ของ Stator และ Rotor ที่กระจายอยู่ในช่องอากาศ (Air-Gap) มีลักษณะเป็นแบบ

Sine Wave

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr} \tag{1}$$

เมื่อ

F_{sr}^2 : เป็น Peak Value ของ mmf Wave ในช่องอากาศ

F_s : เป็น Peak Value ของ mmf Wave ของ Stator

F_r : เป็น Peak Value ของ mmf Wave ของ Rotor

$$T = \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \theta_m} \tag{2}$$

จาก Coenergy Density = $\frac{1}{2} \mu_o H^2$

Average Coenergy Density = $\frac{1}{2} \mu_o \times \text{average value } H^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Average Value } H^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} H_{\text{peak}}^2 \sin^2 \theta \, d\theta = \frac{H_{\text{peak}}^2}{2}$$

$$\text{Average Coenergy Density} = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{H_{\text{peak}}^2}{2}$$

$$= \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{\text{sr}}}{g} \right)^2$$

$$W'_{\text{fld}} = (\text{Average Coenergy Density}) (\text{Volume of Air-Gap})$$

$$= \left(\frac{\mu_0 F_{\text{sr}}^2}{4 g^2} \right) \cdot \pi D L g \quad (3)$$

$$= \frac{\mu_0 \pi D L}{4 g} F_{\text{sr}}^2$$

เมื่อ

D : เป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องอากาศ หน่วยเป็นเมตร

L : เป็นค่าความยาวตามแกนของช่องอากาศ หน่วยเป็นเมตร

g : เป็นค่าความกว้างของช่องอากาศ หน่วยเป็นเมตร

μ_0 : เป็นค่า Permeability of free space = $4\pi \times 10^{-7}$ หน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร

$$W'_{\text{fld}} = \frac{\mu_0 \pi D L}{4 g} (F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{\text{sr}}) \quad (4)$$

จากสมการ (2) ด้านบน เมื่อมี 2 ขั้วแม่เหล็ก ($\theta = \theta_m$)

$$T = -\frac{\mu_0 \pi D L}{2 g} F_s F_r \sin \delta_{\text{sr}} \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องจักรที่มี p ขั้วแม่เหล็ก ($\theta = p/2 \theta_m$)

$$\begin{aligned} T &= -\frac{\mu_o \pi DL}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \frac{d\delta_{sr}}{d\theta_m} \\ &= -\frac{P \mu_o \pi DL}{2 \cdot 2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \end{aligned} \quad (6)$$

จากการเทียบค่า

$$F_s \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_r$$

$$F_r \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_s$$

$$T = -\frac{P \mu_o \pi DL}{2 \cdot 2g} F_s F_{sr} \sin \delta_s$$

และ

$$T = -\frac{P \mu_o \pi DL}{2 \cdot 2g} F_s F_{sr} \sin \delta_r \quad (7)$$

จาก

$$B_{sr} = \mu_o \frac{F_{sr}}{g} \quad (8)$$

แทนค่า

$$T = -\frac{P}{4} \pi DL B_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (9)$$

จาก $\phi = (\text{Average Value ของ } B \text{ ตลอดหน้าขั้วแม่เหล็ก}) \times (\text{Pole Area})$

$$\text{Average Value of } B = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} B_{\text{peak}} \sin \theta d\theta = \frac{2}{\pi} B_{\text{peak}}$$

$$\text{ดังนั้น } \phi = \frac{2}{\pi} B_{\text{peak}} \cdot \frac{\pi DL}{P} = \frac{2DL}{P} \cdot B_{\text{peak}}$$

$$B_{\text{peak}} = \frac{\phi P}{2DL} \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปแทนค่าที่ได้

$$T = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \phi_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (11)$$

สำหรับเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่มี 2 ขั้วแม่เหล็ก

$$\theta = \theta_m$$

เมื่อ θ : เป็นมุมทางไฟฟ้า (Electrical Angle)

θ_m : เป็นมุมทางกล (Mechanical Angle)

ในกรณีที่มีเครื่องจักรกล 4 ขั้วแม่เหล็ก

$$\theta = 2 \theta_m$$

ซึ่งสรุปได้ว่า ถ้ามี p ขั้วแม่เหล็ก

$$\theta = \frac{p}{2} \theta_m$$

ถ้ากำหนดให้ทั้งที่ θ และ θ_m มีหน่วยเป็น Radian

$$\frac{\theta}{2\pi \times 60} = \frac{p}{2} \frac{\theta_m}{2\pi \times 60}$$

$$f = p \cdot \frac{N_s}{120}$$

$$N_s = \frac{120 f}{p}$$

เมื่อ $f = \frac{\theta}{2\pi \times 60}$: ความถี่ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ Hz

$N_s = \frac{\theta_m}{2\pi}$: เป็น Mechanical Speed หรือ Synchronous Speed มีหน่วยเป็น rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rotating Field In AC Machine

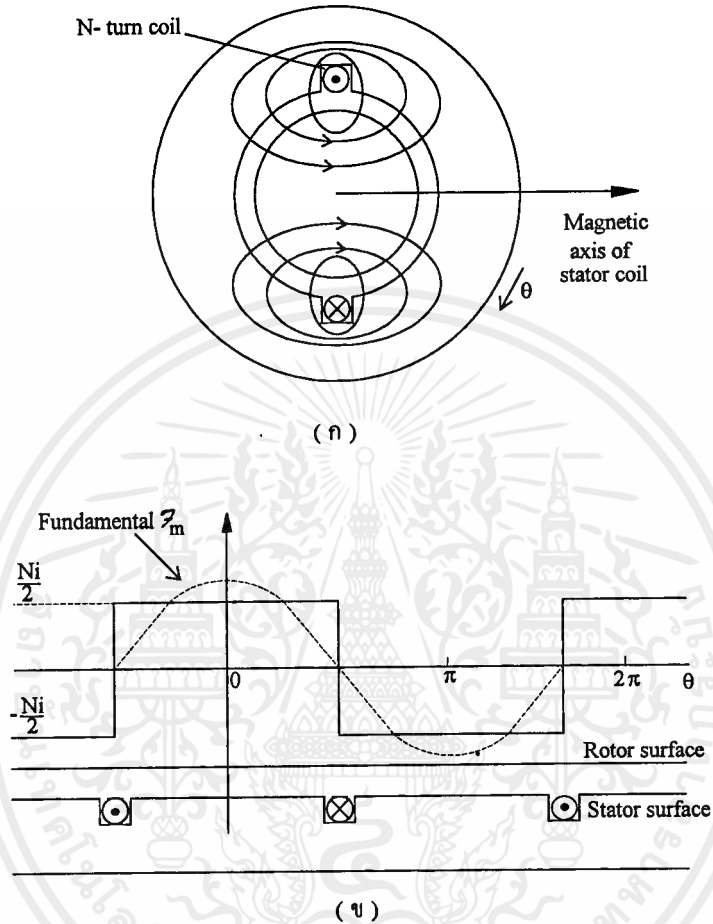
จาก Fouries series จะได้ว่า

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} K \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \dots \right]$$

ในกรณีที่ขดลวดมีการพันแบบกระจาย (Distributor Winding) ทำให้ mmf ที่กระจายในช่องอากาศเป็นแบบ Sinusoidal ดังนั้นจึงไม่คิดค่า Harmonic และคิดว่ามีเฉพาะ Fundamental mmf Wave และในกรณีที่พันแบบกระจายทำให้ค่า Maximum มีค่าลดลงด้วย Winding Factor (K_w)

$$F_m = \frac{4}{\pi} \frac{N i}{2} K_w \cos \theta$$

Rotating Field



รูปที่ 2 การเกิด mmf. ของการพันขดลวดแบบ full pitch

$$F_m = \frac{4 Ni}{\pi 2} \cos \theta$$

$$F_{1,peak} = \frac{4 Ni}{\pi 2}$$

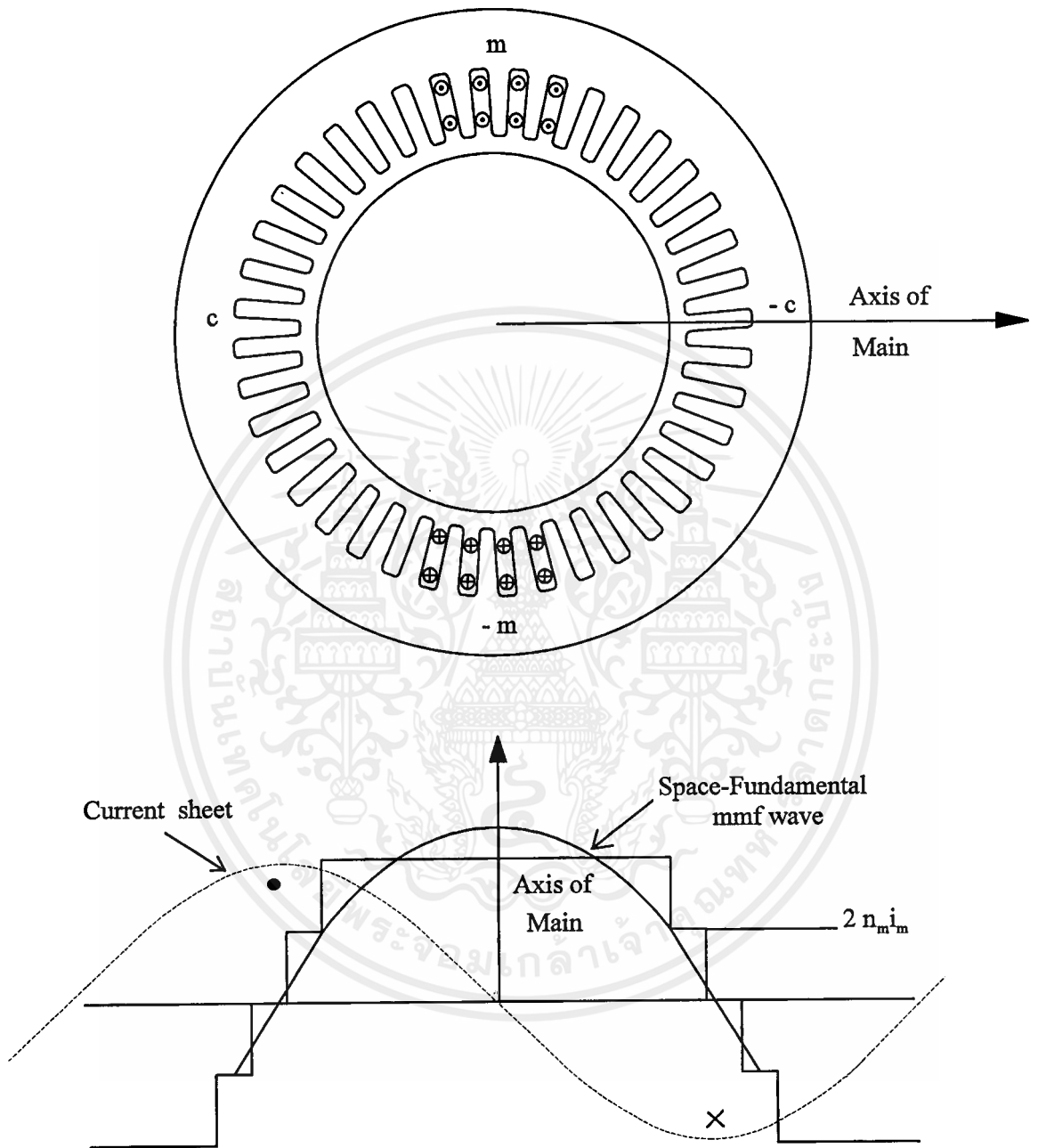
เมื่อใช้กฎของ Fourier Series กระจาย Square Wave ให้อยู่ในรูปของ Sine Function

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} K \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta + \dots \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในการพันแบบกระจายเพื่อลด Harmonic

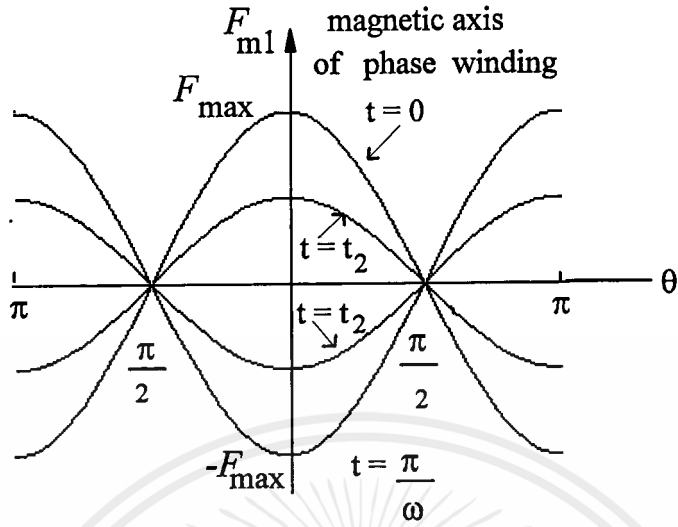


รูปที่ 3 การพันแบบกระจาย

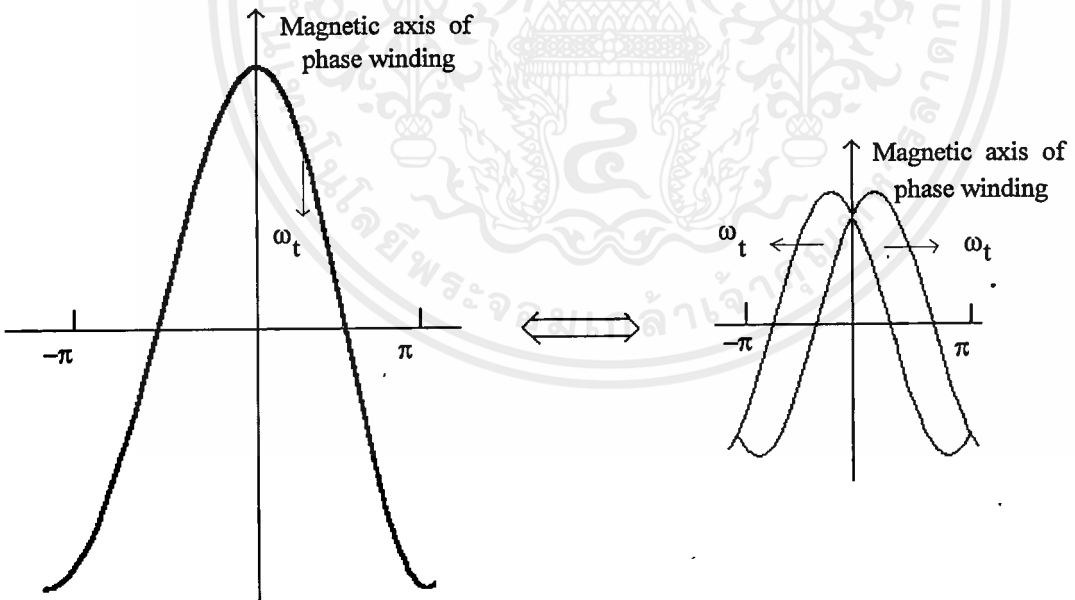
ทำให้ค่า Maximum ลดลงด้วยค่าตัวคูณ Winding Factor (K_w)

เมื่อ K_w : Winding Factor เพื่อให้รูปคลื่นเป็นค่า Sin

$$F_{m1} = \frac{4}{\pi} k_{w,m} \frac{N_m}{P} i_m \cos \theta$$



รูปที่ 4 (ก) การเกิดสนามแม่เหล็กแต่ละเวลา



รูปที่ 4 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{m1} = \frac{4}{\pi} k_{w,m} \frac{N_m}{P} i_m \cos \theta$$

$$F_{c1} = \frac{4}{\pi} k_{w,c} \frac{N_c}{P} i_c \cos (\theta - 90^\circ)$$

เมื่อ N_m : จำนวนรอบของขด Main

เมื่อ N_c : จำนวนรอบของขด Auxiliary

$$i_m = I_m \sin (\omega t - \theta_m)$$

$$i_c = I_c \sin (\omega t - 90^\circ - \theta_c)$$

$$\hat{F}_{m,1} = \frac{4}{\pi} K_{w,m} \frac{N_m}{P} I_m \cos \theta \sin (\omega t - \theta_m)$$

$$F_{\max,m} = \frac{4}{\pi} K_{w,m} \frac{N_m}{P} I_m$$

\therefore

$$\hat{F}_{m,1} = F_{\max,m} \cos \theta \sin (\omega t - \theta_m)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\max,m} \{ \sin (\omega t - \theta_m + \theta) + \sin (\omega t - \theta_m - \theta) \}$$

$$\hat{F}_{c,1} = \frac{4}{\pi} K_{w,c} \frac{N_c}{P} I_c \cos (\theta - 90^\circ) \sin (\omega t - 90^\circ - \theta_c)$$

$$F_{\max,c} = \frac{4}{\pi} K_{w,c} \frac{N_c}{P} I_c$$

\therefore

$$\hat{F}_{c,1} = F_{\max,c} \cos (\theta - 90^\circ) \sin (\omega t - 90^\circ - \theta_c)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\max,c} \{ \sin (\omega t - \theta_c - 180^\circ + \theta) + \sin (\omega t - \theta_c - \theta) \}$$

$$= \frac{1}{2} F_{\max,c} \{ -\sin (\omega t - \theta_c + \theta) + \sin (\omega t - \theta_c - \theta) \}$$

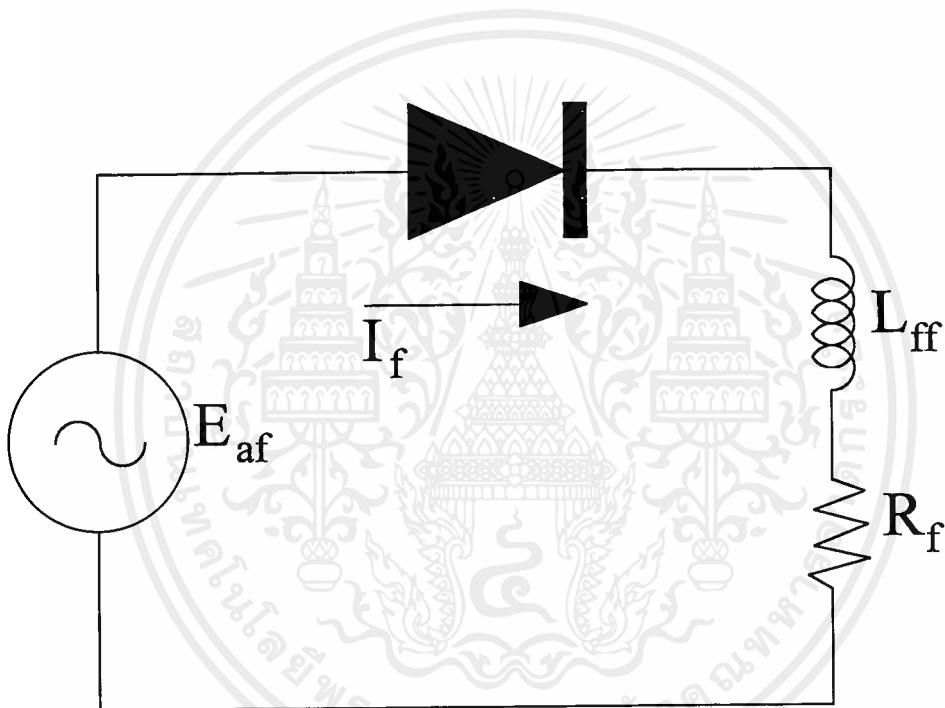
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{F}_{m,1}(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max,m} \{ \sin(\omega t - \theta_m + \theta) + \sin(\omega t - \theta_m - \theta) \}$$

$$\hat{F}_{c,1}(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max,c} \{ -\sin(\omega t - \theta_c + \theta) + \sin(\omega t - \theta_c - \theta) \}$$

$$\text{Positive} \rightarrow \hat{F}^+(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max,m} \sin(\omega t - \theta_m - \theta) + \frac{1}{2} F_{\max,c} \sin(\omega t - \theta_c - \theta)$$

$$\text{Negative} \rightarrow \hat{F}^-(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max,m} \sin(\omega t - \theta_m + \theta) - \frac{1}{2} F_{\max,c} \sin(\omega t - \theta_m + \theta)$$



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของ Generator

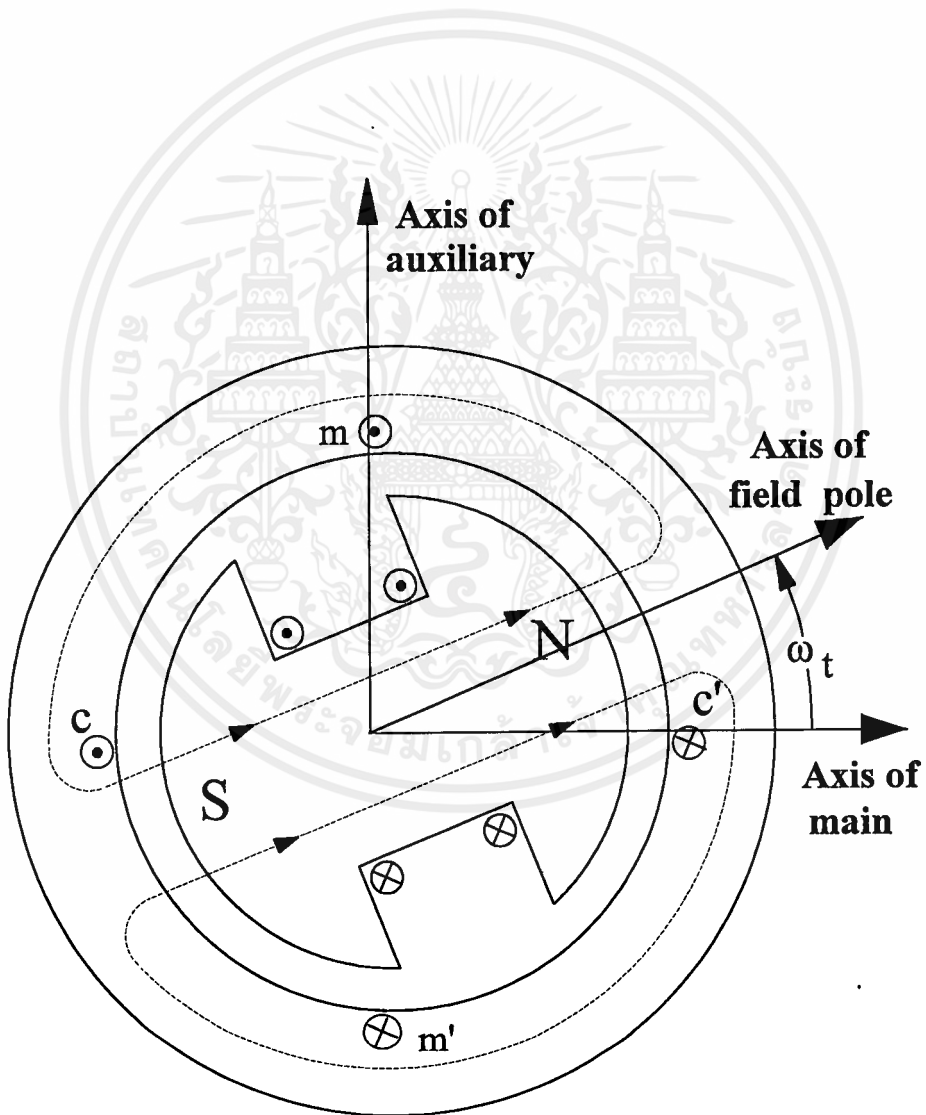
* Negative Field จะ Induced ที่ขดลวด Field ทำให้เกิดกระแสไหลตาม Half-Wave

$$E_{f,\max} = -2\omega N_f \phi_A$$

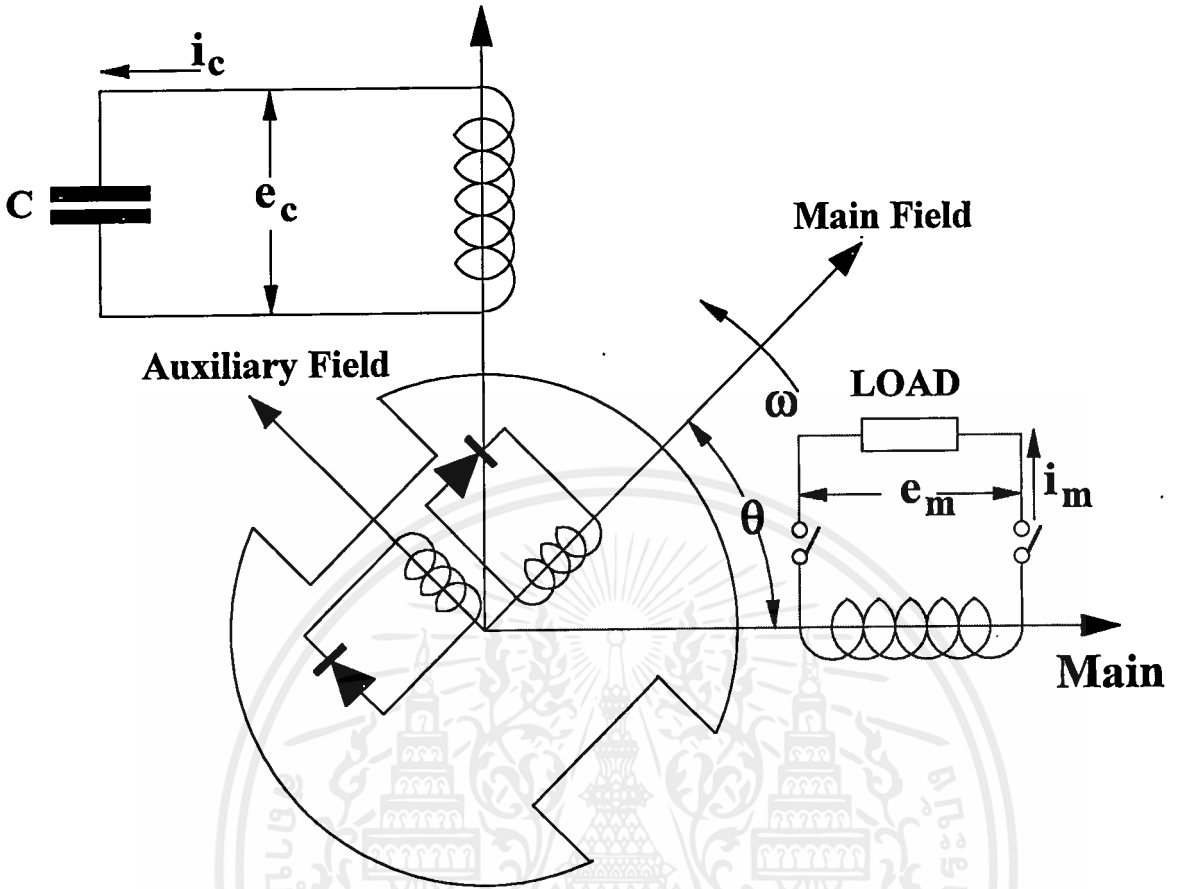
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Generated Voltage

ในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับทุกชนิดจะมีการเหนี่ยวนำเพื่อทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าขึ้นแต่ที่จะกล่าวถึงนี่จะเป็นลักษณะของการเกิดการเหนี่ยวนำในเครื่องจักรไฟฟ้าแบบ Synchronous Machine ซึ่งที่ Stator จะมีการพันขดลวด 1- ϕ Armature Winding ซึ่งค่ากระแสระหว่างขด Main และ Auxiliary จะอยู่ห่างกันเท่ากับ 90° ทางไฟฟ้า ส่วนที่ตัวของ Rotor ไม่ว่าจะเป็นแบบ Cylindrical Rotor หรือ Salient Pole ที่ Rotor จะมี Field Winding ซึ่งเมื่อมีไฟกระแสตรง (DC) ไหลผ่านจะเกิดขั้วแม่เหล็กที่มีการกระจายในลักษณะ Sinusoidal Wave ซึ่งตรงจุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุด



