



ปีการศึกษา 2536

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียวแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน  
Brushless Self Excited 1-Phase Synchronous Machine

โดย

นายกิตติพงษ์

ตันติวิวัฒน์

นายนพพร

ลีปรีชานนท์

นายสุรัชย์

อุดมสม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. พิชิต ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032635

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2536

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียวแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน

Brushless Self Excited 1-Phase Synchronous Machine

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติพงษ์ ตันตวิวัฒน์
2. นายนพพร ลิขิตานนท์
3. นายสุรชัย อุดมสม



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( อ. พิชิต ล้ายอง )

# สารบัญ

สัญลักษณ์	I
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 แนวความคิด	2
2.2 หลักการทำงาน	3
2.3 เฟเซอร์ไดอะแกรม	3
2.4 เรกทิวเลชันของคักดา	7
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อเรกทิวเลชัน	7
2.6 การคำนวณค่าเรกทิวเลชัน	9
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	
3.1 การออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	15
3.2 การออกแบบขดลวดที่สเตเตอร์	18
3.3 การออกแบบขดลวดที่อาร์มาเจอร์ช่วย	19
3.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนของขดอาร์มาเจอร์ช่วย กับส่วนของขดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์	24
3.5 การออกแบบขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก	30
3.6 การหาจำนวนตัวนำของแต่ละขดลวด	31
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ด้านแรงดันระหว่างโรเตอร์ และสเตเตอร์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2	การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์การเหนี่ยวนำบนขดลวดสร้าง สนามแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับจาก ขดลวดอามแปเจอร์ช่วยที่สเตเตอร์	40
4.3	การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเหนี่ยวนำบนขดลวด โรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ และผลการ เหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์	42
4.4	การทดสอบเต็มระบบ	44
4.5	การทดลองจ่ายภาระที่ค่าคาปาซิแตนซ์ชุดเซย์ค่าต่าง ๆ กัน	46
4.6	การทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อน แม่เหล็ก	50
4.7	การทดลองจ่ายภาระความต้านทาน	55
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปและบทวิจารณ์</b>	<b>72</b>
<b>ภาคผนวก ก</b>		
ก-1	สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว	76
ก-2	พีชแพลคเตอร์	78
ก-3	ดิสทริบิวชันแพลคเตอร์	80
<b>ภาคผนวก ข</b>		
ข-1	เซอร์เคิลไดอะแกรม	81
ข-2	วิธีหาค่าคอนดักแตนซ์ $G_0$ และ ซัลเซฟแตนซ์ $B_0$	84
ข-3	การทดสอบอินดักชันมอเตอร์เมื่อไม่มีโหลด (No Load Test)	85
ข-4	การทดสอบอินดักชันมอเตอร์เมื่อให้โรเตอร์หยุดหมุน (Blocked Rotor Test)	87
ข-5	การสร้างเซอร์เคิลไดอะแกรม	90
ข-6	การวัดสลลิปของอินดักชันมอเตอร์ (Measurement of slip)	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

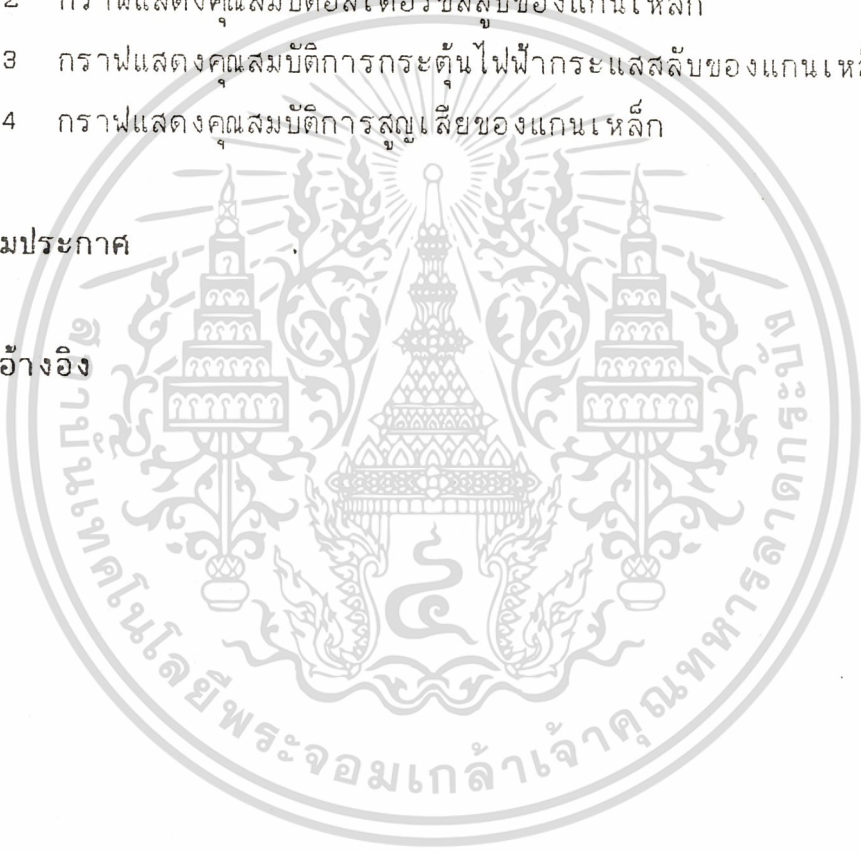
ค-1	โปรแกรมออกแบบการพันขดลวดเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัส เฟสเดียวแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน	100
ค-2	ผลการทำงานของโปรแกรม	102

ภาคผนวก ง

ง-1	กราฟแสดงคุณสมบัติ B-H ของแกนเหล็ก	103
ง-2	กราฟแสดงคุณสมบัติฮิสเตอร์ซิสม์ของแกนเหล็ก	105
ง-3	กราฟแสดงคุณสมบัติการกระตุ้นไฟฟ้ากระแสสลับของแกนเหล็ก	108
ง-4	กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียของแกนเหล็ก	110

กิตติกรรมประกาศ		113
-----------------	--	-----

เอกสารอ้างอิง		114
---------------	--	-----



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	ไดอะแกรมของ Single-Phase Brushless	2
รูปที่ 2.2	เฟเซอร์ไดอะแกรมขณะไร้ภาระ	4
รูปที่ 2.3	เฟเซอร์ไดอะแกรมของขดอาร์มาเจอร์ช่วย	5
รูปที่ 2.4	เฟเซอร์ไดอะแกรมของขดอาร์มาเจอร์หลัก	6
รูปที่ 2.5	วงจรสมมุติของขดอาร์มาเจอร์หลัก	10
รูปที่ 2.6	วงจรการทดสอบวงจรเปิด	11
รูปที่ 2.7	วงจรการทดสอบวงจรปิด	12
รูปที่ 2.8	กราฟแสดงผลการทดสอบหาซิงโครไนส์รีแอกแตนซ์	13
รูปที่ 3.1	การกระจายของสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์	15
รูปที่ 3.2	ลักษณะของคลื่นแบบบลัดเป็	16
รูปที่ 3.3	การพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์	17
รูปที่ 3.4	การพันขดลวดแบบแล็ป	21
รูปที่ 3.5	การพันแบบคอนเซนทริก-เซน รอบนอกมีระยะพิชเต็ม	22
รูปที่ 3.6	การพันแบบคอนเซนทริก-เซน รอบนอกมีระยะพิชเศษส่วน	23
รูปที่ 3.7	แสดงส่วนประกอบของขดอาร์มาเจอร์ช่วยและขดสร้างสนามแม่เหล็ก	25
รูปที่ 3.8	แสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่าง $m\omega f_r$ กับ $EA_1$	25
รูปที่ 3.9	แสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่าง $m\omega f_A$ กับ $Ef_1$	26
รูปที่ 3.10	วงจรสมมุติและรูปคลื่นของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	27
รูปที่ 3.11	โพลาร์ทการคำนวณ	32
รูปที่ 3.12	การพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์	34
รูปที่ 3.13	การพันขดลวดบนสเตเตอร์	35
รูปที่ 3.14	ลักษณะการพันขดลวดในการทดลอง	36-37
รูปที่ 4.1	แสดงวงจรการทดลองที่ 4.1	38
รูปที่ 4.2	วงจรในการทดลองที่ 4.2	40
รูปที่ 4.3	วงจรการทดลองที่ 4.3	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4	วงจรถอดลองที่ 4.4	44
รูปที่ 4.5	วงจรถอดลองที่ 4.5	46
รูปที่ 4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน	58
รูปที่ 4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมคาร์ปาซิเตอร์ กับกระแสของภาระชนิดต่าง ๆ	59
รูปที่ 4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพ รั้งกิวเลชั่น กับกระแสของภาระ	60
รูปที่ 4.9	เซอร์เคิลไดอะแกรมของมอเตอร์ตัวขับ	61
รูปที่ 4.10	ชุดทดลอง ครงงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เฟสเดียวแบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน	62
รูปที่ 4.11	สแตเตอร์	63
รูปที่ 4.12	โรเตอร์	64
รูปที่ 4.13	มอเตอร์ต้นกำลังขับเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 แรงม้า	65
รูปที่ 4.14	สัญญาณแรงดันที่ขดอาเมเจอร์หลักเนื่องจากสนาม แม่เหล็กตกค้าง	58
รูปที่ 4.15	สัญญาณแรงดันคร่อมคาปาซิเตอร์ขด ช่วยขณะ ไร้ภาระ	59
รูปที่ 4.16	สัญญาณแรงดันที่ขั้วของอาร์มาเจอร์หลักขณะ ไร้ภาระ	60
รูปที่ 4.17	สัญญาณแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์หลักขณะจ่ายภาระ	61
รูปที่ 4.18	สัญญาณกระแสที่ไหลในขดอาเมเจอร์ช่วย	62
รูปที่ 4.19	สัญญาณกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก	63
รูปที่ 4.20	สัญญาณแรงดันและกระแสในวงจรถอดลองช่วยขณะ จ่ายภาระ	64
รูปที่ 4.21	สัญญาณแรงดันและกระแสในวงจรถอดลองอาร์มาเจอร์หลักขณะ จ่ายภาระ	65
รูปที่ ก-1	การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็ก	70
รูปที่ ก-2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของ ขดลวดแบบพิเศษเต็มและแบบพิเศษส่วน	72
รูปที่ ก-3	แสดงผลของดิสมิทริบิวชันแปดเตอร์	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	ข-1	วงจรอันดับ R-L	75
รูปที่	ข-2	เวกเตอร์อิมพีแดนซ์ของรูปที่ ข-1	75
รูปที่	ข-3	เซอร์เคิลไดอะแกรมของวงจรอันดับ R-L จากรูป ข-1	76
รูปที่	ข-4	วงจรเทียบเท่าใกล้เคียง (Approximate equivalent circuit)	77
รูปที่	ข-5	แสดงโลกัสของ $I_2$ และ $I_1$ เคลื่อนที่บนวงกลมประและเส้นวงกลมทึบ	78
รูปที่	ข-6	วงจรเทียบเท่าใกล้เคียงของอินดักชันมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์เป็นวงจรปิด	78
รูปที่	ข-7	วงจรทดสอบอินดักชันมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด	80
รูปที่	ข-8	กราฟแสดงความสูญเสียต่าง ๆ ขณะไม่มีโหลด	80
รูปที่	ข-9	เซอร์เคิลไดอะแกรม	85
รูปที่	ข-10	แสดงให้เห็นเส้นตรงแทนกำลังเข้าพุทสูงสุดและกำลังอินพุทสูงสุด	89
รูปที่	ข-11	การต่อสายวัดของโวลท์มิเตอร์เข้ากับสลีปริง	90
รูปที่	ข-12	การต่อมิเตอร์โดยตรงกับโรเตอร์ได้	90
รูปที่	ข-13	วงจรหลอดนีออนที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟสลีปอย่างเดี่ยว	91
รูปที่	ข-14	วงจรหลอดนีออนที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงและไฟสลีปร่วมกัน	92
รูปที่	ข-15	แสดงทิศทางการหมุนของจานโลหะ	92
รูปที่	ง-1	กราฟแสดงคุณสมบัติ B-H ของแกนเหล็ก	97
รูปที่	ง-2	กราฟแสดงคุณสมบัติฮิสเตอร์ซิสลูปของแกนเหล็ก	99
รูปที่	ง-3	กราฟแสดงคุณสมบัติการกระตุ้นไฟฟ้ากระแสสลีปของแกนเหล็ก	102
รูปที่	ง-4	กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียของแกนเหล็ก	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.1	39
ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.2	41
ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.3	43
ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.4	45
ตารางบันทึกผลการทดลองจ่ายภาระโดยเปลี่ยน ค่าคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ชุดเซย์	47
ตารางการทำ V-I Method ในแต่ละชุด	48
ตารางผลการทดลองเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ชุดเซย์	50
ตารางแสดงผลการคำนวณแรงเคลื่อนแม่เหล็ก	50
ตารางผลการทดลอง (V-I Method) ของอาร์มาเจอร์ช่วย ที่พันแบบแล็ป (Lap Winding)	51
ตารางแสดงผลการเพิ่มจำนวนรอบขด (Field) เป็น 425 รอบต่อขั้ว	51
ตารางผลการทดลองวงจรปิดของอาร์มาเจอร์ช่วย open main	52
ตารางผลการทดลองวงจรปิดของอาร์มาเจอร์ช่วย short main	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองหาค่า Impedance โดยใช้ (V-I Method)	54
ตารางผลการทดลองจ่ายภาระความต้านทานที่ค่าคาปาซิแตนซ์ชดเชย (Compensating Capacitance) ค่าต่าง ๆ	55
ตารางการทดสอบโพลิตชนิดต่าง ๆ (R, L, C)	56
ตารางการทดสอบเพื่อเขียนเซอร์เคิลไครโดยแกรมของมอเตอร์ตัวขับ	57
ตารางหา V-I Method ทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ตัวขับ	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

$F_r$	แรงแคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ที่โรเตอร์
$E_A$	แรงแคเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดอาร์มาเจอร์ช่วย
$E_m$	แรงแคเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก
$X_{AM}$	ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (Synchronous Reactance) ของขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก
$X_{SA}$	ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (Synchronous Reactance) ของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย
$X_c$	คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance)
$F_A$	แรงแคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของอาร์มาเจอร์ช่วย
$F_{rA}$	แรงแคเตอร์ล้นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์กับอาร์มาเจอร์ช่วย
$F_{rM}$	แรงแคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของอาร์มาเจอร์หลัก
$F_{TM}$	แรงแคเตอร์ล้นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์กับสเตเตอร์
$V_L$ หรือ $V_m$	คิกคาที่ภาระ หรือ แรงดันที่อาร์มาเจอร์หลัก
$V_c$ หรือ $V_A$	คิกคาที่คร่อมคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) หรือ คิกคาที่ขั้วอาร์มาเจอร์ช่วย
$I_L$ หรือ $I_m$	กระแสของภาระหรือกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก
$I_c$ หรือ $I_A$	กระแสของคาปาซิเตอร์ (Capacitor) หรือกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย
$R_L$	ความต้านทานของภาระ
$X_L$	รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของภาระ
$Z_L$	อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของภาระ
$S_L$	กำลังของภาระ
$P.f$	เพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) หรือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
$I_{sc}$	กระแสลัดวงจร
$\theta_m$	มุมระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำของอาร์มาเจอร์หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_m$	ซิมโคโนนัสนิมพีแดนซ์
$P$	จำนวนขั้วแม่เหล็ก
$f$	ความถี่
$N$	ความเร็วรอบ
$K_w$	ไว้นัดังแฟคเตอร์ (Winding Factor) หรือค่าตัวประกอบของการพันขดลวด
$K_p$	พิชแฟคเตอร์ (Pitch Factor) หรือ ค่าตัวประกอบของระยะห่างระหว่างขดลวด
$K_d$	ดิสทริบิวชันแฟคเตอร์ (Distribution Factor) หรือค่าตัวประกอบของการพันแบบกระจาย
$E$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
$n$	จำนวนสล๊อต (slot) ต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กต่อหนึ่งเฟส
$\alpha$	มุมระหว่างสล๊อต (slot)
$E_f$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดสร้างสนามแม่เหล็ก
$I_f$	กระแสไฟฟ้าดซี (D.C) ที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กผ่านไดโอด (Diode)
$N_f$	จำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
$mmf_r$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดสร้างสนามแม่เหล็ก
$E_A$	แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดอาร์มาเจอร์ช่วย
$I_A$	กระแสไฟฟ้่าที่ไหลในขดอาร์มาเจอร์ช่วย
$N_A$	จำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย
$mmf_A$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดอาร์มาเจอร์ช่วย
$X_{Lr}$	รีแอคแตนซ์ (Reactance) ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
$i(t)$	กระแสที่แปรตามเวลา
$X_A$	ค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) รวมทั้งจรขดอาร์มาเจอร์ช่วย
$C$	ค่าคาปาซิเตอร์ (Capacitor) หรือ ค่าความจุไฟฟ้า
$mmf_{rA}$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมจากโรเตอร์และขดอาร์มาเจอร์ช่วย
$E_a$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดอาร์มาเจอร์หลักตอนมีภาระ
$N_{1,2,3,\dots}$	จำนวนรอบในแต่ละขดขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียวแบบกระตุ้นตัวเองไร้ปรอท่าน

นาย กิตติพงษ์ ตันติวิวัฒน์

นาย นพพร ลิปวีร์ชานนท์

นาย สุรัชชัย อุดมสม

อ.พิชิต ล่ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2536

### บทคัดย่อ

รายงานนี้แสดงผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสเฟสเดียว (1-Phase Synchronous Generator) แบบกระตุ้นตัวเองไร้ปรอท่าน โดยการนำเอาเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์ทรงกระบอกที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมาดัดแปลง โดยที่สเตเตอร์จะมีขดลวดอยู่ 2 ชุด คือ ขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก (Main Armature Winding) สำหรับจ่ายไฟแก่ภาระ (Load) และขดลวดอาร์มาเจอร์รอง (Auxiliary Armature Winding) เพื่อสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่โรเตอร์โดยมีคาปาซิเตอร์เป็นตัวชดเชย ส่วนที่โรเตอร์จะมีขดสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งต่อกับไดโอด เพื่อเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีจำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับขั้วแม่เหล็กของขอลวดอาร์เมอร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Brushless Self Excited 1-Phase Synchronous Machine

Kittipong Tontiwatt

Nopporn Leeprechanon

Surachai Udomsom

Teacher Phichit Lamyong Advisor

1993

### Abstract

This report presents the possibilities of using brushless self excited single-phase synchronous machine. The conventional cylindrical rotor machine is modified. There are two set of windings on the stator ; One called main armature winding to supply load , the other called axiliary armature winding is compensated by capacitor to produce e.m.f. on the rotor. On the rotor field windings are wound and connected with diode in order to rectify a.c-current to be d.c-current. The number of poles on the rotor are equal to the armature winding.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1 บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสขนาดเล็ก (1-10 KVA) โดยทั่วไปที่มีอยู่ จะใช้แปรงถ่าน และวงแหวนลื่น เพื่อนำกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นบน โรเตอร์ ซึ่งมักจะเป็นปัญหายุ่งยากในการจัดเตรียมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อป้อนสนามแม่เหล็กกระตุ้น รวมทั้งปัญหาในการซ่อมบำรุงชุดแปรงถ่านกับวงแหวนลื่น โดยเฉพาะการใช้งานในบริเวณที่มีสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยากัดกร่อนวงแหวนลื่นหรือแปรงถ่าน ทำให้ต้นทุนในการซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้นและความเชื่อถือของระบบต้องลงไป การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดไร้แปรงถ่าน จึงเกิดขึ้นด้วยการประยุกต์จากหลักการต่าง ๆ ได้หลายวิธี เช่น การสร้างตัวจ่ายกระแสสนามแม่เหล็กกระตุ้นบนเพลลาของโรเตอร์ ซึ่งนิยมในเครื่องจักรไฟฟ้าขนาดใหญ่ การใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยหลักการควบคุมแบบปิด และการใช้หลักการของสนามแม่หมุนย้อนกลับจาก สเตเตอร์ไปเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดกระแสขึ้นที่โรเตอร์ โครงสร้างไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการบำรุงรักษา

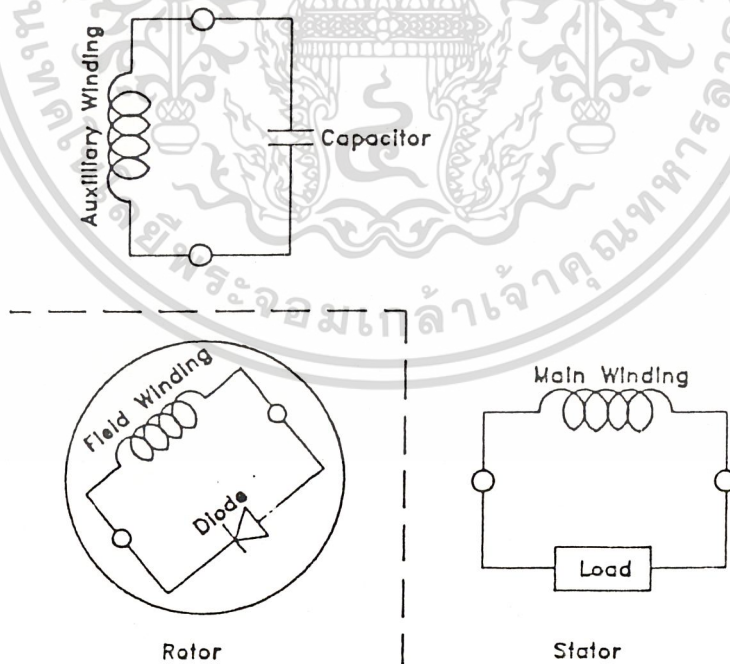
เป้าหมายของโครงการนี้จะเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการสร้างและการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 1 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่าน และสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง ซึ่งประกอบด้วยหลักการทำงาน และการออกแบบ โดยได้นำเอาเครื่องจักรไฟฟ้าขนาด 2 KVA ชนิดโรเตอร์ทรงกระบอกมาดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส พิกัดคิกคา 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ความเร็ว 1500 รอบต่อนาทีเพื่อใช้ศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ นอกจากนั้นยังได้แสดงภาพถ่ายรูปคลื่นคิกคา และกระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดต่าง ๆ อีกทั้งความสัมพันธ์ของคุณลักษณะที่สำคัญในเชิงกราฟอีกด้วย หวังว่าจากแนวคิดและคุณลักษณะต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ที่ทางกลุ่มได้นำผลการทดลอง และการทดสอบมาแสดงไว้เพื่อจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจที่จะศึกษา และพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้อีกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 แนวความคิด

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียว แบบกระตุ้นตัวเองไร้แปรงถ่าน โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนโรเตอร์ ของสนามแม่เหล็ก หมุนย้อนกลับที่สร้างขึ้นโดยขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย ซึ่งมีค่าปาสิตเตอร์ต่อชุด เชยอยู่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่จะถูกเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยไดโอด เพื่อกำหนดทิศทางที่แน่นอนของกระแส ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่แน่นอนเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ ค่อนข้างจะเรียบ และต่อเนื่อง เพราะค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากเมื่อเทียบกับความความต้านทาน



รูปที่ 2.1 ไลอะแกรมของ Single-Phase Brushless Self-Excited Synchronous Generator

ขดลวดทั้ง 2 ชุดที่ใส่เตเตอร์คือ อาร์มาเจอร์หลักและอาร์มาเจอร์ช่วย จะต้องวางห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า เพื่อให้การเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันน้อยที่สุด

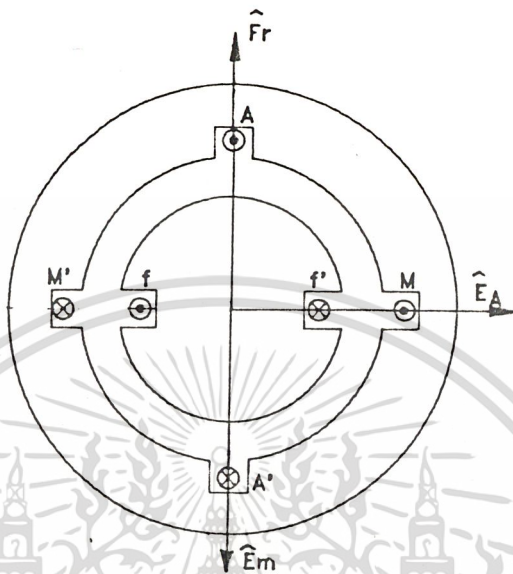
## 2.2 หลักการทำงาน

เนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแกนเหล็กซึ่งจะมีค่าไม่มาก เมื่อโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ได้ ในที่นี้ได้ใช้คาปาซิเตอร์ต่อคร่อมขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยเอาไว้ ทำให้มีกระแสไหลในขดอาร์มาเจอร์ช่วย เกิดสนามแม่เหล็กหมุนทั้งในทิศทางเดียวกันและตรงกันข้ามกับทิศทาง การหมุนของโรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางเดียวกับโรเตอร์จะมีความเร็วสัมพันธ์กับโรเตอร์เป็นศูนย์ ส่วนสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตรงข้ามกับโรเตอร์จะมีความเร็วสัมพันธ์ เป็น 2 เท่าของความเร็วจึงโครนัส จะตัดกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหล และถูกเรียงให้เป็นกระแสตรงโดยไดโอดที่ต่อคร่อมอยู่ที่ขดลวดนั้น กระแสนี้ทำให้สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์มีขนาดมากขึ้นเป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ มีค่ามากขึ้น กระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ก็จะมีค่ามากขึ้น สนามแม่เหล็กจากขดอาร์มาเจอร์ช่วยก็จะมากขึ้นตาม ในช่วงเริ่มต้นการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างโรเตอร์ และสเตเตอร์จะเป็นไปในลักษณะที่เสริมกันไปมาแบบนี้ จนถึงจุดหนึ่งที่สนามแม่เหล็กคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะคงที่ ณ จุดนี้จะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับค่าคาปาซิเตอร์ จำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย

## 2.3 เฟเซอร์ไดอะแกรม

ใช้หลักการเดียวกับเครื่องจักรแบบซิงโครนัสโดยทั่วไป ที่ใส่เตเตอร์จะมีขดลวด 2 ชุด วางทำมุมกัน 90 องศาทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$\hat{F}_r$  = เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ที่โรเตอร์  
 $\hat{E}_A$  = เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ช่วย (Auxiliary Winding)  
 $\hat{E}_M$  = เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก (Main Winding)

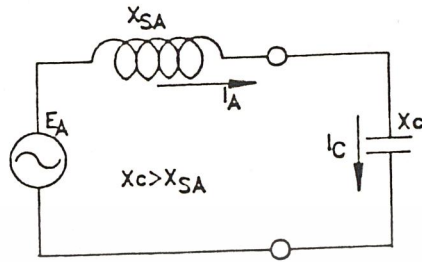
รูปที่ 22 เฟเซอร์ไดอะแกรมของโรเตอร์

จากรูปเฟเซอร์ไดอะแกรมของโรเตอร์ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์จะนำหน้าเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย 90 องศา แต่ที่ขดลวดอาร์มาเจอร์หลักจะมีค่าคาปาซิแตนซ์มากกว่าค่าซึ่งโครนีสรีแอนด์แทนท์ ของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย โดยที่ค่าความต้านทานมีค่าต่ำสามารถตัดทิ้งได้ ภายในวงจรของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย จะมองเห็นเฉพาะค่าคาปาซิแตนซ์ ดังนั้นกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยจะนำหน้าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไป 90 องศา และกระแสตัวนี้เป็นตัวสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ออกจากขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย จึงทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กจาก

โรเตอร์และขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยมีเฟสเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



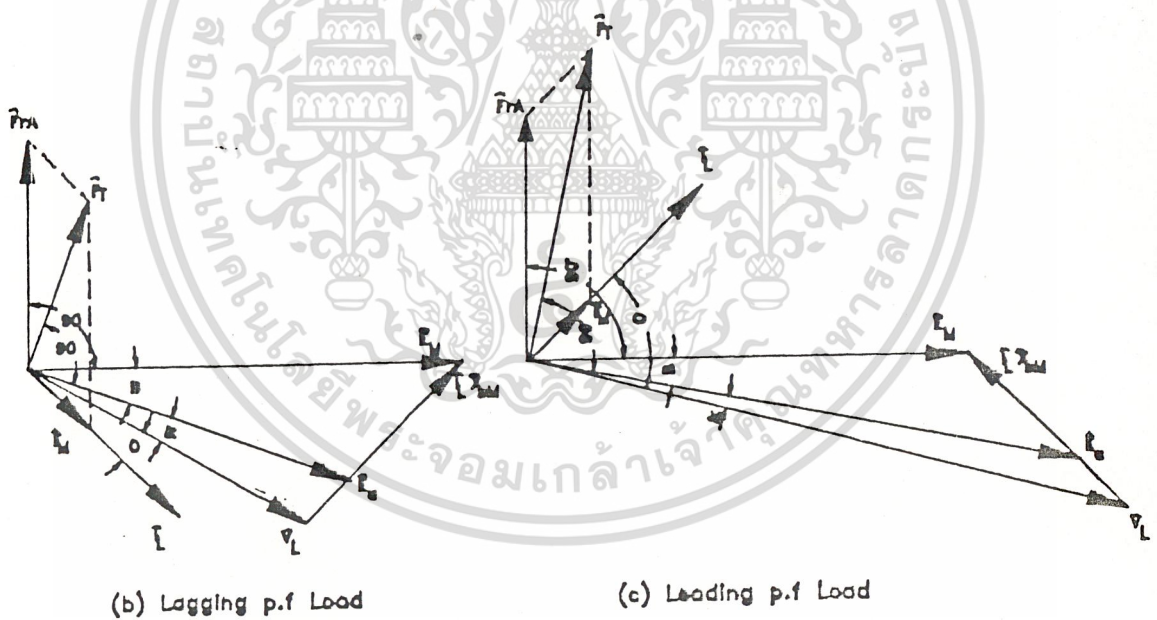
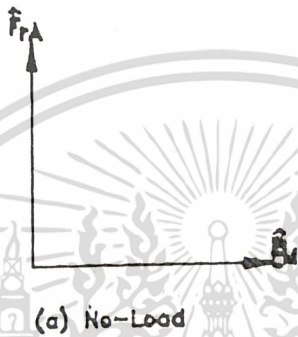
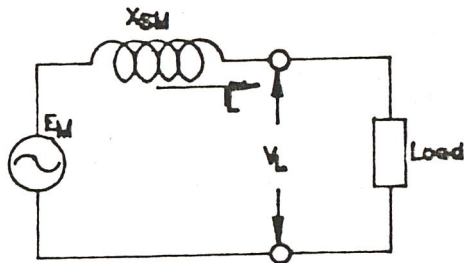
$$\hat{F}_{rA} = \hat{F}_r + \hat{F}_A$$



- $\hat{I}_A = \hat{I}_C$  = กระแสในวงจรขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย (ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ด้วย)
- $X_{SA}$  = ซิงโครไนส์แอดแดนทของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย
- $X_C$  = คาปาซิเตอร์
- $\hat{F}_A$  = เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย
- $\hat{F}_{rA}$  = ผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์และขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย

รูปที่ 2.3 เฟเซอร์ไดอะแกรมของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย

ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่จะไปตัดกับขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก ก็คือ  
 ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์ และขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย  
 นั้นเอง



- $F_m$  = เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ขดอาร์มาเจอร์หลัก
- $I$  = กระแสของอาร์มาเจอร์
- $V_L$  = ศักดที่อาร์มาเจอร์
- $X_{SM}$  = ซิมโวลต์รีแอกแตนซ์ของขดอาร์มาเจอร์หลัก
- $F_r$  = ผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากสเตเตอร์และโรเตอร์

รูปที่ 2.4 เฟเซอร์ไดอะแกรมของซิงโครนาเจอร์หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_{rA}$  หมุนตัดขดอาร์มาเจอร์หลักขณะไม่มีภาระ จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_m$  ขึ้นมาและล้าหลังแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_{rA}$  เป็นมุม  $90$  องศาทางไฟฟ้า พอมิภาระและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของภาระ มีค่า  $\cos\theta$  ดังนั้นมุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันของภาระคือ  $\theta$  กระแส  $I_L$  ที่ไหลอยู่ในขดลวดอาร์มาเจอร์หลักจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_m$  ขึ้นมา เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_m$  รวมกันทางเวกเตอร์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_{rA}$  จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวม  $F_T$  แรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_T$  จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดอาร์มาเจอร์หลักตอนที่มีภาระ เรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ว่า  $E_a$  และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_a$  จะล้าหลังแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_T$  ด้วยมุม  $90$  องศาทางไฟฟ้า

#### 2.4 เรกิวเลชันของศักดา (voltage regulation)

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายกระแสไฟให้กับภาระ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักดาที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์ ถ้ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กและความเร็วรอบมีค่าคงที่จะเรียกการเปลี่ยนแปลงศักดาว่า เรกิวเลชันประจำตัว (inherent regulation) โดยมีนิยามดังนี้

$$\text{เรกิวเลชันประจำตัว (\%)} = \frac{(\text{ศักดาขณะไร้ภาระ} - \text{ศักดาขณะมีภาระ}) \times 100}{\text{ศักดาขณะมีภาระ}}$$

#### 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อเรกิวเลชัน

2.5.1. ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดโดยขดลวดอาร์มาเจอร์ ถึงแม้ว่าจะรักษาสานแม่เหล็ก จากขั้วแม่เหล็กให้มีค่าคงที่ก็ตาม แต่เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกตัด โดยขดลวดอาร์มาเจอร์ขณะไม่มีภาระ กับมีภาระจะมีค่าไม่เท่ากัน เพราะกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์ จะสร้างสนามแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งขึ้นมา เมื่อรวมกับสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก จะได้ผลลัพธ์ของ เส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงในช่องอากาศ (gap) เมื่อเพาเวอร์แฟคเตอร์ของภาระมีค่าประมาณ 1 กระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขวาง (cross magnetizing) และทำให้เกิดการเพี้ยนของสนามแม่เหล็กกลับจากเดิม ผลที่ตามมาคือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง ในกรณีที่เพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าต่ำ และกระแสตามหลังคักดา แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์จะมีความโน้มเอียงที่จะต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก และที่เพาเวอร์แฟคเตอร์เป็นศูนย์ แม่เหล็กจากอาร์มาเจอร์จะต้านแรงเคลื่อนจากขั้วแม่เหล็กทั้งหมด ดังนั้นผลลัพท์ของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศจะลดลงอย่างมาก แต่ถ้ากระแสหน้าคักดา ผลข้างต้นของขดลวดอาร์มาเจอร์จะเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก คักดาที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์จึงเพิ่มขึ้น ผลอันเกิดจากกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์นี้ เรียกว่าอาร์มาเจอร์รีแอคชั่น (Armature Reaction)

2.5.2. คาร์รีแอคแตนท์ คือ คาร์รีแอคแตนท์ของปลายต่อตัวนำ (end-connection) และรีแอคแตนท์จากการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในสล๊อต (Slot leakage reactance) ความต้านทานของขดลวด ทำให้เกิดคักดาตกคร่อมที่มีเฟสเดียวกันกับกระแส และมีขนาดแปรตามขนาดกระแสรีแอคแตนท์ของปลายต่อตัวนำ เป็นส่วนที่ทำให้เกิดคักดาคร่อม อันเนื่องจากการตัดกันของเส้นแรงแม่เหล็กกับตัวนำที่อยู่นอกแกนเหล็กออกไป รีแอคแตนท์จากการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในสล๊อตทำให้เกิดคักดาลดลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กในช่องอากาศไม่ได้ถูกตัดโดยขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งหมด แต่จะมีบางส่วนที่ผ่านซี่แกนเหล็ก (teeth) หนึ่งไปยังอีกซี่แกนเหล็กหนึ่ง จึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยลงจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้อาจจะมีค่ามากได้ โดยเฉพาะเมื่อต้องจ่ายกระแสที่มีเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ ๆ

2.5.3. รูปร่างของคักดาไฟฟ้า คักดาที่วัดได้จากขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์นั้นไม่ได้ขึ้นกับ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดโดยขดลวดอาร์มาเจอร์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการกระจายในช่วงขั้วของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยเช่นกัน เพราะจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกตัดโดยขดลวดอาร์มาเจอร์นั้น จะให้ค่าเฉลี่ยของคักดา



เหนี่ยวนำขึ้นมาเท่านั้น ในขณะที่รูปร่างของคักดาจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่า rms ที่ต้องการ

ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อคำนึงถึงเรกทิวเลชัน จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้

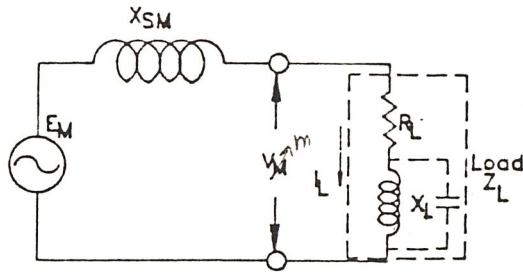
(ก) ขนาดของช่องอากาศ ช่องอากาศที่มีขนาดใหญ่ สามารถช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเรกทิวเลชันที่ดีขึ้นได้เพราะต้องให้แอมป์-เทอรัน ที่มีค่าสูงในการสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้น แอมป์-เทอรัน ของกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์ที่ทำให้เกิดอาร์มาเจอร์รีแอกชันจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ แอมป์-เทอรันของขั้วแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามการที่ช่องอากาศมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic leakage) ขึ้นมา และเพิ่มโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

(ข) การอิมตัวของแกนเหล็ก การออกแบบให้แกนเหล็กมีการอิมตัวในบางส่วนก็ช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเรกทิวเลชันเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน

(ค) การลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์มาเจอร์ แต่การลดค่าเหล่านี้มีข้อจำกัดอยู่เหมือนกัน เพราะปริมาณเหล่านี้จะเป็นตัวจำกัดกระแสขณะลัดวงจร

## 2.6 การคำนวณค่าเรกทิวเลชัน

จากวงจรสมมูลย์ของขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก เมื่อมีการจ่ายกระแสให้กับภาระจะมีแรงดันตกคร่อมที่ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ ของขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก โดยถือว่าค่าความต้านทานมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ขนาด ของแรงดันตกคร่อมจะเท่ากับผลคูณของซิงโครนัสรีแอกแตนซ์กับกระแสของภาระ



- $X_{SM}$  = ซิงโครบัสรีแอคแตนซ์ของซดอาร์มาเจอร์หลัก
- $V_m$  = แรงดันที่ตกคร่อมภาวะ
- $R_L$  = ความต้านทานของภาวะ
- $X_L$  = รีแอคแตนซ์ของภาวะ
- $Z_L$  = อิมพีแดนซ์ของภาวะ
- $S_L$  = พิกัดกำลังของภาวะ
- p.f = เพาเวอร์แฟคเตอร์ของภาวะ

รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของซดอาร์มาเจอร์หลัก

ดังนั้นแรงดันตกคร่อมภาวะก็คือ

$$V_m = E_m - (I_L / \phi_m * X_{SM} / 90^\circ)$$

โดยที่

- คือมุมระหว่างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ  $E_m$  กับกระแสของภาวะ  $I_L$  เมื่อเราทราบพิกัดกำลังและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของภาวะ จะได้

$$I_L = S_L / V_m$$

$$Z_L = V_m / I_L$$

$$R_L = Z_L * \text{Cos}\phi \text{ (Power factor)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}$$

$$X_T = X_{em} + X_L$$

$$Z_T = \sqrt{X_T^2 + R_L^2}$$

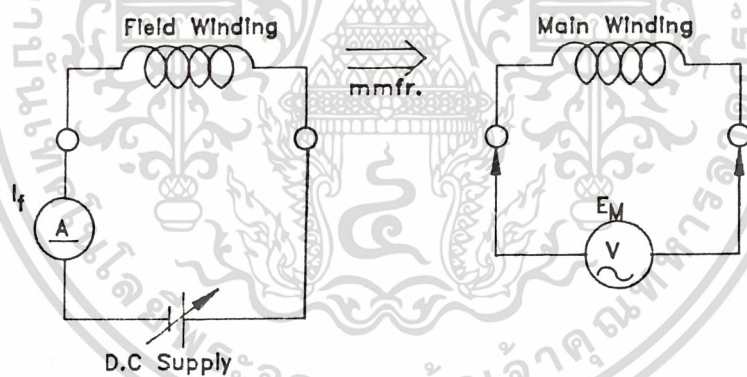
$$\text{ดังนั้น เร็วกวเลขขึ้น} = \frac{E_m - V_m}{V_m} \times 100\%$$

### 2.7 การหาค่าขงโครนัสน์แอดคตงกของชดลวอาร์เมเจอร์หลัก

ก่อนที่จะหาค่าขงโครนัสน์แอดคตงกนั้น จำเป็นจะต้องศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติบางประการของเครื่องกำเนิดเสียก่อน คือ

#### 2.7.1 คุณสมบัติของวงจรเบิด (Open-Circuit Characteristic)

ในการหาคุณสมบัติแบบนให้ต่อวงจรตามรูป และปฏิบัติดังนี้



รูป 2.6 วงจรการทดสอบวงจรเบิด

2.7.1.1. ต่อชดลวดสนามแม่เหล็ก เข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรงที่ปรับค่าได้ผ่าน คี. ซี. แอมป์มิเตอร์

2.7.1.2 ต่อแหล่งจ่ายไฟ เอ.ซี. โวลต์มิเตอร์คร่อมระหว่างปลายสายของชดลวดอาร์เมเจอร์หลัก

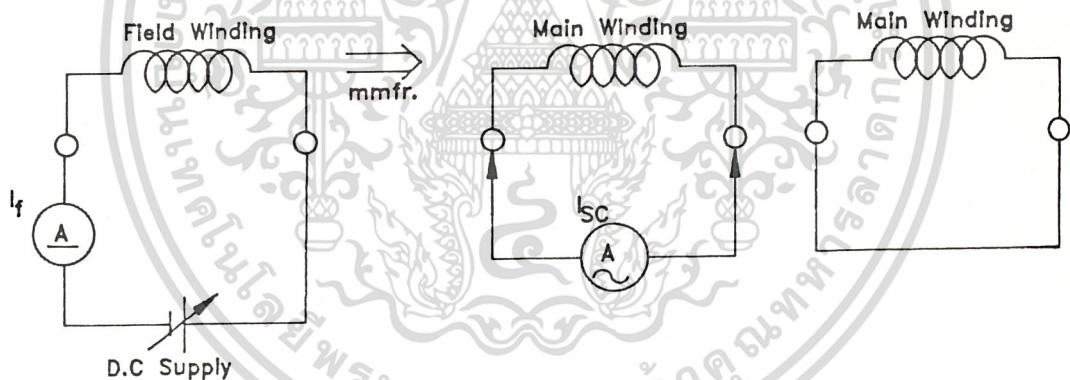
2.7.1.3. เดินเครื่องให้ถึงความเร็วตามพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.7.1.4. ปรับไฟกระแสตรง ให้ไหลเข้าขดลวดสนามแม่เหล็ก เป็นขั้น ๆ โดยเริ่มต้นตั้งแต่ศูนย์จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้เกิดการอิ่มตัว
- 2.7.1.5. บันทึกกระแสไฟฟ้า  $I_f$  และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_m$  ที่เพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ ลงในตาราง
- 2.7.1.6. นำค่ากระแสไฟฟ้า  $I_f$  และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_m$  จากข้อ 2.7.1.5. มาเขียนกราฟลงกระดาษกราฟ โดยให้  $I_m$  เป็นแกนนอนและ  $E_m$  เป็นแกนตั้ง

### 2.7.2 คุณสมบัติของวงจรรัด (Short-Circuit Characteristic)

ในการหาคคุณสมบัติแบบนั้นให้ต่อวงจรดังรูป และปฏิบัติดังนี้

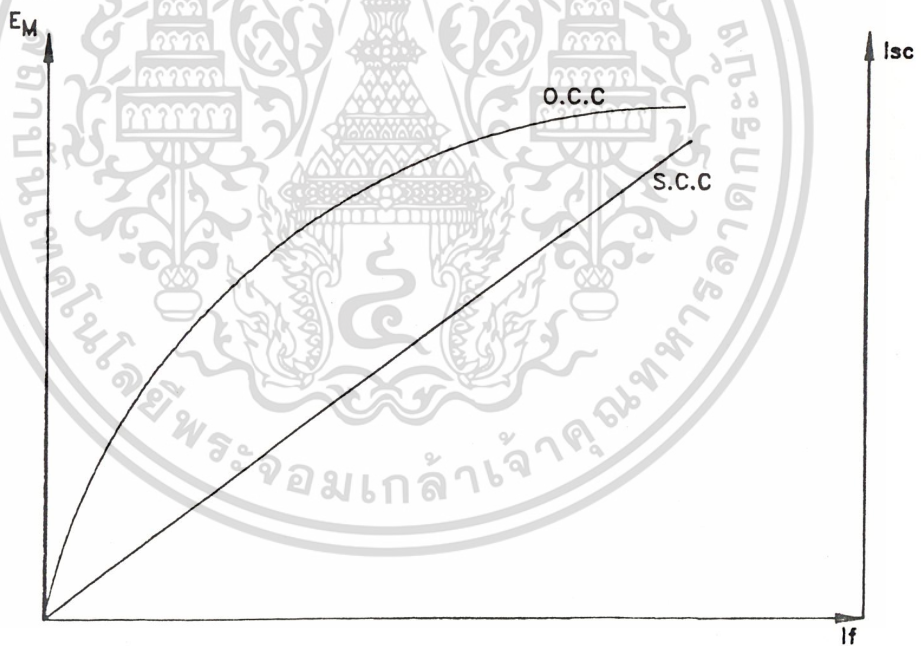


รูปที่ 2.7 วงจรการทดสอบวงจรรัด

- 2.7.2.1. ปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 2.7.1.1. ในคุณสมบัติวงจรมืด
- 2.7.2.2. ต่อ เอ.ซี. แอมป์มิเตอร์อนุกรม กับขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก และลัดวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย
- 2.7.2.3. ปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 2.7.1.3. ในคุณสมบัติวงจรมืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.7.2.4. ปรับกระแสไปตรงไหลเข้าชดลวดสนามแม่เหล็ก เป็นชั้น ๆ โดยเริ่มต้นตั้งแต่ศูนย์ จนกระทั่งแอมมิเตอร์อ่านค่าได้ 150-200% ของกระแสพิกัด
- 2.7.2.5. บันทึกกระแสไฟฟ้า  $I_f$  และกระแสไฟฟ้า  $I_{sc}$  ที่อ่านได้เป็นชั้น ๆ จากแอมป์มิเตอร์ลงในตาราง
- 2.7.2.6. นำค่ากระแสไฟฟ้า  $I_f$  และกระแสไฟฟ้า  $I_{sc}$  จากข้อ 2.7.2.5. ไปเขียนกราฟ โดยให้  $I_f$  เป็นแกนนอน และกระแสไฟฟ้า  $I_{sc}$  เป็นแกนตั้ง



รูป 2.8 กราฟแสดงผลการทดสอบหาชิงโครนีสรีแอคแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเส้นกราฟคุณสมบัติของวงจรเปิดและวงจรลัด นำเอาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_m$  และกระแสลัดวงจร  $I_{sc}$  ณ จุดที่กระแส  $I_s$  ทำให้แรงดันไฟฟ้าอ่านได้จากโวลต์มิเตอร์อิมิตัว มาคำนวณหาค่าซิมโตรนีสอิมพีแดนซ์

$$Z_s = E_m / I_{sc}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การคำนวณและการสร้าง

### 3.1 การออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

โรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่นำมาตัดแปลงเป็น ชนิดทรงกระบอกมีข้อมูลดังต่อไปนี้

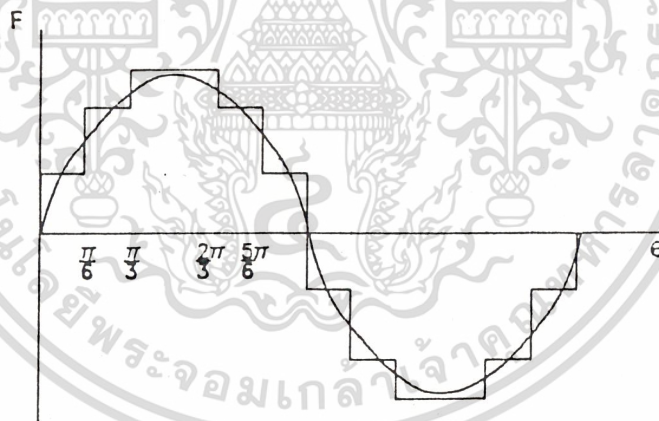
จำนวนสล็อต(slot)	24	สล็อต
เส้นผ่าศูนย์กลาง	14.9	ซ.ม.
ความยาวตามแนวเทป	8	ซ.ม.