รูปที่ 6 (ก) Elementary ของ Synchronous Generator แบบ salient Pole



รูปที่ 6 (ข) วงจรสมมูลย์ ของ Synchronous Generator แบบ salent Pole

สำหรับ Flux density ที่กระจายเป็นแบบ Sinusoidal wave สามารถเขียนเป็นสมการที่มีความสัมพันธ์กับมุม θ ที่เริ่มจากจุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็กจะได้สมการดังนี้

$$B(\theta) = B_{peak} \cdot \cos \theta \tag{12}$$

เมื่อ B_{peak} เป็นค่า Flux Density ณ ที่จุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็ก
 θ เป็นค่ามุมใด ๆ ที่เริ่มจากจุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็ก

ถ้าเป็น Synchronous Machine ชนิด 2 Pole จะสามารถหาค่าของ Flux per pole (ϕ) ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \phi &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_{peak} l.r. \cos \theta d \theta \\ &= 2 B_{peak} l r \end{aligned} \tag{13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ l เป็นค่าความยาวตามแนวแกนของขั้วแม่เหล็ก
 r เป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรถึงช่องอากาศ (Air Gap)

และถ้าเป็น p - pole machine สมการของ Flux per pole จะเป็นดังนี้

$$\therefore \phi = \frac{2}{p} \times 2 B_{\text{peak}} l r \quad (14)$$

ในกรณีที่เป็น Synchronous Machine ตัว Rotor จะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่เท่ากับ ω rad/sec
 จะมีผลทำให้ Flux Linkage ที่คล้องกับขดลวดในแต่ละเฟสตามสมการข้างล่าง

$$\begin{aligned} \lambda_m &= N_m \phi \cos \omega t \\ \lambda_c &= N_c \phi \cos (\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (15)$$

กำหนดให้ λ_m, λ_c : เป็นค่า Flux Linkage ของขดลวดชุด Main และ Auxiliary ตามลำดับ

N_m : เป็นจำนวนรอบของขดลวด Main

N_c : เป็นจำนวนรอบของขดลวด Auxiliary

เนื่องจากการกระจายของ Flux Density เป็นไปในลักษณะของ Sinusoidal Function ดังนั้น
 เมื่อตัว Rotor หมุนด้วยความเร็วคงที่ที่มีผลทำให้ Flux Linkage, 1 ที่คล้องในขดลวดเปลี่ยนแปลงใน
 ลักษณะของ Sinusoidal Function ด้วย พร้อมทั้งมีคาบของการเปลี่ยนแปลงคงที่ตามความเร็วของ
 Rotor จากกฎของฟาราเดย์ จะทำให้ค่าของ Induced emf ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} e_m &= \frac{d\lambda_m}{dt} \\ &= N_m \cos \omega t \cdot \frac{d\phi}{dt} - \omega N_m \phi_{\text{max}} \sin \omega t \end{aligned} \quad (16)$$

ในกรณีที่เป็น Steady State Operation ของ Synchronous Machine ไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อน
 เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (Field Winding) จะมีค่าคงที่ ซึ่งมีผลทำให้ค่า Flux per pole (ϕ)
 มีค่าคงที่ด้วย จึงทำให้สมการ Induced emf มีเฉพาะเทอมของ Speed Voltage

$$\begin{aligned}
 e_m(t) &= \omega N_m \phi_{\max} \sin(\omega t) \\
 &= E_{m, \max} \cdot \sin \omega t \\
 e_c(t) &= \omega N_c \phi_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ) \\
 &= E_{c, \max} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } E_{m, \max} &= \omega N_m \phi_{\max} = 2 \pi f N_m \phi_{\max} \\
 E_{c, \max} &= \omega N_c \phi_{\max} = 2 \pi f N_c \phi_{\max}
 \end{aligned}$$

∴ ค่า rms Induced emf (E_{rms})

$$\begin{aligned}
 E_{m, \text{rms}} &= \frac{E_{m, \max}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi}{\sqrt{2}} f N_m \phi_{\max} = 4.44 f N_m \phi_{\max} \\
 E_{c, \text{rms}} &= \frac{E_{c, \max}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi}{\sqrt{2}} f N_c \phi_{\max} = 4.44 f N_c \phi_{\max}
 \end{aligned}$$

(17)

เมื่อ $f = \omega / 2\pi$ เป็นค่าความถี่ในการ Induced emf.

จากที่ได้หา Induced emf ที่เกิดขึ้นในแต่ละขดลวด 1 ขด แต่ในเครื่องจักรไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้ว ในแต่ละเฟสจะมีขดลวดหลายขดลวดมาต่ออนุกรมกัน ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดทั้งหมดในแต่ละเฟสให้เป็น $N_{m, \text{ph}}$ แต่เนื่องจากขดลวดแต่ละขดที่ทำกรพันในแต่ละคู่ขั้วแม่เหล็กเดียวกันจะไม่อยู่ในร่องสลิตเดียวกัน ทำให้การ Induced Voltage ในแต่ละขดจะไม่ Inphase กันจึงจำเป็นต้องรวมทางเวกเตอร์ และอีกกรณีหนึ่งถ้าพันขดลวดโดยความกว้างของขดลวดย่นกว่า 180° ทางไฟฟ้า (Electrical Degree) ผลของ Voltage ที่ได้ออกมาจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คิดจาก Flux per pole (ϕ)

ดังนั้นค่า Induced emf ที่ได้ออกมาจึงจำเป็นต้องคูณด้วย Factor ที่จะทำให้ค่าถูกต้องเรียกว่า Winding Factor (K_w) ซึ่งค่าของ $K_w \leq 1$ ขึ้นอยู่กับการพันขดลวดของอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) ดังนั้นจะได้สูตรของการหาค่า rms Induced emf ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}
 E_{m, \text{rms}} &= 4.44 f N_{m, \text{ph}} K_{w, m} \phi_{\max} \\
 E_{c, \text{rms}} &= 4.44 f N_{c, \text{ph}} K_{w, c} \phi_{\max}
 \end{aligned} \tag{18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือถ้าหากเราเขียนในรูปของเวกเตอร์ จะได้เป็น

$$\vec{E}_m = 4.44 f N_{m,ph} \phi_{max} K_{w,m} \angle 0^\circ$$

$$\vec{E}_c = 4.44 f N_{c,ph} \phi_{max} K_{w,c} \angle -90^\circ$$

และถ้าคิดในการวิเคราะห์ Synchronous Machine จะใช้เป็นค่าของ Induced emf นั่นคือ

$$E_{mf} = 4.44 f N_{m,ph} K_{w,m} \phi_{max}$$

ซึ่งค่า E_{af} เป็นค่า Induced emf ของขดลวด Main ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของ Field Winding นั่นเอง

จากวงจรการทดลองเมื่อต่อ Capacitor ที่ขด Auxiliary และต่อโหนดที่ขด Main โดยที่

$$Z_{a,m} = R_{a,m} + j X_{s,m}$$

$$Z_{a,c} = R_{a,c} + j X_{s,c}$$

$$\begin{aligned} \text{Auxiliary Circuit} \Rightarrow Z_c &= R_{a,c} + j X_{s,c} - j X_c \quad ; X_c = \frac{1}{\omega c} \\ &= Z_c \angle \theta_c \end{aligned}$$

$$\text{Main Circuit} \Rightarrow Z_m = R_{a,m} + j X_{s,m} + Z_L$$

$$\text{ข้อกำหนด} \Rightarrow V_{t,a,m} = 220 \text{ v.}$$

$$\text{No-Load} \Rightarrow I_{a,m} = 0$$

$$\text{Full Load} \Rightarrow I_{a,m} = I_m \angle \theta_m$$

$$\vec{E}_m = (R_{a,m} + j X_{s,m}) \hat{I}_{a,m} + Z_L \hat{I}_{a,m} \quad (19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าประโยชน์ด้านการค้าไม่คุ้มค่าใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

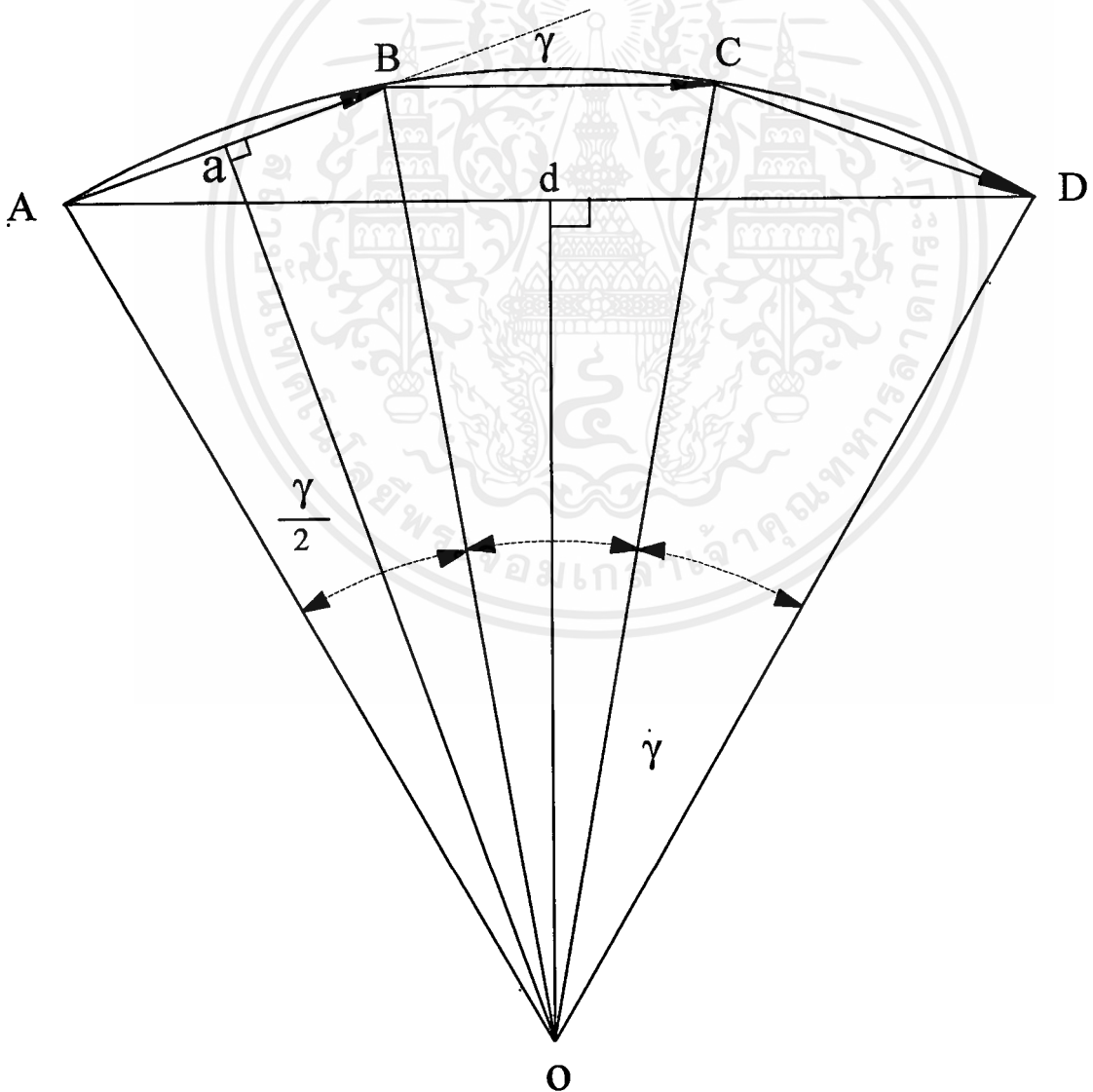
$$\begin{aligned}
 &= Z_m \angle \theta_m \hat{I}_{a,m} \\
 \vec{E}_c &= (R_{a,c} + jX_{s,c}) \hat{I}_{a,c} + \hat{I}_{a,c} \left(-j \frac{1}{\omega C} \right) \quad (20) \\
 &= Z_c \angle \theta_c \hat{I}_{a,c} \quad ; X_{s,c} > X_c : + \theta_c \\
 &\quad \quad \quad ; X_{s,c} < X_c : - \theta_c
 \end{aligned}$$



Armature Winding

Winding Factor (K_w)

กำหนดให้ $K_w = K_d \cdot K_p$
 เมื่อ K_w : Winding Factor
 K_d : Distribution Factor
 K_p : Pitch Factor



รูปที่ 7 ใช้คำนวณหา Distribution Factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหา Distribution Factor (K_d)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดต่าง ๆ กันจะมีจำนวนร่องสลิตที่อยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กแม่เหล็ก 1 ขั้ว ไม่เท่ากันเช่น 4 สลิตต่อ 1 ขั้วแม่เหล็กหมายความว่ากลุ่มของขดลวดที่ต่ออันดับกันภายใต้ 1 ขั้วแม่เหล็กมี 4 ชุด และมีลงในร่องสลิตที่เรียงอยู่ใกล้ๆกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดแต่ละชุดจะไม่พร้อมกัน และอัตราส่วนระหว่างผลบวกทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละชุดกับผลบวกทางเรขาคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละชุดเราเรียกว่า **คิธทริบิวชันแฟกเตอร์**

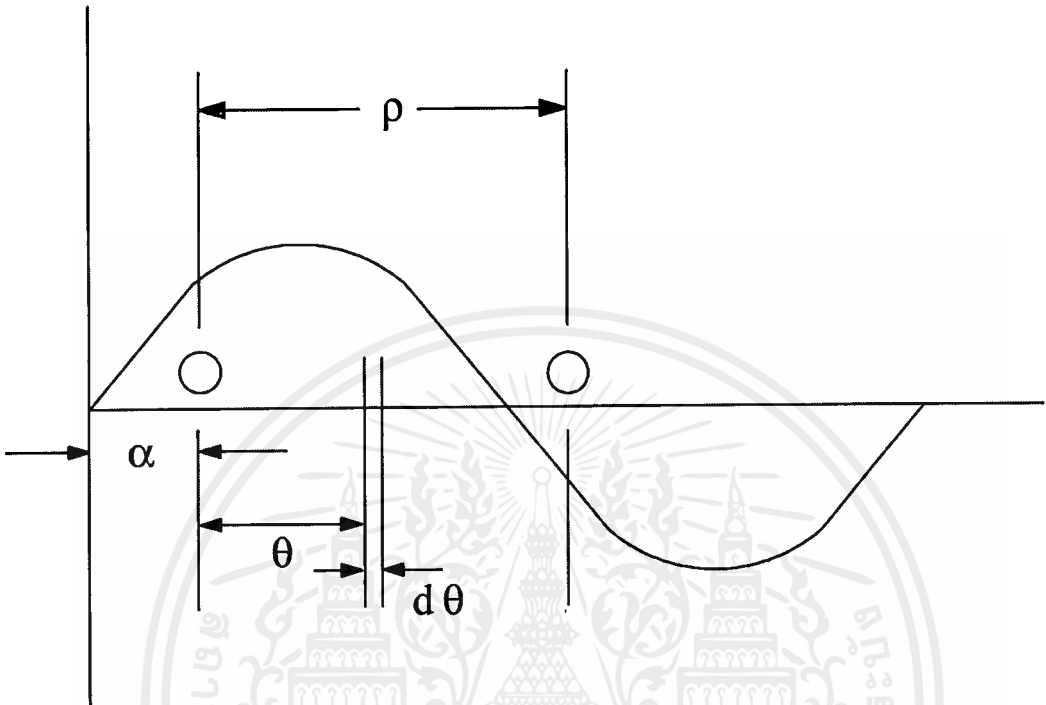
$$\begin{aligned}
 OA &= \frac{Aa}{\sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{AB}{2 \sin \frac{\gamma}{2}} \\
 OA &= \frac{Ad}{\sin \frac{3\gamma}{2}} = \frac{AD}{2 \sin \left(\frac{3\gamma}{2} \right)} \\
 AD &= \frac{AB \sin \left(\frac{3\gamma}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \\
 K_d &= \frac{AD}{3 \times AB} = \frac{\sin \left(\frac{3\gamma}{2} \right)}{3 \times \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right)}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่า Distribution Factor ของ Slot Winding เมื่อเป็น Fundamental จะเป็น

$$K_{d1} = \frac{\sin \left(\frac{\sigma}{2} \right)}{\sigma / \gamma \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \quad (21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่า Pitch Factor (K_p)



รูปที่ 8 ประกอบการหา Pitch Factor

$$\rho = \frac{Y_s}{Y_p} \cdot \pi \text{ rad.}$$

กำหนดให้

- B_{peak} เป็นค่าสูงสุดของ Flux Density ของขั้วแม่เหล็ก
 l เป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรถึงช่องอากาศ
 N เป็นจำนวนรอบของขดลวด

ดังนั้น
$$d\lambda = N \cdot B_{\text{peak}} \sin \theta \left(\frac{l r d\theta}{p} \right)$$

Total Flux Linkage ที่คล้องขดลวด (λ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\lambda &= \int_{\alpha}^{\alpha+\rho} N \cdot B_{\text{peak}} \sin \theta \, l r \frac{\alpha}{\rho} d\theta \\ &= N \cdot B_{\text{peak}} \, l r \frac{\alpha}{\rho} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \rho)]\end{aligned}$$

แทนค่า α ด้วย ωt เมื่อเครื่องจักรกลหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ωt

$$\lambda = N B_{\text{peak}} \, l r \frac{2}{\rho} [\cos \omega t - \cos(\omega t + \rho)] \quad \text{----22}$$

จาก

$$[\cos \omega t - \cos(\omega t + \rho)] = 2 \left[\cos \frac{\pi-\rho}{2} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi-\rho}{2}\right) \right] \quad \text{----23}$$

ดังนั้น แทนค่า สมการ 23 ใน 22 จะได้ $e = \frac{d\lambda}{dt}$

$$= -\omega N \phi \cos \frac{\pi-\rho}{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi-\rho}{2}\right)$$

$$\begin{aligned}E_{\text{rms}} &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} N \phi \cos \frac{\pi-\rho}{2} \\ &= 4.44 f N \phi K_w\end{aligned}$$

(24)

เมื่อค่า K_p เป็นค่า Peak Factor ; $K_p = \cos \frac{\pi-\rho}{2} = \sin \frac{\rho}{2}$

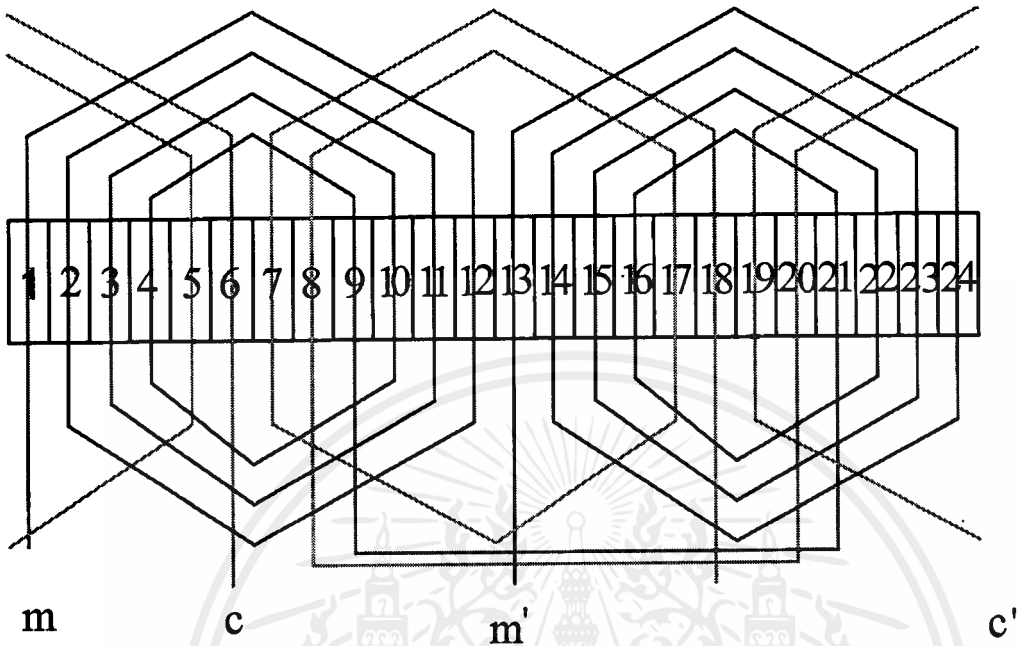
เมื่อ K_p ที่ HARMONIC FLUX DENSITY ORDER เขียนได้โดย

$$K_w = \sin n \cdot \frac{\rho}{2} \quad (25)$$

ทำให้ค่า Maximum Voltage ลดลงด้วยค่าตัวคูณ Winding Factor (K_w)

เมื่อ K_w เป็น Winding Factor เพื่อให้รูปคลื่นเป็นค่า Sin เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพันขดลวด (WINDING DIAGRAM)



รูปที่ 9 การลงขดลวดของสเตเตอร์

การพันขดลวด (Winding) ของสเตเตอร์ (Stator) ใช้แบบ Concentric Coil โดยแต่ละร่องสลีต มีการวางขดลวดแบบ Single Layer ดังมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ดังนี้

$$\text{จำนวนสลีตต่อขั้ว (Slot /pole)} = \frac{24}{2} = 12$$

$$\text{ความกว้างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (pole pitch (Y_p))} = \text{Slot /pole} = 12$$

การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ Main Winding

$$\text{ความกว้างของขดลวด (Coil pitch (Y_s))} = 8$$

$$\text{ค่า Spread of phase group (σ)} = 120^\circ$$

$$\text{มุมระหว่างสลีต (Angle /slot(γ))} = 15^\circ$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{Y_s}{Y_p} * \pi \\ &= \frac{8}{12} * \pi \end{aligned}$$

$$= 120^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{แฟกเตอร์การกระจายของขดลวด Main } (K_{dm}) &= \frac{\sin(\sigma/2)}{\frac{\sigma}{\gamma}(\sin(\gamma/2))} \\ &= \frac{\sin(120/2)}{\frac{120}{15} \sin(15/2)} \\ &= 0.8294 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แฟกเตอร์ระยะขดลวด Main } (K_{pm}) &= \sin \frac{\rho}{2} \\ &= \sin \frac{120}{2} \\ &= 0.866 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{แฟกเตอร์การพันขดลวด Main } (K_{wm}) &= K_{dm} * K_{pm} \\ &= 0.8294 * 0.866 \\ &= 0.7183 \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ Auxiliary Winding

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด (Coil pitch } (Y_s)) &= 10 \\ \text{ค่า Spread of phase group } (\sigma) &= 60^\circ \\ \text{มุมระหว่างสล็อต (Angle /slot } (\gamma)) &= 15^\circ \\ \rho &= \frac{Y_s}{Y_p} * \pi \\ &= \frac{10}{12} * \pi \\ &= 150^\circ \end{aligned}$$

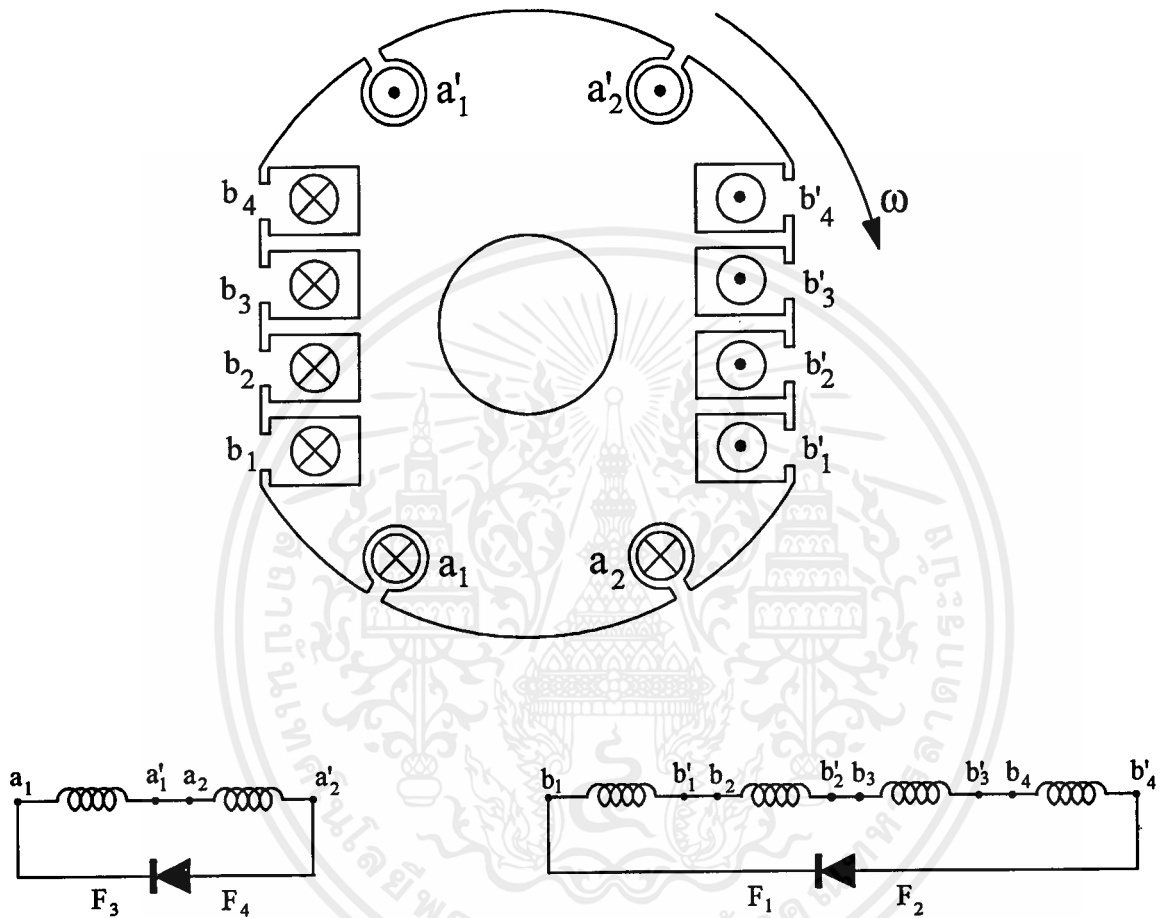
$$\begin{aligned} \text{แฟกเตอร์การกระจายของขดลวด Auxiliary } (K_{dc}) &= \frac{\sin(\sigma/2)}{\frac{\sigma}{\gamma}(\sin(\gamma/2))} \\ &= \frac{\sin(60/2)}{\frac{60}{15}(\sin(15/2))} \\ &= 0.9577 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แฟกเตอร์ระยะของขดลวด Auxiliary } (K_{pc}) &= \sin \frac{\rho}{2} \\ &= \sin \frac{150}{2} \\ &= 0.9659 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{แฟกเตอร์การพันขดลวด Main } (K_{wc}) &= K_{dc} * K_{pc} \\ &= 0.9577 * 0.9659 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อขดลวดของโรเตอร์

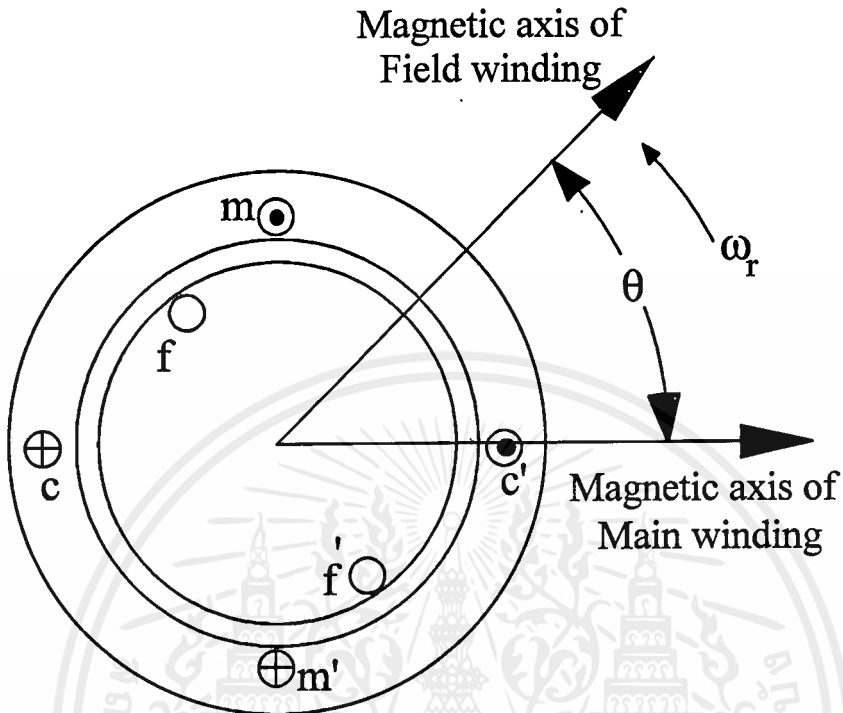


รูปที่ 10 การต่อขดลวดของโรเตอร์กับไดโอด

ลักษณะการต่อขดลวดที่ตัวของโรเตอร์มีขดลวดอยู่สองชุดคือชุดขดลวด a และชุดขดลวด b ซึ่งชุดขดลวด a เป็นชุดขดลวดหลัก ชุดขดลวด b เป็นชุดขดลวดช่วย โดยมีการต่อของแต่ละชุดขดลวดตามรูปที่ 10

สำหรับไดโอดที่ต่อคร่อมอยู่กับขดลวดเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นเป็นขั้วแม่เหล็กที่แน่นอน

Synchronous Machines Inductance



รูปที่ 11 วงจรสมมูลของ Synchronous Generator 1 เฟส
ระหว่างขดลวด m และขดลวด c ในรูปข้างบนห่างกัน 90° ทางไฟฟ้า

ใน Synchronous Machine จะมี Flux Linkage (λ) ของขดลวดใน Synchronous Machine มีดังนี้

$$\lambda_m = L_{mm} \cdot i_m + L_{mc} \cdot i_c + L_{mf} \cdot i_f \quad (26)$$

$$\lambda_c = L_{cm} \cdot i_m + L_{cc} \cdot i_c + L_{cf} \cdot i_f \quad (27)$$

$$\lambda_f = L_{fm} \cdot i_m + L_{fc} \cdot i_c + L_{ff} \cdot i_f \quad (28)$$

ค่า Inductance ถ้าตัว Subscript เหมือนกันทั้ง 2 ตัว เป็น Self - Inductance และ ถ้าไม่เหมือนกันทั้ง 2 ตัว จะเป็น Mutual - Inductance ระหว่างขดลวดทั้ง 2 ขดตาม Subscript .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rotor Self - Inductance (L_{ff})

$$L_{ff} = L_{ff} = L_{ffo} + L_{f1} \quad (29)$$

เมื่อ L_{ffo} : Space-Fundamental Component of Air-gap Flux
 L_{f1} : Field Winding Leakage Flux Component

Stator - to - Rotor Mutual Inductance (L_{mf}, L_{cf})

$$L_{mf} = L_{fm} = L_{mf} \cos \theta \quad (30)$$

$$L_{cf} = L_{fc} = L_{cf} \cos (\theta - 90^\circ) \quad (31)$$

เมื่อ Rotor หมุนด้วยความเร็ว Synchronous Speed (ω_s) และ
 θ_0 : เป็นมุมระหว่างแกนของ Rotor กับ แกนของ Phase a ที่เวลา $t = 0$

$$\theta = \omega_s \cdot t + \theta_0$$

ถ้ามีไฟกระแสตรงที่ Field Winding มีค่าเท่ากับ I_f แอมป์ ดังนั้น ค่า Flux Linkage ของขดลวด Phase a ที่ถูกกระทำจาก Field Winding ของ Rotor

$$\lambda_{mf} = L_{mf} I_f \cos (\omega_s t + \theta_0)$$

ส่วนค่า Mutual Inductance ที่ขดลวด Field Winding ถูกกระทำจากกระแสที่ไหลใน Armature Winding เมื่อกระแสไหลในขดลวด Armature เป็น

$$i_m = I_m \sin (\omega t - \theta_m)$$

$$i_c = I_c \sin (\omega t - 90^\circ - \theta_c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่า Flux Linkage ที่ขดลวด Field Winding ถูกกระทำจากขดลวด Main

$$\begin{aligned}\lambda_{fm} &= L_{fm} \cdot i_m = L_{mf} \cos(\omega_s t + \theta_0) I_m \sin(\omega t - \theta_m) \\ &= \frac{1}{2} L_{mf} I_m \{ \sin(\omega t - \theta_m + \omega_s t + \theta_0) + \sin(\omega t - \theta_m - \omega_s t - \theta_0) \}\end{aligned}$$

ถ้า $\omega = \omega_s$

$$\lambda_{fm} = \frac{1}{2} L_{mf} I_m \{ \sin(-\theta_m - \theta_0) + \sin(2\omega_s t + \theta_0 - \theta_m) \}$$

$$\lambda_{fc} = \frac{1}{2} L_{cf} I_c \{ \sin(-\theta_m - \theta_0) - \sin(2\omega_s t + \theta_0 - \theta_m) \}$$

ซึ่งจะได้ว่าค่า Mutual Flux Linkage (λ_{total}) ของ Field Winding ที่ถูกกระทำจาก Armature Winding จะได้ว่า

$$\lambda_{total} = \lambda_{fm} + \lambda_{fc}$$

Stator Self - Inductance (L_{mm}, L_{cc})

$$L_{mm} = L_{mmo} + L_{m1}$$

$$L_{cc} = L_{cco} + L_{c1}$$

L_{mmo}, L_{cco} : เป็นส่วนของ Self-inductance ที่กระทำต่อ Space - Fundamental Air - Gap Flux

L_{m1}, L_{c1} : เป็นส่วนที่เกิดจาก Armature Leakage Flux

Stator Armature Phase - to - Phase Mutual Inductance

$$\therefore \text{Mutual Inductance } (L(\theta)) = L_{aao} \cos \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ มุม θ เป็น $\pm 90^\circ \therefore \cos(\pm 90^\circ) = 0$

$$L_{mc} = L_{cm} = 0$$

Total Flux Linkage ของขดลวด Armature แต่ละเฟส

$$\lambda_m = (L_{m0} + L_{m1}) i_a + \lambda_{mf} \quad (32)$$

$$\lambda_c = (L_{c0} + L_{c1}) i_c + \lambda_{cf} \quad (33)$$

หรือ

$$\lambda_m = L_{sm} i_m + \lambda_{mf}$$

$$\lambda_c = L_{sc} i_c + \lambda_{cf}$$

เมื่อ $L_{sm} = L_{m0} + L_{m1}$: Synchronous Inductance of main winding
 $L_{sc} = L_{c0} + L_{c1}$: Synchronous Inductance of auxiliary winding
 $X_{sm} = \omega L_{sm}$: Synchronous Reactance of main winding
 $X_{sc} = \omega L_{sc}$: Synchronous Reactance of auxiliary winding

Synchronous Machines Equivalent Circuit

จาก Flux Linkage λ_m ของขด Main Winding จะสามารถคำนวณหาค่า Induced Voltage ของขดลวดขุด Main ได้จาก

$$\frac{d\lambda_m}{dt} = L_{sm} \frac{di_m}{dt} + \frac{d\lambda_{mf}}{dt}$$

เมื่อ $L_{sm} \frac{di_m}{dt}$: เป็นศักดาไฟฟ้าตกคร่อม Synchronous Inductance

$\frac{d\lambda_{mf}}{dt}$: เป็นเทอมของ Generated Voltage = e_{mf}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\frac{d\lambda_{mf}}{dt} &= \frac{d}{dt} L_{mf} I_f \cos(\omega t + \theta_o) \\ &= -\omega L_{mf} I_f \sin(\omega t + \theta_o) \\ e_{mf} &= \omega L_{mf} I_f \cos(\omega t + \theta_o + \pi/2)\end{aligned}$$

สรุปได้ว่า e_{mf} จะ lead ค่าของ Flux Linkage เป็นมุม 90°

$$E_{mf} = \frac{e_{mf, \max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega L_{mf} I_f}{\sqrt{2}}$$

เมื่อเทียบกับค่า Generated Voltage ที่หาค่า ϕ_{mf} โดยตรง

$$E_{mf} = 4.44 f K_{w,m} N_{ph} \phi_{mf} \quad (34)$$

ซึ่งค่าของ Terminal Voltage (V) และ Armature Current (I_m) สามารถเขียนเป็นสมการในกรณีที่เป็น Generator และ Motor

Synchronous Generator

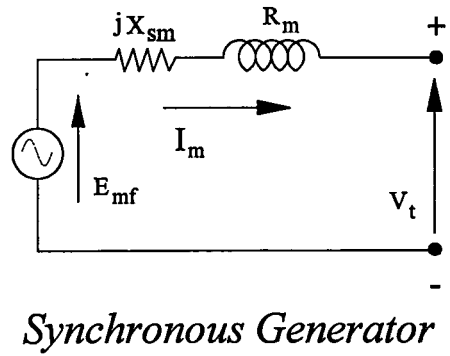
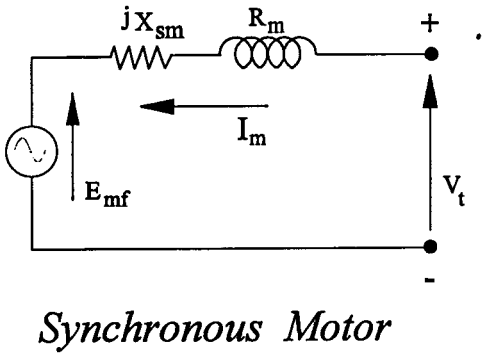
Synchronous Motor

⇓

⇓

$$\hat{E}_{mf} = R_m \hat{I}_m + j X_{sm} \hat{I}_m + \hat{V}_t \quad \hat{V}_t = R_m \hat{I}_m + j X_{sm} \hat{I}_m + \hat{E}_{mf}$$

และสามารถนำมาเขียนเป็น Equivalent Circuit ของ Synchronous Machine ได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 วงจรสมมูลของ Motor และ Gennerator

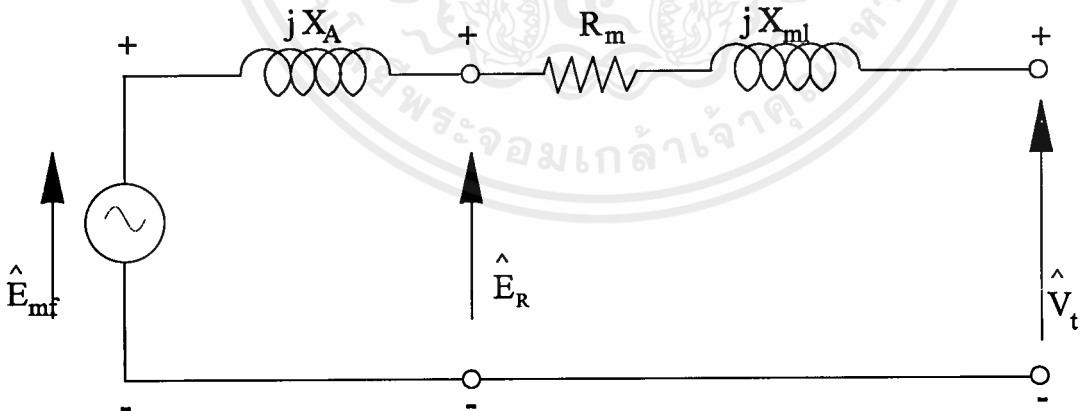
ซึ่งค่าของ Synchronous Reactance (X_{sm}) จะประกอบไปด้วย

$$X_{sm} = \omega L_{sm} = \omega L_{m1} + \omega L_{mmo} = X_{m1} + X_A \quad (35)$$

เมื่อ X_{m1} : เป็น Armature Leakage Reactnce

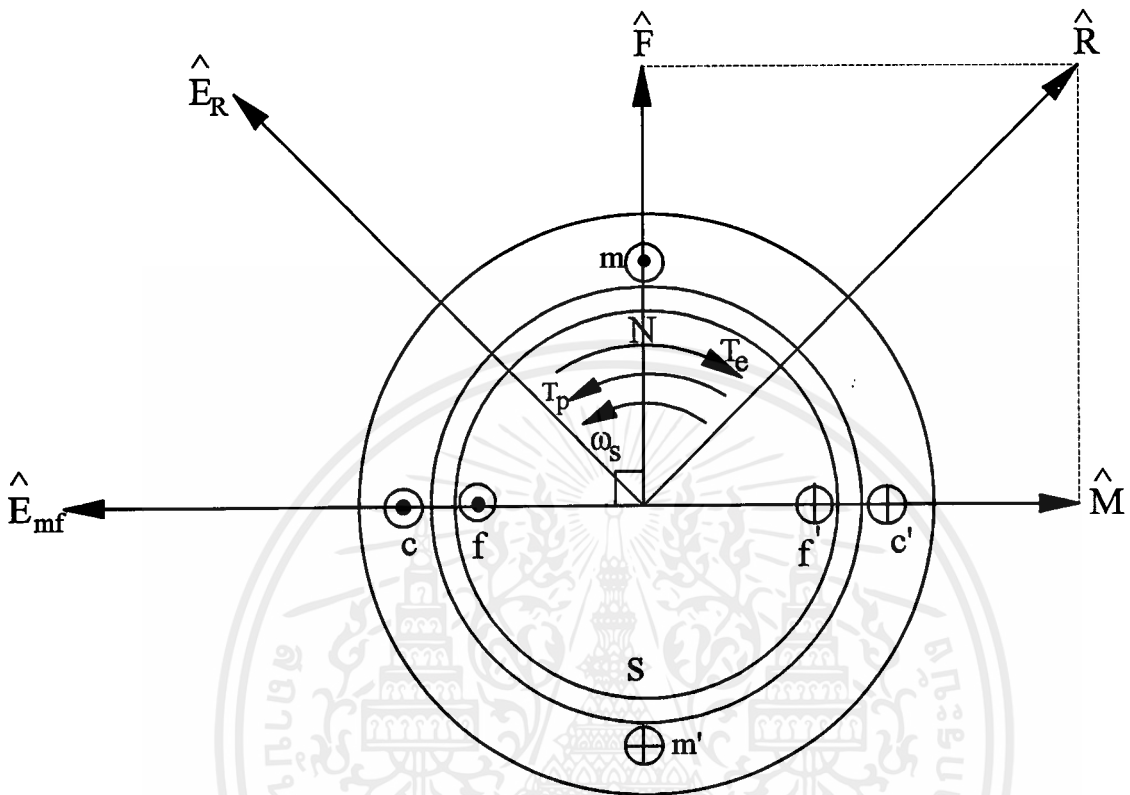
X_A : เป็น Armature Reaction Reactnce

กำหนดให้ E_R เป็น Internal Generated Voltage ที่เกิดจาก Resultance Air - Gap Flux (ϕ_R)



รูปที่ 13 วงจรสมมูลของ Internal Generator (E_R)

Phasor Diagram of Generator



รูปที่ 14 เฟเซอร์ไดอะแกรม ของ เชนเนอเรเตอร์

เมื่อทิศทางกระแสที่ไหลใน Armature Winding Inphase กับ E_{mf}

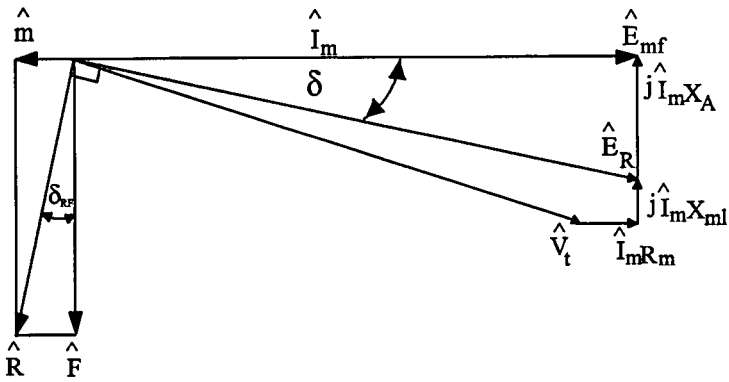
โดย F เป็น mmf ของ Field Winding

M เป็น mmf ของ Armature Winding

R เป็น Resultance mmf ที่ Air Gap

E_{mf} คือ ค่า Induced emf ของขด Main ที่เกิดจาก Field Winding mmf

E_R คือ ค่า Induced emf ของขด Main ที่เกิดจาก Resultance mmf



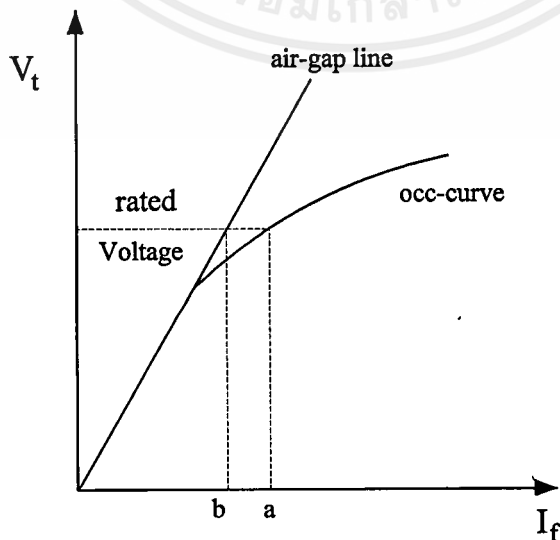
รูปที่ 15 เวกเตอร์ของ Synchronous Generator

จากรูปเวกเตอร์ข้างบน δ คือ มุม Power Angle
 δ_{RF} คือ มุม Torque Angle

Open and Short Circuit Characteristic

Open-Circuit Test

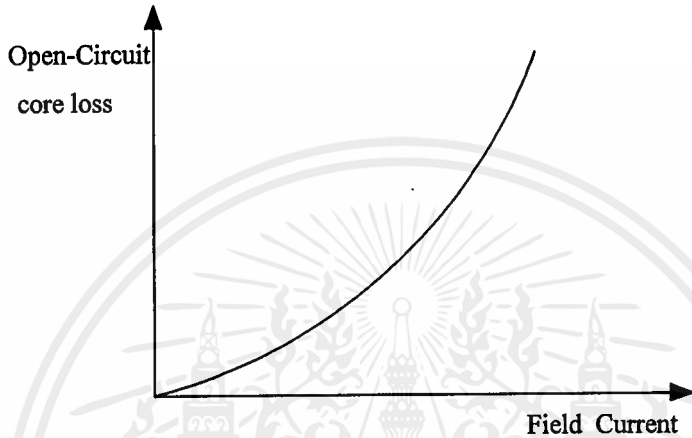
ทำการขับ Synchronous Machine ด้วยตัวขับที่ความเร็ว Synchronous Speed (N_s) ขณะที่เครื่องจักรได้ทำตัวเป็น Synchronous Generator ในสภาวะ no-load ค่อย ๆ ปรับค่า Field Current (I_f) ที่ป้อนให้กับ Field Winding แล้วทำการบันทึกค่า Field Current (I_f) กับ Terminal Voltage (V_t)



รูปที่ 16 Open-circuit Characteristic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

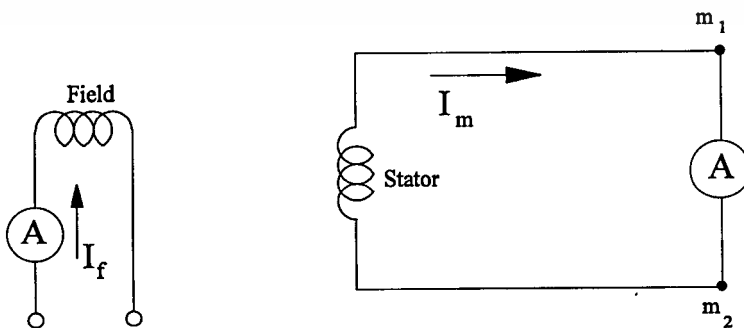
Mechanical Power ที่ใช้ในการทำ Open Circuit test จะเป็นค่าของ no-load rotational loss ซึ่งประกอบด้วย Friction , Windage และ core-loss ที่ความเร็วรอบคงที่เท่ากับ N_s ค่าของความเสียดทาน (Friction) และ แรงลม (Windage loss) ให้มีค่าคงที่



รูปที่ 17 Open-circuit core-loss curve

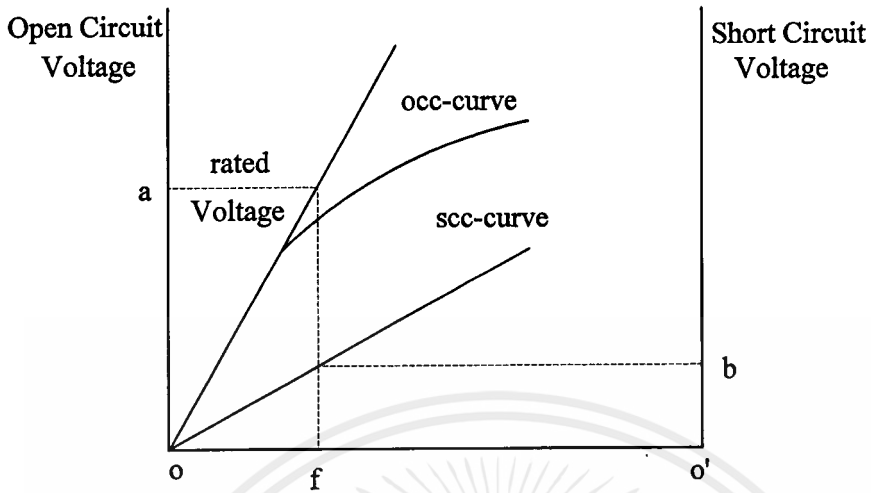
Short-Circuit Test

ในการ Scc นี้ทำได้โดยการ Short-Circuit Terminal ของ Synchronous Machine ขณะที่ทำตัวเป็น Generator ที่ความเร็วเท่ากับ Synchronous Speed (N_s)

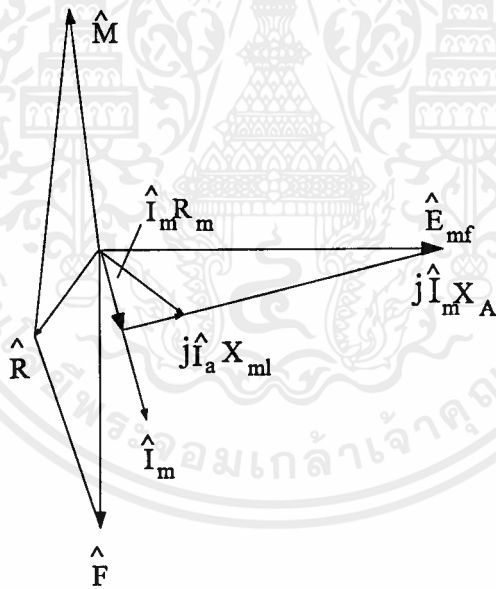


รูปที่ 18(ก) การต่อแอมป์มิเตอร์เพื่อ Short-Circuit Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



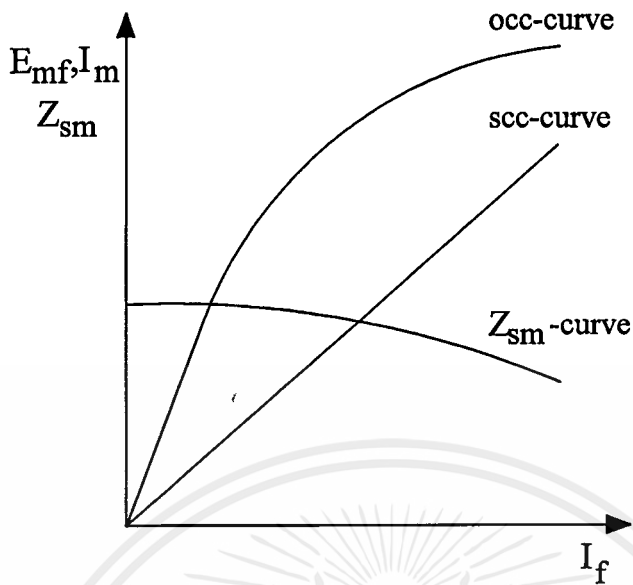
รูปที่ 18 (ข) Open-circuit และ Short-Circuit Characteristic



รูปที่ 18 (ค) เฟเซอร์ไดอะแกรมของการ Short-Circuit

$$\begin{aligned} \hat{E}_{mf} &= \hat{I}_m (R_m + jX_{sm}) \\ &= \hat{I}_m R_m + j\hat{I}_m X_{ml} + j\hat{I}_m X_A \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 19 การหาค่า Synchronous Impedance จากการ Open-circuit และ Short-Circuit

ซึ่งสามารถหาค่า Synchronous Impedance (Z_{sm}) ได้จาก

$$Z_{sm} = \frac{E_{mf}}{I_m} \quad \text{ที่ } I_f \text{ เดียวกัน}$$

โดยทั่วไปค่า Armature resistance มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ Synchronous Reactance ดังนั้น

$$X_{sm} \approx Z_{sm}$$

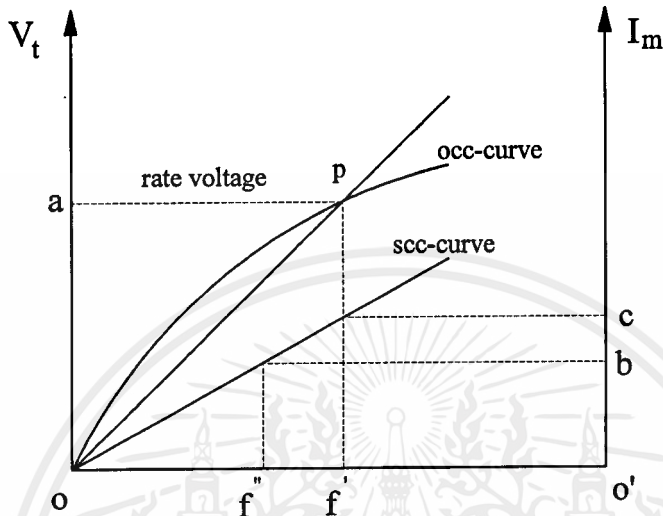
การหา Unsaturated Synchronous Reactance สามารถคำนวณได้จาก Excitation Voltage ($E_{mf,ag}$) ซึ่งหาได้จาก Air-gap line กับ SCC - Curve โดยคำนวณที่ตำแหน่ง Rated Voltage

$$X_{sm,ag} = \frac{E_{mf,ag}}{I_{m,sc}}$$

หรือดูจากรูปจะได้ดังนี้

$$= \frac{oa}{o'b} \quad (36)$$

สำหรับการใช้งานที่ใกล้เคียงกับ Rated Terminal Voltage ในบางครั้งจะสมมุติว่าไม่มีการอิ่มตัว โดยลากเส้นตรงจากจุด O ผ่านจุดที่ให้ค่าเท่ากับ Rated Voltage บนเส้น OCC - Curve ซึ่งแสดงโดยเส้น OP จากรูปข้างล่าง



รูปที่ 20 Open-circuit และ Short-Circuit Characteristic

o'b เป็น Saturated Value of Synchronous reactance ที่ Rated Voltage

$$X_{sm} = \frac{V_t}{I'_{m,sc}} \quad (37)$$

Short Circuit Ratio (SCR)