ความต้องการของการออกแบบคือ เมื่อมีไฟฟ้ากระแสตรงไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีการกระจายใน 1 ช่วงขั้วเป็นรูปไซน์ และจากสมการ  $P=120f/N$  ในกรณีที่เราต้องการความถี่เท่ากับ 50 เฮิรตซ์ และความเร็วรอบของตัวขั้วเท่ากับ 1500 รอบต่อนาที ดังนั้นจำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์จะต้องมี 4 ขั้ว และระยะขั้วจะมีความกว้าง 6 สล็อตซึ่งสามารถสร้างภาพประกอบได้ดังรูป

fig 2.1

แต่การเกิดสนามแม่เหล็กที่มีการกระจายตามรูป นั้น จะเกิดได้ในกรณีที่มีสล็อตจำนวนมากถึงอนันต์ จนกระแสที่ไหลในตัวนำในช่องสล็อตติดเป็นแผ่นหรือแนวของกระแสได้ แต่สำหรับในกรณีที่มีจำนวน 24 สล็อต จะคำนึงถึงการกระจายรูปคลื่นชาxonพื้นฐานของสนามแม่เหล็กเป็นหลัก ซึ่งรูปร่างการกระจายของสนามแม่เหล็กก็คือการกระจาย แอมป์-เทอรัน ของกระแสที่ไหลในช่องสล็อตนั่นเองในการออกแบบนี้ เราจะใช้วิธีสร้างคลื่นสเต็ปเลียนแบบคลื่นชาxon

โดยปกติที่สร้างคลื่นสเต็ปเลียนแบบคลื่นชาxonด้วยจำนวน  $N$ -สเต็ปต่อ 1 ไซเคิล แล้วมุมในแต่ละสเต็ปจะมีค่า  $2\pi/N$  เรเดียน คลื่นสเต็ปที่สร้างอย่างถูกต้องหลักเกณฑ์ จะมีฮาร์โมนิคปรากฏอยู่เฉพาะในลำดับที่  $K = nN+1$  โดยที่  $n = 1, 2, 3, 4$



รูปที่ 3.2 ลักษณะของคลื่นแบบสเต็ป

เพื่อให้องค์ประกอบรวมของฮาร์โมนิค ของคลื่นสเต็ปมีค่าต่ำสุดระดับแรงดันแต่ละสเต็ปควรมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของคลื่นชาxonในสเต็ปนั้น ๆ นั่นคือ ความสูงในแต่ละสเต็ปจะต้องแปรผันตาม

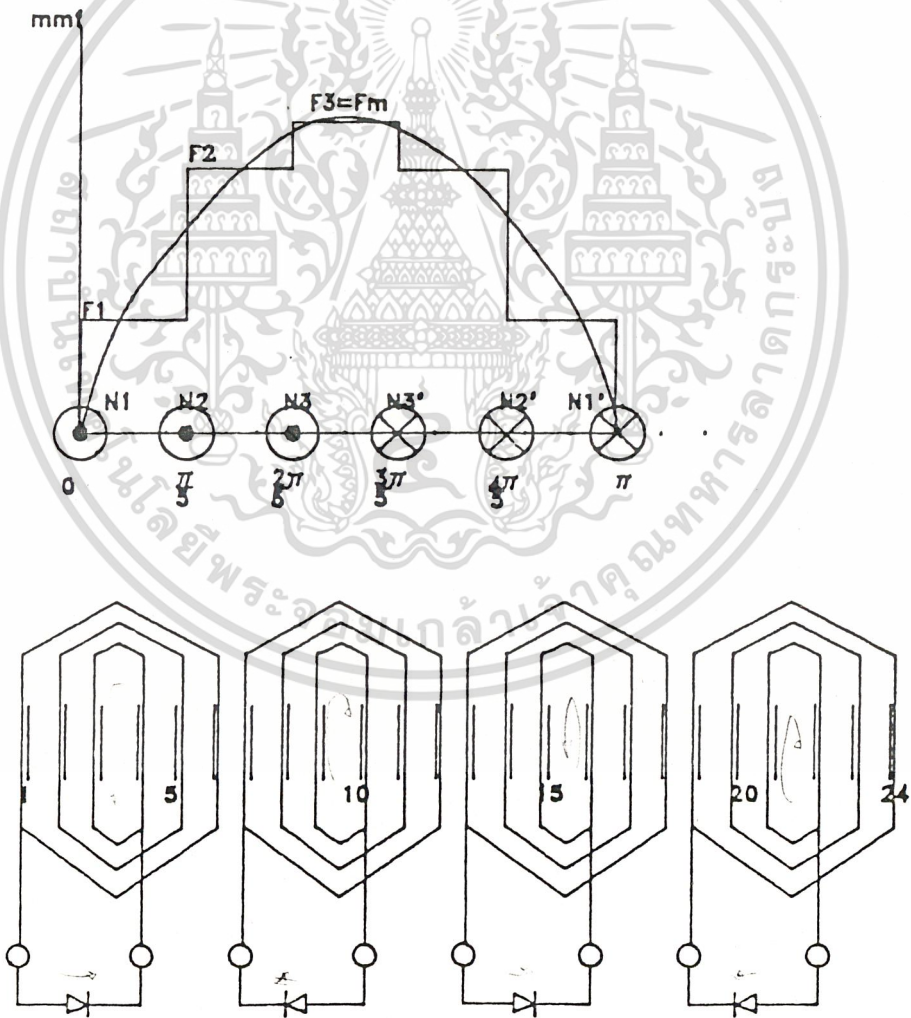
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_m = f \sin \theta_m$$

$$\theta_{m-1} = (m-1) * 2\pi / N$$

$$\theta_m = m * 2\pi / N \quad 1 < m < n$$

โดยวิธีการนี้จะได้คลื่นสลับที่มีฮาร์โมนิคต่ำสุดเท่ากับ (N-1) และจะ  
ได้ออมพลิจูดของฮาร์โมนิคที่ K = 1/K เท่าของอมพลิจูดของคลื่นพื้นฐาน



รูปที่ 3.3 การพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_3 = \int_{2\pi/5}^{3\pi/5} f \sin \theta \, d\theta = [-\cos \theta]_{2\pi/5}^{3\pi/5} = 0.618 = F_m$$

$$F_2 = \int_{\pi/5}^{2\pi/5} f \sin \theta \, d\theta = [-\cos \theta]_{\pi/5}^{2\pi/5} = 0.500 = 0.800 F_m$$

$$F_1 = \int_0^{\pi/5} f \sin \theta \, d\theta = [-\cos \theta]_0^{\pi/5} = 0.200 = 0.300 F_m$$

เนื่องจากขดลวดแต่ละชุดต่อแบบอันดับกันดังรูป ที่ให้กระแสไหลเท่ากัน เราจะได้สัดส่วนของจำนวนรอบในแต่ละชุดคือ

$$(N_1) : (N_1 + N_2) : (N_1 + N_2 + N_3) = (0.3) : (0.8) : (1.0)$$

$$(N_1) : (N_2) : (N_3) = (0.3) : (0.5) : (0.2)$$

นอกจากนี้ในการออกแบบขดลวดชนิดนี้จะต้องคำนึงถึงพิภพของกระแสและแรงดันของไดโอดที่ใช้งานด้วย

### 3.2 การออกแบบขดลวดที่สี่เตเตอร์

ข้อมูลสี่เตเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่นำมาตัดแปลงคือ

จำนวนสล็อต	36	สล็อต
เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน	15.1	ซ.ม.
เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก	21.3	ซ.ม.
ความยาวตามแกน	8	ซ.ม.
พื้นที่หน้าตัดร่องสล็อต	50	ม.ม. <sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย

จากหลักการทำงานจะเห็นได้ว่าหน้าที่ของขดอาร์เมเจอร์ช่วยก็เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กที่วิ่งในช่องอากาศ (gap) ร่วมกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ โดยที่ปลายขั้วของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยจะมีตาปายีเตอร์ต่อชดเชยอยู่ ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ เราต้องการสนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่มีค่าสูงจนเกือบอิ่มตัว เพื่อให้ค่าเรีกิวเลชันที่ขดอาร์เมเจอร์หลักมีค่าน้อย สนามแม่เหล็กที่ออกจากขดอาร์เมเจอร์ช่วยจะแปรค่าไปตามกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน ดังนั้นสิ่งที่เราจะต้องพิจารณาในการออกแบบขดอาร์เมเจอร์ช่วยก็คือ ค่าอิมมิตแดนซ์และคิกค่าที่ขั้วพยายามให้กระแสไหลมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยคำนึงถึงพิกัดของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ และพื้นที่หน้าตัดของร่องสลิตควบคู่กันไปด้วย

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดอาร์เมเจอร์หาได้จาก

$$E = 4.44 f N \phi_m Kw$$

จากสมการ จะมีแฟคเตอร์ตัวหนึ่งที่เกิดจากลักษณะการพันขดลวดคือ ค่าไวน์ดิงแฟคเตอร์ (winding factor) Kw จะมีค่าเท่ากับพิชแฟคเตอร์ (Kp) คูณกับคิสทริบิวชันแฟคเตอร์ (Kd) ดังที่กล่าวไว้ในภาคผนวก เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุดเราจะเลือกวิธีการพันที่ได้ค่าไวน์ดิงแฟคเตอร์สูงสุด ในที่นี้ว่าพิจารณาลักษณะการพัน 2 แบบ คือแบบแฉับ และแบบคอนเซนทริก-เซน

ถ้าพันแบบแฉับระยะพิชเต็มเราจะได้

$$\begin{aligned} Kp &= 1 \\ Kd &= \sin(n\alpha/2)/n\sin(\alpha/2) \\ n &= 36/4 = 9 \\ \alpha &= 180 * (1/9) = 20^\circ \end{aligned}$$

$$K_d = \sin[9*(20/2)]/[9*\sin(20/2)] = 0.64$$

$$K_w = 1 * 0.64 = 0.64$$

พื้นแบบคอนกรีต- เชนรอบนอกมีระยะพิชเต็ม จะได้

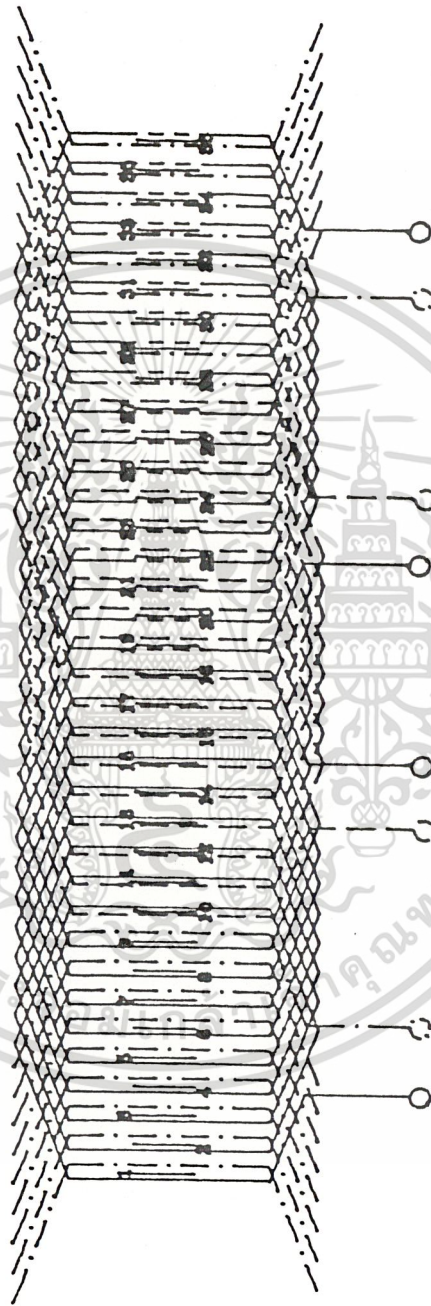

$$\begin{aligned} K_d &= 1 \\ (1-10) \quad K_{p_1} &= 1 \\ (2-9) \quad K_{p_2} &= \cos[180*(2/9)*(1/2)] = 0.94 \\ (3-8) \quad K_{p_3} &= \cos[180*(4/9)*(1/2)] = 0.266 \\ (4-7) \quad K_{p_4} &= \cos[180*(6/9)*(1/2)] = 0.5 \\ (5-6) \quad K_{p_5} &= \cos[180*(8/9)*(1/2)] = 0.174 \end{aligned}$$

การพื้นแบบนี้มีข้อเสียคือรอบนอกที่มีระยะพิชเต็มจะลงขดลวดได้เพียงครึ่งเดียว

การพื้นแบบคอนกรีต- เชนรอบนอกมีระยะพิชเศษส่วน จะได้

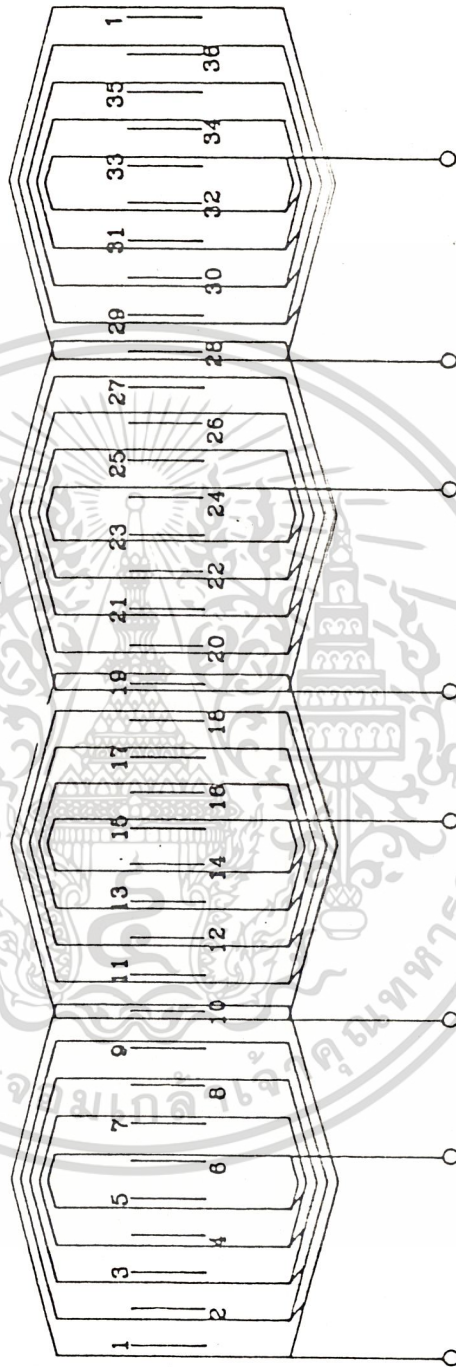
$$\begin{aligned} K_d &= 1 \\ (1-9) \quad K_{p_1} &= \cos[180*(1/9)*(1/2)] = 0.985 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



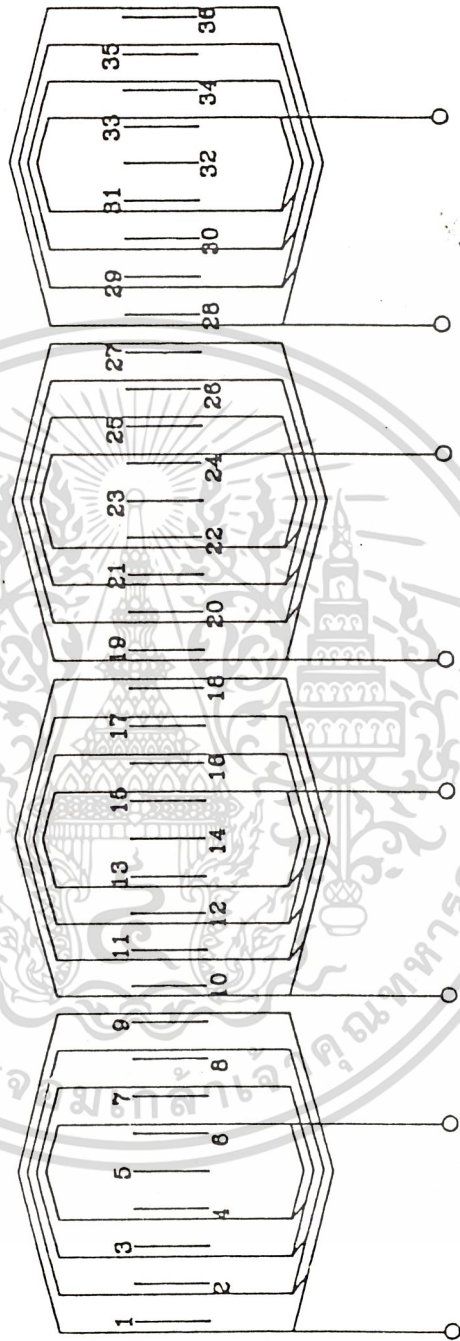
รูปที่ 3.4 การพันสอดแบบแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การพันแบบคอนเซนทริก-เฮน รอบนอกมีระยะพิชต์เต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การพันแบบคอนเซนทริก 2 เชน รอบแกนมีระยะพิเศษส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(2-8) \quad Kp_2 = \cos[180*(3/9)*(1/2)] = 0.866$$

$$(3-7) \quad Kp_3 = \cos[180*(5/9)*(1/2)] = 0.643$$

$$(4-6) \quad Kp_4 = \cos[180*(7/9)*(1/2)] = 0.342$$

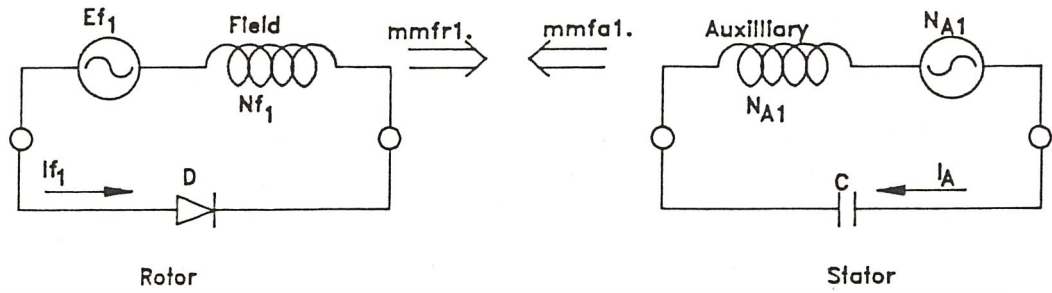
การพันแบบนี้มีข้อเสีย คือจะเสียพื้นที่ร่องสล๊อตไปโดยไม่ได้ใช้งาน 1 สล๊อต

### 3.4 การหาความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนของขดอาร์มาเจอร์ช่วย กับส่วนของขดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์

ในขั้นต้นเราจะต้องทดลองพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ และขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยที่สเตเตอร์ ด้วยจำนวนรอบค่าใดค่าหนึ่งก่อนแล้วนำมาทดลองต่อวงจรเหมือนกับที่ใช้งานจริง เพื่อที่จะหาข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ เมื่อมีพารามิเตอร์ตัวหนึ่งตัวใดเปลี่ยนแปลงไป

- EF<sub>1</sub> คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดสร้างสนามแม่เหล็ก
- IF<sub>1</sub> คือ กระแสไฟฟ้าดี. ซี. ที่ไหลในขดสร้างสนามแม่เหล็กผ่านไดโอด
- NF<sub>1</sub> คือ จำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
- mmf<sub>r1</sub> คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดสร้างสนามแม่เหล็ก = IF<sub>1</sub> \* NF<sub>1</sub>
- EA<sub>1</sub> คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดอาร์มาเจอร์ช่วย
- IA<sub>1</sub> คือ กระแสไฟฟ้าไหลในขดอาร์มาเจอร์ช่วยผ่านคาปาซิเตอร์
- NA<sub>1</sub> คือ จำนวนรอบของขดอาร์มาเจอร์ช่วย
- mmf<sub>A1</sub> คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดอาร์มาเจอร์ช่วย = IA<sub>1</sub> \* NA<sub>1</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

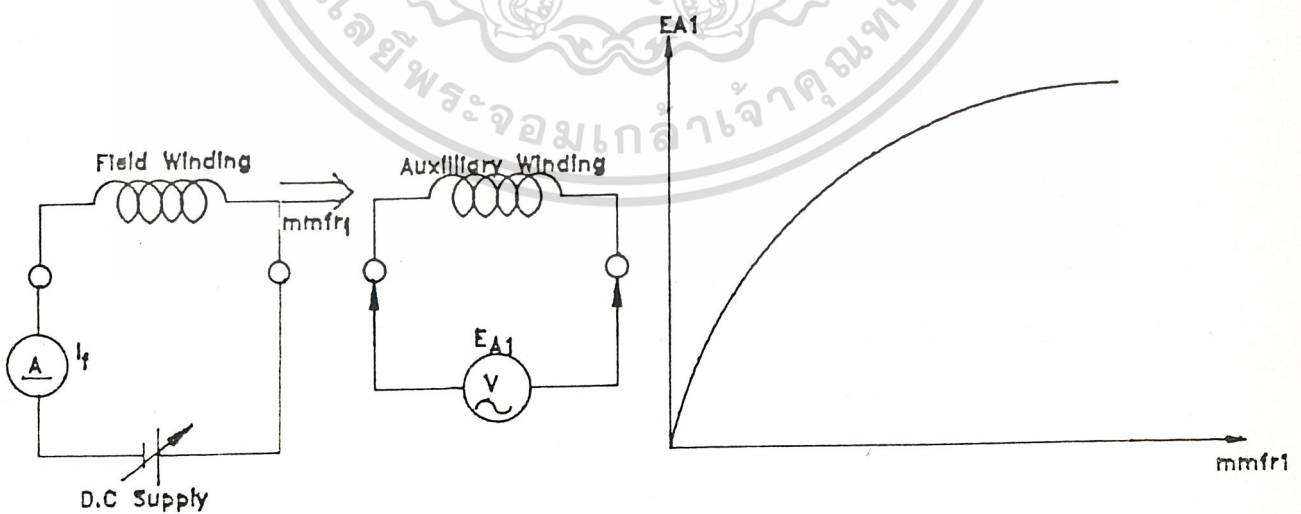


รูปที่ 3.7 แสดงส่วนประกอบของซดอาร์มาเจอร์ช่วยและซดสร้างสนามแม่เหล็ก

ตัวห้อยที่เป็น 1 หมายถึงเป็นข้อมูลที่มาจากการทดลองผันขดลวดในชั้นต้น  
ข้อมูลพื้นฐานสำคัญที่เราต้องการคือ

(ก). ความสัมพันธ์ระหว่าง  $mmfr_1$  กับ  $EA_1$

โดยใช้การทดสอบแบบวงจรเปิด (open circuit test) ดัง  
ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.7.1

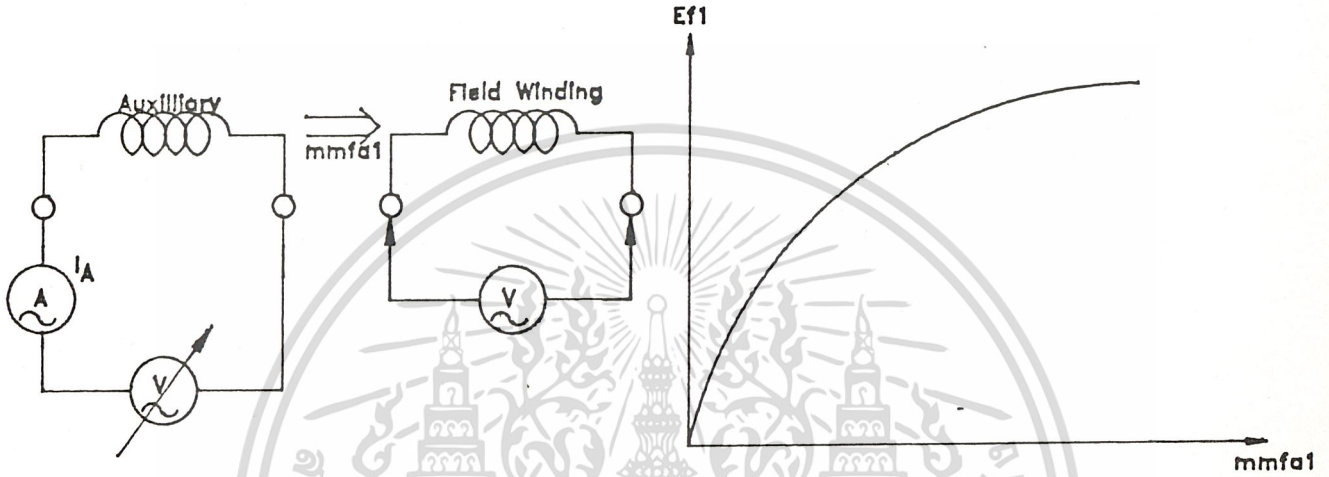


รูปที่ 3.8 แสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $mmfr_1$  กับ  $EA_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข). ความสัมพันธ์ระหว่าง  $mmfA_1$  กับ  $E_{f1}$

ทำเหมือนกับข้อ ก แต่ที่ขดอาร์มาเจอร์ช่วยใช้แหล่งจ่าย เอ.ซี. ที่ปรับค่าได้



รูปที่ 3.9 แสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $mmfA_1$  กับ  $E_{f1}$

(ค). ค่ารีแอคแตนซ์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ( $X_{Lr_1}$ )

โดยวิธี V-I method โดยถือว่าค่าความต้านทานมีค่าน้อยละทิ้งได้

(ง). ค่าซิงโครไนส์รีแอคแตนซ์ของขดอาร์มาเจอร์ช่วย ( $X_{SA_1}$ )

ตามวิธีในหัวข้อ 2.7 โดยถือว่า ค่าความต้านทานมีค่าน้อยละทิ้งได้เช่นกัน

หลังจากได้ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นมาแล้ว เราจะมีขั้นตอนในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

3.4.1. สมมุติค่ากระแสในขดอาร์มาเจอร์ช่วย ( $I_A$ ) จำนวนรอบที่ขดอาร์มาเจอร์ช่วย ( $N_A$ ) และจำนวนรอบที่ขดสร้างสนามแม่เหล็ก ( $N_f$ ) ตามที่เราต้องการ