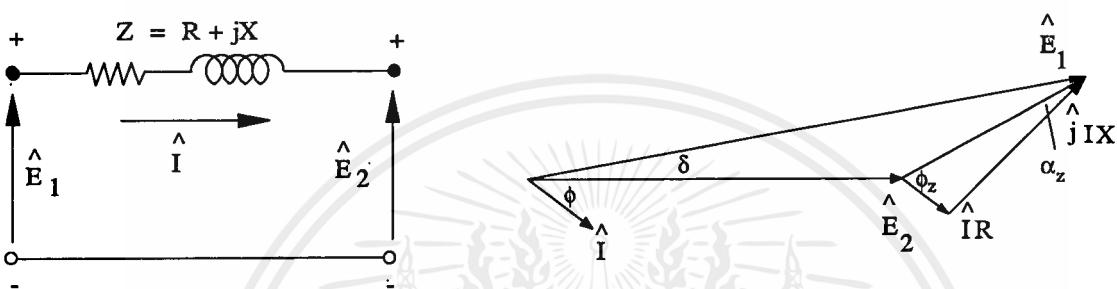
เป็นอัตราส่วนของ Field Current ที่ต้องการสำหรับ Rated Voltage ขณะ Open Circuit กับ Field Current ที่ต้องการสำหรับ Rated Armature Current ขณะที่ทำการ Short Circuit จากรูปข้างบนจะได้สมการดังนี้

$$SCR = \frac{of'}{of''} \quad (38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Steady-State Power-Angle Characteristics

จากรูปวงจรสมมูลข้างล่าง เป็นการแสดง Ac Voltage Source 2 แหล่งจ่าย คือ E_1 และ E_2 ต่ออยู่ด้วยกันโดยผ่าน Impedance Z ซึ่งจะมีกระแส I ไหลผ่าน โดย Power จะจ่ายจาก Source 1 ไปยัง Source 2 ซึ่งที่ขั้ว Terminal E_2 มีค่าเท่ากับ P_2



รูปที่ 21 วงจรสมมูลและเฟเซอร์ไคอะแกรม E_1 และ E_2 ที่ต่ออยู่ด้วยกันโดยผ่าน Z เมื่อ ϕ_2 เป็น Phase angle ของ I เมื่อเปรียบเทียบกับ E_2 รูปทางขวามือเป็นเวกเตอร์ที่มีผลจากวงจรทางซ้ายมือ ในการคำนวณค่าต่าง ๆ จะได้ดังนี้

$$P_2 = |E_2| |I| \cos \phi_2$$

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{|E_1| \angle \delta - |E_2| \angle 0^\circ}{|Z| \angle \phi_z}$$

$$= \frac{|E_1|}{|Z|} \angle \delta - \phi_z - \frac{|E_2|}{|Z|} \angle -\phi_z$$

(39)

- โดยกำหนดให้ E_2 เป็น reference $\therefore E_2 = |E_2| \angle 0^\circ$
- เมื่อ $|E_1|, |E_2|$ เป็นขนาดของศักดาไฟฟ้า (Magnitudes of Voltage)
- δ เป็น Phase angle ซึ่ง \hat{E}_1 นำหน้า \hat{E}_2
- $|Z|$ เป็นขนาดของอิมพีแดนซ์ (Impedance)
- ϕ_z เป็นมุมของ Impedance ที่เขียนในรูป Polar Form

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 |I| \cos \phi_z &= \frac{|E_1|}{|Z|} \cos(\delta - \phi_z) - \frac{|E_1|}{|Z|} \cos(-\phi_z) \\
 \cos(-\phi_z) &= \cos(\phi_z) = \frac{R}{Z} \\
 P_2 &= |E_2| |I| \cos \phi_z = \frac{|E_1||E_2|}{|Z|} \cos(-\phi_z) - \frac{|E_2|^2}{|Z|^2} R \\
 &= \frac{|E_1||E_2|}{|Z|} \sin(\delta + \delta_z) - \frac{|E_2|^2}{|Z|^2} R
 \end{aligned}$$

เมื่อ $\delta_z = 90^\circ - \phi_z = \tan^{-1} \frac{R}{X}$

ในลักษณะทำนองเดียวกัน ค่าของ P_1 ที่ Terminal E_1

$$P_1 = \frac{|E_1||E_2|}{|Z|} \sin(\delta - \alpha_z) + \frac{|E_1|^2}{|Z|^2} R \quad (40)$$

ถ้าคิดว่าค่าความต้านทาน R มีค่าน้อยมาก ($R=0$)

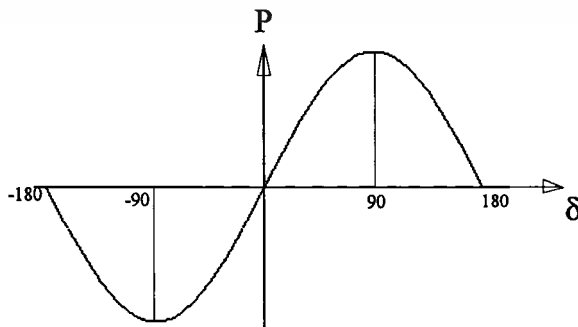
ดังนั้นจะได้ว่า $|Z| = X$ และ $\alpha_z = 0$ ซึ่งก็จะได้ค่าของ P ดังนี้

$$P_1 = P_2 = \frac{|E_1||E_2|}{X} \sin \delta$$

และเรียกมุม δ ว่า มุม Power Angle

ดังนั้นค่า Maximum Power Transfer เมื่อ $|E_1|$ และ $|E_2|$ มีค่าคงที่

$$P_1(\text{Max}) = P_2(\text{Max}) = \frac{|E_1||E_2|}{X}$$



รูปที่ 22 Power Angle Characteristic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรกิวเลชันของศักดา (Voltage Regulation)

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระ (Load) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักดาที่ขั้วขดลวดของอาร์เมเจอร์ ถ้ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กและความเร็วรอบมีค่าคงที่จะเรียกการเปลี่ยนแปลงศักดาที่ว่าเรกิวเลชันประจำตัว (Inherent Regulation) โดยมีนิยามดังนี้

$$\text{เรกิวเลชันประจำตัว (\%)} = \frac{(\text{ศักดาไฟฟ้าไร้ภาระ} - \text{ศักดาไฟฟ้าขณะมีภาระ})}{\text{ศักดาไฟฟ้ามีขณะภาระ}} \times 100$$

ปัจจัยที่มีผลต่อเรกิวเลชัน

ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์ถึงแม้ว่าจะรักษาสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กให้มีค่าคงที่ก็ตาม แต่เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกตัด โดยขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะไม่มีภาระกับมีภาระจะมีค่าไม่เท่ากัน เพราะกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งขึ้นมา เมื่อรวมกับสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก จะได้ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กจริงในช่องอากาศ (Gap) เมื่อเพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระโหลดมีค่าประมาณ 1 กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขวาง (Cross Magnetizing) จะทำให้เกิดการเพี้ยนของสนามแม่เหล็กลัพธ์จากเดิมผลที่ตามมาก็คือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง ในกรณีที่เพาเวอร์แฟกเตอร์มีค่าต่ำ และกระแสตามหลังศักดาแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีความโน้มเอียงที่จะต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก และที่ต่ำเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็นศูนย์แม่เหล็กจากอาร์เมเจอร์จะต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กทั้งหมดดังนั้นผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศจะลดลงอย่างมาก แต่ถ้ากระแสหน้าศักดาผลข้างต้นของขดลวดอาร์มาเจอร์จะเสริมกับแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กศักดาที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ จึงเพิ่มขึ้นผลอันเกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์เรียกว่า อาร์เมเจอร์รีแอกชัน (Armature Reaction)

คาร์รีแอกแตนซ์ คือ คาร์รีแอกแตนซ์ของปลายต่อตัวนำ (End Connection) และรีแอกแตนซ์จากการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในร่องสล็อต (Slot Leakage Reactance) ความต้านทานของขดลวดทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมที่มีเฟสเดียวกันกับกระแส และมีขนาดแปรตามขนาดกระแสรีแอกแตนซ์ของปลายต่อตัวนำเป็นส่วนที่ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าคร่อม อันเนื่องมาจากการตัวกันของเส้นแรงแม่เหล็ก กับตัวนำที่อยู่นอกแกนเหล็กออกไปรีแอกแตนซ์จากการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในสล็อตทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าลด (Voltage drop) เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กในช่องอากาศไม่ได้ถูกตัดโดยขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์เมเจอร์ทั้งหมดแต่จะมีบางส่วนที่ผ่านซี่แกนเหล็ก (Teeth) หนึ่งไปยังอีกซี่แกนเหล็กหนึ่งจึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยลงจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้อาจจะมีค่ามาก โดยเฉพาะเมื่อต้องจ่ายกระแสที่มีเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) ต่ำ ๆ

รูปร่างของศักดาไฟฟ้าที่วัดจากขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์นั้น ไม่ได้ขึ้นกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการกระจายในช่วงขั้วของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยเช่นกัน เพราะว่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์นั้น จะให้ค่าเฉลี่ยของศักดาเหนี่ยวนำขึ้นมาเท่านั้น ในขณะที่รูปร่างของศักดาจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่า rms ที่ต้องการ

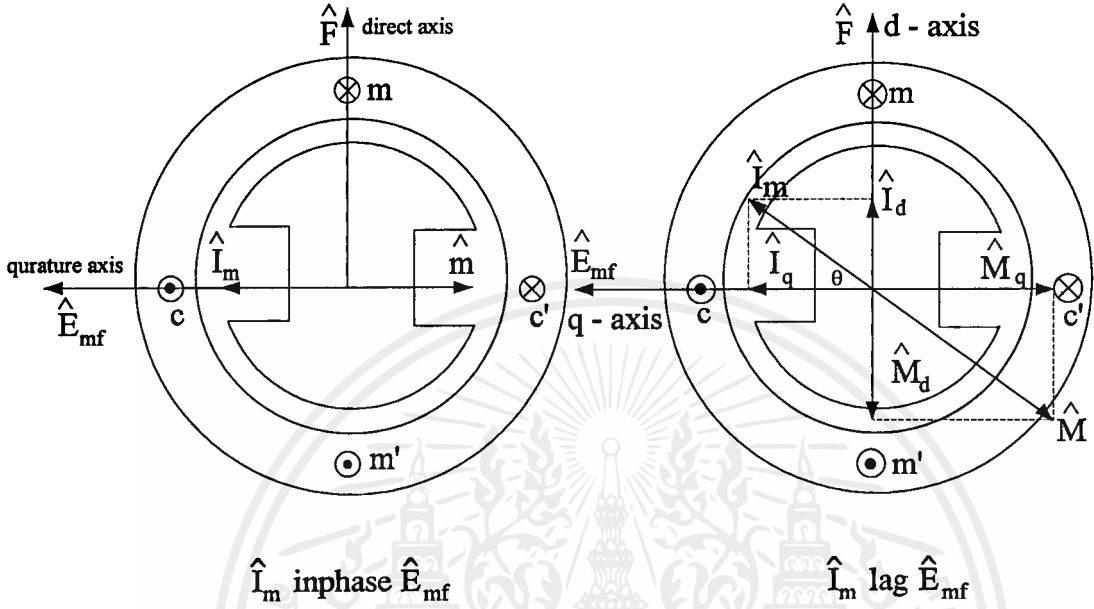
ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เมื่อคำนึงถึงเรกิวเลชัน (Regulation) แล้วจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้

(ก) ขนาดของช่องอากาศ ช่องอากาศที่มีขนาดใหญ่ สามารถช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขั้วไปเพราะต้องให้แอมป์-เทอรัน ที่มีค่าสูงในการสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นค่าแอมป์-เทอรันของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ทำให้เกิดอาร์เมเจอร์รีแอคชัน จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ แอมป์-เทอรันของขั้วแม่เหล็กอย่างไรก็ตามการที่ช่องอากาศมีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Leakage) ขึ้นมา และเพิ่มโครงสร้างของเครื่องกลให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

(ข) การอิมตัวแกนเหล็ก การออกแบบให้แกนเหล็กอิมตัวในบางส่วนก็ช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเรกิวเลชันเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน

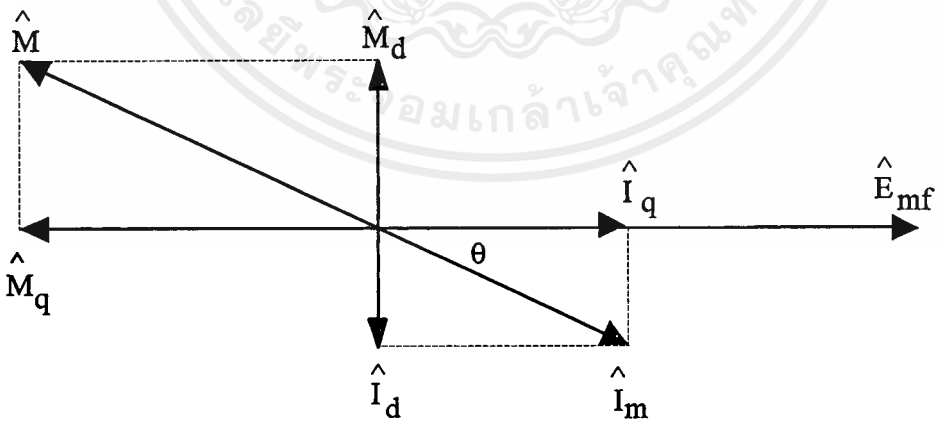
(ค) การลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ แต่การลดค่าเหล่านี้มีข้อจำกัดอยู่เหมือนกัน เพราะปริมาณเหล่านี้จะเป็นตัวจำกัดกระแสลัดวงจร

ผลของ Salient Pole



รูปที่ 23 วงจรสมมูลของ Salient Pole ที่ \hat{I}_m , \hat{E}_{mf} Inphase และ lag กัน

Salient Pole Synchronous Generator



รูปที่ 24 Phasor Diagram ของ Salient Pole Synchronous Generator

เมื่อ \hat{I}_d : Armature Current Component ที่อยู่ในแนว d - axis

\hat{I}_q : Armature Current component ที่อยู่ในแนว q - axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\hat{M}_d : mmf of Armature Winding ที่อยู่ในแนว d - axis

\hat{M}_q : mmf of Armature Winding ที่อยู่ในแนว q - axis

X_d : d - axis Synchronous reactance

X_q : q - axis Synchronous reactance

X_{Ad} : d - axis Armature reaction reactance

X_{Aq} : q - axis Armature reaction reactance

X_{m1} : Armature leakage reactance

$$X_d = X_{m1} + X_{Ad}$$

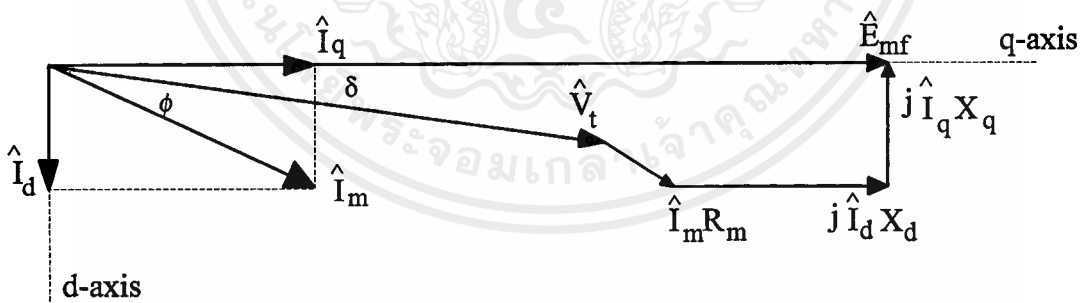
$$X_q = X_{m1} + X_{Aq}$$

ดังนั้นสมการที่ใช้หา Induced emf ที่เกิดจาก Field Winding Current ของ Synchronous

Generator

$$\hat{E}_{mf} = \hat{V}_t = \hat{I}_m R_m + j\hat{I}_d X_d + j\hat{I}_q X_q \quad (41)$$

ซึ่งสามารถเขียน Phasor diagram ของ Salient Pole Synchronous Generator

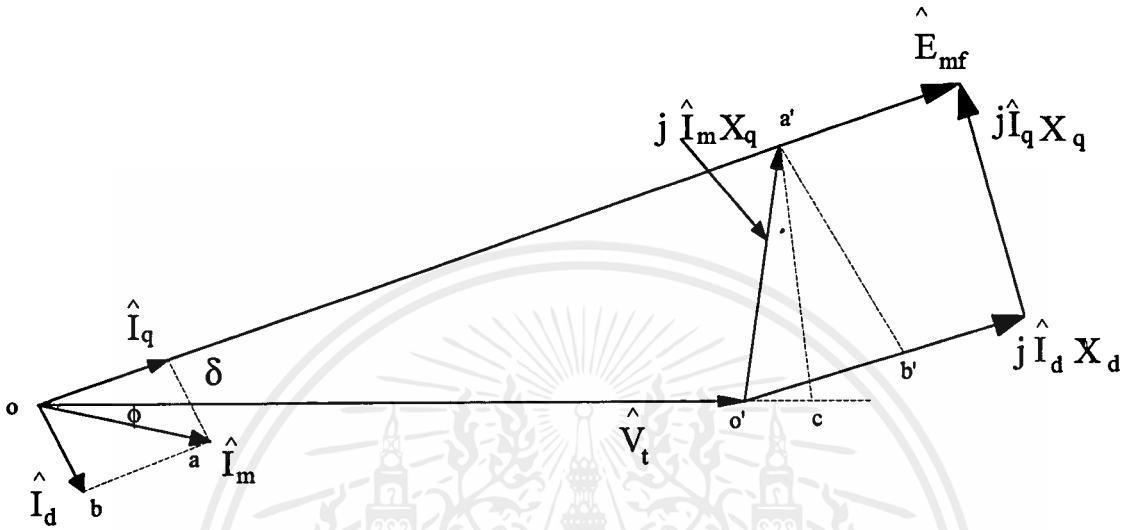


รูปที่ 25 Phasor diagram ของ Salient Pole Synchronous Generator

จาก Phasor Diagram ของ Salient Pole Synchronous Generator จะเห็นได้ว่าไม่สามารถวาดตาม Phasor นี้ได้โดยตรงอันเนื่องจากตอนเริ่มต้นยังไม่รู้ว่ามุม δ มีค่าเท่าไรและการเขียน Phasor โดยทั่วไปแล้วจะใช้ V_t เป็นแกน Reference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าคิดว่าผลของ R_m มีค่าน้อยมากแล้วค่าของ $R_m \Rightarrow 0$



รูปที่ 26 Phasor diagram ของ Salient Pole Synchronous Generator ไม่คิดค่า R

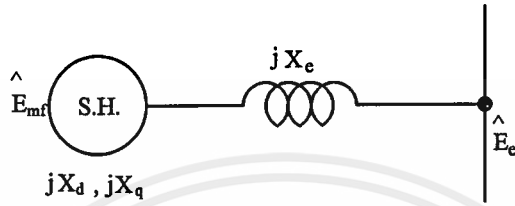
$$oa' = \hat{V}_t + j\hat{I}_m X_q$$

$$\tan \delta = \frac{ca'}{oc} = \frac{|I_m| X_q \cos \phi}{|V_t| + |I_m| X_q \sin \phi} \quad (42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power-Angle Characteristic of Salient Pole Machine

Synchronous Machine แบบ Salient Pole ต่ออยู่กับ Finite Bus โดยผ่าน Series Impedance ซึ่งมีแต่ค่า Reactance X_e (คิดเป็นค่า per Phase) ไม่คิดค่าความต้านทาน R



รูปที่ 27 Synchronous Machine แบบ Salient Pole ต่ออยู่กับ Finite Bus

เมื่อ

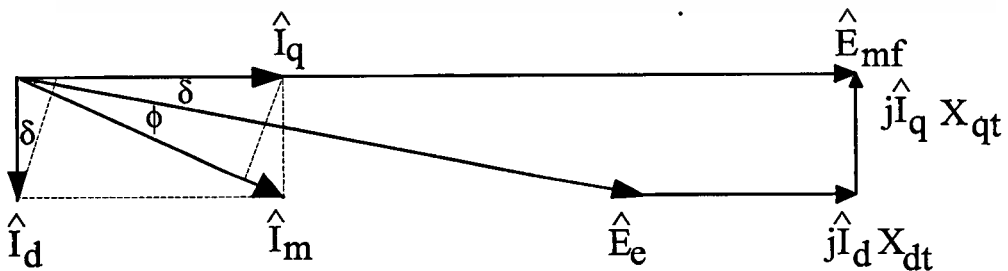
$$X_{dt} = X_d + X_e$$

$$X_{qt} = X_q + X_e$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_{mf} &= \hat{E}_e + j \hat{I}_m X_e + j \hat{I}_d X_d + j \hat{I}_q X_q \\ &= \hat{E}_e + j \hat{I}_d X_e + j \hat{I}_q X_e + j \hat{I}_d X_d + j \hat{I}_q X_q \end{aligned}$$

$$\hat{E}_{mf} = \hat{E}_e + j \hat{I}_d X_{dt} + j \hat{I}_q X_{qt} \tag{43}$$

เมื่อคิดค่า R_m ของ Synchronous Machine มีค่าน้อยมาก $R_m \Rightarrow 0$



รูปที่ 28 Phasor diagram ของ Salient Pole Synchronous Generator ไม่คิดค่า R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = |I_d||E_e| \sin \delta + |I_q||E_e| \cos \delta$$

$$|I_d| = \frac{|E_{mf}| - |E_e| \cos \delta}{X_{dt}}$$

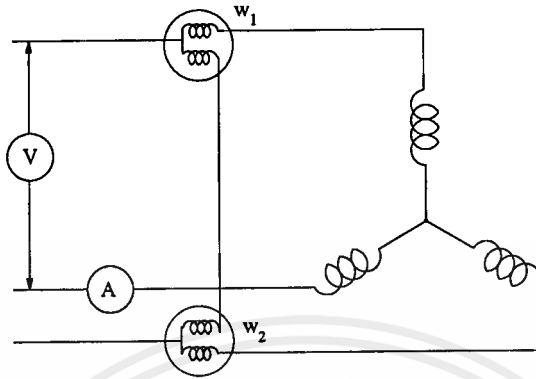
$$|I_q| = \frac{|E_e| \sin \delta}{X_{qt}}$$

$$\tan \delta = \frac{|I_m| X_{qt} \cos \phi}{|E_e| + |I_m| X_q \sin \phi}$$

เมื่อ ϕ เป็นมุมของ \hat{I}_m ที่ทำกับ \hat{E}_e

$$\begin{aligned} P &= \left(\frac{|E_{mf}| - |E_e| \cos \delta}{X_{dt}} \right) |E_e| \sin \delta + \frac{|E_e|^2 \sin 2\delta}{2X_{qt}} \\ &= \frac{|E_{mf}||E_e|}{X_{dt}} \sin \delta + \frac{|E_e|^2 \sin 2\delta}{2X_{qt}} - \frac{|E_e|^2}{2X_{dt}} \sin 2\delta \quad (44) \\ &= \frac{|E_{mf}||E_e|}{X_{dt}} \sin \delta + |E_e|^2 \frac{X_{dt} - X_{qt}}{2X_{dt}X_{qt}} \sin 2\delta \end{aligned}$$

การทดสอบ Induction Motor



รูปที่ 29 การต่อวัตต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์กับตัวมอเตอร์

No-Load Test ต่อวงจรการทดลองตามรูปด้านบนทดสอบ โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับ Induction Motor ในสถานะที่ไม่มีภาระ Load จะทำให้ Induction motor หมุนด้วยความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส (N_s) และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์จะมีการสูญเสียใน

- Core Loss (P_c) ที่ สเตเตอร์
- Stator Copper Loss เนื่องจากการ Excited Current
- Mechanical Loss

ซึ่งค่า Loss ต่าง ๆ เหล่านี้รวมกันเรียกว่า Fix Loss ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคือ (P_o) , (I_o) , (V_o)

$$\cos \phi_o = \cos^{-1} \left(\frac{P_o}{3V_o I_o} \right) \quad (45)$$

$$I_f = I_o \quad (46)$$

$$I_m = I_o \sin \phi_o \quad (47)$$

$$I_c = I_o \cos \phi_o \quad (48)$$

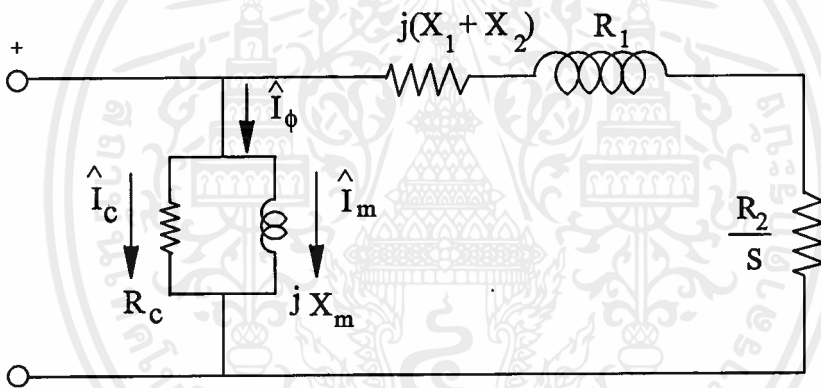
$$R_c = \frac{V_o}{I_c} = \frac{V_o}{I_m} \quad (49)$$

Block-Rotor Test การทดสอบนี้ทำได้โดยจับยึดตัวโรเตอร์ของ Induction Motor ให้อยู่กับที่ แล้วทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านตัวปรับแรงดัน (Variac) ให้กับมอเตอร์อย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงค่าพิกัดกระแส (Rated Current) โดยการอ่านค่าของกระแสจากแอมป์มิเตอร์ จากการทดลองนี้จะทราบค่าของ (P_b) , (I_b) , (V_b)

โดยกำหนดให้ $R_b = R_1 + R_2$; $X_b = X_1 + X_2$

$$R_b = \frac{P_b}{3I_b^2} \quad ; \quad Z_b = \frac{P_b}{3I_b^2} \quad ; \quad X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2}$$

สามารถเขียนวงจรสมมูลย์ (Equivalent Circuit) ได้ดังนี้



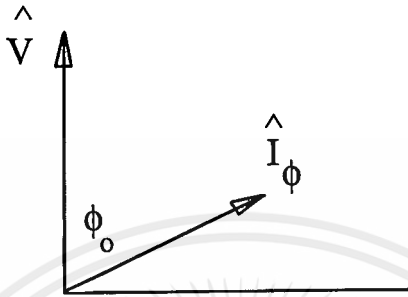
รูปที่ 30 วงจรสมมูลย์ (Equivalent Circuit)

จากการทดสอบ Block-Rotor Test นี้ได้ค่าความต้านทานออกมาเป็นค่ารวมก็คือ $R_1 + R_2$ ซึ่งจะต้องหาค่า R_2 แล้วนำค่านี้ไปคำนวณหา Power Output และ ค่าของ Electromagnetic torque

ถ้าเป็นกรณีของ Induction Motor แบบ Squirrel cage rotor ซึ่งสามารถวัดค่าของ R_2 ออกมาได้โดยตรง จึงใช้ V-I Method วัดค่า R_1 ที่สเตเตอร์และได้ว่า $R_2 = R_b + R_1$ ในกรณีมี Supply ที่สามารถปรับความถี่ได้จะทำให้หาค่าของ R_2 ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการลดความถี่พร้อมกับแรงดันในการ Block-Rotor Test

การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ใน Circle Diagram

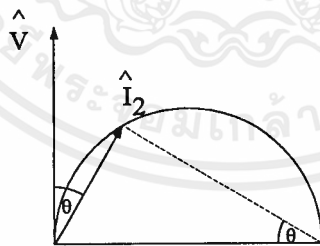
เป็นการเคลื่อนตัวของ phasor current ที่ค่า slip ต่างๆ โดยกำหนดให้ศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าที่ค่าคงที่ที่พิกัด ซึ่งจะแยกกระแสออกเป็น 2 ส่วนคือ



รูปที่ 31 (ก) เฟเซอร์ไดอะแกรมของ I_ϕ

- ส่วนที่เป็น No Load เป็นการแสดง Exciting Current และส่วนที่เป็น Fixed Loss ซึ่งประกอบด้วย