3.4.2.  $\text{mmfA} = IA \times NA$

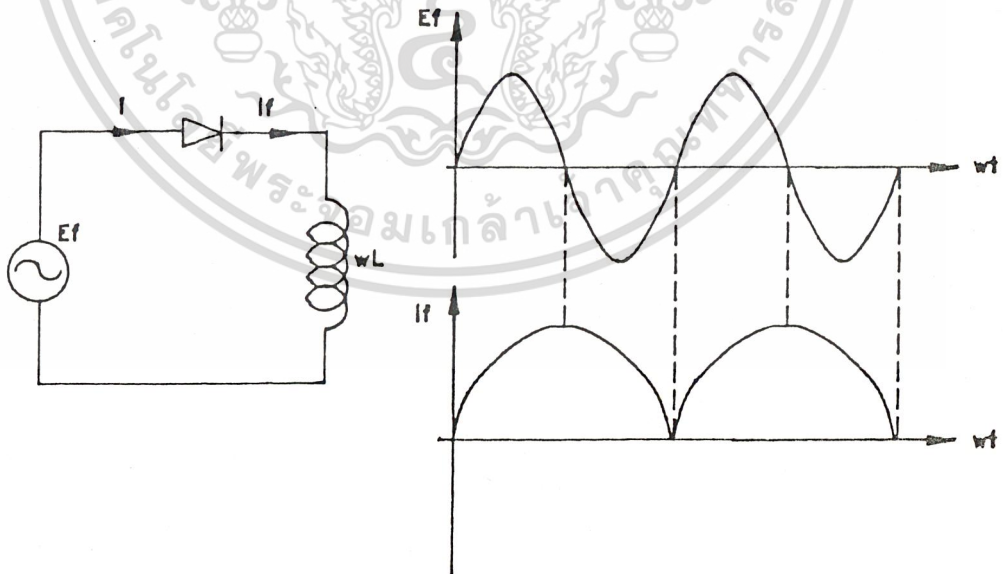
3.4.3. นำค่า  $\text{mmfA}$  ที่ได้ไปหาค่า  $Ef_1$  จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{mmfA}_1$  กับ  $Ef_1$  โดยค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดสร้างสนามแม่เหล็ก ( $Ef$ ) จะแปรตามจำนวนรอบ จะได้

$$Ef = Ef_1 * Nf / Nf1$$

3.4.4. ค่ารีแอคแตนซ์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ( $XLf$ ) แปรตามจำนวนรอบกำลังสอง จะได้

$$XLf = XLf_1 * (Nf / Nf1)^2$$

3.4.5. หาค่ากระแสไฟฟ้าดี.ซี. ที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ( $If$ )



รูปที่ 3.10 วงจรสมมุติและรูปคลื่นของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ของ Ef จะมีค่าเป็น 2 เท่าของ EA เนื่องจากเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กย้อนกลับจากขดอาร์เมเจอร์ช่วย จากวงจรสมมูลย์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เราจะได้

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = \sqrt{2} E_f \sin \omega t$$

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} E_f}{Z} [\sin(\omega t - \phi) + e^{-(R/\omega L)\omega t} \sin \phi]$$

เนื่องจาก  $R \ll \omega L$  ทำให้  $\phi$  มีค่าเข้าใกล้ 90 องศา ดังนั้นจะได้

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} E_f}{X_{L_f}} [\sin(\omega t - 90^\circ) + 1]$$

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} E_f}{X_{L_f}} [1 - \cos \omega t]$$

กระแสเฉลี่ย  $I_f = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{2} E_f}{X_{L_f}} [1 - \cos \omega t] d(\omega t)$

$$I_f = \frac{\sqrt{2} E_f}{X_{L_f}} A.$$

3.4.6.  $mmfr = I_f * N_f$

3.4.7. นำค่า mmfr ที่ได้ไปหาค่า EA<sub>1</sub> จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง mmfr<sub>1</sub> กับ FA<sub>1</sub> โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดอาร์เมเจอร์ช่วย (EA) จะแปรตามตัวจำนวนรอบ จะได้

$$EA = EA_1 * NA/NA_1$$

3.4.8. ค่ารีแอกเตอร์รวมที่ขดอาร์มาเจอร์ช่วย (XA) = EA/IA

3.4.9. XA = XC - XSA

XC = XA + XSA

XSA แปรตามจำนวนรอบกำลังสอง

XSA = XSA<sub>1</sub> \* (NA/NA<sub>1</sub>)<sup>2</sup>

3.4.10. ค่าคาปาซิเตอร์ c = 1/2πfX<sub>c</sub>

3.4.11. แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมจากโรเตอร์และขดอาร์มาเจอร์ช่วย

mmfrA = mmfr + mmfA

โดยวิธีการตั้งแต่ข้อ 3.4.1 - 3.4.11 เราสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณได้ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก  
ในกรณีที่เราให้ค่า mmfA คงที่ แล้วทำการปรับเปลี่ยนจำนวนรอบ NA กับค่า C ก็จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

ให้ตัวห้อยที่เป็น 0 คือ ค่าเดิม

ให้ตัวห้อยที่เป็น N คือ ค่าใหม่

mmfA<sub>0</sub> = mmfA<sub>N</sub>

IA<sub>0</sub> \* NA<sub>0</sub> = IA<sub>N</sub> \* NA<sub>N</sub>

(EA<sub>0</sub> / XA<sub>0</sub>) NA<sub>0</sub> = (EA<sub>N</sub> / XA<sub>N</sub>) NA<sub>N</sub>

EA<sub>0</sub> \* NA<sub>0</sub> = EA<sub>N</sub> \* NA<sub>N</sub>

XC<sub>0</sub> - XSA<sub>0</sub> = XC<sub>N</sub> \* XSA<sub>N</sub>

EA<sub>0</sub> \* NA<sub>0</sub> = VA<sub>0</sub> (NA<sub>N</sub> / NA<sub>0</sub>) \* NA<sub>N</sub>

XC<sub>0</sub> - XSA<sub>0</sub> = XC<sub>N</sub> - XSA<sub>0</sub> (NA<sub>N</sub> / NA<sub>0</sub>)<sup>2</sup>

XC<sub>N</sub> = XC<sub>0</sub> (NA<sub>N</sub> / NA<sub>0</sub>)<sup>2</sup>

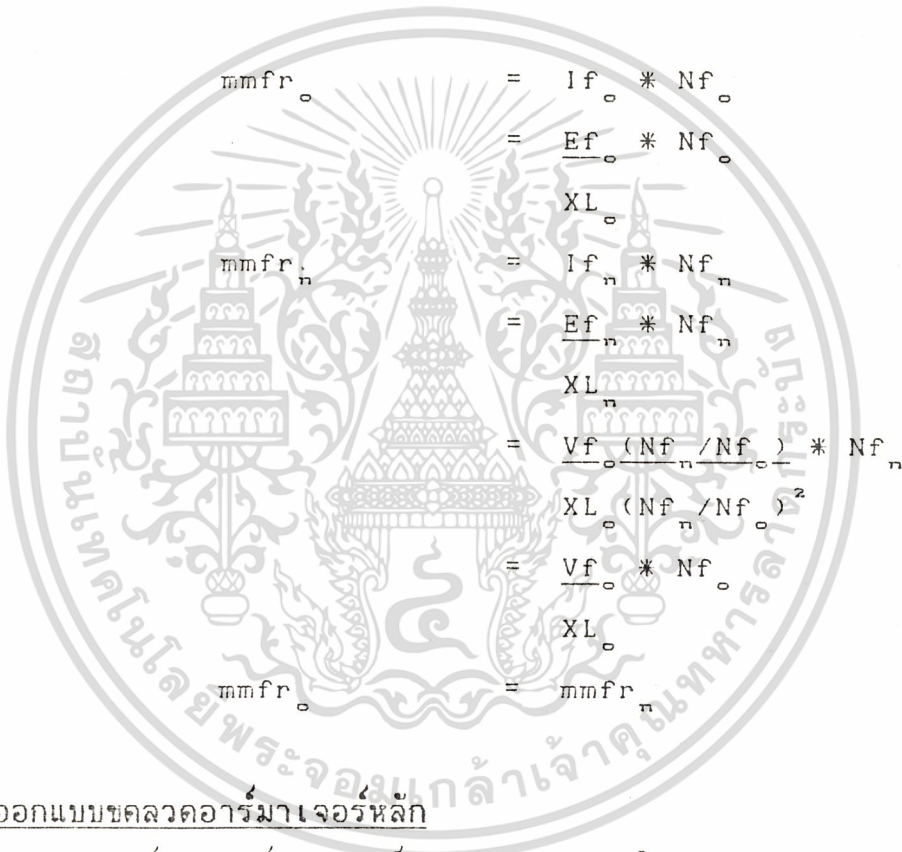
C<sub>N</sub> = C<sub>0</sub> (NA<sub>0</sub> / NA<sub>N</sub>)<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในกรณีที่ mmfA คงที่ เราพบว่า การปรับเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (Nf) ไม่ทำให้ค่า mmfr เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยสามารถพิสูจน์ได้จากสมการข้างล่าง

ให้ตัวห้อยที่เป็น 0 คือ ค่าเดิม

ให้ตัวห้อยที่เป็น N คือ ค่าใหม่



$$\begin{aligned}
 mmfr_0 &= I f_0 * N f_0 \\
 &= \frac{E f_0}{X L_0} * N f_0 \\
 mmfr_n &= I f_n * N f_n \\
 &= \frac{E f_n}{X L_n} * N f_n \\
 &= \frac{V f_0 (N f_n / N f_0)}{X L_0 (N f_n / N f_0)^2} * N f_n \\
 &= \frac{V f_0}{X L_0} * N f_0 \\
 mmfr_0 &= mmfr_n
 \end{aligned}$$

### 3.5 ออกแบบขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก

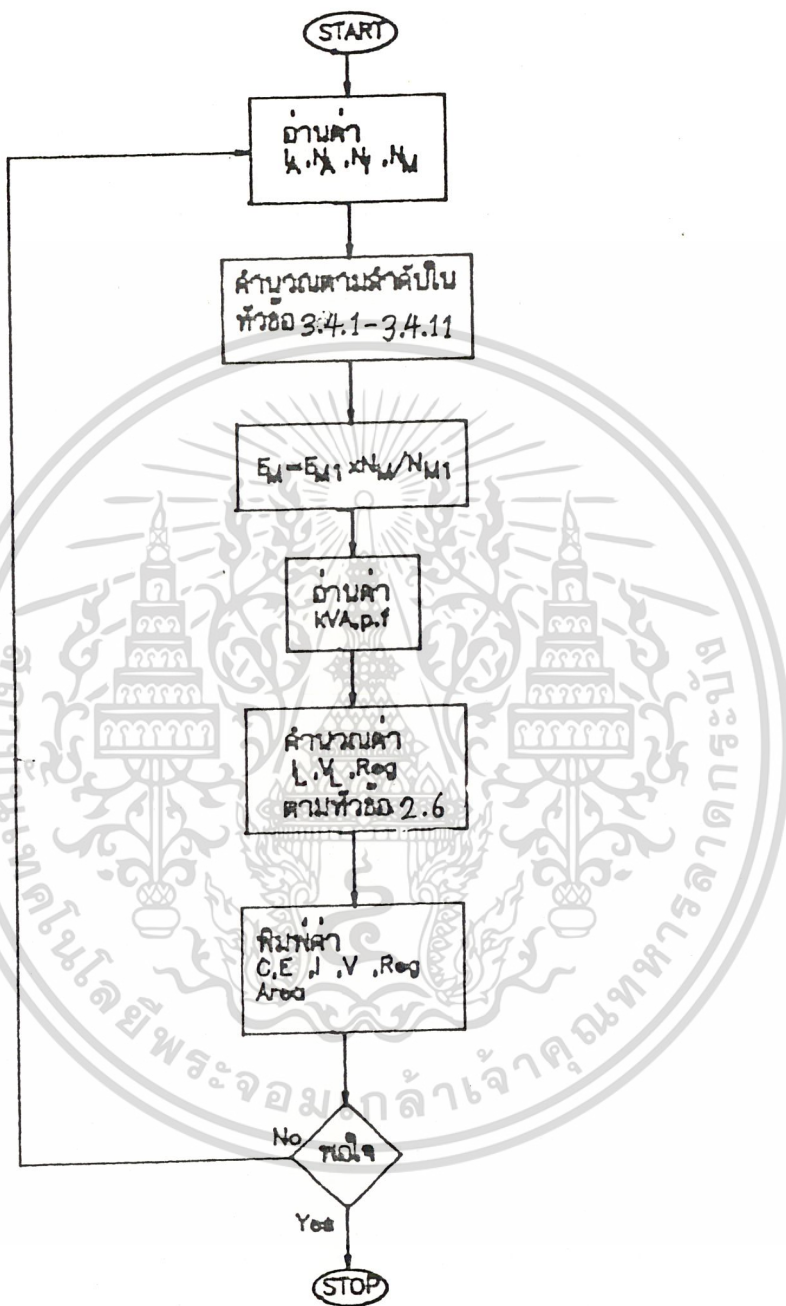
ขดลวดอาร์มาเจอร์หลักจะเป็นตัวจ่ายกระแส ให้กับภาระตามพิกัดแรงดันแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดอาร์มาเจอร์หลัก เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กรวมจากโรเตอร์และขดอาร์มาเจอร์ช่วย ซึ่งหาได้ตามความสัมพันธ์ในหัวข้อ 3.4 ดังนั้นการออกแบบขดลวดอาร์มาเจอร์หลักคือการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้ได้แรงดันตามพิกัด และหาลักษณะการพันขดลวดที่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด มีวิธีพิจารณาเช่นเดียวกับ การออกแบบขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย

### 3.6 การหาจำนวนตัวนำของแต่ละขดลวด

#### 3.6.1 การหาจำนวนตัวนำของขดลวดสเตเตอร์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าที่สเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดอาร์มาเจอร์หลักและขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยและจากหัวข้อ 3.4 เราพบว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กรวม ระหว่างโรเตอร์ กับขดอาร์มาเจอร์ช่วยจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ และกระแสของขดอาร์มาเจอร์ช่วย ดังนั้นพื้นที่ของขดอาร์มาเจอร์ช่วยจะแทนจำนวน แอมป์-เทอรัน ของขดลวด ส่วนพื้นที่ของขดลวดอาร์มาเจอร์หลักจะแทนกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พื้นที่ในกรณีที่แอมป์-เทอรัน ของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยที่น้อยเกินไป ก็จะไม่สามารทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าถึงค่าที่ต้องการได้ แต่ถ้า แอมป์-เทอรัน มากเกินไปก็จะไปลดพื้นที่ของขดลวดอาร์มาเจอร์หลักทำให้กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟาลดลงไปด้วย เราจะต้องหาสัดส่วนของพื้นที่ของขดอาร์มาเจอร์ช่วยกับขดอาร์มาเจอร์หลักที่เหมาะสม คือพยายามให้แอมป์-เทอรัน มากที่สุด เพื่อเรียกกระแสขั้วที่ดี แต่ต้องมีเนื้อที่เหลือพอสำหรับขดอาร์มาเจอร์หลักเพื่อที่จะให้แรงดันที่พิกัดได้

ในการคำนวณเราจะให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วย โดยการป้อนข้อมูลพื้นฐานจากการพันขดลวดที่สเตเตอร์ที่เข้าไปก่อน แล้วทำการปรับเปลี่ยนข้อมูลที่เราต้องการ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะคำนวณข้อมูลตัวอื่นที่สัมพันธ์กับข้อมูลที่เราปรับเปลี่ยนออกมา ขั้นตอนในการคำนวณ แสดงในไฟล์เวิร์กชีตในหน้าถัดไป



รูปที่ 3.11 โฟลว์ชาร์ทการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 การหาจำนวนตัวนำของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์

อาจที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4 การปรับเปลี่ยนจำนวนรอบของขดสร้างสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็กรวม เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กจากขดอาร์มาเจอร์ช่วยคงที่ ดังนั้นสิ่งที่เราจะต้องคำนึงถึงในการเลือกจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กคือ

ก.  $I_F$  จะบอกถึงขนาดของกระแสฟลักซ์ของไดโอด และขนาดของลวดตัวนำ

ข.  $E_F$  จะบอกถึงขนาดแรงดันรีเวอร์สบล็อกกิ้งของไดโอด

ในการออกแบบเราจะเลือกจุดที่ไดโอดมีราคาถูกที่สุด และ ลวดตัวนำลงในร่องสลิตไดโอดคือ

ดังนั้นวิธีการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นดังข้อมูล ข้างล่าง

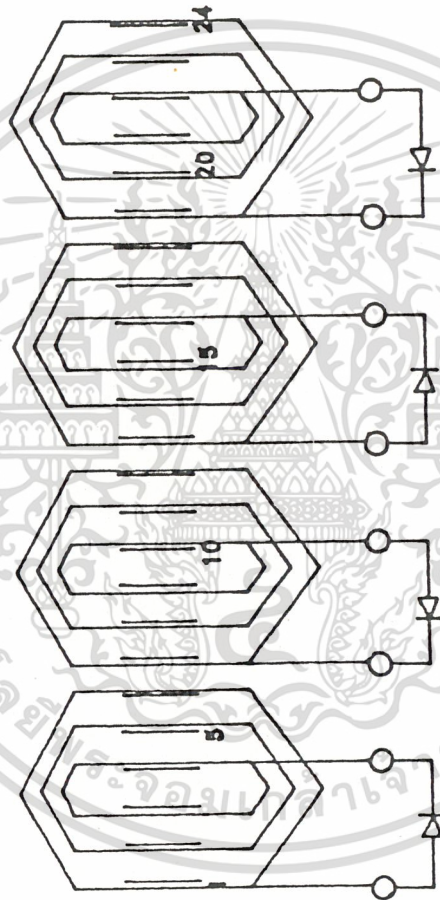
จำนวนขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว

วิธีการพัน คอนเซนทริก-เซน 1 ชั้น

ระยะขดลวด  $N_1, N_2, N_3 = (1-6), (2-5), (3-4)$

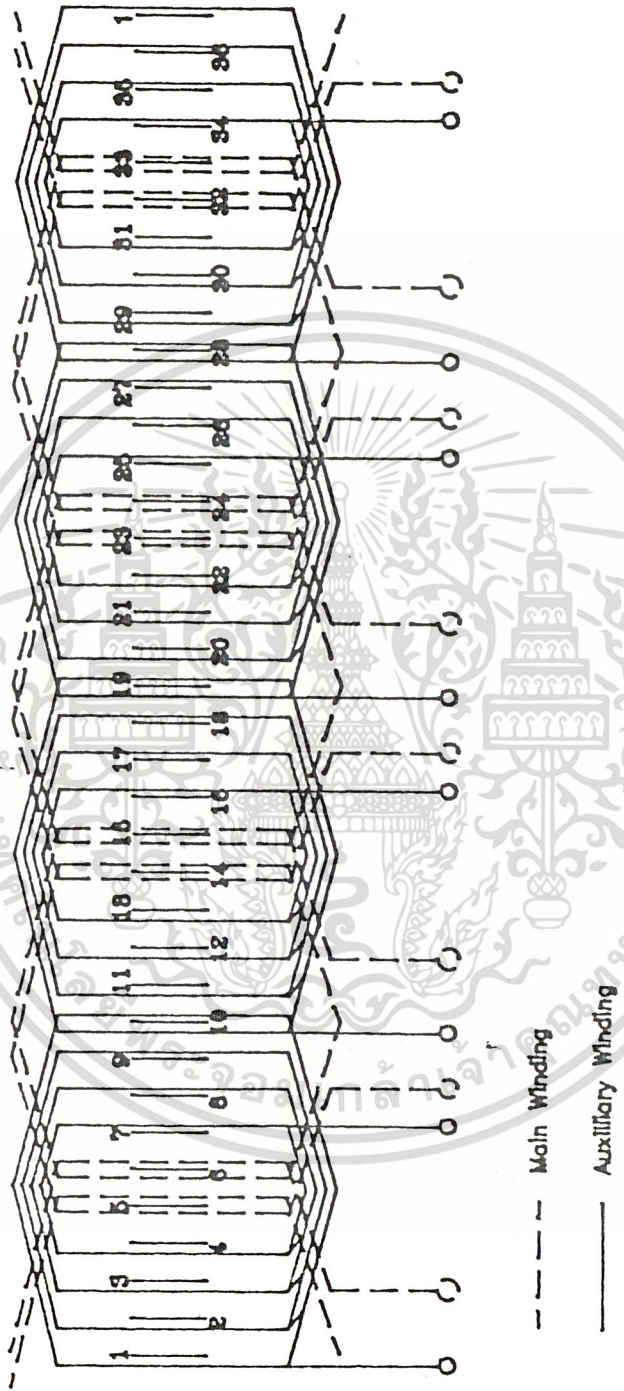
จำนวนรอบต่อขด  $N_1 : N_2 : N_3 = 3 : 5 : 2$

ขนาดตัวนำ SWG 21



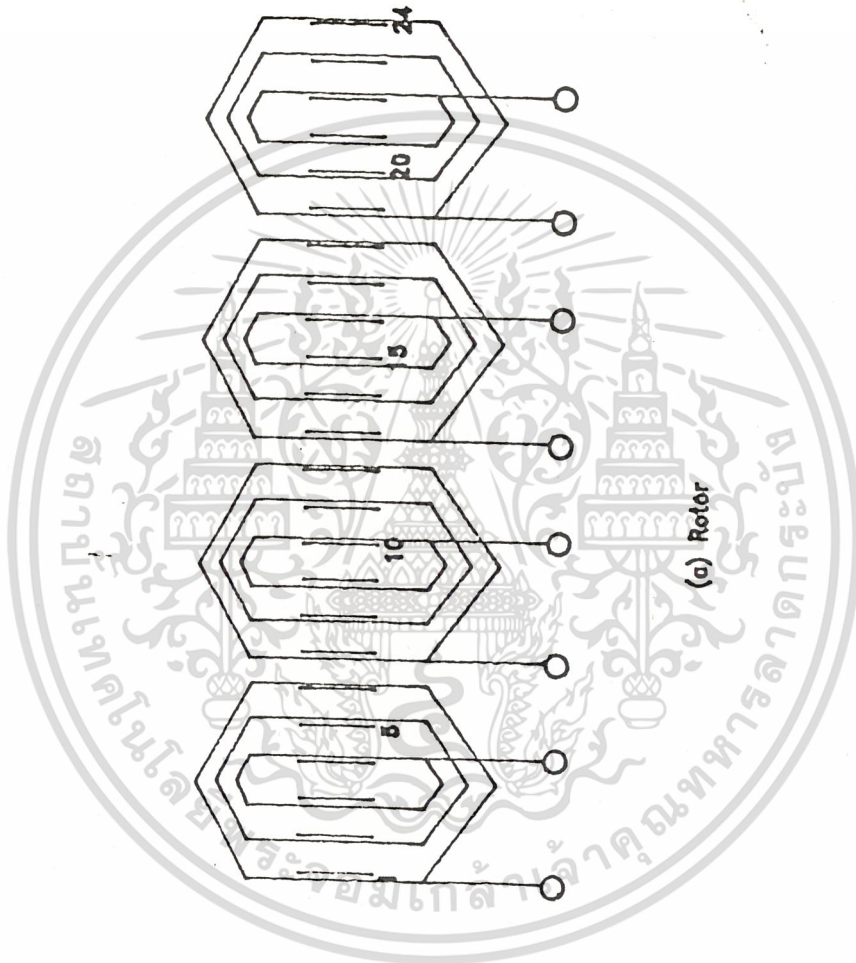
รูปที่ 3.12 การพับหลอดสร้างขบวนแม่เหล็กที่เชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

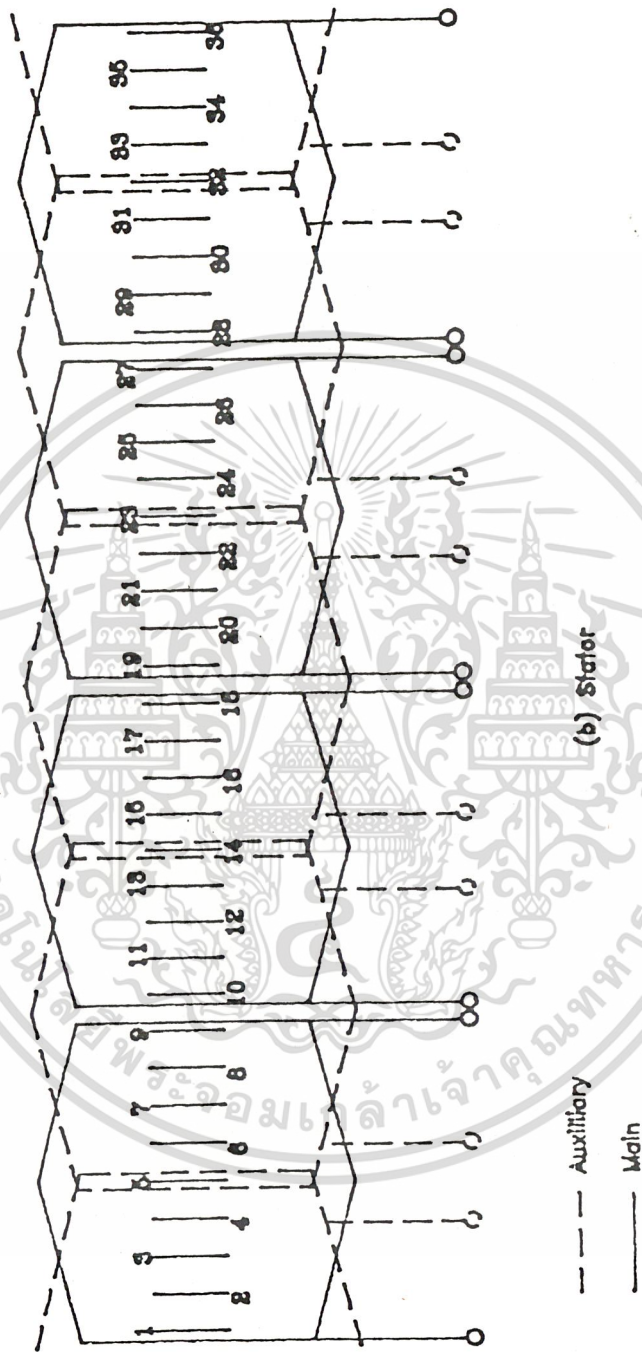


รูปที่ 3.13. การที่หลอดบนหลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ลักษณะการพันขดลวดในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