- core loss
- stator cu. loss ขณะ no load
- mechanical loss



รูปที่ 31 (ข) เฟเซอร์ไดอะแกรมของ I_2

- อีกส่วนเป็นส่วนทางด้าน load ซึ่งกระแสในส่วนนี้ คือ I^2

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_1}{\left((R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2) \right)} \quad (50)$$

$$|I_2| = \frac{|V_1|}{\left((R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right)^{1/2}} \quad (51)$$

$$\sin \theta = \frac{X_1 + X_2}{\left((R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right)^{1/2}} \quad (52)$$

$$I_2 = \frac{|V_1|}{X_1 + X_2} \sin \theta \quad (53)$$

ดังนั้นครึ่งวงกลมแสดง Locus ของกระแส I_2 ในกรณีที่ Blocked Rotor Test จำเป็นต้องปรับค่าที่ได้มาเป็นค่าที่พิกัดของศักดาไฟฟ้า (Rated Voltage)

$$\text{ซึ่งจะได้} \quad I'_b = \frac{V_1}{V_b} \cdot I_b ; \quad \theta_b = \cos^{-1} \frac{P_b}{3 v_b I_b} \quad (54)$$

กำหนดให้ KI : เป็นจำนวนกระแสไฟต่อหน่วยความยาว A/cm

$$\text{ทางด้านข้อมูลของ No Load Test} \quad \theta_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{3 v_o I_o}$$

การเขียน Circle Diagram

- ลากเส้น OA โดยเบี่ยงจากแกนตั้ง (V_1) มาเป็นมุม θ_o โดยขนาดของ $OA = I_o / KI$
- ลากเส้น OA โดยเบี่ยงจากแกนตั้ง (V_1) มาเป็นมุม θ_b โดยขนาดของ $OE = I'_b / Kb$
- จากจุด A ลากเส้นขนานกับแนวแกนนอน และ ลากเส้น AE
- จากจุด A และ E ซึ่งเป็นจุด 2 จุดบนเส้นรอบวงของครึ่งวงกลมดังนั้นถ้าลากเส้นแบ่งครึ่งและตั้งฉาก จะผ่านจุดศูนย์กลางของวงกลมซึ่งจะไปตัดกับเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมที่ลากขนานกับแกนนอนที่จุด C
- กางวงเวียนรัศมีเท่ากับ AC ใช้ C เป็นจุดศูนย์กลางเขียนครึ่งวงกลมจากจุด A ไป E แล้วตัดเส้นขนานที่จุด B
- จากจุด E ลากเส้นขนานกับแกนในแนวตั้ง V_1 ลงมาตัดแกนในแนวนอนที่จุด E และ F

ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หากจุด H ซึ่งเป็นจุดแบ่งระหว่าง stator และ rotor cu.loss ได้จาก เนื่องจากเส้นในแนวแกนตั้ง เป็นค่ากระแสที่ Inphase กับ Voltage ($I \cos\phi$)
 ดังนั้น

$$\text{Stator cu.loss} = 3V_1(HG)K_I$$

หรือ
$$= 3I_2^2 R_1 = 3(AE)^2 K_I R_1$$

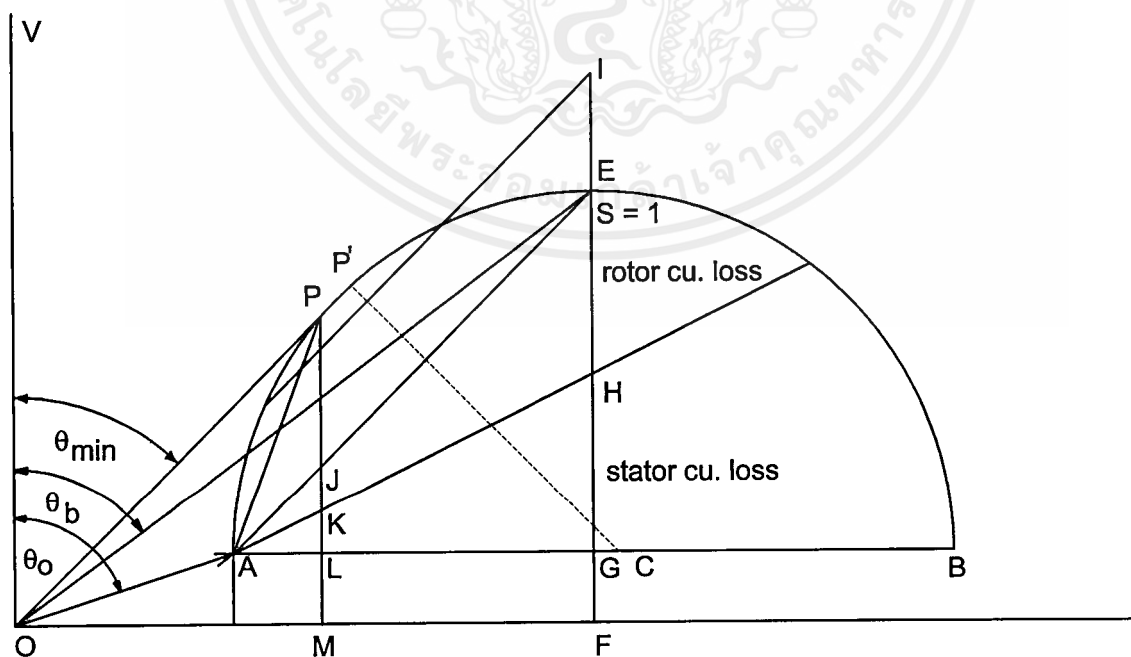
$$HG = (AE)^2 \frac{K_I R_1}{V_1}$$

และ
$$EH = (AE)^2 K_I R_1 / V_1$$

ซึ่งจะได้
$$\frac{EH}{HG} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\text{Rotor cu loss}}{\text{Stator cu loss}} \quad \text{ที่ } S = 1$$

จากจุด A ลากเส้นตรงผ่านจุด H ไปพบส่วนโค้งของครึ่งวงกลมที่จุด K'

Circle Diagram



รูปที่ 32 Circle Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา Power และ Torque

เรียกเส้น AE : mechanical power develop line

AH : torque line หรือ air-gap power line

ที่ $S = 1$

$$\begin{aligned} \text{Power transfer across Air-gap}(P_g) &= 3I_2^2 R_2^2 \cong 3(AE)2K_I R_2 \\ &= 3V_I K_I (EH) \\ &= K_p (EH) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Electromagnetic torque } (T_e) &= 3V_I K_I \frac{EH}{WS} \\ &= K_T (EH) \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_p &= 3V_I K_I \quad ; \text{ W/cm} \\ K_T &= 3V_I \frac{K_I}{WS} \quad ; \text{ N-m / cm} \end{aligned}$$

ที่ S ทำให้ p.f. สูงสุด

จากจุด O ลากเส้นสัมผัสส่วนโค้งของวงกลมที่จุด P ลากเส้น AP จากจุด P ลากเส้นตรงขนานกับเส้นแนวตั้งตัดเส้นต่างๆที่จุด J, K, L และ M

โดยหาค่าต่าง ๆ ที่จุด P ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_1 &= (OP).K_I \quad A \\ I_2 &= (AP).K_I \quad A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Input Power} &= 3V_I I_1 \cos\phi = 3V_I (OP) \cos\phi \text{ min} \\ &= 3V_I K_I I(PM) = (PM).K_p \end{aligned}$$

$$\text{Output Power} = (PJ).K_p$$

$$\text{Efficiency } (h) = (PJ) / (PM)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Power Factor (p.f.)} = (\text{MP}) / (\text{OP})$$

$$\text{Per-Unit slip (s)} = (\text{JK}) / (\text{PK})$$

$$\text{ดังนั้น Rotos Speed} = (1-s) N_s \quad \text{rpm.}$$

หาค่าแห่ง Maximum Output Power

ลากเส้นตรงจากจุด C ไปแบ่งครึ่งและตั้งฉาก เส้น AE ไปตัดส่วนโค้งของวงกลมที่จุด P' จากจุด P' ลากเส้นตรงขนานในแนวตั้งโดยตั้ง AE ที่จุด J' เส้น P'J' เป็นเส้นที่ยาวที่สุด

$$\text{Maximum Output Power} = (P'J') \cdot K_p$$

หาค่าแห่ง Maximum Electromagnetic Torque

ลากเส้นจากจุด C ไปแบ่งครึ่งและตั้งฉากกับ torque line และเลยไปตัดส่วนโค้งของวงกลมที่จุด P' จากจุด P' ลากเส้นในแนวตั้งตัดเส้น AK' ที่จุด K''

$$\text{Maximum Electromagnetic Torque (Te)} = (P'K'') \cdot K_T$$

หาค่าแห่ง Rated Output Power

จากจุด E ลากเส้นตรงขนานกับแกนในแนวตั้งออกนอกครึ่งวงกลมไปเท่ากับระยะ EI โดย

$$EI = \frac{\text{Rated Output Power}}{K_p}$$

จากจุด I ลากเส้นตรงขนานกับเส้น Mechanical Power develop (AE) ตัดส่วนโค้งของวงกลมที่จุด P'' ซึ่งเป็นจุดที่จ่ายกำลังที่พิกัด

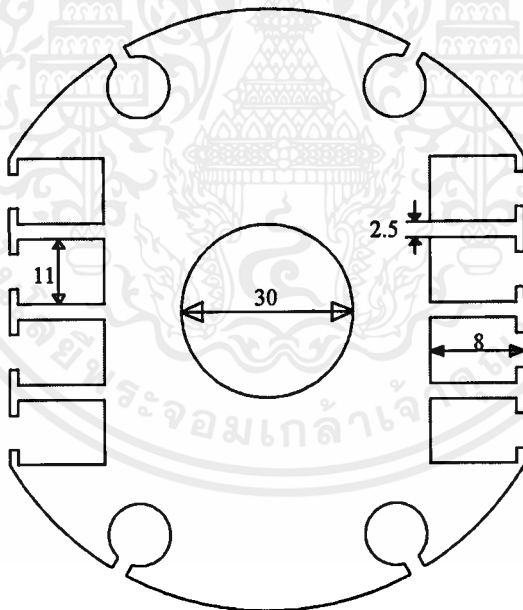
บทที่ 3

ลักษณะโครงสร้าง

ขนาดของแผ่นเหล็ก (Laminate) ที่ใช้ทำโรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบขั้วยื่น (Salient Pole) มีขนาดดังต่อไปนี้

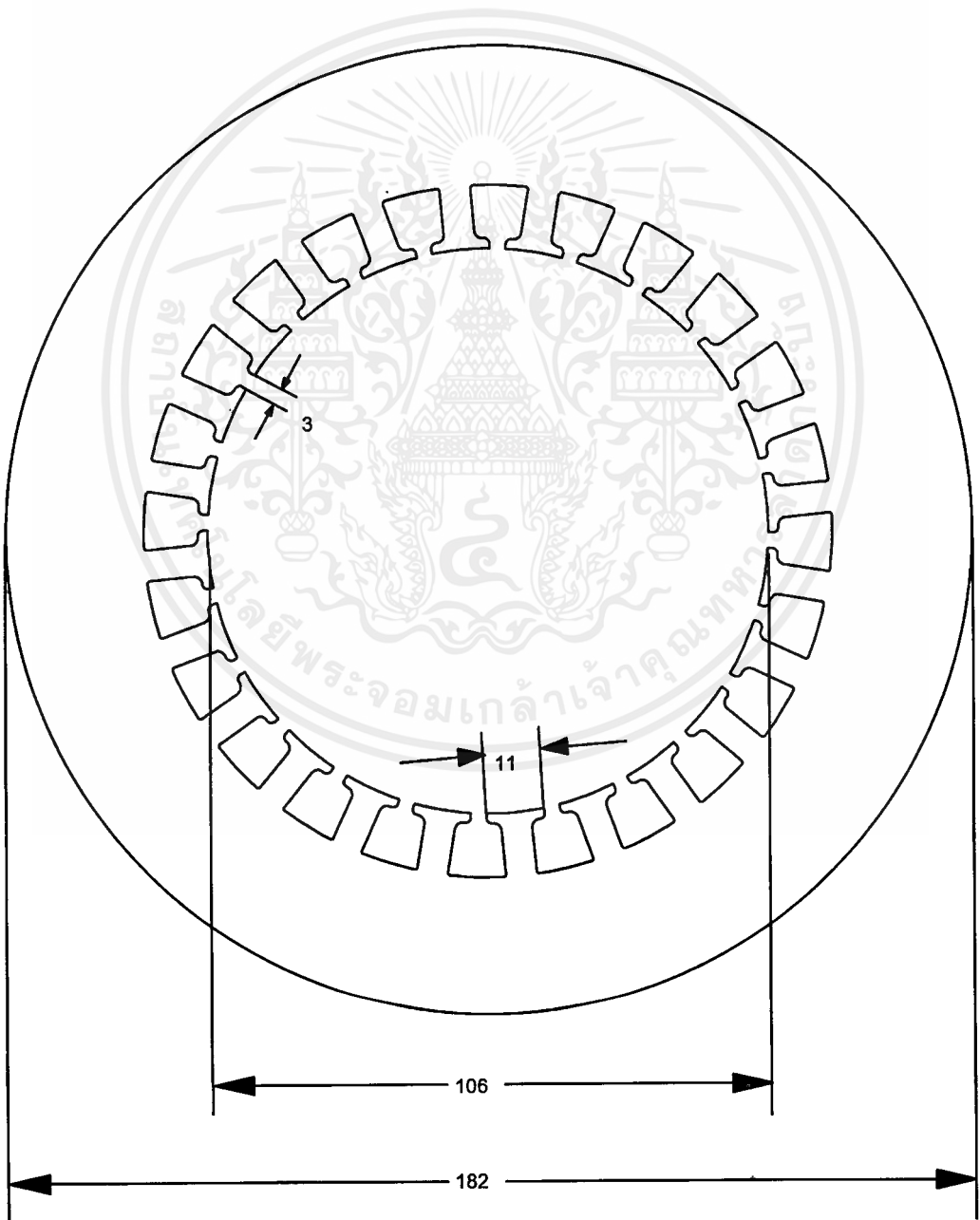
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก	104.5	ม.ม
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน	30	ม.ม
ความยาวของโรเตอร์ตามแนวแกน	150	ม.ม
เบอร์ลวดตัวนำที่ใช้ในการพันโรเตอร์ชุดMain	SWG # 19	
เบอร์ลวดตัวนำที่ใช้ในการพันโรเตอร์ชุดAuxiliary	SWG # 22	



รูปที่ 33 แผ่นเหล็กที่ใช้ทำโรเตอร์

ขนาดของแผ่นเหล็ก (Laminate) ที่ใช้ทำ Stator

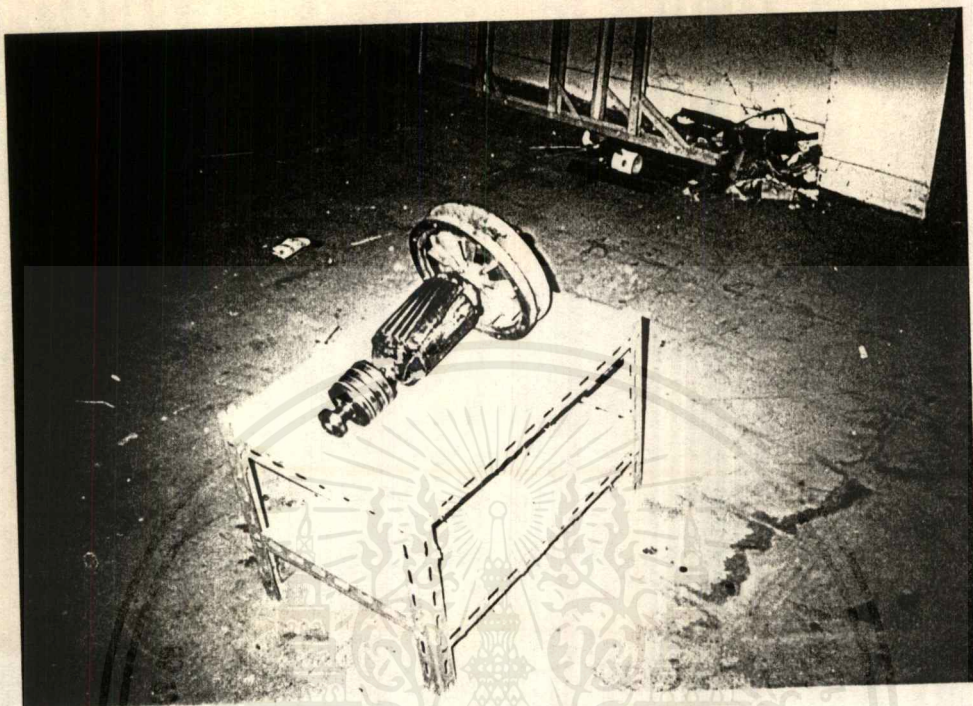
จำนวนสลีต (Slot)	24	สลีต
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก	182	ม.ม
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน	106	ม.ม
ความยาวของสเตเตอร์ตามแนวแกน	150	ม.ม
เบอร์ลวดคั่วที่ใช้ในการพันสเตเตอร์ชุด Main	SWG # 21	
เบอร์ลวดคั่วที่ใช้ในการพันสเตเตอร์ชุด Auxiliry	SWG # 22	



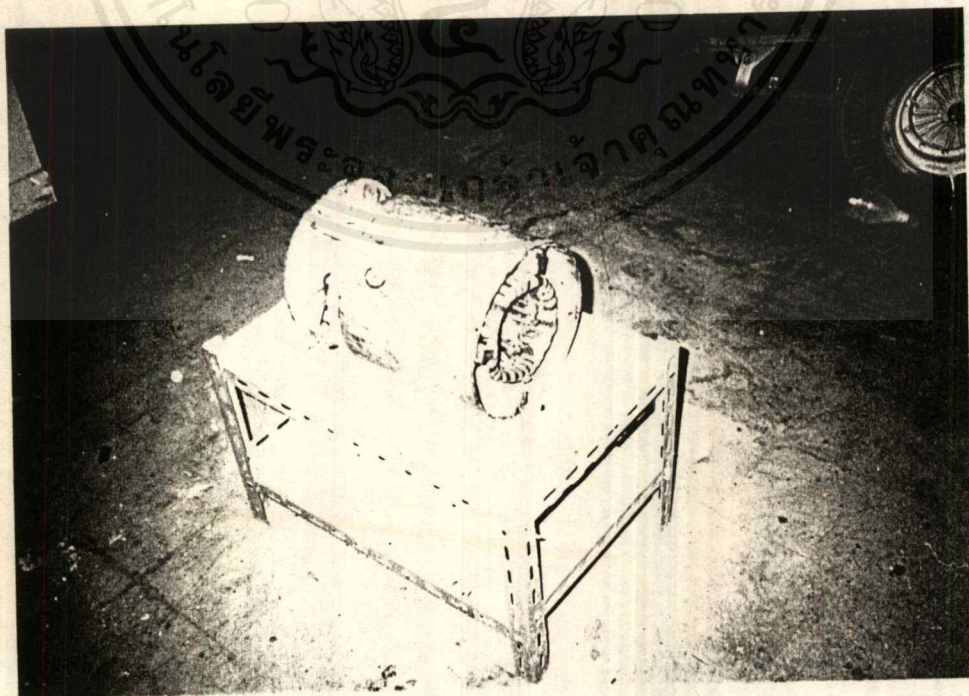
รูปที่ 34 แผ่นเหล็กที่ใช้ทำสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

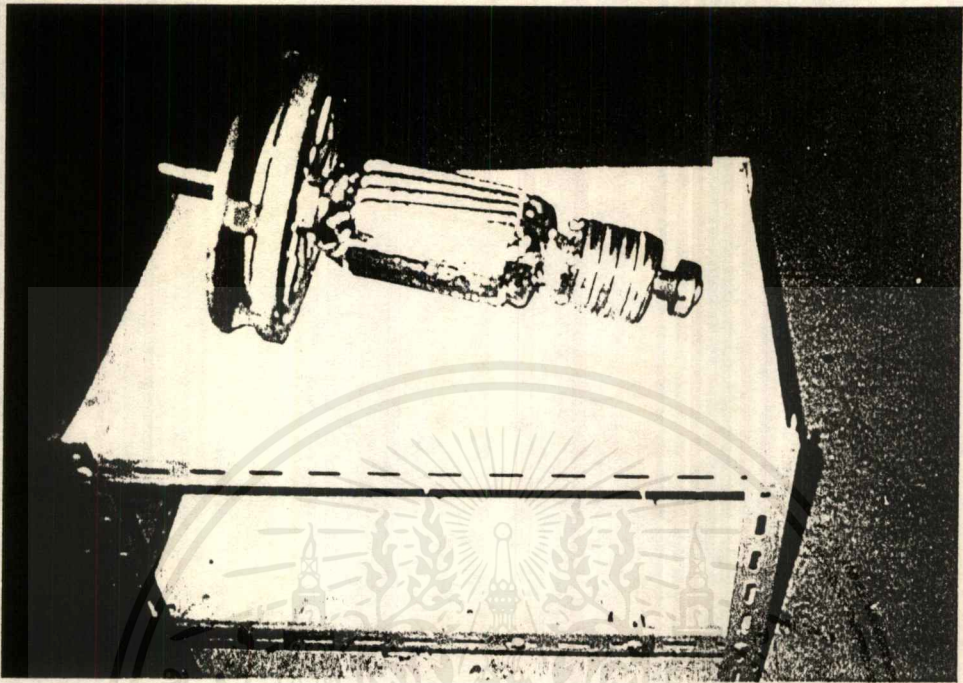
โรเตอร์และสเตเตอร์ที่ประกอบแล้วเสร็จ



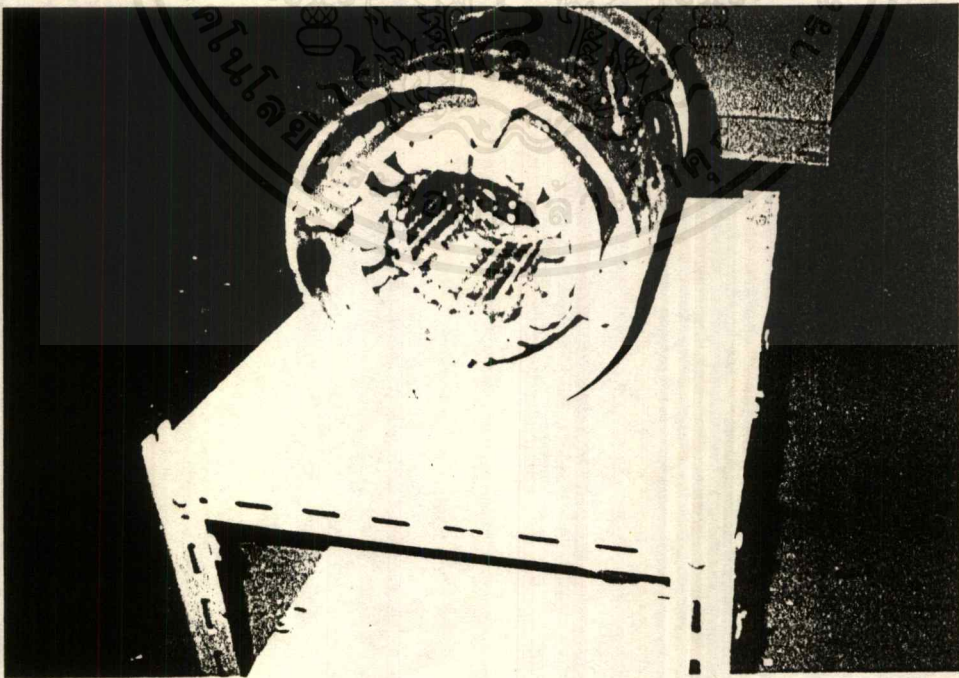
รูปที่ 35 โรเตอร์และสเตเตอร์



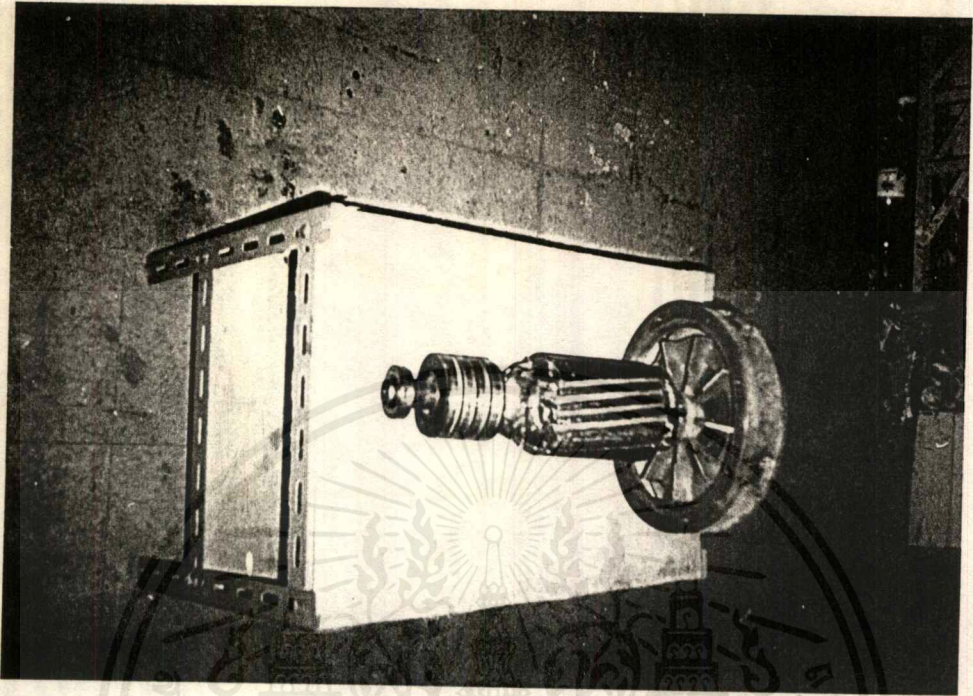
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



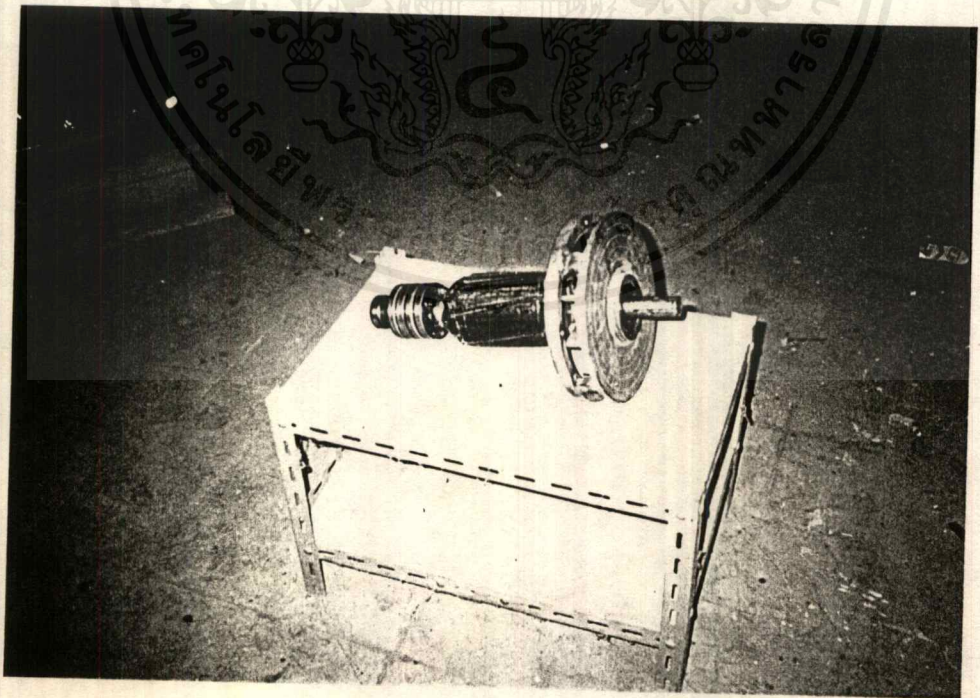
รูปที่ 36 โรเตอร์และสเตเตอร์



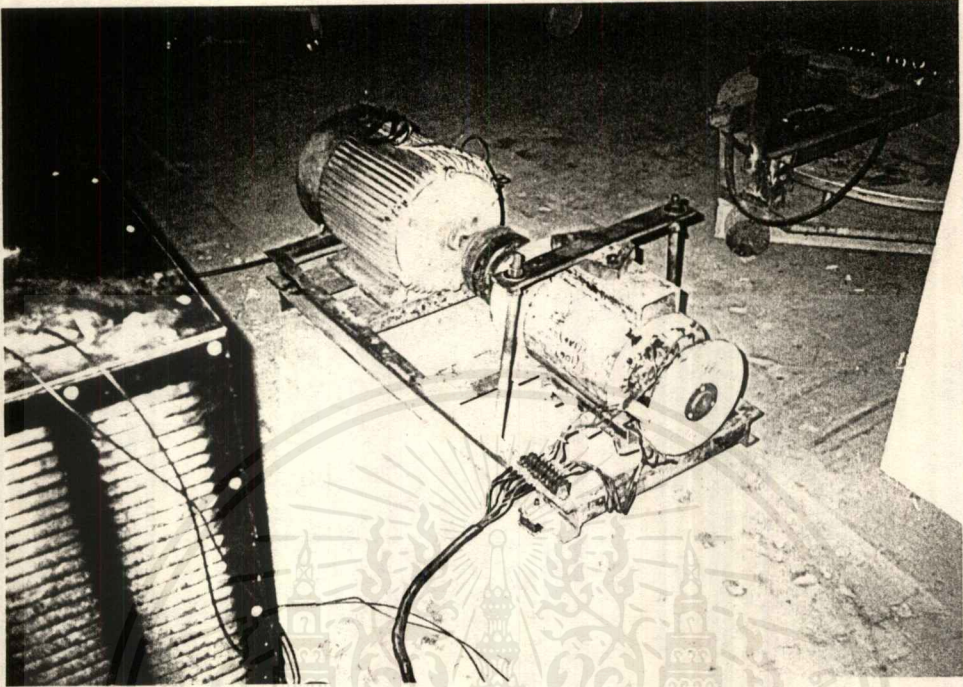
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