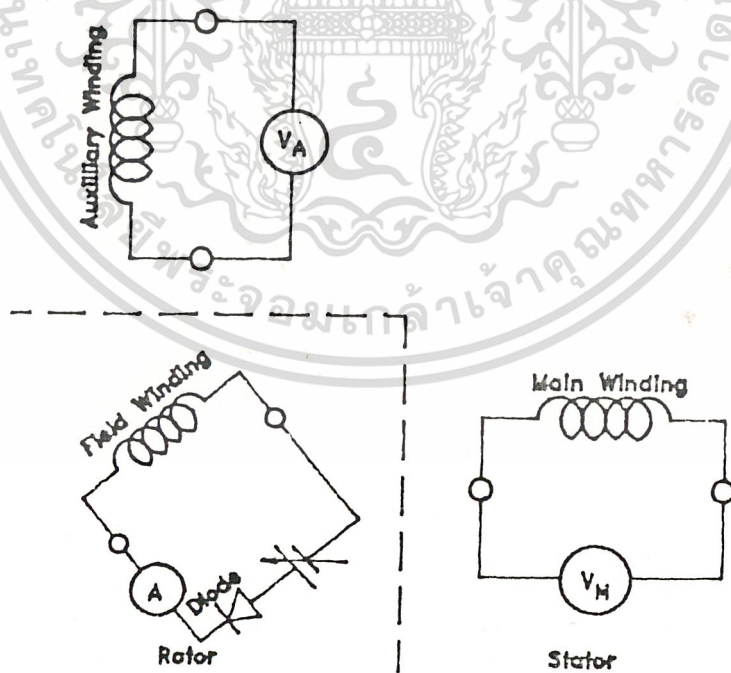
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองต่าง ๆ เพื่อเก็บข้อมูลเชิงตัวเลข และลักษณะรูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าจุดประสงค์ของการทดลองก็เพื่อหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้า รวมทั้งผลการทดสอบเครื่องจักรไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ดังนี้

#### 4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ด้านแรงดันระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์

ขับโรเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วเชิงโคจรนัส จ่ายกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก ผ่านแปรงถ่านจากแหล่งจ่ายกระแส ดี.ซี. ที่ปรับค่าได้ ปรับกระแสสร้างสนามแม่เหล็กที่ค่าต่าง ๆ จุดบันทึกค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรการทดลองที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.1

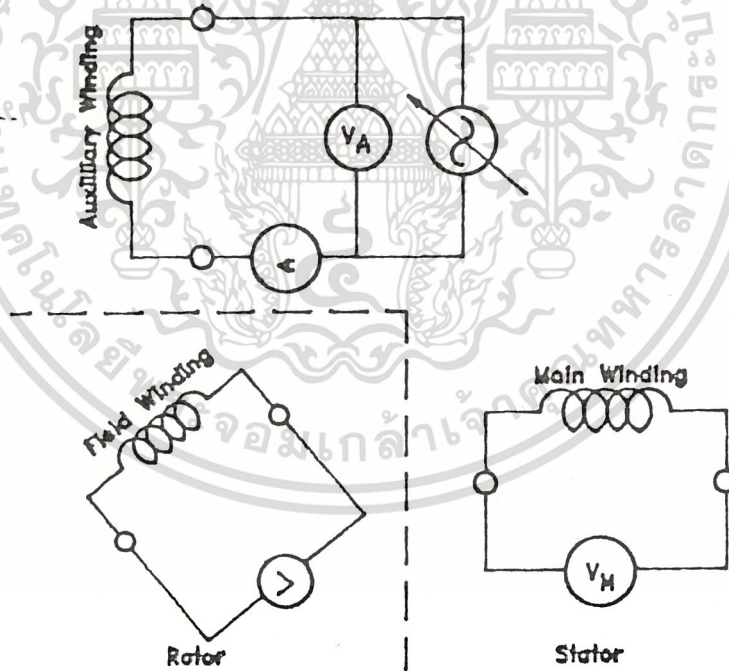
If (A)	Vf (V)		Vm (V)	Va (V)
	AC	DC		
0.2	7	4.4	18	13
0.4	11	9.4	34	25
0.6	16	13.0	56	40
0.8	21	17.0	72	50
1.0	26	22.0	90	62
1.2	30	26.0	100	72
1.4	34	30.0	120	80
1.6	40	35.0	134	92
1.8	44	40.0	145	100
2.0	50	45.0	158	105
2.2	55	50.0	165	112
2.4	60	55.0	175	118
2.6	68	60.0	182	124
2.8	72	64.0	186	128
3.0	80	70.0	192	130
3.5	90	80.0	200	138
4.0	110	94.0	210	145
4.5	120	110.0	220	150
5.0	130	120.0	230	170

ชุด Field 250 รอบ/ชั่วโมง SWG # 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์การเหนี่ยวนำบนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับจากขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยที่สเตเตอร์

หมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส เปิดวงจรของขดลวดสนามแม่เหล็กจ่ายแรงดันสัญญาณ A.C. ความถี่ 50 Hz ที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย ปรับค่ากระแสที่จ่ายแก่อาร์เมเจอร์ช่วยประมาณ 3 ค่า จดบันทึกกระแสอาร์เมเจอร์ช่วย ( $I_A$ ) แรงดันอาร์เมเจอร์ช่วย ( $V_A$ ) และแรงดัน A.C. ที่เกิดขึ้นในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์และสังเกตความถี่บนโรเตอร์



รูปที่ 4.2 วงจรในการทดลองที่ 4.2

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.2

$I_a$ (A)	$V_a$ (V)	$V_f$ (V)	$V_m$ (V)
0.2	4	15	0
0.4	8	27	0
0.6	13	45	0
0.8	19	60	0
1.0	24	80	0
1.2	29	98	0
1.4	35	110	0
1.6	40	130	0
1.8	46	150	0
2.0	50	170	10
2.5	62	200	12
3.0	74	250	15
3.5	85	275	20
4.0	96	320	21

ชุด Field      250    รอบ/ขั้ว      SWG # 23

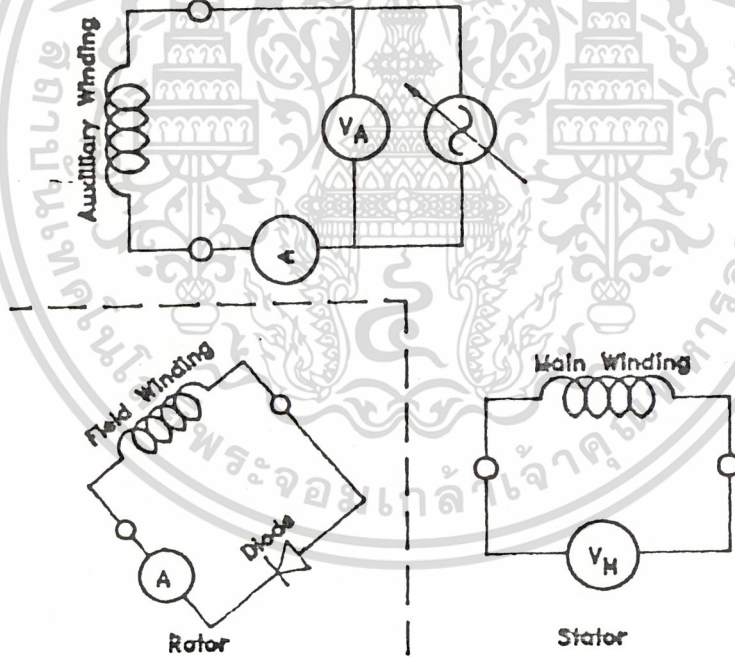
ชุด Auxiliary    40    รอบ/ขั้ว      SWG # 21

ชุด Main        60    รอบ/ขั้ว      SWG # 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเหนี่ยวนำบนโรเตอร์  
เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับและผลการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่  
เหล็กจากโรเตอร์

ต่อวงจรเหมือนหัวข้อ 4.2 ลัดวงจรขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กด้วยไดโอด  
โอดเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของกระแสบนโรเตอร์ และจับบันทึกกระแส  
ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ( $I_f$ ), กระแสและแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์  
ช่วยและแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก



รูปที่ 4.3 วงจรการทดลองที่ 4.3

**ตารางบันทึกผลการทดลอง 4.3**

Ia (A)	Va (A)	If (A)	Vm (V)
2	55	0.4	60
2.5	75	0.5	80
3	95	0.6	100
3.5	102	0.7	108
4	115	0.8	120
4.5	128	0.88	130
5	138	0.95	142

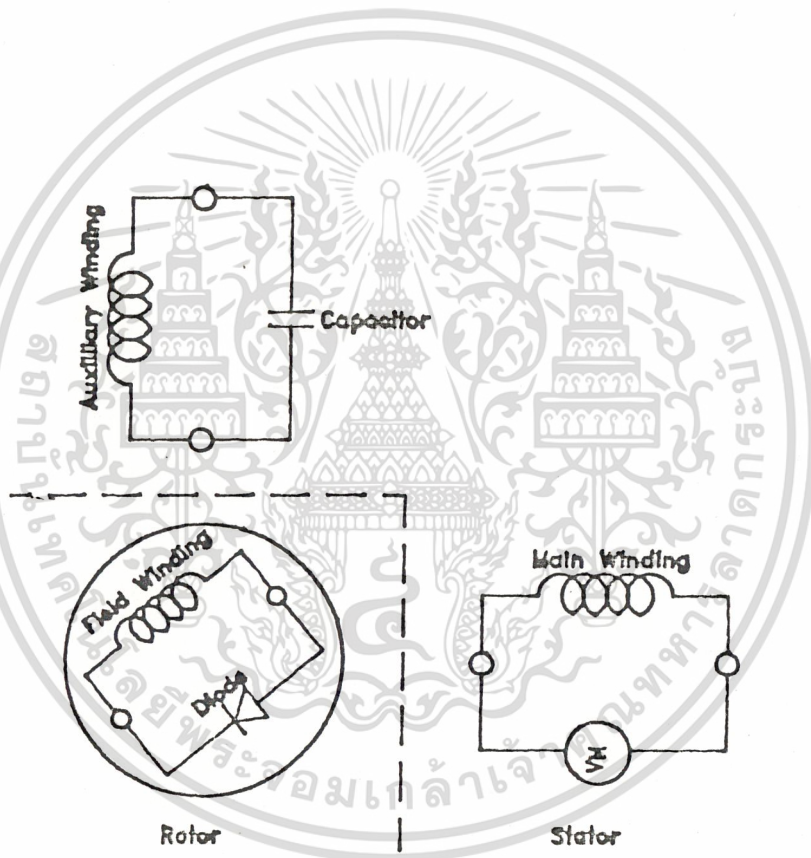
mmf (rotor)	mmf (stator)
100	80
125	100
150	120
175	140
200	160

ขด Field	250	รอบ/นิ้ว	SWG # 23
ขด Auxiliary	40	รอบ/นิ้ว	SWG # 21
ขด Main	60	รอบ/นิ้ว	SWG # 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดสอบเค็มระบบ

ต่อวงจรเหมือนกับหัวข้อ 4.3 โดยนำคาปาซิเตอร์มาต่อแทนแหล่งจ่าย  
เอซี โดยการต่อคาปาซิเตอร์ 6 ค่า สังเกตและบันทึกกระแสสร้างสนามแม่  
เหล็ก กระตุ้นกระแสแรงดันขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย และแรงดันขดลวดอาร์เม  
เจอร์หลัก



รูปที่ 4.4 วงจรการทดลองที่ 4.4

หมายเหตุ ในการทดลองต่อ c ที่ขด Aux ไม่สามารถ built up ได้จึง  
ต้อง เปลี่ยนไปต่อที่ขด main

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.4

c(μf)	If(A)	Im(A)	Vm(V)	Va(V)
48.00	1.20	3.15	182	104
48.75	1.20	3.20	184	106
50.00	1.30	3.50	190	110
52.50	1.40	3.80	200	115
55.00	1.46	4.10	210	120
57.50	1.54	4.50	216	124
60.00	1.60	4.80	220	125
65.00	1.76	5.40	232	130

mmf(rotor)	mmf(stator)	ratio
300	189	1.58:1
300	192	1.56:1
325	210	1.55:1
350	228	1.53:1
365	246	1.48:1
385	270	1.42:1
400	288	1.38:1
440	324	1.36:1

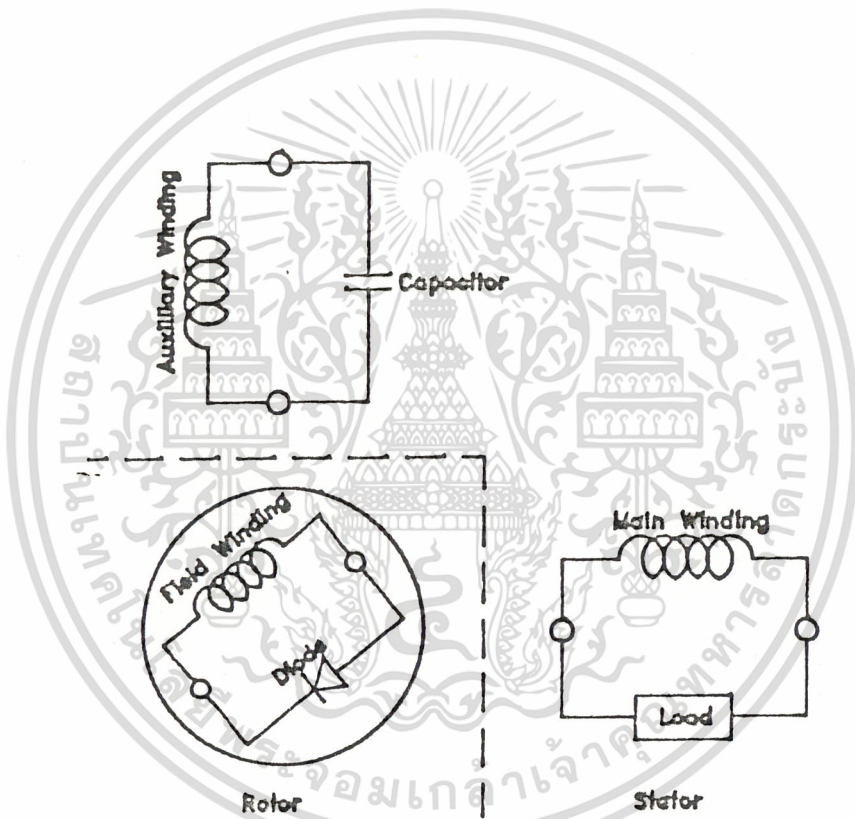
ชุด Field 250 รอบ/ขั้ว SWG # 23

ชุด Auxiliary 40 รอบ/ขั้ว SWG # 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดลองจ่ายภาระ ที่ค่าคาปาซิแตนซ์ชุดเซสค่าต่างๆ กัน

ในการทดลองนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา ผลกระทบของการเลือกใช้ค่าคาปาซิแตนซ์ค่าต่างๆ เช่น เปอร์เซนต์เรีกมูละชั้นของแรงดันที่ขั้วของอาร์เมเจอร์หลัก ต่อวงจรการทดลองดังรูป ทำการทดลองและจดบันทึกผลการทดลอง ในตารางบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 4.5 วงจรการทดลองที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.5

ค่าคาปาซิแตนซ์ที่ใช้ (C) 50 $\mu$ f					
Load (W)	I <sub>f</sub> (A)	I <sub>m</sub> (A)	V <sub>m</sub> (V)	I <sub>a</sub> (A)	V <sub>a</sub> (V)
100	1.20	3.4	188	0.30	104
200	1.18	3.3	182	0.57	100
300	1.13	3.2	180	0.84	94
400	1.10	3.1	175	1.08	90
500	1.10	3.1	172	1.30	85

ค่าคาปาซิแตนซ์ที่ใช้ (C) 55 $\mu$ f					
Load (W)	I <sub>f</sub> (A)	I <sub>m</sub> (A)	V <sub>m</sub> (V)	I <sub>a</sub> (A)	V <sub>a</sub> (V)
100	1.42	4.1	208	0.30	116
200	1.36	4.0	204	0.60	110
300	1.32	3.9	200	0.90	105
400	1.30	3.8	198	1.15	100
500	1.28	3.7	196	1.40	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคาปาซิแตนซ์ที่ใช้ (C) <span style="float: right;">60 <math>\mu</math>f</span>					
Load (W)	I <sub>f</sub> (A)	I <sub>m</sub> (A)	V <sub>m</sub> (V)	I <sub>a</sub> (A)	V <sub>a</sub> (V)
100	1.60	4.8	220	0.30	122
200	1.52	4.6	218	0.62	118
300	1.50	4.5	215	0.92	112
400	1.45	4.5	212	1.20	108
500	1.42	4.4	210	1.46	102

ทำ V-I method ในแต่ละขด

ขด main

I (A)	V (v)	$\phi$ (องศา)
1.0	46	72
1.5	74	72
2.0	96	72
2.5	120	72
3.0	140	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุด AUX

I (A)	V (v)	φ (องศา)
1.0	23	72
1.5	36	72
2.0	46	72
2.5	60	72
3.0	72	72

ชุด Field

I (A)	V (v)	φ (องศา)
0.2	70	90
0.3	115	90
0.4	155	90
0.5	200	90
0.6	240	90

ชุด Field	250	รอบ/ชั่วโมง	SWG # 23
ชุด Auxiliary	40	รอบ/ชั่วโมง	SWG # 21
ชุด Main	60	รอบ/ชั่วโมง	SWG # 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดลอง และเก็บข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

การทดลองนี้มีลักษณะการต่อวงจร เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 ถึง หัวข้อ 4.4 โดยเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ต้องการจะศึกษา และผลการทดลองดังต่อไปนี้

ผลการทดลองเปลี่ยนค่าคาปาซิแตนซ์ขดเซย์

$c$ ( $\mu f$ )	$I_f$ (A)	$I_a$ (A)	$V_a$ (V)
22.5	1.22	2	240
25	1.47	2.5	270
30	1.8	3.5	315

ตารางแสดงผลการคำนวณแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

rotor mmf (A-T)	stator mmf (A-T)
305.0	180
367.5	225
450.0	315

ขด Field	250	รอบ/ขั้ว	SWG # 23
ขด Auxiliary	90	รอบ/ขั้ว	SWG # 21
ขด Main	60	รอบ/ขั้ว	SWG # 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดสอบ V-I Memod ของอาร์มาเจอร์ช่วย ที่พื้นแบบ lap

$I_{dc}$ (A)	$V_{dc}$ (V)	$I_{ac}$ (A)	$V_{ac}$ (V)	$\phi$ (องศา)
1.0	8	1.0	38	72
1.5	12	1.5	58	72
2.0	15	2.0	75	72
2.5	20	2.5	95	72
3.0	28	3.0	113	72

ตารางแสดงผลการเพิ่มจำนวนรอบขด field เป็น 425 รอบต่อขั้ว

$c$ ( $\mu f$ )	$I_f$ (A)	$I_a$ (A)	$V_a$ (u)
40	0.65	2.2	124
45	0.80	2.8	147
60	1.10	4.4	178

Field 425 รอบ/ขั้ว      Aux shell 90 รอบ/ขั้ว  
 main lap full-pitch      90 รอบ/ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองลัดวงจร และเปิดวงจรที่ขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก และขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย เพื่อนำข้อมูลไปหา ซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้า

Short circuit test ขด Aux open main

$I_f$ (A)	$I_{sc}$ (A)
0.2	0.70
0.4	1.20
0.6	1.75
0.8	2.50
1.0	3.00
1.2	3.60
1.4	4.30
1.6	4.90
1.8	5.50
2.0	6.00

ขด Field 140 รอบ/ขั้ว SWG # 23 concentric chain

ขด Auxiliary 70 รอบ/ขั้ว SWG # 21 concentric chain

ขด Main 350 รอบ/ขั้ว SWG # 21 shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Short main

If (A)	Isc (A)
0.2	0.45
0.4	0.75
0.6	1.05
0.8	1.45
1.0	1.75
1.2	2.20
1.4	2.50
1.6	2.90
1.8	3.20
2.0	3.50
2.2	3.80
2.4	4.30
2.6	4.70
2.8	5.00
3.0	5.30

ขด Field 140 รอบ/ขั้ว SWG # 23 concentric chain

ขด Auxiliary 70 รอบ/ขั้ว SWG # 21 concentric chain

ขด Main 350 รอบ/ขั้ว SWG # 21 shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V-I method

ผลการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

field		main		auxiliary	
Vf (V)	If (A)	Vm (V)	Im (A)	Va (V)	Ia (A)
160	0.2	34	0.5	75	0.5
248	0.3	70	1.0	120	0.8
315	0.4	85	1.2	150	1.0
410	0.5	92	1.4	180	1.2

ผลการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

field		main		auxiliary	
Vf (V)	If (A)	Vm (V)	Im (A)	Va (V)	Ia (A)
24	1	8	1	4	1
47	2	16	2	8	2
75	3	24	3	12	3
100	4	32	4	16	4

ชุด Field 140 รอบ/ขั้ว SWG # 23 concentric chain

ชุด Auxiliary 70 รอบ/ขั้ว SWG # 21 concentric chain

ชุด Main 350 รอบ/ขั้ว SWG # 21 shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การทดลองจ่ายภาระความต้านทาน

ผลการทดลองจ่ายภาระที่ค่า  $c = 30 \mu f$

load(w)	I <sub>f</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)	I <sub>L</sub> (A)	V <sub>c</sub> (v)	V <sub>m</sub> (v)	N(rpm)	reg(%)
0	2.60	5.0	0.0	440	260	1476	-
100	2.40	5.0	0.5	430	250	1472	4.00
200	2.35	4.8	1.0	430	235	1467	10.64
300	2.30	4.6	1.4	430	223	1462	16.60

ผลการทดลองจ่ายภาระที่ค่า  $c = 37.50 \mu f$

load(w)	I <sub>f</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)	I <sub>L</sub> (A)	V <sub>c</sub> (v)	V <sub>m</sub> (v)	N(rpm)	reg(%)
0	2.70	6.5	0.0	460	270	1465	-
100	2.60	6.2	0.5	460	260	1461	3.85
200	2.60	6.0	1.0	450	245	1451	10.20
300	2.50	6.0	1.4	450	230	1453	17.40
400	2.50	5.8	1.8	450	220	1453	22.70

ขด Field 140 รอบ/ขั้ว SWG # 23 concentric chain  
ขด Auxiliary 70 รอบ/ขั้ว SWG # 21 concentric chain  
ขด Main 350 รอบ/ขั้ว SWG # 21 shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loading tests.