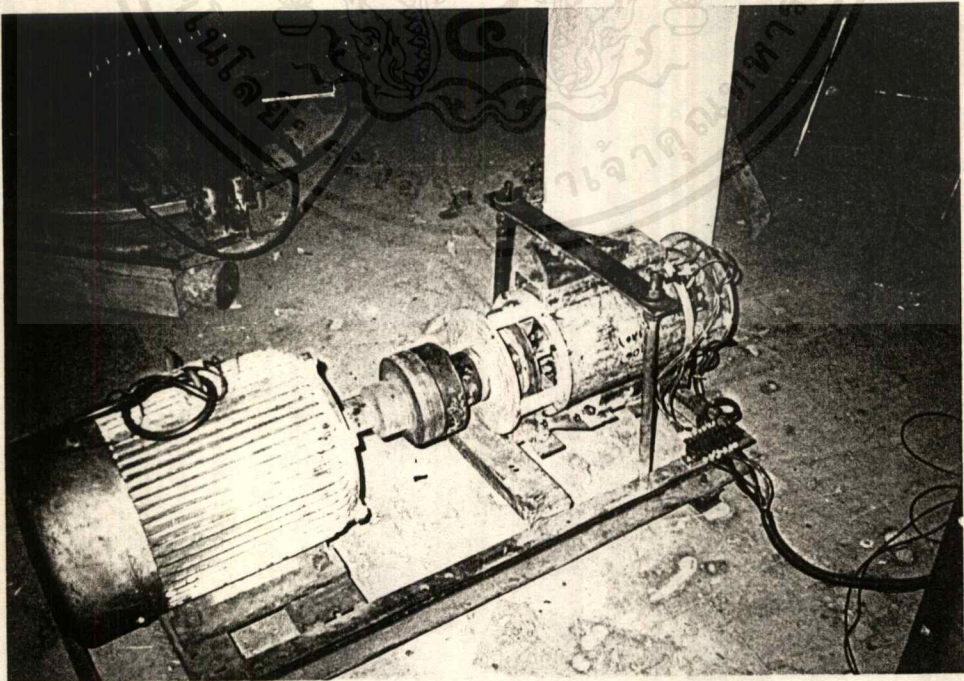
รูปที่ 37 โรเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 38 เยนเนอเรเตอร์ที่ประกอบกับตัวต้นกำลัง



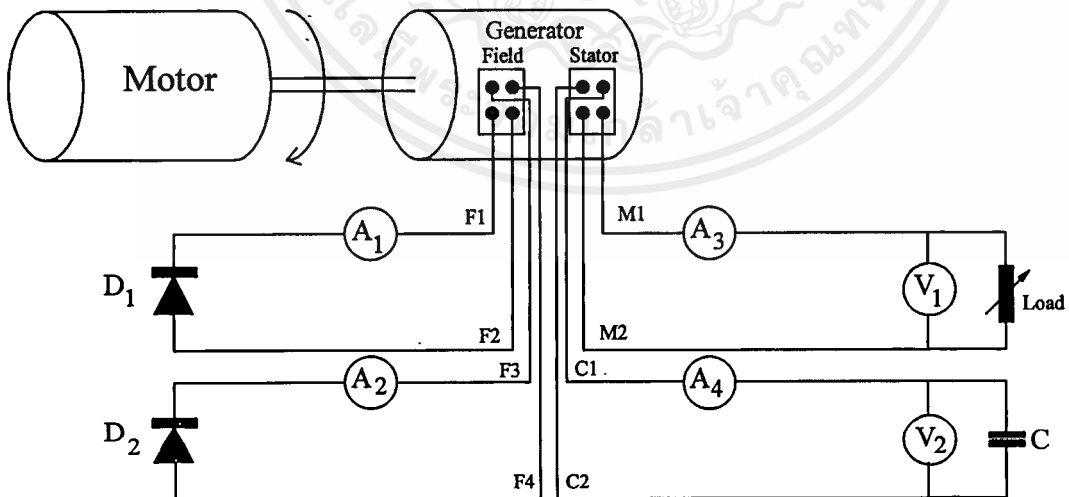
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

เมื่อทำการป้อนขึ้นรูปแผ่นเหล็ก Laminate ทั้งส่วนที่เป็นของ Rotor และส่วนของ Stator ได้ตามขนาดที่ระบุไว้ดังรายละเอียดดังที่กล่าวมาแล้ว จากนั้นก็ทำการเรียงแผ่นเหล็กเข้าด้วยกันโดยมีความยาวของแต่ละตัวเมื่อได้ความยาวตามรายละเอียดข้างบนทั้งของ Rotor และ Stator แล้วก็อัดแผ่นเหล็กให้แน่นที่ส่วนของ Stator ก็จะประกอบเข้ากับโครงสร้าง (Yoke) จากนั้นก็พันขดลวด (Winding) ทั้งสองส่วนตาม (Winding Diagram)

วงจรการทดลอง



รูปที่ 39 รูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปวงจรการทดลองข้างบน เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากตัวของโรเตอร์ (Rotor) และ สเตเตอร์ (Stator) ต้องใช้ Slip Ring และแปรงถ่าน Tag ต่อสายออก Jump กับอุปกรณ์และเครื่องวัดข้างนอกดังนี้คือ ไคโอด D_1 , D_2 แอมมิเตอร์ A_1 , A_2 Clamp on meter (เพื่อวัดมุมเฟาเวอร์แพคเตอร์ และกระแส A_3 , A_4) โดยที่รูปบล็อกที่ชื่อ Field เป็นบล็อกที่ Tag จากส่วนโรเตอร์ (Rotor) และ รูปบล็อกที่ชื่อ Stator เป็นบล็อกที่ Tab จากส่วนของสเตเตอร์ (Stator)

อุปกรณ์การทดลอง

1. โวลท์มิเตอร์ 2 ตัว
2. แอมป์มิเตอร์ 4 ตัว
3. ออสซิลอสโคป 1 ตัว
4. วัดคีมิตเตอร์ 2 ตัว
5. เครื่องวัดความเร็วรอบ 1 ตัว
6. วาริแอก 1 ตัว
7. มอเตอร์ 3-f 1 ตัว
8. ตู้โหลดขนาด 5 กิโลวัตต์
9. เชนเนอเรเตอร์

ก่อนเริ่มการทดลองจะต้องสร้างให้มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่โรเตอร์ของเอนเนอเรเตอร์เสียก่อน มิฉะนั้นแล้วเมื่อหมุนเอนเนอเรเตอร์ด้วยมอเตอร์ดังกล่าวที่เทอร์มินอลจะไม่มีโวลเตจออกมา การสร้างเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างกระทำได้โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวด Main Field โดยไม่ให้ค่ากระแสเกินพิกัดของขดลวดที่ทนได้ จากนั้นก็ขับเอนเนอเรเตอร์เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่โรเตอร์ของเอนเนอเรเตอร์แล้วก็ต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 31 โดยการใช่มอเตอร์ 3- ϕ 380 v. หมุนด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นตัวต้นกำลังขับเอนเนอเรเตอร์จากนั้นก็บันทึกผลการทดลอง ในการทดลองจะมีการปรับแต่งขนาดของค่าคาปาซิเตอร์และจำนวนรอบที่พันเพื่อให้ได้ตามจุดประสงค์

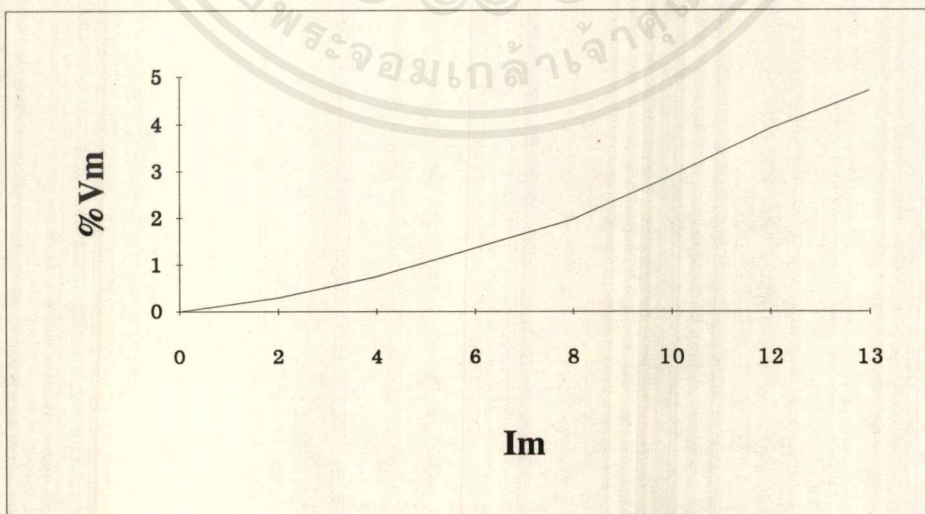
ตารางผลการทดลองและกราฟ

Resistor Load

STATOR MAIN 17 รอบ/slot AUXILIARY 35 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 60 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 1

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
225	0	301	7.4	52.1	3.4	2.6	49.9	0	0.00
224	2	304	7.5	53.0	3.7	2.4	49.8	449	0.30
223	4	309	7.8	58.3	4.1	2.2	49.6	893	0.75
222	6	315	8.1	68.0	4.6	2.1	49.5	1332	1.35
221	8	321	8.3	71.7	4.9	2.3	49.4	1765	1.96
219	10	326	8.6	75.4	5.4	2.5	49.2	2187	2.90
216	12	331	8.9	79.1	5.9	2.7	49.1	2592	4.17
214	13	332	9.0	80.3	6.1	2.8	49.0	2782	4.67



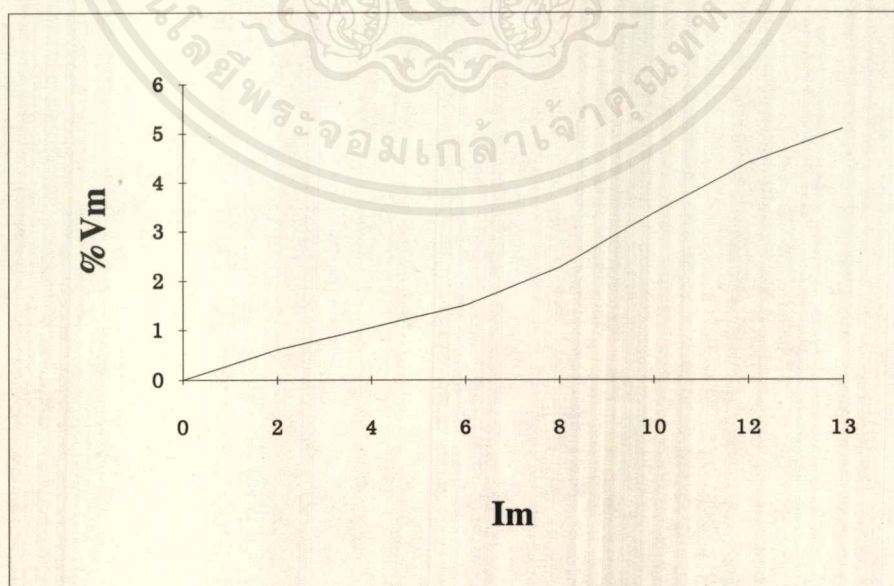
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 17 รอบ/slot AUXILIARY 36 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 58 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 2

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
225	0	314	6.9	51.6	3.5	2.7	49.9	0	0.00
224	2	318	7.1	56.1	3.8	2.4	49.8	447	0.60
223	4	322	7.3	61.3	4.1	2.2	49.6	891	1.05
222	6	326	7.5	67.1	4.4	2.1	49.5	1332	1.35
220	8	331	7.8	72.2	4.9	2.3	49.4	1760	2.27
218	10	336	8.1	75.2	5.4	2.5	49.3	2177	3.37
215	12	341	8.4	76.2	5.9	2.7	49.2	2580	4.65
213	13	343	8.5	77.0	6.2	2.8	49.0	2769	4.69



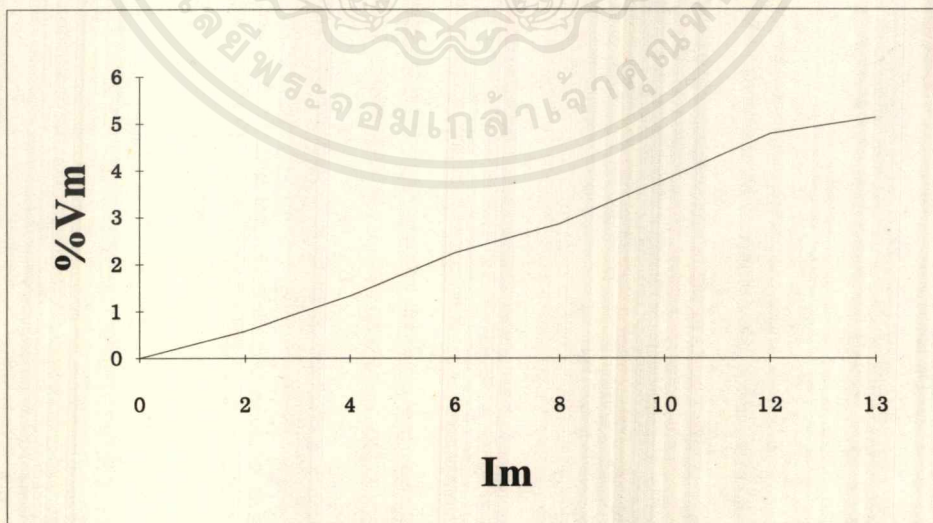
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 17 รอบ/slot AUXILIARY 37 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 56 ไมครอเฟร็ด

ตารางที่ 3

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
227	0	325	6.9	51.6	3.6	2.7	49.9	0	0.00
226	2	329	7.1	52.7	3.9	2.4	49.7	451	0.59
224	4	333	7.3	57.5	4.2	2.2	49.6	896	1.34
222	6	338	7.5	66.0	4.5	2.1	49.5	1332	2.25
221	8	343	7.8	71.6	5.0	2.3	49.4	1765	2.87
219	10	348	8.1	75.1	5.5	2.5	49.2	2187	3.81
216	12	352	8.4	76.4	6.0	2.7	49.1	2592	5.09
214	13	355	8.5	77.0	6.2	2.8	49.0	2782	5.14



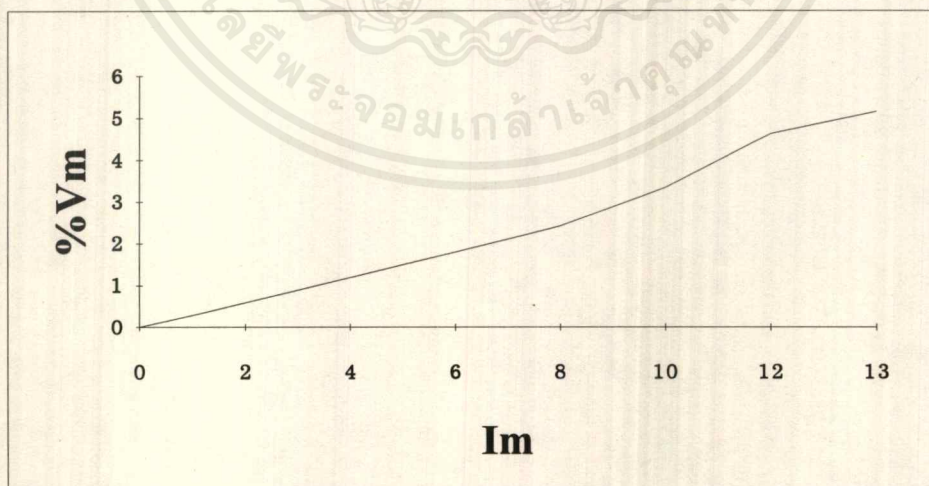
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 17 รอบ/slot AUXILIARY 38 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 53 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 4

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
226	0	333	6.7	51.6	3.6	2.7	49.9	0	0.00
225	2	338	6.8	55.6	3.9	2.4	49.8	449	0.59
223	4	342	7.0	60.9	4.2	2.2	49.6	893	1.19
222	6	347	7.2	67.4	4.6	2.1	49.5	1332	1.80
221	8	352	7.5	72.5	5.0	2.3	49.4	1765	2.42
219	10	357	7.7	75.4	5.4	2.5	49.2	2187	3.35
216	12	361	8.0	76.2	5.9	2.7	49.1	2592	4.63
213	13	364	8.2	77.1	6.2	2.8	49.1	2769	5.16



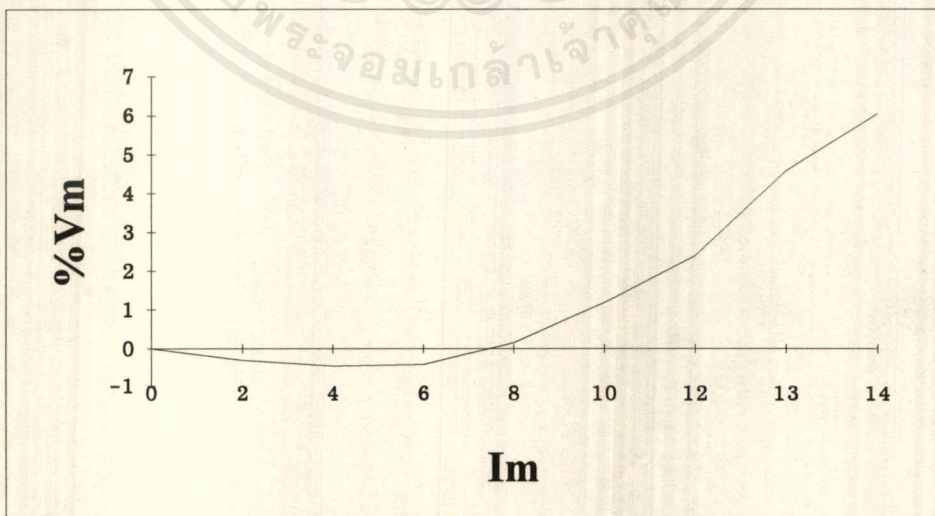
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 19 รอบ/slot AUXILIARY 35 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 53 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 5

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
227	0	275	5.6	51.5	2.8	2.2	50.0	0	0.00
228	2	282	5.8	59.9	3.1	1.9	49.9	455	-0.29
228	4	288	6.0	66.9	3.5	1.7	49.7	912	-0.44
228	6	295	6.3	72.5	4.0	1.8	49.6	1368	-0.44
227	8	301	6.6	74.7	4.5	2.1	19.8	1813	0.15
224	10	307	6.9	76.9	5.1	2.4	19.7	2243	1.19
221	12	313	7.2	79.1	5.8	2.7	49.2	2652	2.71
218	13	315	7.2	79.8	6.1	2.8	49.1	2834	4.59
215	14	316	7.4	80.4	6.4	3.0	49.0	3010	6.05



ตารางที่ 5

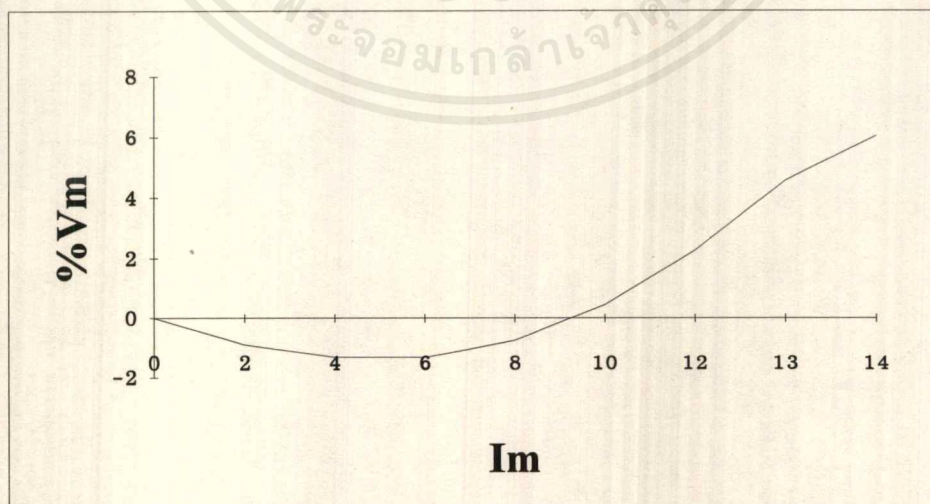
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 19 รอบ/slot AUXILIARY 36 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 50 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 6

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
225	0	280	5.4	51.0	2.8	2.2	49.9	0	0.00
227	2	289	5.7	57.3	3.1	1.9	49.8	454	-0.88
228	4	296	5.9	64.3	3.5	1.8	49.7	912	-1.32
228	6	303	6.2	72.0	4.0	1.8	49.5	1368	-1.32
227	8	310	6.5	74.0	4.6	2.1	49.4	1813	-0.74
224	10	316	6.7	76.0	5.2	2.4	49.2	2240	0.45
220	12	321	6.9	78.1	5.8	2.7	49.1	2640	2.27
218	13	324	7.2	78.9	6.1	2.8	49.1	2834	4.59
215	14	325	7.2	79.5	6.3	2.9	49.0	3010	6.05



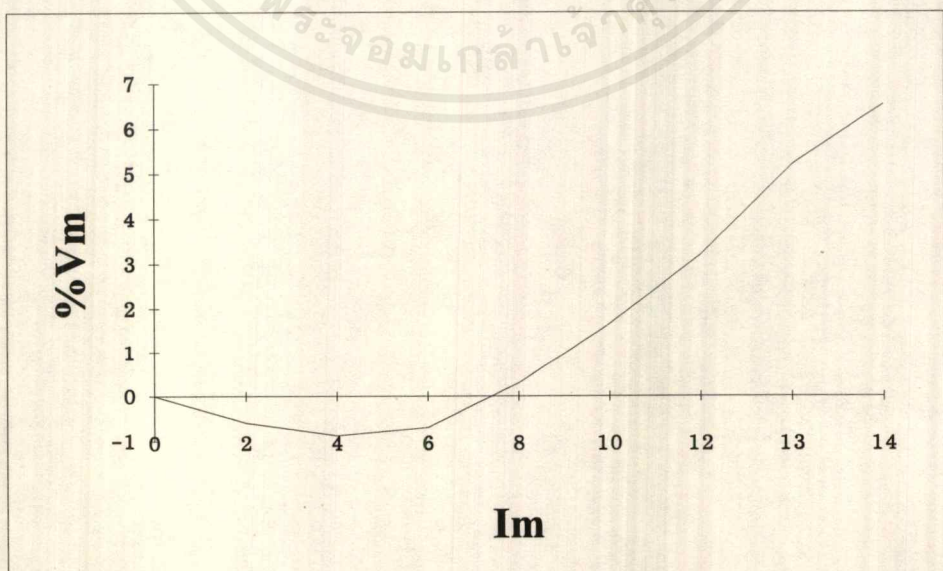
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 19 รอบ/slot AUXILIARY 37 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 44 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 7

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
226	0	289	5.2	57.8	2.8	2.2	49.9	0	0.00
227	2	296	5.4	63.4	3.1	1.9	49.8	455	-0.59
228	4	304	5.6	68.5	3.5	1.8	49.7	912	-0.88
228	6	311	5.9	73.2	4.0	1.8	49.5	1368	-0.88
225	8	318	6.2	75.4	4.6	2.1	49.4	1803	0.30
222	10	325	6.4	77.5	5.2	2.4	49.2	2223	1.65
219	12	330	6.7	79.5	5.8	2.7	49.1	2628	3.20
216	13	332	6.8	80.4	6.1	2.8	49.1	2808	5.56
214	14	334	6.9	80.9	6.4	3.0	49.0	2996	6.54



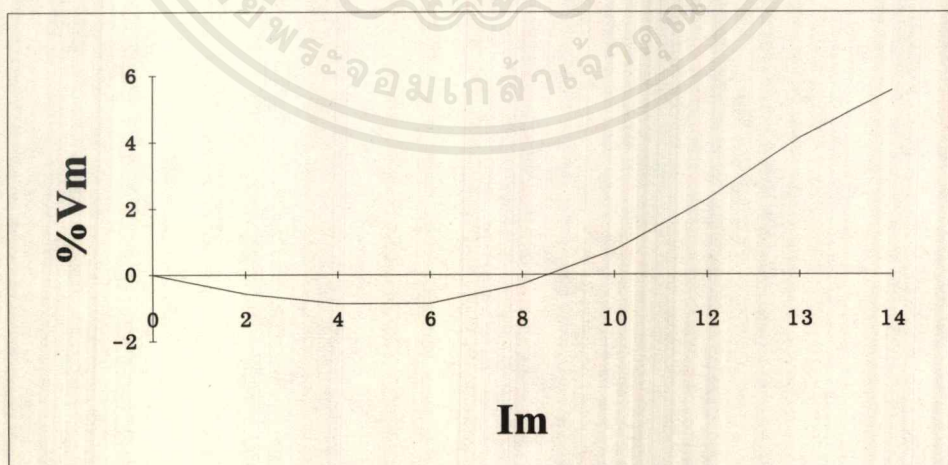
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 19 รอบ/slot AUXILIARY 38 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 42 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 8

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
226	0	298	5.2	57.8	2.8	2.3	49.8	0	0.00
227	2	305	5.3	63.5	3.1	2.0	49.7	455	-0.59
228	4	312	5.5	68.8	3.5	1.8	49.6	912	-0.88
228	6	321	5.8	73.8	4.0	1.8	49.5	1368	-0.88
227	8	328	6.1	75.2	4.7	2.1	49.4	1813	-0.29
224	10	335	6.4	76.8	5.3	2.4	49.3	2243	0.74
221	12	340	6.6	78.6	5.8	2.7	49.2	2652	2.26
219	13	344	6.7	79.5	6.2	2.8	49.1	2847	4.11
216	14	346	6.8	80.3	6.4	3.0	49.0	3024	5.56