RESISTIVE LOAD

Load (watts)	Vm	Im	Vin	Iin	Oin	Va	Ia	r
0.00	225.00	0.00	225.00	2.30	72.00	390.00	2.90	14
100.00	212.00	0.40	225.00	2.50	72.00	380.00	2.80	14
200.00	200.00	0.80	225.00	2.55	72.00	375.00	2.70	14
300.00	190.00	1.20	225.00	2.60	72.00	375.00	2.70	14
400.00	182.00	1.52	225.00	2.60	72.00	375.00	2.70	14
500.00	177.00	1.90	225.00	2.65	72.00	380.00	2.80	14

INDUCTIVE LOAD

Load (Henry)	Vm	Im	Vin	Iin	Oin	Va	Ia	r
0.00	225.00	0.00	220.00	2.40	82.44	390.00	2.90	14
1.14	235.00	0.46	220.00	2.50	72.00	410.00	3.50	14
1.20	239.00	0.58	220.00	2.50	64.80	415.00	3.60	14
0.96	240.00	0.72	220.00	2.50	64.80	425.00	3.80	14
0.72	246.00	1.05	218.00	2.50	64.80	445.00	4.30	14
0.48	253.00	1.40	217.00	2.60	54.00	475.00	4.90	14
0.24	255.00	2.50	216.00	3.20	43.20	580.00	6.80	14

CAPACITIVE LOAD

Load (uF)	Vm	Im	Vin	Iin	Oin	Va	Ia	r
0.00	225.00	0.00	232.00	2.75	117.00	2.90	390.00	14
1.07	260.00	0.60	232.00	2.76	117.00	2.70	380.00	14
1.15	265.00	0.69	232.00	2.78	117.00	2.68	376.00	14
1.25	275.00	0.83	236.00	2.80	117.00	2.62	375.00	14
1.36	284.00	1.10	236.00	2.82	117.00	2.60	372.00	14
1.50	290.00	1.20	236.00	2.85	117.00	2.60	372.00	14
1.67	300.00	1.40	236.00	2.90	117.00	2.60	370.00	14
1.88	320.00	2.00	237.00	2.90	117.00	2.65	365.00	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดสอบเพื่อเขียนเซอร์เคิลไอต่อแอมของมอเตอร์ที่ตัวขับ

	$V_{pn}$ (v)	$I_{pn}$ (A)	องศา( $\theta$ )	Power/Per Phase (Watt)
No Load Test	220	2.25	83	30
Block Rotor Test	50	3.7	50	120

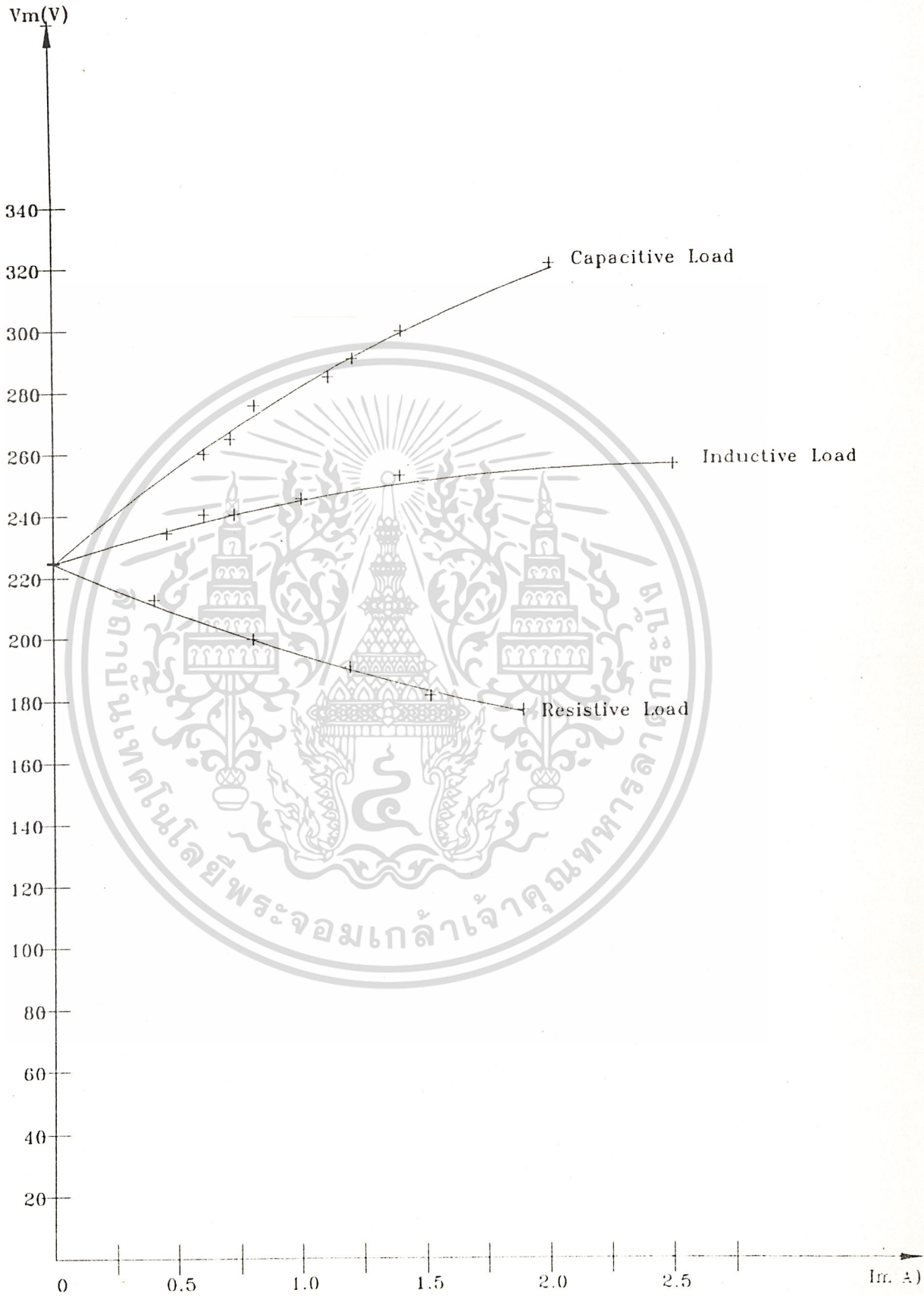
ตารางผลการทดสอบโดย V-I Method ของมอเตอร์ตัวขับ

$V_{dc}$ (V)	$I_{dc}$ (A)	$R_{dc}$
1.0	0.2	5.00
2.2	0.4	5.50
3.2	0.6	5.33
4.2	0.8	5.25
5.2	1.0	5.20

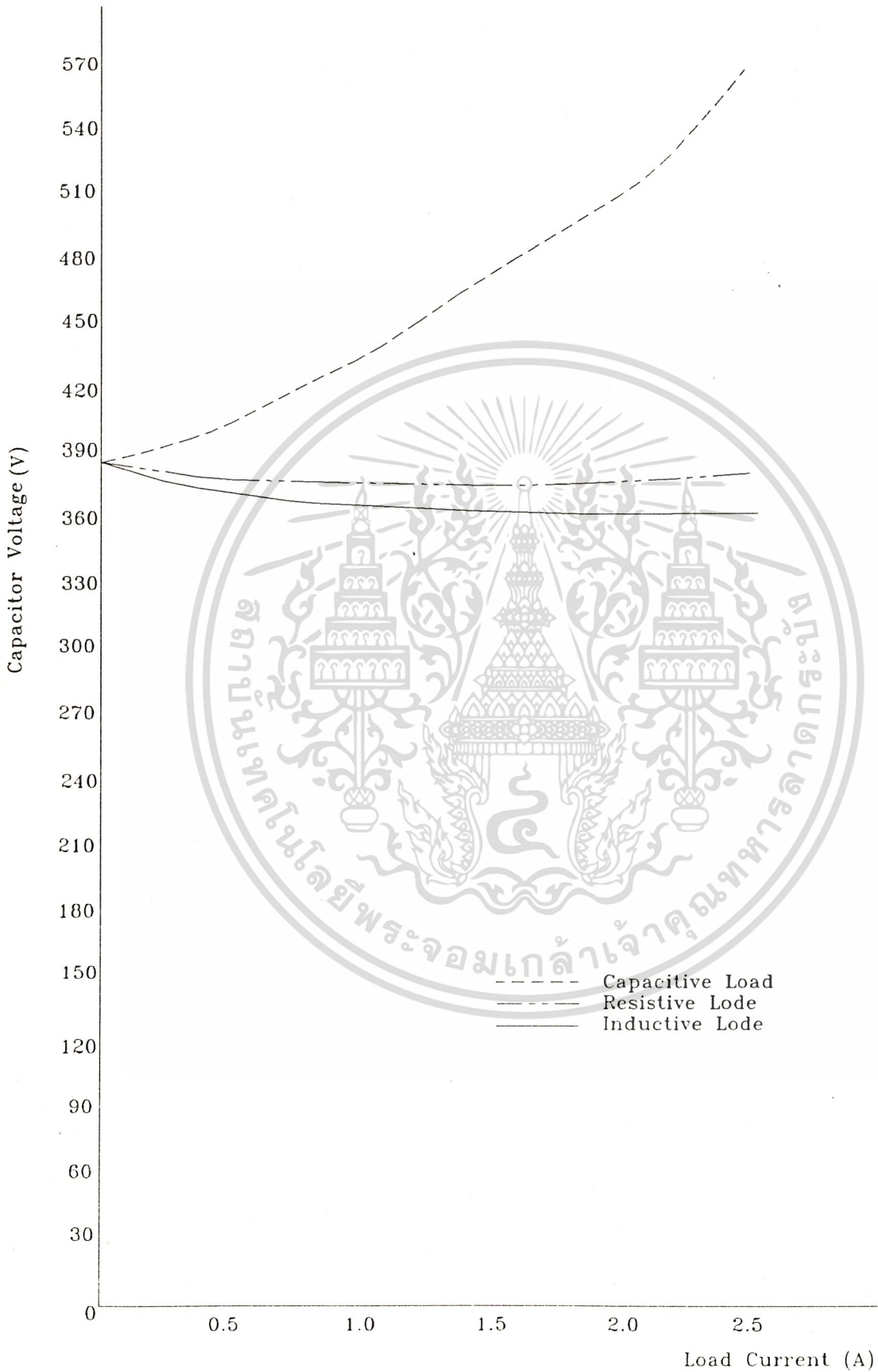
$$R_{dc} = 1.20(5.00+5.50+5.33+5.25+5.20)/5$$

$$= 6.31 \text{ ohms.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



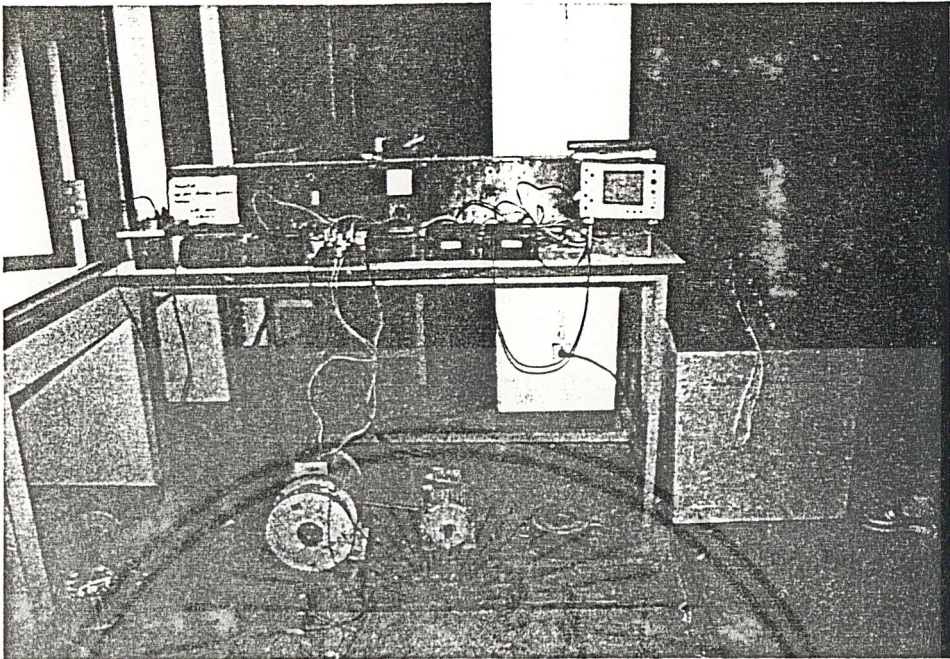
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. ให้อิสระแก่ผู้รับใช้เพื่อเผยแพร่ข้อมูลเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เชิงพาณิชย์ได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



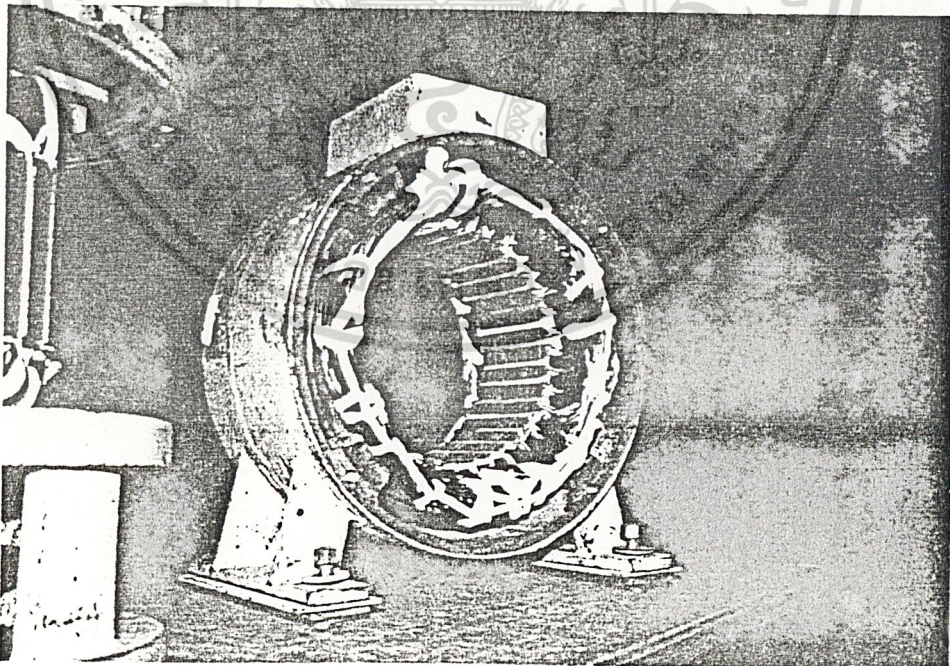
เอกสารนี้เป็นที่ 4.7 ที่สงวนไว้เพื่อข้อมูลเท่านั้น ไม่ควรใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยอื่นใดที่ปรากฏในเอกสารนี้มิได้มีเจตนาที่จะ  
อ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





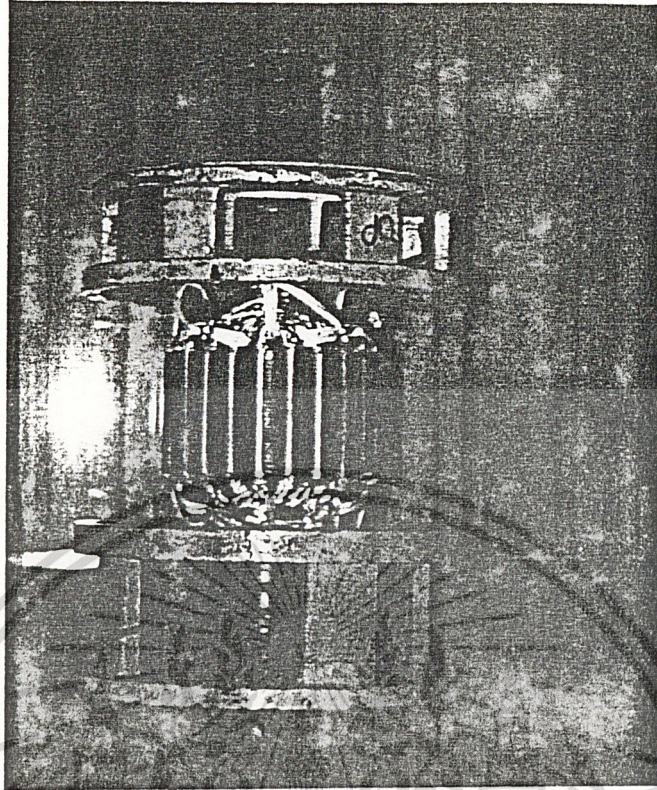


รูปที่ 4.10 ชุดทดลองโครงงาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขั้วโครนัสเฟสเดียวชนิดไร้แปรงถ่านกระตุ้นตัวเอง ใช้คาปาซิเตอร์ชดเชย

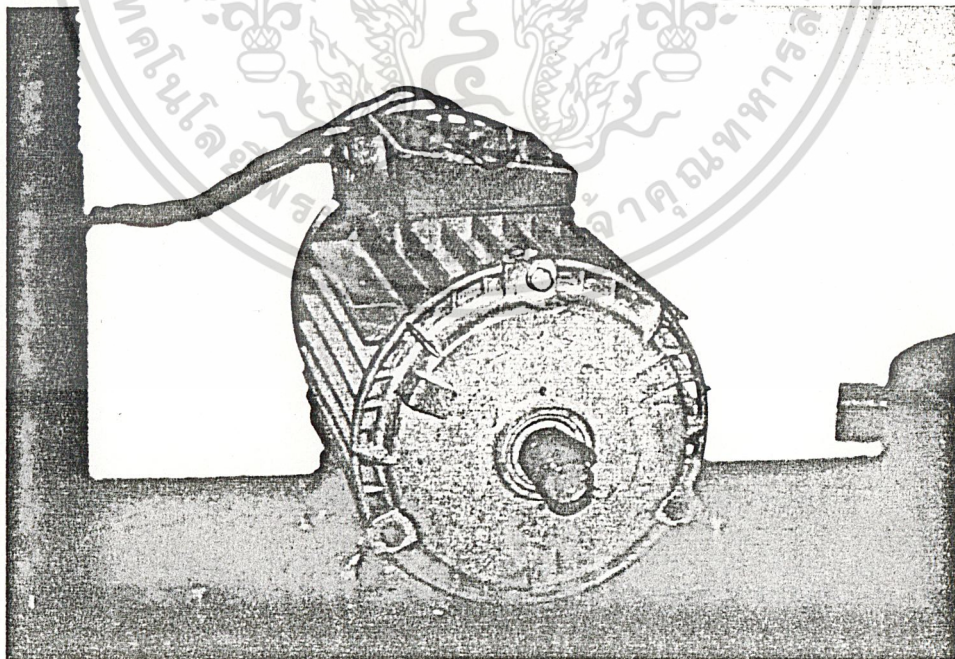


รูปที่ 4.11 สเตเตอร์

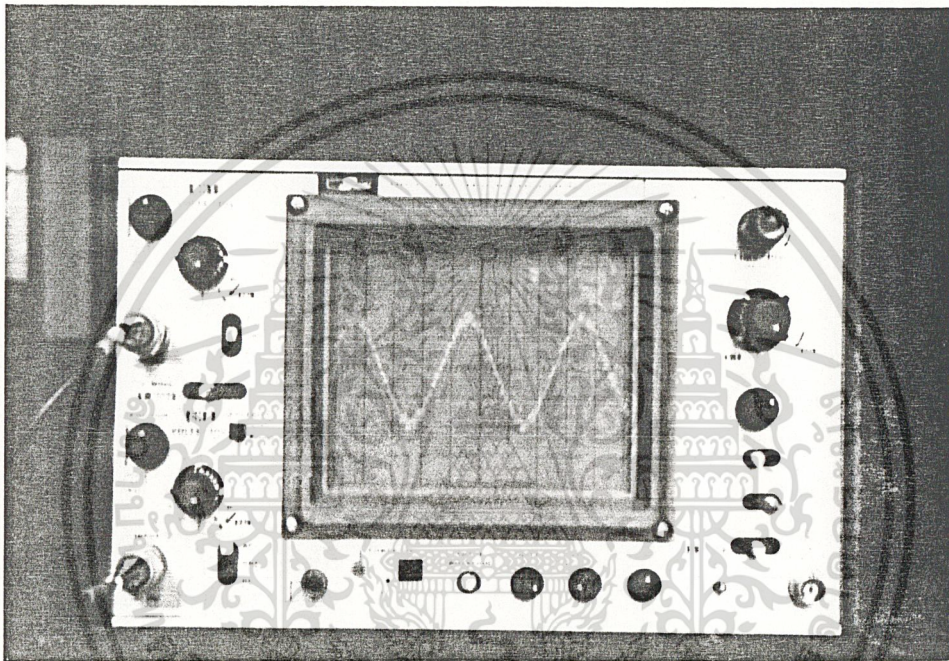
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 โวลเตอร์



รูปที่ 4.13 มอเตอร์ต้นกำลังขับ เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 แรงม้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



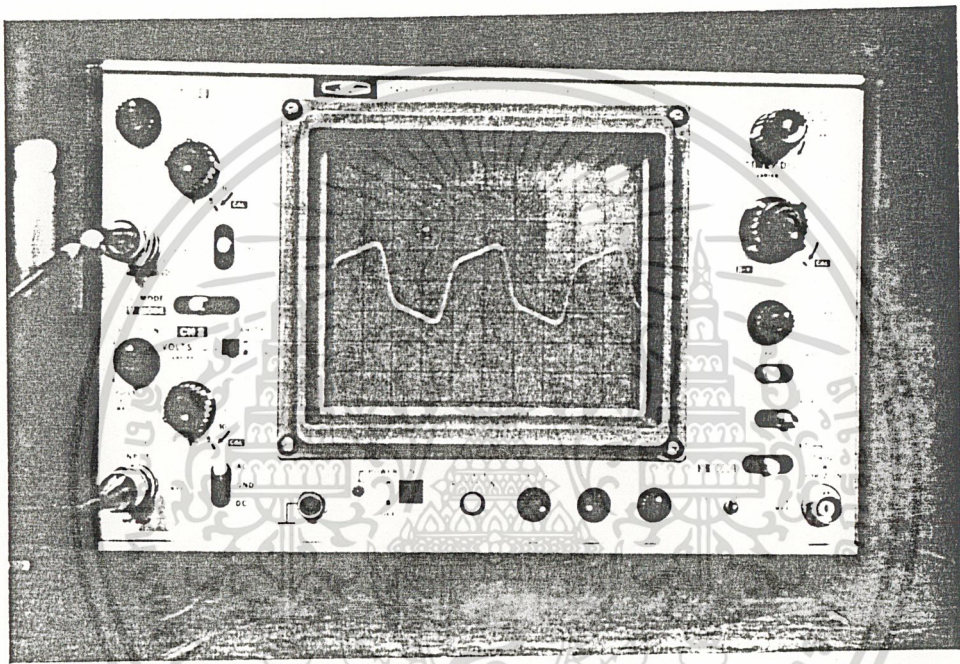
รูปที่ 4.14 สัญญาณแรงดันที่ขด Main เนื่องจากสนามแม่เหล็กตกต่าง

Time/Div 10 msec

Volt/Div 0.2 v

prob x 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

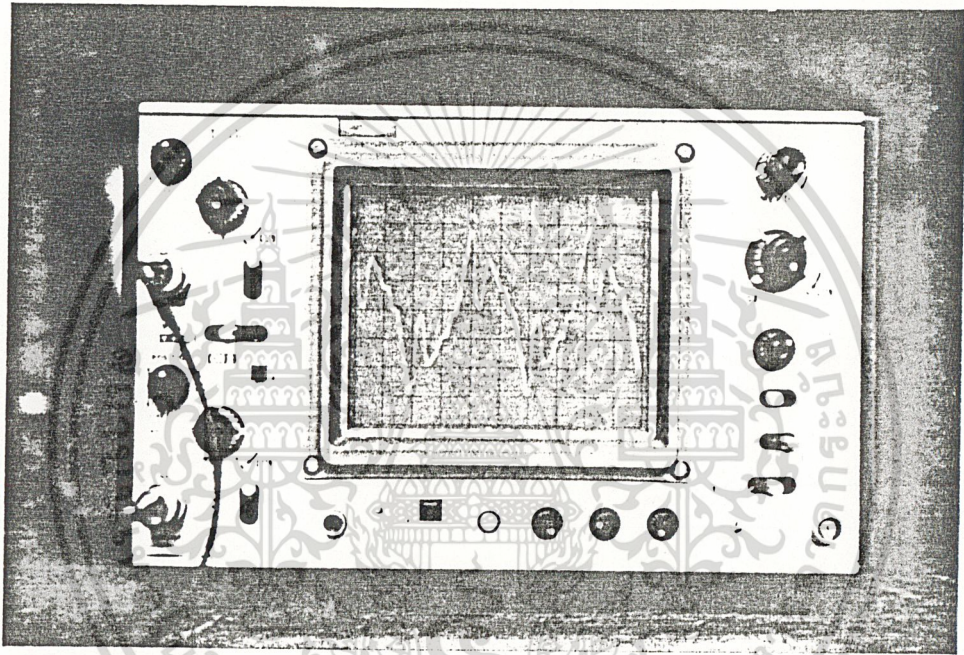


รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันคร่อมคาปาซิเตอร์ชุดเซซขณะไว้ภาระ

Time/Div 10 msec

Volt/Div 10 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

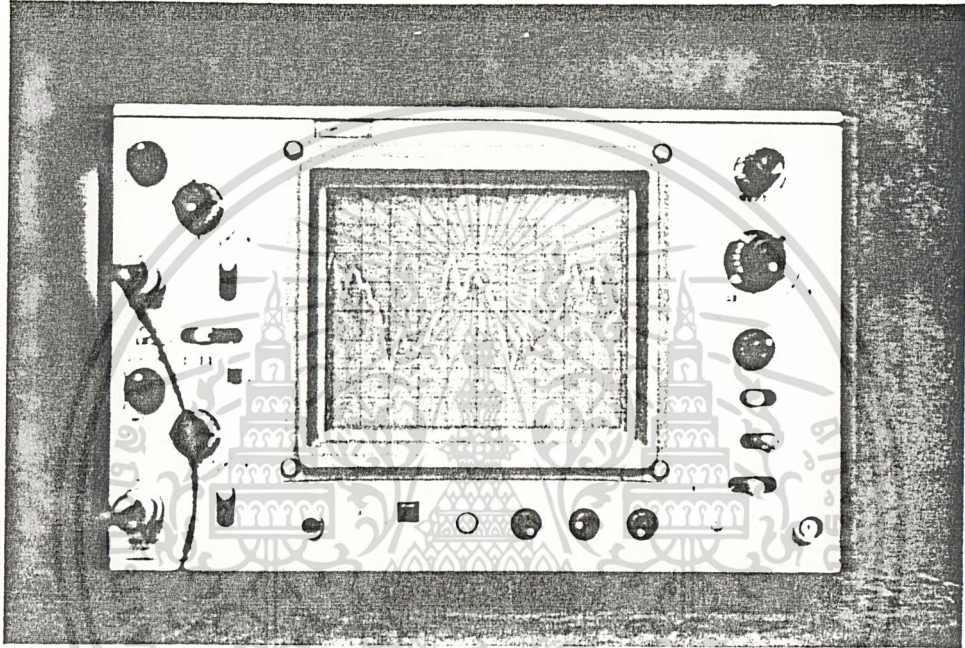


รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันที่ขั้วของอามีแเจอร์ลักษณะไว้ลาระ