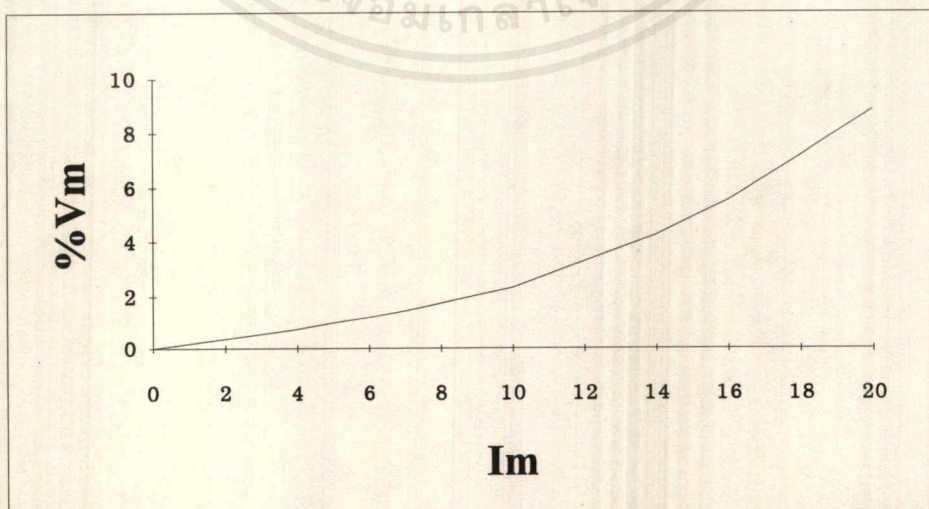
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 14 รอบ/slot AUXILIARY 34 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 56 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 9

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
221	0	357	7.5	74.4	2.8	3.0	49.9	0	0
220	2	360	7.6	75.1	3.0	2.8	49.8	440	0.36
219	4	363	7.7	75.8	3.3	2.6	49.7	878	0.73
218	6	367	7.8	76.1	3.5	2.5	49.6	1310	1.19
217	8	370	7.9	76.0	3.8	2.4	49.5	1738	1.75
216	10	373	8.0	75.9	4.1	2.3	49.3	2160	2.31
214	12	376	8.2	77.2	4.4	2.4	49.1	2568	3.27
212	14	379	8.4	78.5	4.7	2.5	48.9	2968	4.25
209	16	381	8.6	79.9	5.1	2.7	48.7	3350	5.54
206	18	384	8.7	81.5	5.6	3.0	48.5	3712	7.18
203	20	386	8.8	83.1	6.0	3.2	48.3	4060	8.87



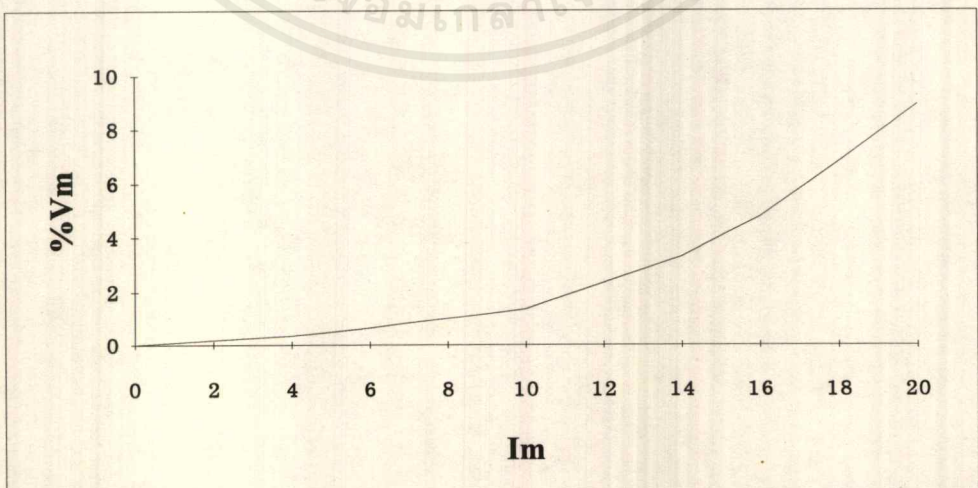
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 14 รอบ/slot AUXILIARY 35 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 52 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 10

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
220	0	367	7.2	74.4	2.8	3.0	49.9	0	0
220	2	371	7.3	75.1	3.0	2.8	49.8	439	0.18
219	4	374	7.4	75.8	3.3	2.6	49.7	877	0.36
219	6	378	7.6	76.2	3.5	2.5	49.5	1312	0.64
218	8	381	7.7	76.1	3.8	2.4	49.4	1742	1.01
217	10	385	7.8	76.1	4.1	2.3	49.3	2170	1.38
215	12	388	8.0	77.4	4.4	2.4	49.1	2580	2.33
213	14	391	8.1	78.7	4.7	2.5	48.9	2982	3.29
210	16	394	8.3	80.1	5.1	2.7	48.7	3360	4.76
206	18	397	8.4	81.6	5.6	3.0	48.5	3708	6.80
202	20	399	8.5	83.0	6.0	3.2	48.3	4040	8.91



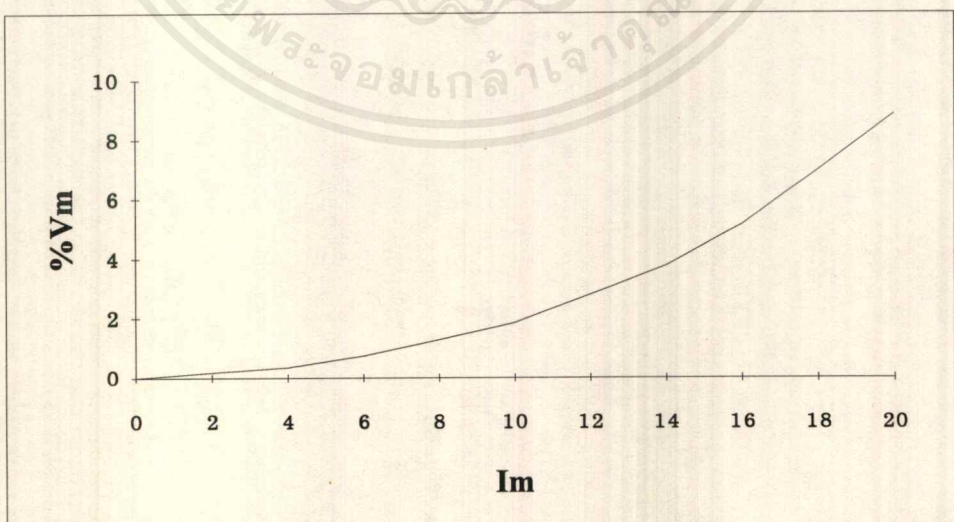
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 14 รอบ/slot AUXILIARY 36 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 50 ไมครอเฟร็ด

ตารางที่ 11

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
221	0	380	7.2	74.3	2.9	3.0	49.9	0	0
221	2	383	7.3	75.1	3.1	2.8	49.8	441	0.18
220	4	386	7.4	75.8	3.3	2.6	49.7	881	0.36
219	6	390	7.4	76.1	3.5	2.5	49.5	1316	0.73
218	8	393	7.5	76.0	3.8	2.4	49.4	1746	1.28
217	10	397	7.6	75.9	4.1	2.3	49.3	2170	1.84
215	12	400	7.8	77.2	4.4	2.4	49.1	2580	2.79
213	14	403	7.9	78.5	4.7	2.5	48.9	2982	3.76
210	16	406	8.1	79.9	5.1	2.7	48.7	3363	5.14
207	18	409	8.2	81.4	5.6	3.0	48.5	3719	6.97
203	20	412	8.4	82.8	6.0	3.2	48.3	4060	8.87



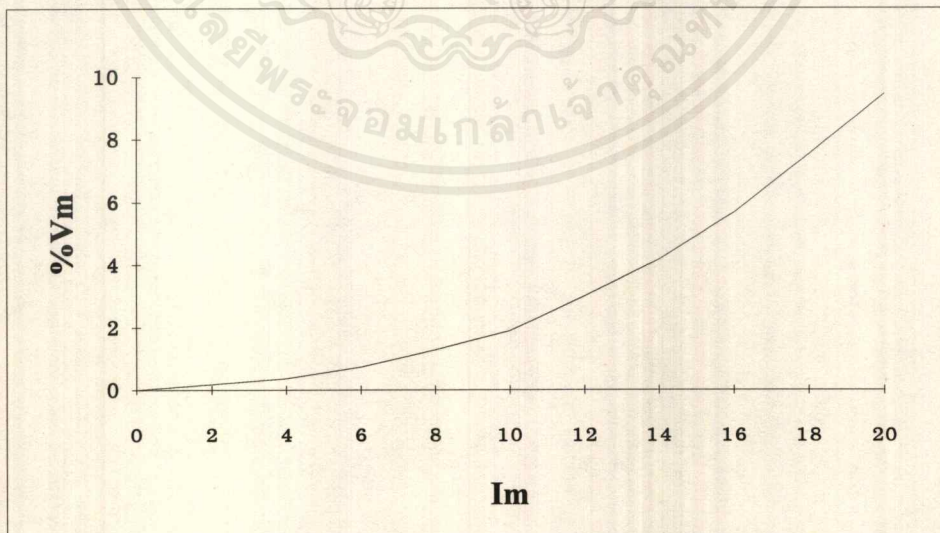
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 14 รอบ/slot AUXILIARY 37 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 47 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 12

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
220	0	388	6.8	74.1	2.8	3.0	49.9	0	0
220	2	391	6.8	74.7	3.1	2.8	49.8	439	0.18
219	4	394	6.9	75.3	3.4	2.5	49.7	877	0.36
218	6	398	7.0	75.7	3.7	2.4	49.5	1310	0.73
217	8	402	7.1	75.8	3.9	2.3	49.4	1738	1.29
216	10	406	7.3	75.9	4.1	2.3	49.3	2160	1.85
214	12	410	7.5	77.5	4.5	2.4	49.1	2563	3.00
211	14	413	7.6	79.0	4.8	2.5	48.9	2957	4.17
208	16	416	7.8	80.5	5.2	2.7	48.7	3331	5.67
205	18	418	7.9	82.0	5.6	3.0	48.5	3683	7.53
201	20	420	8.0	83.4	6.0	3.2	48.3	4020	9.45



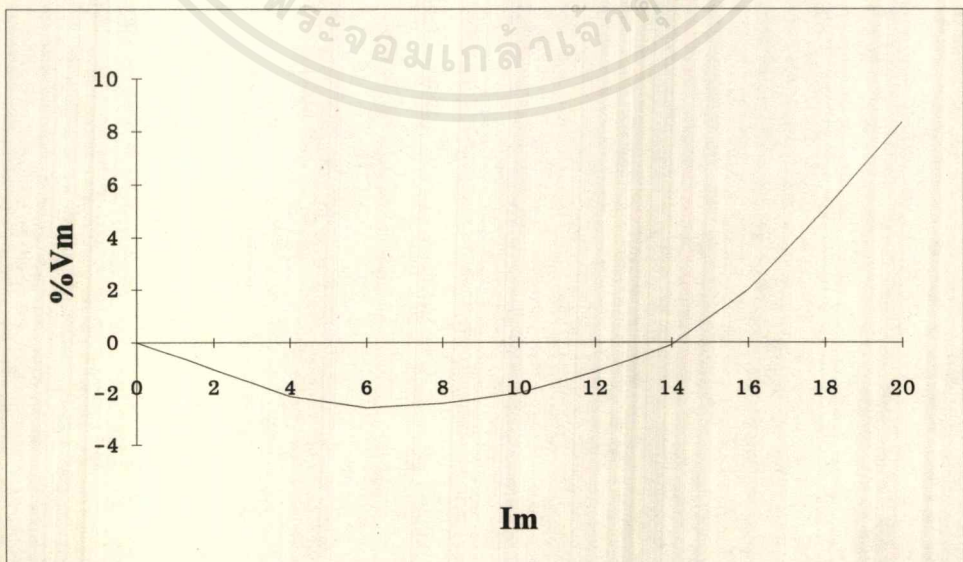
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 16 รอบ/slot AUXILIARY 32 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 50 ไมครอเฟร็ด

ตารางที่ 13

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
220	0	288	5.5	71.3	2.1	2.0	49.9	0	0
222	2	296	5.7	71.7	2.4	1.8	49.8	445	-1.08
225	4	304	5.9	72.1	2.7	1.7	49.7	899	-2.14
226	6	311	6.1	73.4	3.1	1.7	49.5	1355	-2.57
225	8	318	6.4	75.5	3.5	1.8	49.4	1803	-2.40
225	10	325	6.7	77.6	3.9	2.0	49.3	2250	-2.22
223	12	329	6.9	79.8	4.4	2.3	49.1	2671	-1.17
220	14	334	7.2	81.9	4.9	2.6	48.9	3083	-0.09
216	16	337	7.4	83.3	5.4	2.9	48.7	3453	1.95
209	18	338	7.5	84.0	5.9	3.2	48.5	3769	5.06
203	20	340	7.7	84.7	6.4	3.5	48.3	4060	8.37



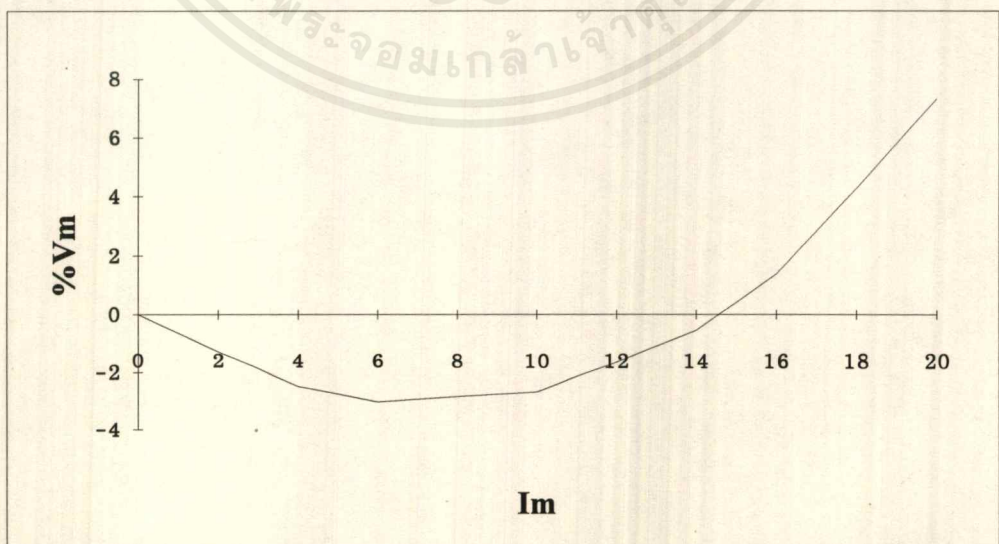
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 16 รอบ/slot AUXILIARY 33 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 47 ไมครอเฟร็ด

ตารางที่ 14

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
219	0	296	5.3	71.3	2.1	2.0	49.9	0	0
222	2	304	5.5	71.8	2.4	1.8	49.8	444	-1.26
225	4	313	5.7	72.3	2.7	1.6	49.7	898	-2.49
226	6	321	5.9	73.6	3.0	1.6	49.5	1355	-3.01
225	8	328	6.2	75.7	3.5	1.8	49.4	1803	-2.84
225	10	336	6.4	77.9	3.9	2.0	49.3	2250	-2.67
223	12	340	6.6	79.9	4.3	2.3	49.1	2671	-1.62
220	14	345	6.9	82.0	4.8	2.6	48.9	3083	-0.54
216	16	348	7.1	83.3	5.3	2.8	48.7	3456	1.39
210	18	349	7.2	84.0	5.8	3.1	48.5	3780	4.29
204	20	351	7.4	84.6	6.3	3.4	48.3	4080	7.35



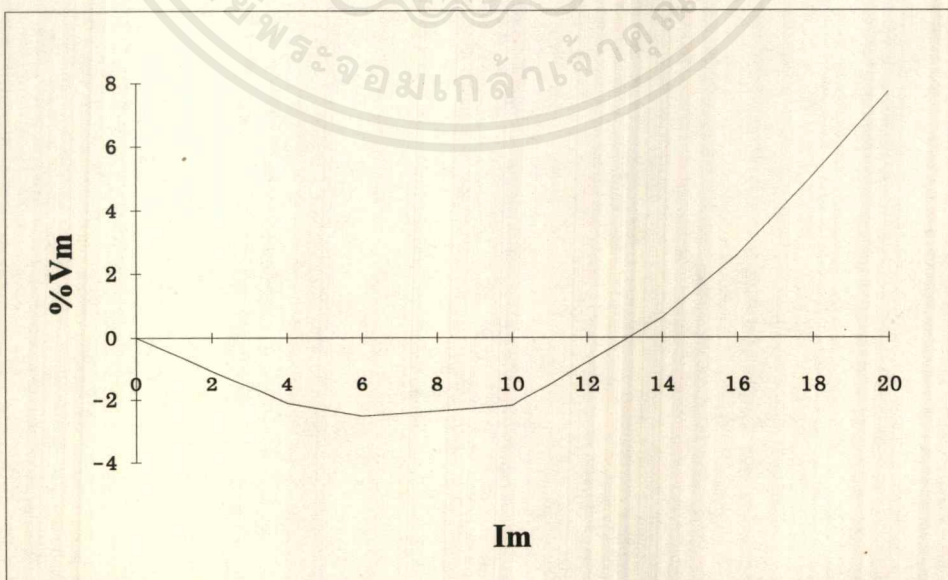
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 16 รอบ/slot AUXILIARY 34 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 45 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 15

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
223	0	310	5.3	72.2	2.2	2.1	49.9	0	0
225	2	318	5.5	72.5	2.5	1.9	49.8	451	-1.06
228	4	326	5.7	72.8	2.8	1.7	49.7	911	-2.11
229	6	334	5.9	73.9	3.1	1.7	49.5	1373	-2.53
228	8	341	6.2	76.0	3.6	1.9	49.4	1827	-2.36
228	10	348	6.4	78.0	4.0	2.1	49.3	2280	-2.19
225	12	352	6.6	80.0	4.5	2.4	49.1	2698	-0.80
222	14	357	6.8	82.1	5.0	2.7	48.9	3102	0.63
217	16	360	7.0	83.4	5.4	2.9	48.7	3478	2.58
212	18	361	7.1	84.1	5.9	3.2	48.5	3820	5.09
207	20	363	7.3	84.8	6.3	3.5	48.3	4140	7.73



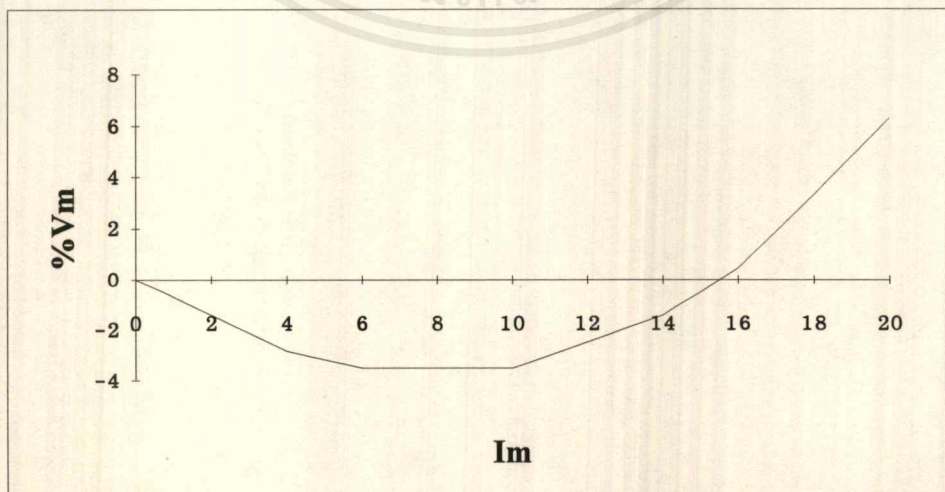
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 16 รอบ/slot AUXILIARY 35 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 42 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 16

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
219	0	315	5.0	71.7	2.1	2.0	49.9	0	0
222	2	325	5.2	72.1	2.5	1.8	49.8	444	-1.44
225	4	334	5.4	72.6	2.8	1.7	49.7	902	-2.84
227	6	343	5.6	73.8	3.2	1.7	49.5	1362	-3.52
227	8	350	5.9	75.9	3.6	1.8	49.4	1816	-3.52
227	10	357	6.1	78.0	4.0	2.0	49.3	2270	-3.52
225	12	362	6.3	80.0	4.5	2.3	49.1	2695	-2.49
222	14	367	6.6	82.0	5.0	2.6	48.9	3111	-1.44
218	16	371	6.8	83.4	5.4	3.0	48.7	3488	0.46
212	18	374	6.9	84.1	5.9	3.3	48.6	3816	3.30
206	20	376	7.1	84.8	6.4	3.6	48.5	4120	6.31



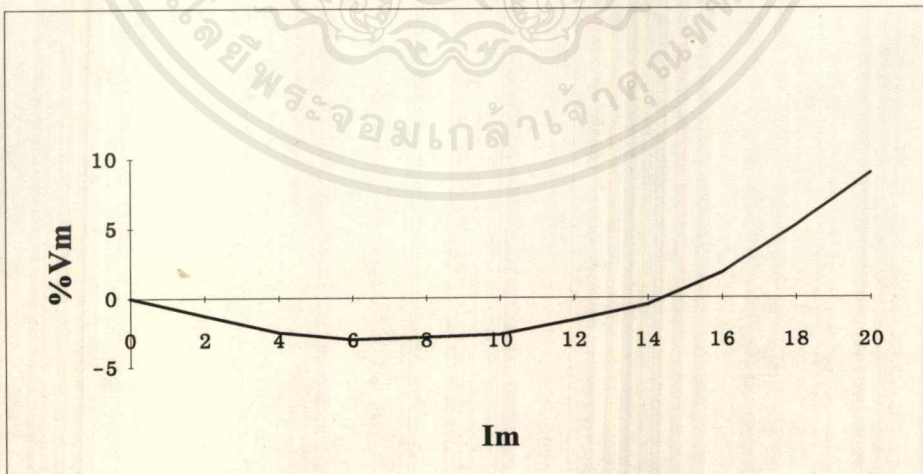
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 16 รอบ/slot AUXILIARY 36 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 40 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 17

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
220	0	325	4.9	71.7	2.1	2.0	50.0	0	0
223	2	334	5.1	72.1	2.4	1.8	49.8	446	-1.26
226	4	343	5.2	72.4	2.7	1.7	49.7	902	-2.48
227	6	352	5.4	73.7	3.1	1.7	49.5	1361	-3.00
226	8	359	5.7	76.0	3.6	1.9	49.4	1811	-2.83
226	10	366	5.9	78.3	4.0	2.1	49.3	2260	-2.65
224	12	371	6.1	80.2	4.5	2.4	49.1	2683	-1.61
221	14	376	6.3	82.1	5.0	2.7	48.9	3097	-0.54
216	16	380	6.5	83.4	5.4	3.0	48.7	3462	1.66
209	18	381	6.6	84.1	5.9	3.3	48.5	3766	5.16
202	20	383	6.8	84.8	6.4	3.6	48.3	4040	8.91



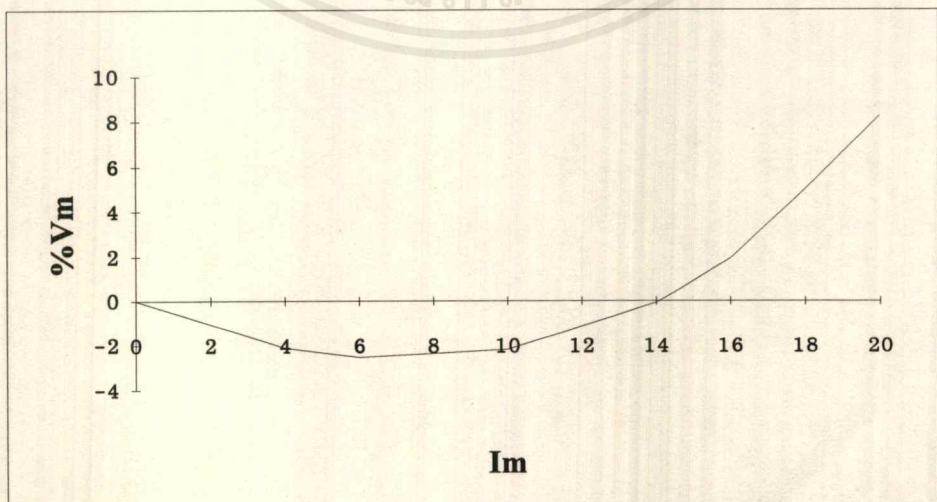
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 16 รอบ/slot AUXILIARY 37 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 37 ไมโครฟารัด

ตารางที่ 18

Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
223	0	336	4.8	71.4	2.2	2.0	50.0	0	0
225	2	344	5.0	71.7	2.5	1.8	49.8	451	-1.06
228	4	353	5.1	72.0	2.8	1.7	49.7	911	-2.11
229	6	361	5.3	73.5	3.1	1.7	49.5	1373	-2.53
228	8	369	5.6	76.0	3.6	1.9	49.3	1827	-2.36
228	10	377	5.9	78.5	4.0	2.1	49.1	2280	-2.19
226	12	382	6.1	80.2	4.5	2.4	49.0	2707	-1.15
223	14	387	6.2	81.9	5.0	2.7	48.9	3125	-0.09
219	16	390	6.4	83.2	5.4	2.9	48.7	3501	1.92
212	18	392	6.5	83.9	5.9	3.2	48.4	3823	4.99
206	20	394	6.7	84.6	6.4	3.5	48.2	4120	8.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

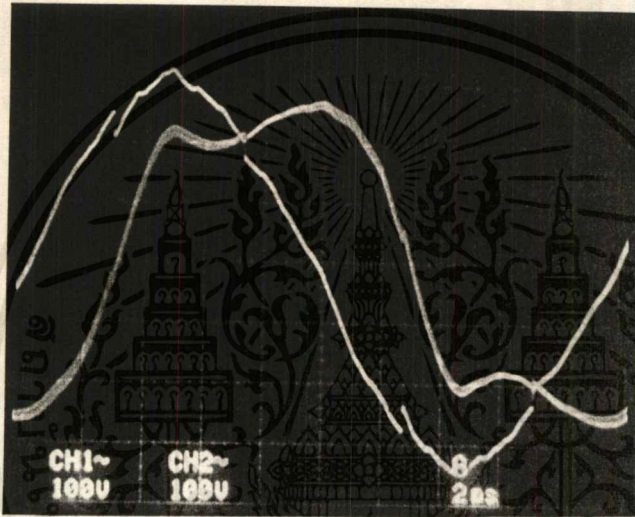
Load-Test Resistor Load

STATOR MAIN 16 รอบ/slot AUXILIARY 36 รอบ/slot
 ROTOR MAIN 190 รอบ/pole AUXILIARY 104 รอบ/pole
 ใช้ CAPACITOR ขนาด 40 ไมครอเฟร็ด

ตารางที่ 19

T(min.)	Vm	Im	Vc	Ic	θ	Ifm	Ifc	Hz.	W	%Vm
0	218	0	324	5.5	68.9	2.3	2.7	49.9	0	0
10	216	17	377	7.1	82.7	5.2	2.7	48.8	3672	0.93
20	212	17	375	7.1	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
30	212	17	375	7.1	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
40	212	17	375	7.1	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
50	212	17	375	7.1	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
60	212	17	375	7.0	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
70	212	17	375	7.1	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
80	212	17	375	7.1	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
90	212	17	375	7.0	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83
100	212	17	375	7.0	82.7	5.2	2.7	48.7	3604	2.83

ลักษณะรูปคลื่น Output

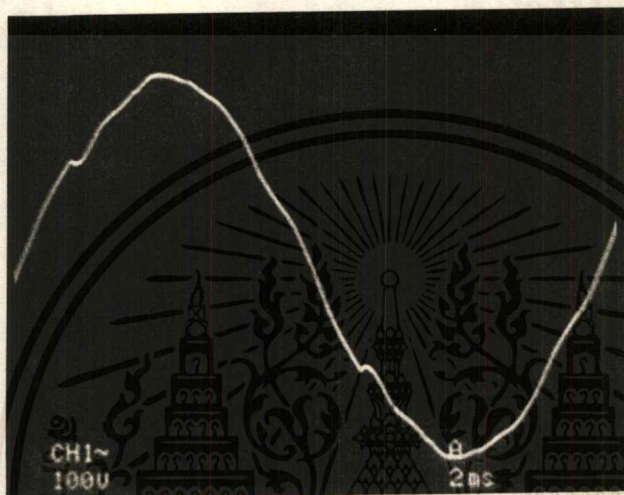


Main => CH1 : 100V/div.