Tim/Div 10 msec

Volt/Div 10 v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



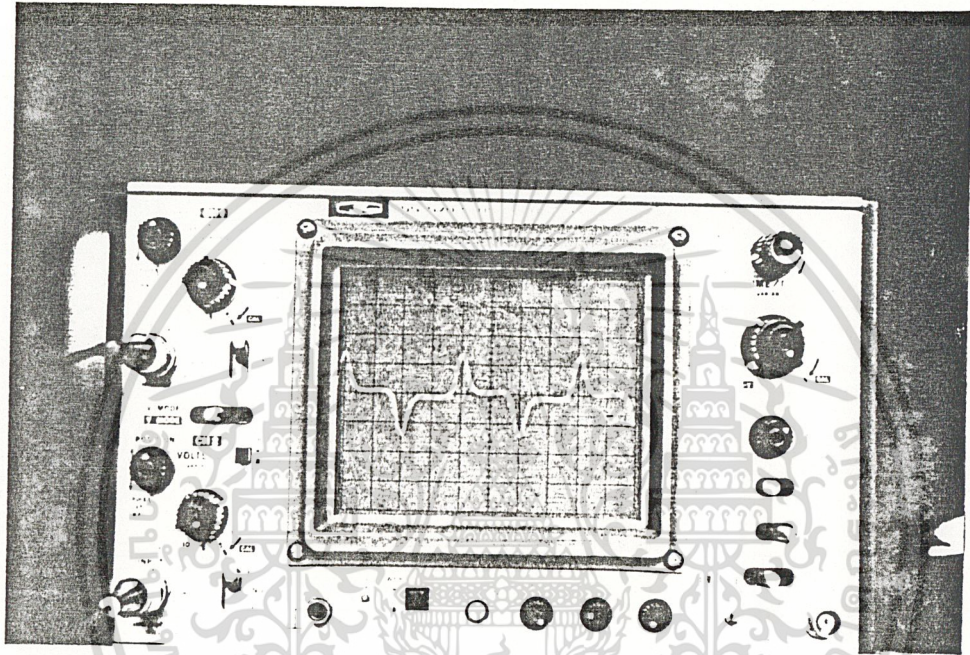
รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันที่หัวออสซิลโลสโคปลักษณะจ่ายภาระ

Time/Div 5 msec

Volt/Div 2 v

Prob x 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

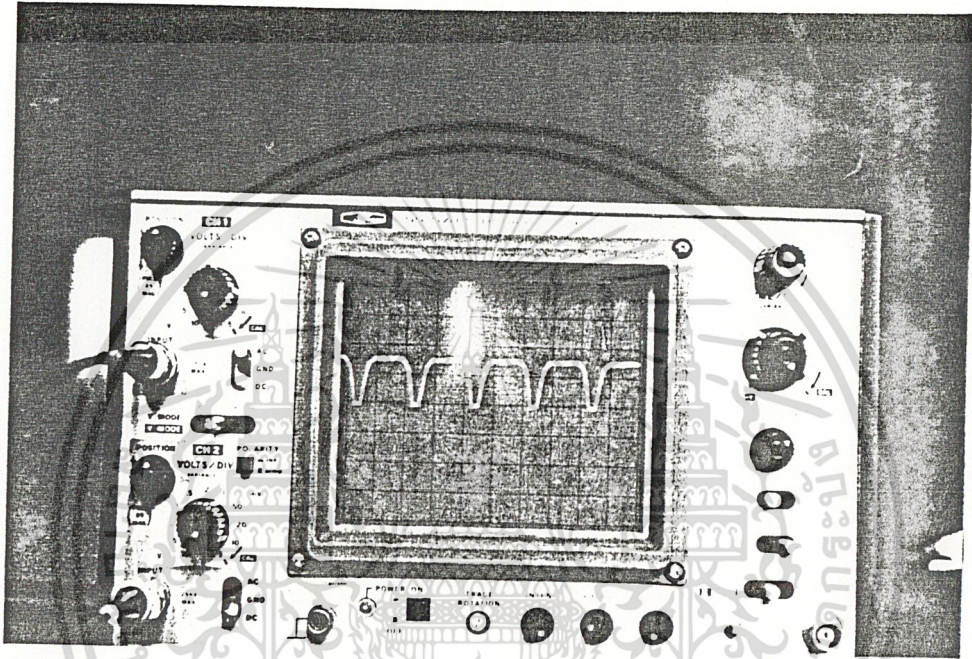


รูปที่ 4.18 สัญญาณกระแสที่ไหลในขดลวดอามะเจอร์ช่วย

Time/Div 5 msec

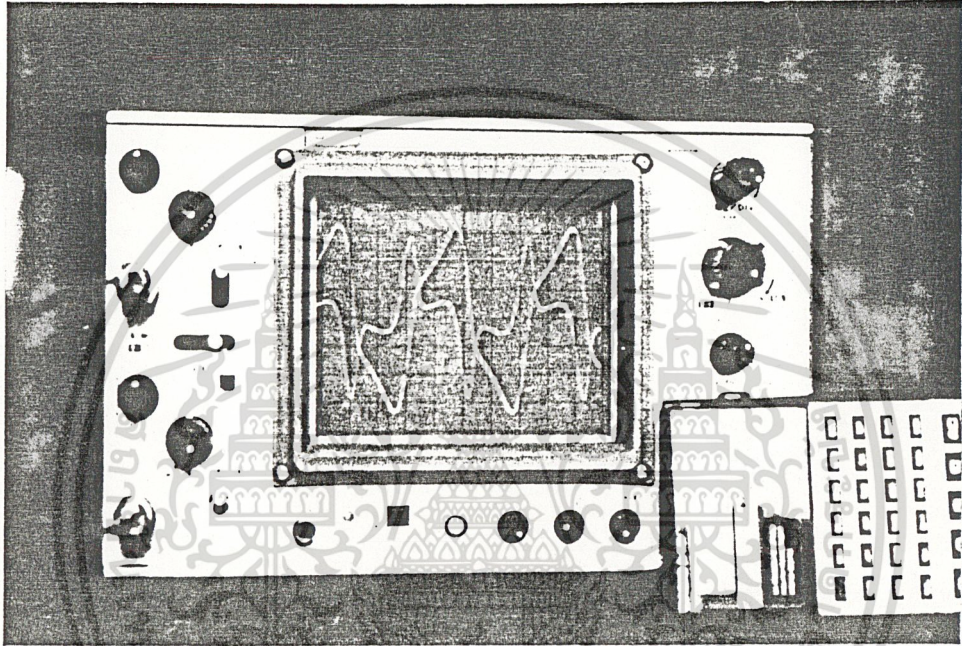
Volt/Div 5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 สัญญาณกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก  
Tim/Div 5 msec  
Amp/Div 1 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



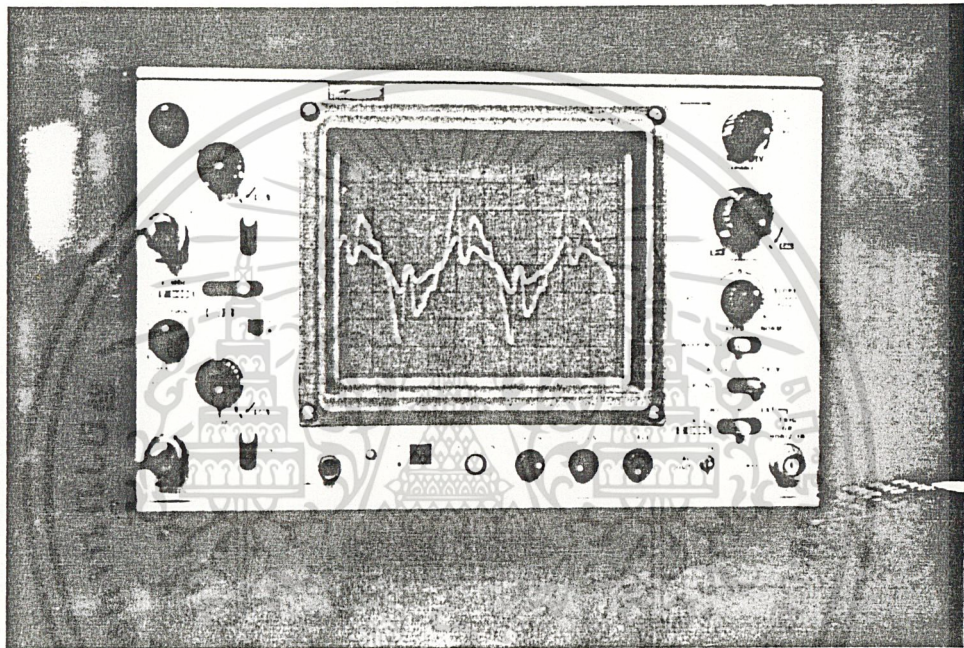
รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงดันและกระแสในวงจรรอาเมเจอร์ช่วยขณะจ่ายภาระ

Time/Div 5 msec

Amp/Div 2 A

Prob x100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 สัญญาณแรงดันและกระแสในวงจรอาร์เมเจอร์หลักขณะจ่ายภาระ

Time/Div 5 msec

Volt/Div 2 v

Amp/Div 1 A

Prob x100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 สรุปและบทวิจารณ์

ผลการทดลองต่าง ๆ ได้แก่ การทดลองทฤษฎีและหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเฟสเดียว ชนิดไร้แปรงถ่านกระตุ้นด้วยตัวเอง การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดทั้ง 3 ชุด คือ ขดลวดสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ ขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก และขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยที่สเตเตอร์ และการทดสอบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ออกแบบสร้างขึ้นสามารถสรุปผลได้ดังนี้

### 5.1 ผลการทดสอบทฤษฎีและหลักการ

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเฟสเดียวชนิดไร้แปรงถ่านกระตุ้นด้วยตัวเอง มีความเป็นไปได้ ผลการทดลองได้สอดคล้องกับทฤษฎีและหลักการตั้งนั้นจึงมีโอกาที่จะศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดนี้ต่อไปโดยมีเป้าหมายที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงต่อไป สำหรับการทดลองในขั้นนี้ การออกแบบพันขดลวดต่าง ๆ อาศัยหลักการออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสโดยทั่วไป และแนวการออกแบบยึดหลักความสะดวกในการพัน เพื่อสามารถหาข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว โดยคำนึงถึงข้อมูลที่จำเป็นและสอดคล้องกับย่านของเครื่องมีวัตต์ที่จะแสดงข้อมูล การออกแบบพันขดลวดจะเป็นการพันแบบขดลวดขดเดียว ไม่มีการพันแบบกระจาย เพราะในขั้นนี้ เรายังไม่สนใจรูปร่างของลวดขดไฟฟ้าที่เครื่องจักรไฟฟ้าผลิตขึ้น

### 5.2 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเฟสเดียวชนิดไร้แปรงถ่านกระตุ้นด้วยตัวเองที่อาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ ในการสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นและใช้คาปาซิเตอร์ต่อชุดเซย์ที่ขดอาร์มาเจอร์ช่วย แรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ (air gap) ที่พิจารณาได้ 2 สภาวะ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 สภาวะไร้ภาวะ แรงแเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ(air gap) ประกอบด้วยแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ และแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย ซึ่งวิเคราะห์เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก เราพบว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองส่วนจะเสริมกัน เช่นเดียวกับลักษณะการจ่ายภาวะเพาเวอร์แฟคเตอร์นำหน้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยทั่วไป

5.2.2 สภาวะจ่ายภาวะ ในช่วงนี้ แรงแเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดอาร์มาเจอร์หลักจะมีผลต่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ(air gap) ซึ่งอาจจะเสริมหรือหักล้างกัน ขึ้นอยู่กับเพาเวอร์แฟคเตอร์ของภาวะ ในสภาวะนี้ แรงแเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ(air gap) จะประกอบไปด้วย แรงแเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดทั้ง 3 ขด

การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ เราใช้สภาวะไร้ภาวะ ทั้งนี้เนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์หลักมีมุมเปลี่ยนแปลงตามเพาเวอร์แฟคเตอร์ ขดภาวะจึงไม่อาจนำมาหาความสัมพันธ์ที่แน่นอนได้ ดังนั้นเราจึงเลือกที่จะศึกษาจากสภาวะไร้ภาวะ สำหรับการศึกษาในโครงการนี้

ผลการทดลองสรุปได้ว่า แรงแเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ(air gap) ในสภาวะไร้ภาวะนั้น ได้จากผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ และแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลรวมทางพีชคณิต ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 (เฟสเซอร์ไดอะแกรม) แรงแเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย และคาปาซิแตนซ์ที่นำมาต่อชดเชยเท่านั้น จำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ

### 5.3 ผลการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องจักรไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเฟสเดียวชนิดไร้แปรงถ่านกระตุ้นด้วยตัวเองที่ออกแบบสร้างขึ้นโดยมีเป้าหมายคือ ใช้ค่าคาปาซิแตนซ์ไม่เกิน 30  $\mu\text{F}$  แรงดันพิกัดที่ขั้วของอาร์มาเจอร์หลัก 220 V ความถี่ 50 Hz จากหัวข้อ 5.2 เรพบว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย และค่าคาปาซิแตนซ์ชดเชย แต่เนื่องจากค่าคาปาซิแตนซ์ เราจำกัดค่าที่ไม่เกิน 30  $\mu\text{F}$  ดังนั้น การเพิ่มค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศให้มีค่าใกล้เคียงตัวของแกนเหล็ก ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วย และผลที่ตามมาคือ แรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์มีค่าสูง กระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยมีค่ามาก นั่นคือ สัดส่วนของขดลวดอาร์มาเจอร์ช่วยมีมากกว่าขดลวดอาร์มาเจอร์หลัก ในร่องสล้อที่จำกัดนั้น

สรุปผลการทดสอบ ปรากฏว่า เครื่องจักรไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายภาระได้ประมาณ 500 VA ซึ่งนับว่าน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องจักรไฟฟ้าของเดิมก่อนนำมาดัดแปลงคือ ขนาด 2 KVA และมีเปอร์เซ็นต์เร็กทิวเลชันประมาณ 16 %

### 5.4 บทวิจารณ์

จากการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเฟสเดียวชนิดไร้แปรงถ่านกระตุ้นด้วยตัวเองแบบชดเชยด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ พบว่า ข้อได้เปรียบของเครื่องจักรชนิดนี้คือ โครงสร้างที่ง่าย ซึ่งยังผลให้ต้นทุนในขั้นตอนการผลิตต่ำ ค่าบำรุงรักษาน้อย แต่ข้อเสียเปรียบก็คือ การออกแบบให้เครื่องจักรชนิดนี้มีพิกัดกำลังสูงขึ้นก็คือการเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ชดเชย ซึ่งทำให้ต้นทุนในส่วนนี้สูงมาก และพิกัดกำลังก็ยังคงต่ำอยู่ อีกทั้งเร็กทิวเลชันของศักดาไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมได้ และมีเปอร์เซ็นต์สูง ไม่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการระดับศักดาที่ชัดเจน

การออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์นั้น ถ้าคำนึงถึงค่าความต้านทานของขดลวด ก็จะมีผลต่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ แต่ในที่นี้เราพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจำนวนรอบในช่วงหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไม่มากนักการเลือกขนาดตัวนำและจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจึงขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ไดโอด

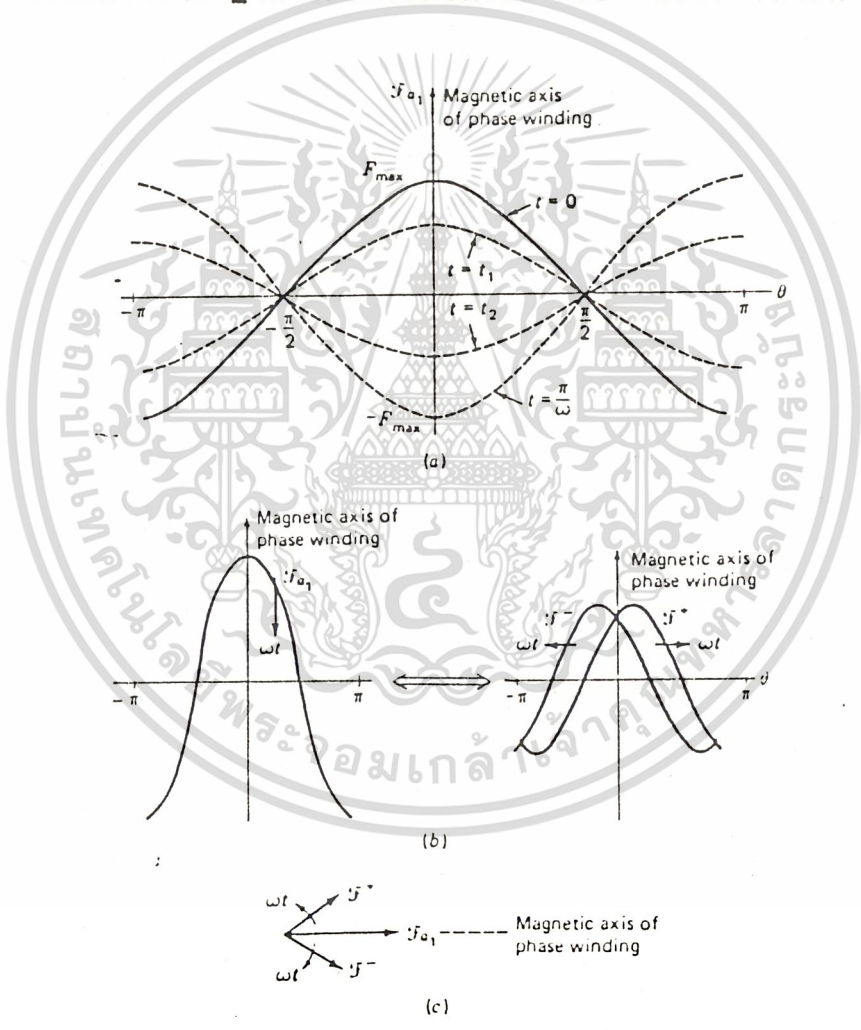


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก

#### ก-1 สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว

การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap) ของเครื่องจักรไฟฟ้าเฟสเดียวที่แสดงในรูป ก-1 โดยลักษณะการผันขดลวดอาร์เมเจอร์จะพยายามออกแบบให้การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นไซน์ (sinusoidally) มากที่สุด ในการวิเคราะห์จะพิจารณาการกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน (fundamental mmf wave) เท่านั้น



รูปที่ ก-1 การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า a) การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐานที่แปรค่าตามเวลา b) ผลรวมของการกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า c) แสดง องค์ประกอบ  $F^+$  และ  $F^-$  ของ  $F_{a1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน  $F_{a1}$  มีค่าเท่ากับ

$$F_{a1} = 4/\pi \cdot Kw \cdot Nph / P \cdot i_a \cos \theta$$

เมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์ถูกกระตุ้น ด้วยกระแสที่เป็นไซน์ (sinusoidal -ly current) ที่แปรค่าตามเวลา

$$i_a = I_a \cos \omega t$$

ดังนั้นการกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็น

$$F_{a1} = (F_{max} \cos \theta) \cdot \cos \omega t$$

เมื่อ  $F_{max} = 4/\pi \cdot Kw \cdot Nph / P \cdot I_a$

จากเอกลักษณ์ของ ตรีโกณมิติ

$$\cos A \cos B = 1/2 \cos (A-B) + 1/2 \cos (A+B)$$

จะได้

$$F_{a1} = F_{max} [1/2 \cos (\theta - \omega t) + 1/2 \cos (\theta + \omega t)]$$

ดังนั้นจะเห็นว่า การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องอากาศ (air gap) ของเครื่องจักรไฟฟ้าเฟสเดียว สามารถแยกองค์ประกอบเป็น สนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนในสองทิศทาง โดยมีแอมพลิจูดเป็นครึ่งหนึ่งของ  $F_{max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

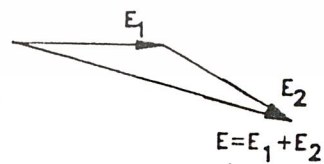
กำหนดให้  $F^+$  คือองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่หมุนตามทิศทาง  $+\omega$  และ  $F^-$  คือองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่หมุนตามทิศทาง  $-\omega$  เรียก  $F^-$  ว่า สนามแม่เหล็กที่หมุนย้อนกลับ ซึ่งจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  หรือ ความเร็วเชิงโคโรนนั้นนั่นเอง

$$F^+ = 1/2 F_{max} \cos(\omega - \omega t)$$

$$F^- = 1/2 F_{max} \cos(\omega + \omega t)$$

**ก-2 พิชแฟคเตอร์ (Pith Factor)**

เกิดจากการลงขดลวดแบบพิชเศษส่วน คือระยะห่างระหว่างต้นและปลายของขดลวดเดียวกันที่พันลงไปในเรื่องสลิต ของอาร์เมเจอร์มีค่าน้อยกว่า 120 องศาไฟฟ้า ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ต้นและปลายของขดลวดไม่พร้อมกัน



(ก) แบบพิชเต็ม

(ข) แบบพิชเศษส่วน

รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแบบพิชเต็มและแบบพิชเศษส่วน

รูป ก. แสดงให้เห็นถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดอาร์เมเจอร์เมื่อพันแบบพิชเต็ม แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ต้นและปลายของขดลวดอาร์เมเจอร์จะเกิดขึ้นพร้อมกันและมีทิศทางตามกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมจะมีค่าเท่ากับ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในแต่ละด้านของขดลวด

$$E = E_1 + E_2$$

รูป ข. แสดงให้เห็นถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์มาเจอร์ที่พันแบบพิชเศษส่วน ต้นและปลายของขดลวดวางห่างกัน 150 องศาไฟฟ้า (180 x 5/6 = 150°) ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E<sub>2</sub> ที่เกิดขึ้นที่ปลายของขดลวดจะเกิดก่อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E<sub>1</sub> ที่ต้นของขดลวด 30 องศาไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวม E คือผลบวกทางเวกเตอร์ของ E<sub>1</sub> และ E<sub>2</sub> และมีค่าน้อยกว่า E ในกรณีที่ขดลวดพันแบบพิชเต็ม

ถ้าเอาผลทางของเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีของพิชเศษส่วนหารด้วย ผลบวกทางเลขคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีเดียวกัน ผลที่ได้เรียกว่าพิชแฟคเตอร์ (Pitch Factor)

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{E}{2 E_1} \\
 &= \frac{2 E_1 \cos B/2}{2 E_1} \\
 &= \cos B/2
 \end{aligned}$$

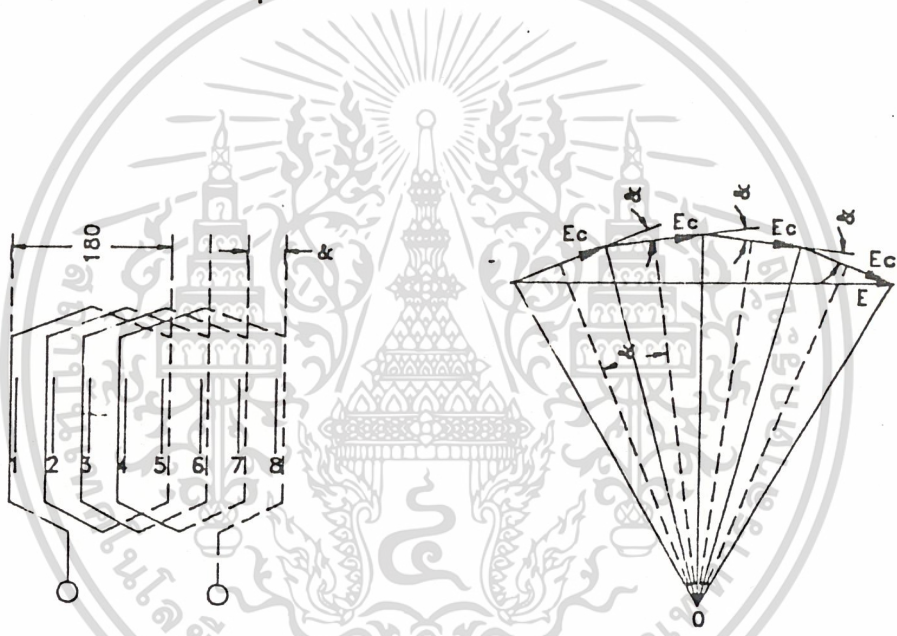
เมื่อระยะพิชมีค่า 5/6 แสดงว่าลดลงจากระยะพิชเต็ม 1/6 จะได้

$$\begin{aligned}
 B &= 180 * 1/6 \\
 &= 30^\circ \\
 K_p &= \cos (30^\circ / 2) \\
 &= 0.966
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-3 คิสรวิวัติน แผลเตอร (Distribution Factor)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดต่าง ๆ กันจะมีจำนวนร่องสลิตที่อยู่ภายใต้ ขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้วไม่เท่ากัน เช่น 4 สลิตต่อ 1 ขั้วแม่เหล็กหมายความว่ากลุ่ม ของขดลวดที่ต่ออันดับกันภายใต้ 1 ขั้วแม่เหล็กมี 4 ชุด และมีลงในสลิตที่ เรียงอยู่ใกล้ ๆ กัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดแต่ละชุดจะไม่ พร้อมกัน และอัตราส่วนระหว่างผลบวกทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละชุด กับผลบวกทางเลขคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละชุด เราเรียกว่าคิสรวิวัตินแผลเตอร