Auxiliary => CH2 : 100V/div. Time : 2 mSec/div.

รูปที่ 40 ลักษณะรูปคลื่นของขด Main และ Auxiliary ขณะ No-Load

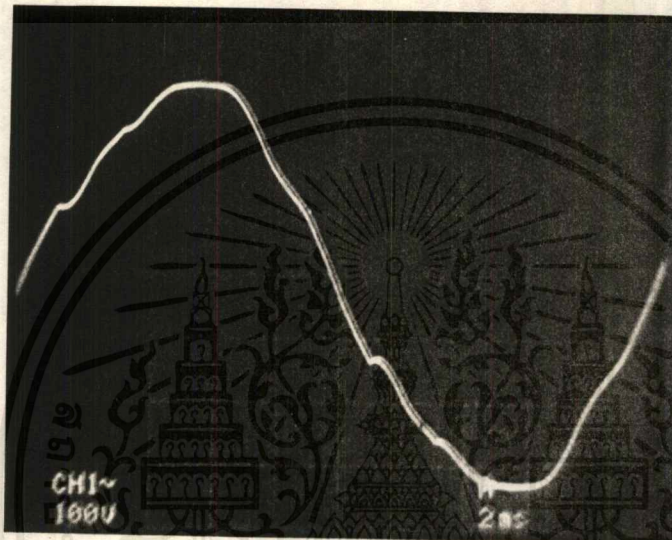
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Main => CH1 : 100V/div. Time : 2 mSec/div

รูปที่ 41 ลักษณะรูปคลื่นของขด Main ขณะ Half-Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



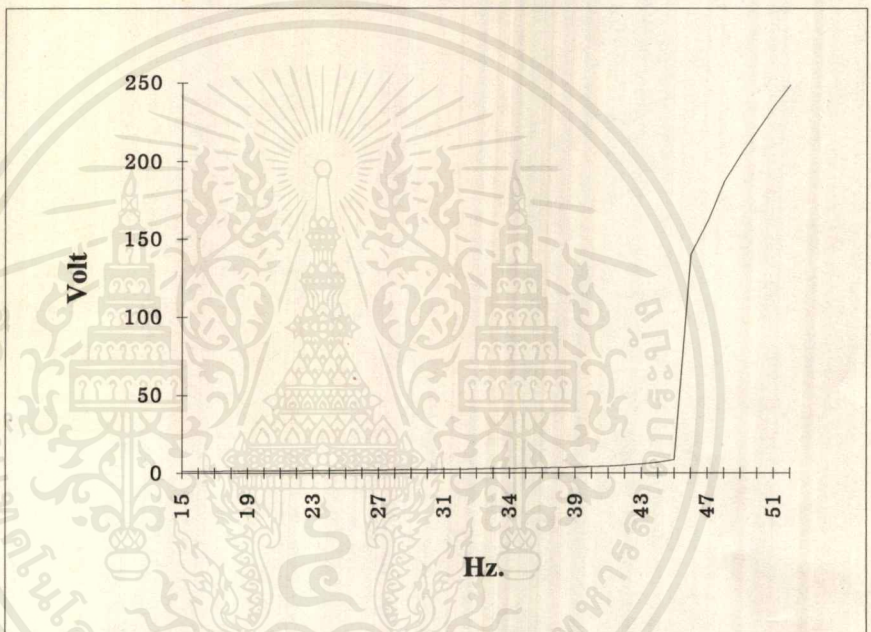
Main => CH1 : 100V/div. Time : 2 mSec/div

รูปที่ 42 ลักษณะรูปคลื่นของขด Main ขณะ Full-Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดัน

Hz	Volt
15	1.3
16	1.3
17	1.3
18	1.5
19	1.5
20	1.5
21	1.6
22	1.6
23	1.8
24	1.8
25	1.9
26	2
27	2
28	2.1
29	2.2
30	2.3
31	2.4
32	2.5
33	2.6
34	2.7
34	2.8
36	3
37	3.2
38	3.5
39	3.7
40	4
41	4.4
42	5
43	5.7
44	6.8
45	8.6
46	140
47	161
48	187
49	204
50	220
51	235
52	249



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

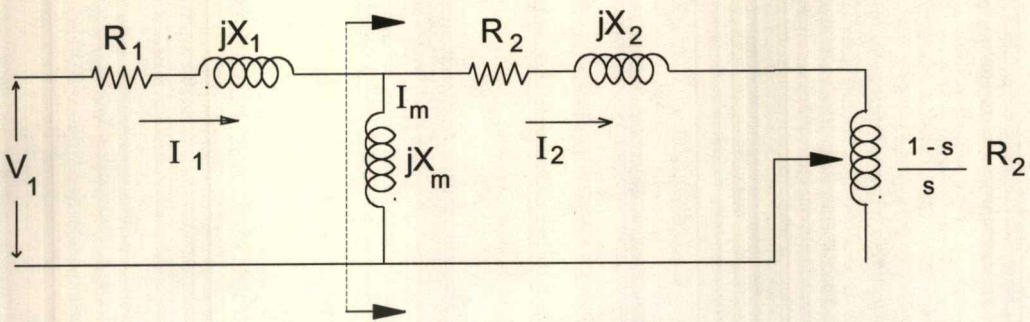
ตารางที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ เรกิวเร้นของศักดา กับเรกิวเร้นของ
ความถี่ขณะจ่ายโหลด 1800 วัตต์

ความถี่		ศักดาไฟฟ้า	
Hz	%	Volt	%
50	0	217	0
49.5	1.01	224	3.125
49	2.04	218	0.45
48.5	3.09	211	2.84
48	4.16	204	6.37
47.5	5.26	198	9.59

ตารางที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ เรกิวเร้นของศักดา กับเรกิวเร้นของ
ความถี่ขณะจ่ายโหลด 3,750 วัตต์

ความถี่		ศักดาไฟฟ้า	
Hz	%	Volt	%
50	0	217	0
49.5	1.01	223	2.69
49	2.04	218	0.45
48.5	3.09	212	2.35
48	4.16	206	5.33
47.5	5.26	201	7.96

การหาค่า Parameter ต่าง ๆ



รูปที่ 43 วงจรสมมูลย์ ของการหาค่า Parameter

No-load Test

$$\begin{aligned}
 P_o &= 552 \text{ W.} \\
 I_o &= 1.82 \text{ A.} \\
 V_o &= 232 \text{ V.} \\
 \phi_o &= \cos^{-1} \left(\frac{P_o}{3V_o I_o} \right) = 64^\circ \\
 I_\phi &= I_o = 1.82 \text{ A.} \\
 I_m &= I_o \sin \phi_o = 1.64 \text{ A.} \\
 I_c &= I_o \cos \phi_o = 0.798 \text{ A.} \\
 R_c &= V_o / I_c = 291 \ \Omega \\
 X_m &= V_o / I_m = 141 \ \Omega
 \end{aligned}$$

Block Rotor Test

$$\begin{aligned}
 P_b &= 8485 \text{ W.} \\
 I_b &= 30.6 \text{ A.} \\
 V_b &= 235 \text{ V.} \\
 Z_b &= V_b / I_b = 7.68 \ \Omega \\
 R_b &= \frac{P_b}{3I_b^2} = 3.02 \ \Omega \\
 X_b &= \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} = 7.06 \ \Omega \\
 R_b &= R_1 + R_2 \quad ; \quad X_b = X_1 + X_2
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก V-I Method กำหนดหาค่า R_1 ได้ค่าคือ 2.52 Ω

ดังนั้น $R_2 = 0.5 \Omega$

$$\text{ที่ } N_r = 2935 \text{ ได้ } \%S = 2.2\%$$

$$Z_f = \left(\frac{R_2}{S} + jX_2 \right) // jX_m$$

$$= 21.6 + j5.23 \Omega$$

$$Z_t = 24.12 + j10.74 = 26.4 \angle 24 \Omega$$

$$I_1 = V_1 / Z_t = 8.9 \text{ A.}$$

$$P_g = 3(I_1)^2 R_f = 5132.8 \text{ W.}$$

$$P = (1-s)P_g = 5019.88 \text{ W.}$$

$$\text{Power O/P} = P - P_{\text{fix}}$$

จาก No-load Test ได้ $P_{\text{fix}} = 552 \text{ W.}$

$$\therefore \text{Power O/P} = 5019.88 - 552 = 4467.88 \text{ W.}$$

ประสิทธิภาพของ Motor (η_m)

$$\text{Stator CU. loss} = 3(I_1)^2 R_1 = 3(8.9)^2 (2.52) = 598 \text{ W.}$$

$$\text{Friction, Windage และ Core-loss} = 552 \text{ W.}$$

$$\text{Total loss} = 552 + 598 = 1150 \text{ W.}$$

$$\% \eta_m = \frac{\text{O/P}}{\text{I/P}} * 100 = \frac{\text{O/P}}{\text{O/P} + \text{loss}} * 100 = \frac{4467.88}{4467.88 + 1150} * 100 = 80\%$$

ประสิทธิภาพของ Generator (η_g)

$$\text{Power O/P ของ Motor} = \text{Power I/P ของ Generator}$$

$$= 4467.88 \text{ W.}$$

จากตารางที่ 19 หน้า 80

$$\text{Power O/P ของ Generator ขณะ Full load} = 3604 \text{ W.}$$

$$\% \eta_g = \frac{\text{O/P}}{\text{I/P}} * 100 = \frac{3604}{4467.88} * 100 = 81\%$$

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การทดสอบแต่ละตารางแสดงผลต่าง ๆ กันนั้น เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องกำเนิดชนิดนี้ สามารถผลิตได้หลายกรรมวิธี โดยผู้ผลิตต้องคำนึงถึงลักษณะและคุณสมบัติของการทำงานเป็นหลัก รวมทั้งวัสดุอุปกรณ์สำหรับการผลิตด้วย และสิ่งที่ต้องคำนึงเป็นอย่างยิ่งสำหรับผู้ผลิต คือ ต้นทุนการผลิต และเครื่องจักรสำหรับผลิต

ผลจากการทดลองในโครงการนี้ พอจะสรุปได้ดังนี้

1. ถ้าลักษณะโครงสร้างเหมือนกันทุกประการ กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ (kVA) ขึ้นอยู่กับความยาวของแกนแม่เหล็กตามแนวนอน ตารางผลการทดลองที่ 1-8 เครื่องกำเนิดชนิดนี้สามารถจ่ายโหลดได้สูงสุด 3024 VA

ตารางที่ 9-17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้สามารถจ่ายโหลดได้สูงสุด 4140 VA

ผลของการทดลองนั้นได้แสดงผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ชุด โดยใช้ตารางที่ 1-8 คือ ผลแสดงของชุดที่ 1 และตารางที่ 9-17 คือผลแสดงของชุดที่ 2

เครื่องจักร	ความยาวแกนแม่เหล็ก	กำลังสูงสุด	กำลังใช้งาน
ชุดที่ 1	130 mm	3024 VA	2750 VA
ชุดที่ 2	150 mm	4140 VA	3600 VA

จากผลการเพิ่มความยาวของแกนแม่เหล็กตามแนวนอน 20 mm จะได้กำลังเพิ่ม 850 VA นั้นหมายความว่า ถ้าต้องการ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 kVA ความยาวของแกนแม่เหล็กตามแนวนอนมีค่าเท่ากับ 183 mm

2. การเลือกค่าของคาปาซิเตอร์ให้เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับ θ_c (มุมระหว่าง V_c กับ I_c) ผลการทดลองนั้นเมื่อค่า V_m เท่ากับ θ_c จะมีค่าใกล้เคียงกัน(เครื่องจักรเดียวกัน)

θ_c : กำหนดค่าที่ V_m

V_c : จะแปรผันตามจำนวนรอบ Auxiliary ใน Stator

I_c : จะแปรผันตามขนาดความจุของคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าศักดา V_m จะแปรผันตามความถี่(ความเร็วรอบของตัวต้นกำลัง)

Hz.	V_m	หมายเหตุ
45	8.6	
45.7	133	Build-up
46	140	
47	161	
48	187	
49	204	
50	220	
51	235	
52	249	

4.เปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกิวเรชั่นจะขึ้นอยู่กับโหลดและความถี่

Hz.	No Load		Half Load		Full Load	
	V_m	% V_m	V_m	% V_m	V_m	% V_m
50	220	-	217	-	217	-
49.5	212	3.77	224	3.12	223	2.69
49	204	7.84	218	0.45	218	0.45
48.5	196	12.24	211	2.84	212	2.35
48	187	17.64	204	6.37	206	5.33
47.5	172	27.9	198	9.59	201	7.96

5. การออกแบบลักษณะรูปคลื่น Output

5.1 จำนวนรอบของ Armature Winding

- จำนวนรอบมากให้กำลังสูงขึ้นและสามารถปรับศักดา V_m ได้มากลักษณะรูปคลื่นไม่ดี
- จำนวนรอบน้อยให้กำลังต่ำกว่าและสามารถปรับศักดา V_m ได้น้อยกว่าลักษณะรูปคลื่นดี

กว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การกำหนด Winding Factor (K_w) ของ Armature Winding

$$\frac{Y_s}{Y_p} = 1 \quad \text{ลักษณะรูปคลื่นไม่ดี}$$

$$\frac{Y_s}{Y_p} = \frac{2}{3} \quad \text{ลักษณะรูปคลื่นดีที่สุด}$$

6. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ สามารถใช้งานลักษณะต่อเนื่อง และสามารถใช้งานกับตัวต้นกำลังได้ทุกชนิดได้ดี มีประสิทธิภาพ 81 %

จากกรรมวิธีการผลิตและการทดลองนั้น ลักษณะโครงสร้างมีขั้นตอนการผลิตมากมายซึ่งแต่ละขั้นตอนต้องมีความรอบคอบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อน เช่น

1. การ Pump แผ่นเหล็กของ โรเตอร์และสเตเตอร์ ต้องให้ได้ระยะเพื่อให้ได้ช่องอากาศน้อยที่สุดและไม่เกิดการเสียดสีของการหมุน
2. การลงลวดเนื่องจากสล็อตมีพื้นที่น้อยต้องระมัดระวังไม่ให้ลวดชำรุด

สำหรับการทดลองนั้นต้องเก็บข้อมูลอย่างละเอียดทุกขั้นตอนเพื่อประมวลและสรุปแต่ละครั้งให้ค่าที่ใกล้เคียงโดยได้ทำการ Winding และปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ตามตารางการทดลองขั้นต้นและการสรุปผลที่ผ่านมา

โครงการนี้ต้องผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเดียวกันถึง 2 ขนาดเพื่อแสดงค่าเปรียบเทียบต่าง ๆ ให้ได้ผลถูกต้องตามแนวคิดและทฤษฎีมากที่สุด แต่ผลการทดลองและบทสรุปอาจจะไม่ใช่ผลที่ดีที่สุดสำหรับเราเพียงแต่หวังว่าโครงการจะเป็นประโยชน์ต่อส่วนรวมบ้าง

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้หากมีความดีที่เกิดขึ้น ขอมอบให้แก่ พ่อ แม่ และผู้มีพระคุณ
ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ พิชิต ล้ายอง ที่ให้คำแนะนำในการจัดทำ
ปริญญาบัตรฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี
และขอขอบพระคุณ

บริษัท ไทยเนอเนอเรเตอร์ แอน เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
บริษัท โรบอทิกส์ คอมพิวเตอร์ จำกัด
คุณ เขมทัต สุคนธสิงห์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
และอีกหลาย ๆ ท่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

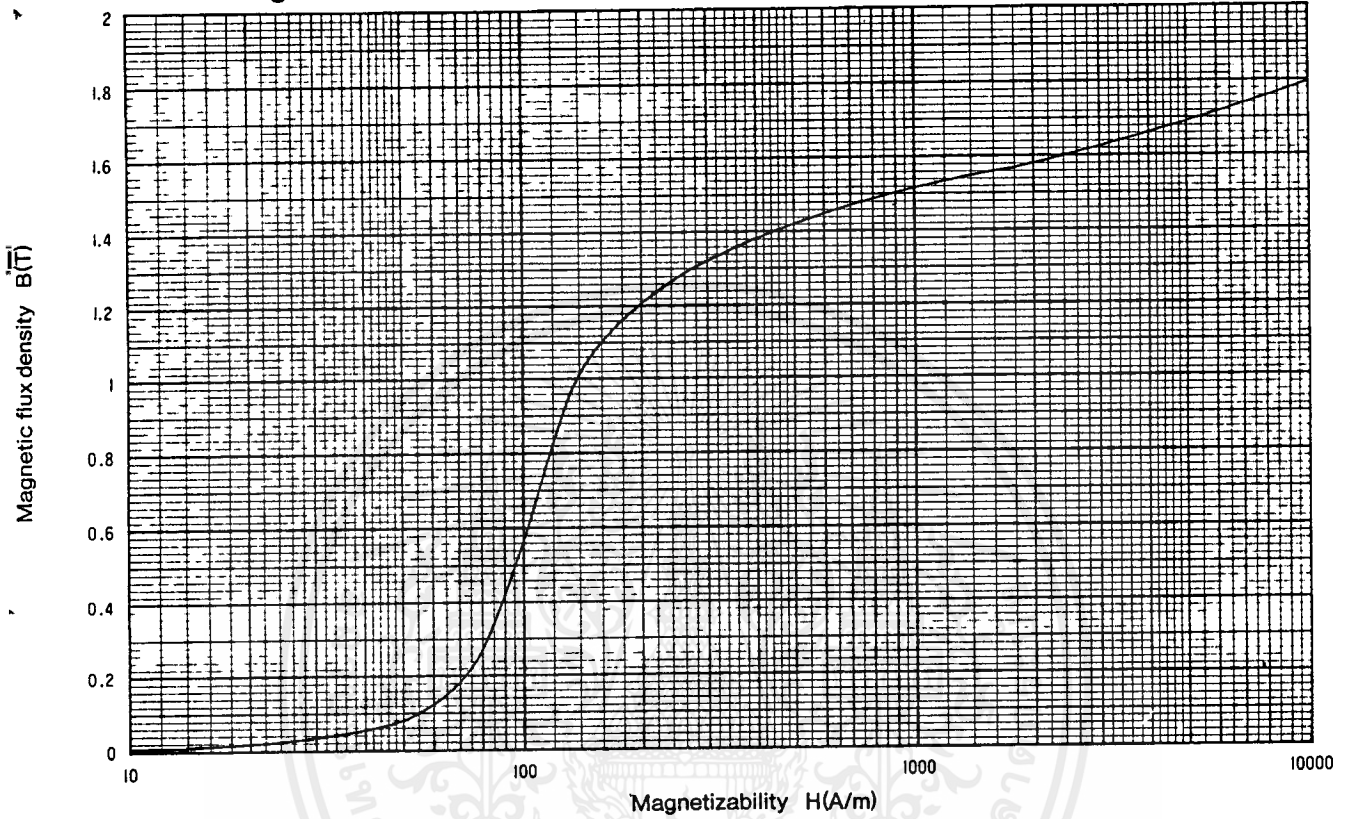
- [1] รศ.ดร. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด , ณรงค์เดช ศรีอัสวอมร " ทฤษฎีวิเคราะห์เครื่องจักรไฟฟ้า
โครงการตำรา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง , 280 หน้า , ตุลาคม 2532
- [2] รศ.ดร. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด " เครื่องจักรไฟฟ้า 1 " , สำนักพิมพ์ โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร, 251 หน้า , 2533
- [3] อาจารย์พิชิต ถ้ายอง เอกสารประกอบการเรียน เครื่องกลไฟฟ้า 2 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2535
- [4] จรูญ หอศิวัลย์ , " เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขึงโครนัส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้าง
สนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตนเอง " , วิทยานิพนธ์สำหรับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 128 หน้า , 2532
- [5] PAUL C. KRAUSE , " Anaiysis of Electric Machinery " , Mc. GRAW-HILL BOOK
COMPANY , 254 P , 189
- [6] A.E. Fitzgerald , Charles Kingsley Jr. , Stephen D Umans , " Electrical Machinery " ,Mecraw-
Hill , 4th Edition , 144 P , 1993



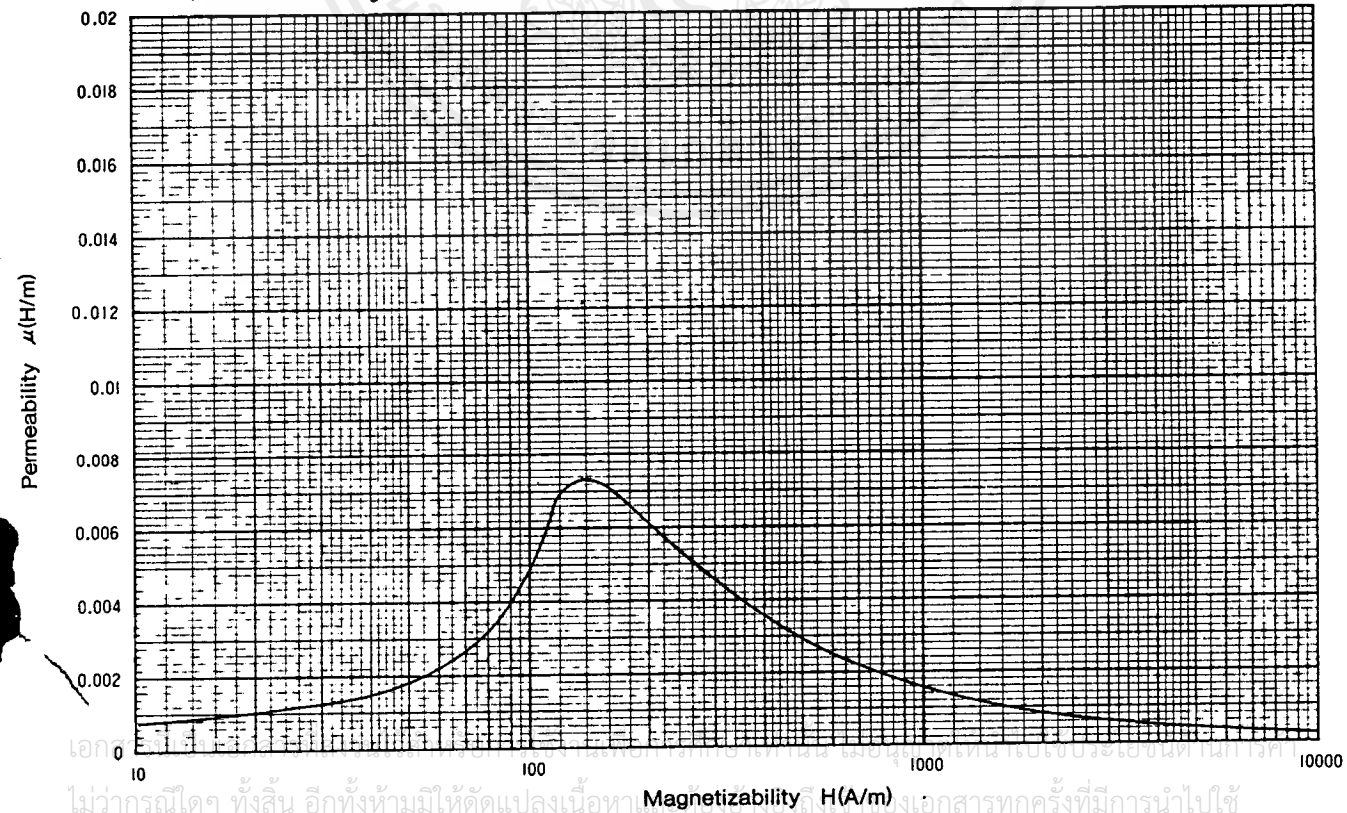
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงคุณสมบัติ B-H curve ของแกนเหล็ก

DC Magnetization Curve



Permeability Curve

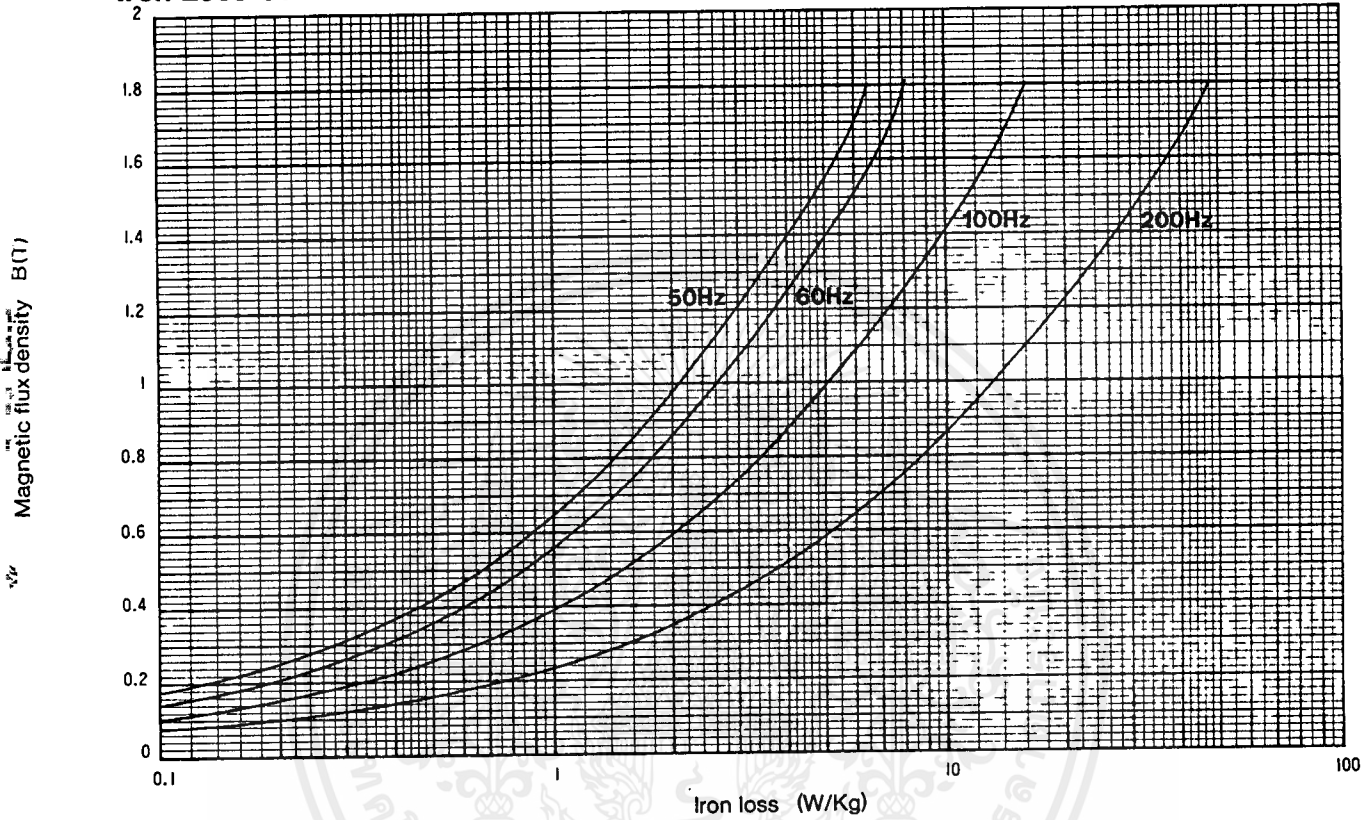


ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงคุณสมบัติ Iron Loss curve

Hysteresis curve

Iron Loss Curve



DC Hysteresis Curve