รูปที่ ก-3 แสดงผลของ คิสรวิวัตินแผลเตอร

$$K_d = \frac{E}{nE_c}$$
$$= \frac{(\sin n\alpha)}{(n \cdot \sin \alpha/2)}$$

n = จำนวนสลิตต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็ก

α = มุมระหว่างสลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ข

#### ข-1 เซอร์เคิลไดอะแกรม (Circle Diagram)

สมรรถนะของอินดักชันมอเตอร์ สามารถที่จะรู้ได้จากเซอร์เคิลไดอะแกรม ข้อมูลที่จะเขียนเซอร์เคิลไดอะแกรมได้มาจากการทดสอบขณะไม่มีโหลด (No-Load Test) และขณะบล็อกโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test) โดยที่คอปเปอร์ลอสของสเตเตอร์ และโรเตอร์สามารถที่จะแยกออกจากกันได้โดยเส้นแรงบิด

ข-1-1 เซอร์เคิลไดอะแกรมของวงจรอันดับ เพื่อให้เข้าใจหลักการเบื้องต้น ให้พิจารณาวงจรอันดับที่ประกอบด้วย  $R$  และ  $L$  โดยให้ค่า  $X_L$  และแรงบิดป้อน  $V$  คงที่ แต่ปรับค่า  $R$  ได้จะทำให้เวกเตอร์ของกระแสเคลื่อนที่เป็นวงกลม



รูปที่ ข-1 วงจรอันดับ R-L

รูปที่ ข-2 เวกเตอร์อิมพีแดนซ์ของรูป ข-1

จากรูปที่ ข-1(a) และ ข-1(b)

$$\begin{aligned}
 I &= V/Z \\
 &= \frac{V}{\sqrt{R^2 + X^2}} \\
 &= \frac{V}{X} \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

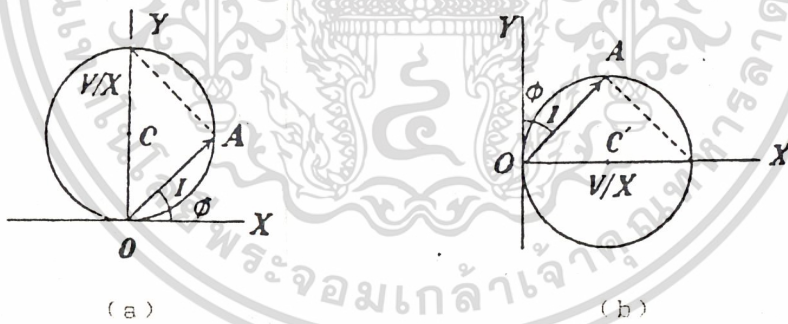
$$= \frac{V}{X} \sin \phi$$

เพราะว่า  $\sin \phi = \frac{X}{Z}$

$$= \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad ; [ \text{จากรูป ข-1(b)} ]$$

ดังนั้นสมการกระแส  $I = \frac{V}{X} \sin \phi$

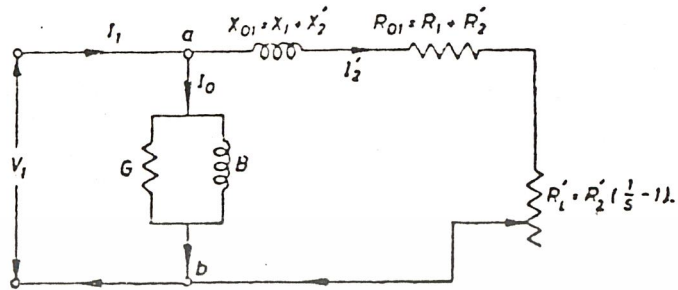
เป็นสมการวงกลม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $V/X$  เมื่อเขียนเป็นวงกลม โดยการเปรียบเทียบค่า  $\sin \phi$  ไปเรื่อยๆ ตั้งแต่  $\phi = 0$  องศา จนกระทั่ง  $\phi = 180$  องศาตามรูปที่ ข-3



รูปที่ ข-3 เซอร์เคิลไดอะแกรมของวงจรอันดับ R-L จากรูปที่ ข-1

### ข-1-2 เซอร์เคิลไดอะแกรมของวงจรเทียบเท่าไกล์เคียง

จากวงจรเทียบเท่าไกล์เคียงของอินดักชันมอเตอร์ข้างล่างนี้ เมื่อพิจารณาวงจรทางขวามือตั้งแต่จุด a ไป จะเห็นว่า เป็นวงจรอันดับที่มีแรงดันป้อน  $V$ , คงที่ รีแอกแตนซ์  $X_{\omega}$  คงที่ แต่ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากสลิป

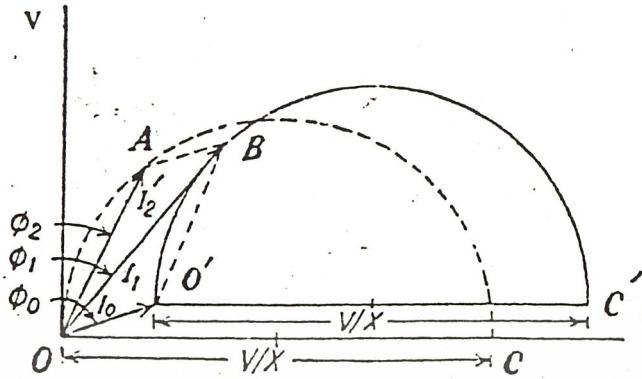


รูปที่ ข-4 วงจรเทียบเท่าใกล้เคียง (Approximate-Equivalent Circuit)

ปลายของเวกเตอร์กระแส  $I_2'$  จะอยู่บนเส้นวงกลมประซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $V/X$  ซึ่งกระแส  $I_2'$  เป็นกระแสของโรเตอร์เมื่อพิจารณาเทียบกับสเตเตอร์ กระแส  $I_0$  เป็นกระแสตอนไม่มีโหลด หรือที่เรียกว่ากระแสเอ็กไซต์ กระแส  $I_1$  เป็นกระแสรวมที่สเตเตอร์ ซึ่งเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแส  $I_0$  และ  $I_2'$  ถ้ากระแส  $I_2'$  ล้าหลังแรงดัน  $V$  เป็นมุม  $\phi_2 = 90^\circ$  องศา เวกเตอร์ของ  $I_2'$  จะอยู่บนเส้น OC หรือ  $V/X$  และตั้งฉากกับเวกเตอร์แรงดัน  $OV$  เมื่อ  $\phi_2$  เปลี่ยนค่าไป จุด A บนเส้นวงกลมประจะเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปด้วย

กระแสเอ็กไซต์  $I_0$  จะล้าหลังแรงดัน  $V$  เป็นมุม  $\phi_0$  สมมติว่าคอนดักแตนซ์  $G_0$  ซัสเซปแตนซ์  $B_0$  ของวงจรขนานเอ็กไซต์มีค่าคงที่ ดังนั้นกระแส  $I_0$  และมุม  $\phi_0$  จึงมีค่าคงที่ด้วย ปลายของเวกเตอร์  $I_1$  ซึ่งเกิดจากเวกเตอร์  $I_0$  และเวกเตอร์  $I_2'$  ก็จะเคลื่อนที่ตามเส้นวงกลมทึบ ซึ่งจุดเริ่มต้นของเส้นวงกลมทึบนี้จะอยู่ห่างจากจุดเริ่มต้นของเส้นวงกลมประเท่ากับ  $I_0$  โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเท่าเดิมคือ  $V/X$  และขนานกับแกนของ OC ดังนั้นจะพบว่า ถ้าทดสอบอินดักชันมอเตอร์ที่โหลดต่าง ๆ กัน โลกัศของปลายเวกเตอร์  $I_1$  จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมดังรูปที่ ข-5

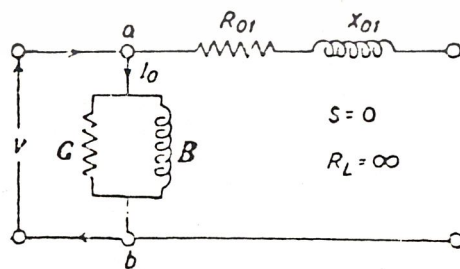
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 แสดงโลกัสของ  $I_2$  และ  $I_1$  เคลื่อนที่บนเส้นวงกลมประ  
และเส้นวงกลมทึบ

ข-2 วิธีหาค่าคอนดักแตนซ์  $G_0$  และซีสเซฟแตนซ์  $B_0$

ถ้ารู้ค่าลิกเกเจอร์แอดแตนซ์  $X_{01}$  ของมอเตอร์ รู้ค่าคอนดักแตนซ์  $G_0$  และค่าซีสเซฟแตนซ์  $B_0$  ของวงจรเอ็กไซต์ ก็จะสามารถหาตำแหน่งของวงกลม  $OBC$  ได้ วิธีหนึ่งที่จะหาค่า  $G_0$  และ  $B_0$  ได้ก็คือ ให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วซึ่งโคไซน์ ดังนั้นสลลิป  $s = 0$  แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยากมาก เนื่องจากมีความสูญเสียเนื่องจากลมและแรงเสียดทาน อย่างไรก็ตาม อินดักชั่นมอเตอร์สามารถทำให้หมุนด้วยความเร็วซึ่งโคไซน์ได้ โดยใช้มอเตอร์ตัวอื่นที่จะช่วยทำให้ความสูญเสียเนื่องจากลมและแรงเสียดทานหมดไป ซึ่งในกรณีนี้จะต้องทำให้โรเตอร์เป็นวงจรเปิด ดังนั้น สลิป  $s = 0$  และ  $R_2 = \infty$  ดังรูปที่ ข-6 ดังนั้น กระแสมอเตอร์จะมีเฉพาะ  $I_0$  เท่านั้น



รูปที่ ข-6 วงจรเทียบเท่าโกล์เดียงของอินดักชั่นมอเตอร์  
ที่ทำให้โรเตอร์เป็นวงจรเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้  $V$  = แรงดันป้อน/เฟส

$I_o$  = กระแสมอเตอร์/เฟส

$W$  = กำลังอินพุทที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์

$Y_o$  = แอ็ดมิตแตนซ์ของวงจรเอ็กไซต์

ในกรณีมอเตอร์ 3 เฟส

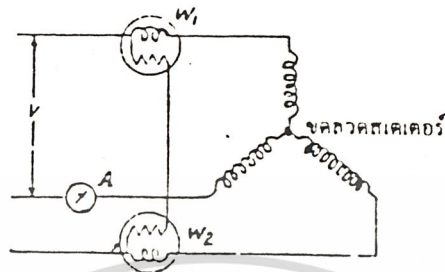
$$\begin{aligned}
 W &= \frac{3V^2}{R_o} \\
 &= 3 G_o V^2 \\
 G_o &= \frac{W}{3V^2} \quad \text{(ข-1)} \\
 I_o &= \frac{W}{V Y_o} \\
 Y_o &= \frac{I_o}{V} \\
 B_o &= \sqrt{Y_o^2 - G_o^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{I_o}{V}\right)^2 - G_o^2} \quad \text{(ข-2)}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า  $G_o$  และ  $B_o$  จะสามารถหาได้จากสมการ ข-1 และ ข-2

### ข-3 การทดสอบอินดักชันมอเตอร์เมื่อไม่มีโหลด (No-load Test)

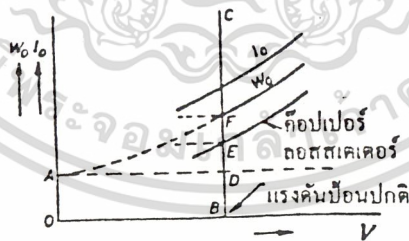
ในทางปฏิบัติแล้วจะเป็นไปไม่ได้เลย ที่จะให้อินดักชันมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส เพื่อหาค่า  $G_o$  และ  $B_o$  ถึงแม้ว่าจะไม่มีโหลดใด ๆ มาดูมอเตอร์ก็ตาม ความเร็วของโรเตอร์จะไม่สูงถึงความเร็วซิงโครนัส แต่จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส การทดสอบขณะไม่มีโหลดจะกระทำโดยการเปลี่ยนค่าแรงดันป้อนให้สูงและต่ำกว่าค่าแรงดันปกติ (หรือแรงดันเต็มพิกัด) แล้ววัดค่ากำลังไฟฟ้าด้วยวิธีใช้วัตต์มิเตอร์ 2 ตัว (two-wattmeter method) วัดกระแสเอ็กไซต์  $I_o$  ด้วยแอมมิเตอร์วัด

แรงดันป้อน  $V$  ด้วยโวลท์มิเตอร์ดังรูปที่ ข-7



รูปที่ ข-7 วงจรทดสอบอินดักชันมอร์เตอร์ขณะไม่มีโหลด

ขณะที่มอเตอร์ทำงานด้วยโหลดน้อย ๆ (light load) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์จะต่ำกว่า 0.5 ดังนั้น กำลังอินพุทของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์  $W_1$  และ  $W_2$  ก็คือ ค่า  $W_0$  นำเอาค่า  $W_0$ ,  $I_0$  และ  $V$  มาเขียนกราฟดังรูปที่ ข-8 ถ้าเปลี่ยนค่า  $V$  ให้สูงและต่ำกว่าค่าปกติ ก็จะได้ค่า  $W_0$  และ  $I_0$  ที่มากกว่าและน้อยกว่าค่า  $W_0$  และ  $I_0$  ที่แรงดันป้อนปกติ  $V$  เมื่อลากเส้น  $W_0$  ออกไปให้ตัดกับเส้นแนวตั้งที่เริ่มจากจุด  $O$  ค่า  $W_0$  จะตัดกับเส้นแนวตั้งนี้ที่จุด  $A$



รูปที่ ข-8 กราฟแสดงความสูญเสียต่าง ๆ ขณะไม่มีโหลด

ระยะ  $OA$  แทนด้วยความสูญเสีย (ลอส, loss) เนื่องจากลมและแรงเสียดทาน เมื่อเอาค่า  $OA$  ลบออกจากค่า  $W_0$  จะได้ความสูญเสียเนื่องจากคอปเปอร์ลอสและคอรีลอส (copper losses core losses) ของมอเตอร์ เพราะว่าอินพุทของมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด จะประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คิวบเปอร์ลอสที่สเตเตอร์ (stator cu. losses =  $3I_o^2 R_s$ )
2. คอร์ลอสที่สเตเตอร์ (stator core losses =  $3G_o V^2$   
=  $3V^2/R_o$ )
3. ลอสเนื่องจากลมและแรงเสียดทาน (Friction and windage losses) ความสูญเสีย (ลอส) ลำดับที่ 2 และ 3

ก็คือ ความสูญเสียคงที่ (fixed losses) เพราะถึงแม้ว่าโวลตจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ค่าความสูญเสียนี้อาจจะไม่เปลี่ยนแปลง

ระยะ OB แทนค่าแรงดันป้อนปกติ ดังนั้นความสูญเสียของมอเตอร์ที่แรงดันป้อนปกติหรือแรงดันเต็มพิกัด สามารถหาได้จากเส้นแนวตั้งที่เริ่มต้นจากจุด B

ระยะ BD แทนลอสเนื่องจากลมและแรงเสียดทาน

ระยะ DE แทนคิวบเปอร์ลอสที่สเตเตอร์

ระยะ EF แทนคอร์ลอสที่สเตเตอร์ ( $W_{CL}$ )

สมมติว่าคอร์ลอสมีค่า =  $W_{CL}$

$$\text{เพราะฉะนั้น } W_{CL} = \frac{3V_L I_o \cos\phi_o}{\dots} \quad \text{ข-3}$$

$$\cos\phi_o = \frac{W_{CL}}{\sqrt{3}V_L I_o} \quad \text{ข-4}$$

เมื่อ  $V_L$  = แรงดันไลน์ (line voltage)

#### ข-4 การทดสอบอินดักชันมอเตอร์เมื่อให้โรเตอร์หยุดหมุน (Blocked rotor Test)

การทดสอบแบบนี้บางครั้งก็เรียกว่า block rotor หรือ lock rotor หรือ short circuit ทดสอบแบบนี้เพื่อที่จะหาค่าต่อไปนี้

1. หากกระแสลัดวงจร (short circuit current) ที่แรงดันป้อนสเตเตอร์เต็มพิกัด
2. หาเพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะลัดวงจร

ค่าที่ได้จากข้อ 1 และ 2 นำไปเขียนเซอร์เคิลไดอะแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3. หาสิบลูกแกจรีแอ็คแทนซ์  $x_{01}$  เมื่อพิจารณาเทียบกับสเตเตอร์
- 4. หาความต้านทาน  $R_{01}$  เมื่อพิจารณาเทียบกับสเตเตอร์

การทดสอบนี้จะต้องทำให้โรเตอร์หยุดหมุนหรือไม่ ก็ให้โรเตอร์หมุนได้อย่างช้า ๆ ถ้าโรเตอร์เป็นวาวด์โรเตอร์จะต้องต่อลัดวงจรขดลวดโรเตอร์ที่สลีปริ่งซึ่งเหมือนกับการทดสอบลัด วงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันป้อนจะลดลงเหลือประมาณ 15-20% ของแรงดันป้อนปกติในกรณีมอเตอร์ก็เหมือนกัน จะต้องลดแรงดันป้อนที่สเตเตอร์ลง จนกระทั่งกระแสอินพุตสเตเตอร์มีค่าเท่ากับกระแสเมื่อโหลดเต็มพิกัด การทดสอบขณะนี้สลีป  $s = 1$  ดังนั้น วงจรเทียบเท่าของอินดักชันมอเตอร์จะเหมือนกับวงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้าทุกประการ ค่าของกระแสอินพุต แรงดันป้อนและกำลังอินพุตของมอเตอร์ จะทราบได้จากแอมมิเตอร์ โวลท์มิเตอร์ และวัตต์มิเตอร์ ดังเช่นวงจรในรูปที่ ข-7 การวัดค่ากระแสอินพุตแรงดันป้อนและกำลังอินพุต ควรจะวัดสัก 2-3 ครั้ง โดยการลดแรงดันป้อนสเตเตอร์ลงที่ค่าต่าง ๆ กัน แล้วจะทราบว่า

- 1. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรและแรงดันที่กระแสลัดวงจรจะเป็นเส้นตรง

ถ้า  $V =$  แรงดันป้อน

$V_{sc} =$  แรงดันป้อนขณะต่อโรเตอร์ลัดวงจร

แล้วกระแสขณะมอเตอร์ลัดวงจร (stand still) หรือกระแสลัดวงจร เมื่อป้อนแรงดันเต็มพิกัด จะหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$I_{sc} = I_{fl} \frac{V}{V_{sc}} \quad \text{ข-5}$$

เมื่อ  $I_{sc} =$  กระแสลัดวงจร เมื่อป้อนแรงดันเต็มพิกัด

$I_{fl} =$  กระแสลัดวงจรที่แรงดัน  $V_{fl}$

2. เพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะลัดวงจร หรือลอคโรเตอร์ซึ่งจะหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$W_{\text{e}} = \sqrt{3} V_{\text{e}} I_{\text{e}} \cos \phi_{\text{e}} \quad \text{ข-6}$$

$$\cos \phi_{\text{e}} = \frac{W_{\text{e}}}{\sqrt{3} V_{\text{e}} I_{\text{e}}} \quad \text{ข-7}$$

เมื่อ  $W_{\text{e}} =$  กำลังอินพุทที่วัดได้ขณะต่อวงจรลัด  
 $V_{\text{e}} =$  แรงดันไลน์ขณะต่อวงจรลัด

3. กำลังอินพุทของอินดักชันมอเตอร์ขณะต่อวงจรลัด ประกอบด้วย  
 ก. คิวเปอร์ลอสมัลติเตเตอร์และโรเตอร์  
 ข. คอรัลอส ซึ่งมีค่าน้อยมาก เพราะว่ามีป้อนแรงดันด้วยขนาดต่ำมาก และคอรัลอสนี้สามารถที่จะคำนวณได้จากรูปที่ ข-8

$$\text{คิวเปอร์ลอสมัลติเตเตอร์ทั้งหมด} = W_{\text{e}} - W_{\text{CL}} \quad \text{ข-8}$$

$$3 I_{\text{e}}^2 R_{\text{e1}} = W_{\text{e}} - W_{\text{CL}}$$

$$R_{\text{e1}} = \frac{W_{\text{e}} - W_{\text{CL}}}{3 I_{\text{e}}^2} \quad \text{ข-9}$$

4. เมื่ออ้างถึงวงจรเทียบเท่าใกล้เคียงของอินดักชันมอเตอร์ตามรูปที่ 5.8 รีแอกแตนซ์/เฟส เมื่อพิจารณาเทียบกับด้านสเตเตอร์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\therefore Z_{\text{o1}} = \frac{V_{\text{e}}}{I_{\text{e}}}$$

$$X_{\text{o1}} = \sqrt{Z_{\text{o1}}^2 - R_{\text{o1}}^2}$$

โดยปกติแล้ว  $X_1$  จะสมมุติให้มีค่า  $= X_2$  เมื่อ  $X_1$  และ  $X_2$  เป็นรีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์และโรเตอร์

$$\therefore X_1 = X_2 = \frac{X_{\text{o1}}}{2} \quad \text{ข-10}$$

ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์เป็นแบบวาวด์โรเตอร์แล้ว ความต้านทานสเตเตอร์และโรเตอร์ จะแยกกันได้โดยแบ่ง  $R_{01}$  ให้เป็นอัตราส่วนของความต้านทานสเตเตอร์และโรเตอร์

ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์เป็นแบบสไลควเรลเกจ หาค่าความต้านทานสมมูลของโรเตอร์เมื่อพิจารณาเทียบกับสเตเตอร์  $R_2$  สมการดังต่อไปนี้

$$R_2 = R_{01} - R_1 \quad \text{ข-11}$$

### ข-5 การสร้างเซอร์เคิลไคอะแกรม

เซอร์เคิลไคอะแกรมของอินดัคชันมอเตอร์เขียนขึ้นได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบต่อไปนี้

1. ข้อมูลจากการทดสอบขณะไม่มีโหลด (no-load test)
2. ข้อมูลจากการทดสอบเมื่อให้โรเตอร์หยุดหมุน (lock-rotor test)
3. การทดสอบหาความต้านทานของสเตเตอร์

ลำดับที่ 1 จากการทดสอบขณะไม่มีโหลด หาค่า  $I_0$  และ  $\phi_0$  ได้แล้วเขียนเวกเตอร์  $I_0$  ดังรูปที่ ข-9 โดยให้  $I_0$  ล้าหลังแรงดันป้อน  $V$  เป็นมุม  $\phi_0$

ลำดับที่ 2 จากการทดสอบล๊อคโรเตอร์ หาค่า  $I_{sc}$  ที่แรงดันป้อนปกติได้ หามุม  $\phi_{sc}$  ได้ ลากเส้น OA ให้มีความยาวเท่ากับ  $I_{sc} = I_{sc} V / V_{sc}$  และล้าหลังแรงดัน  $V$  เป็นมุม  $\phi_{sc}$  เวกเตอร์ O'A จะแทนกระแสโรเตอร์  $I_2'$  (กระแสโรเตอร์เมื่อพิจารณาเทียบกับสเตเตอร์) จุด A จะเป็นจุดที่อยู่บนเส้นวงกลม

แบ่งครึ่งเส้น O'A ลากเส้นตั้งฉากจากจุดกึ่งกลาง ของเส้น O'A ไปตัด O'D จะได้จุดกึ่งกลางของเส้น O'D ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลาง



จุด E บนเส้น AG กำหนดได้ดังนี้

1. ในกรณีโรเตอร์แบบสไลด์เวเรลเกจ ความต้านทานสเตเตอร์ต่อเฟส  $R_1$  ได้จากการทดสอบหาความต้านทานสเตเตอร์ กำลังอินพุทขณะลัดโรเตอร์  $W_{sc}$  จะมีค่าเท่ากับคอปเปอร์ลอสของมอเตอร์ (ไม่คิดคอร์ลอส)

$$\begin{aligned} \therefore \text{cu. losses (stator)} &= 3I_{sc}^2 R_1 \\ \text{cu. losses (rotor)} &= W_{sc} - 3I_{sc}^2 R_1 \\ \therefore \frac{AE}{EF} &= \frac{W_{sc} - 3I_{sc}^2 R_1}{3I_{sc}^2 R_1} \end{aligned}$$

2. ในกรณีโรเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์ ความต้านทานโรเตอร์และสเตเตอร์ต่อเฟส  $r_2$  และ  $r_1$  ซึ่งสามารถคำนวณได้อย่างง่าย ๆ สำหรับค่ากระแสสเตเตอร์และโรเตอร์  $I_1$  และ  $I_2$  จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{AE}{EF} &= \frac{I_2^2 R_2}{I_1^2 R_1} \\ &= \frac{R_2 (I_2)^2}{R_1 (I_1)^2} \\ \therefore \frac{I_1}{I_2} &= k \text{ (transformation ratio)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{AE}{EF} &= \frac{R_2 (1)^2}{R_1 (k)^2} \\ &= \frac{R_2 / k^2}{R_1} \end{aligned} \quad \text{ข-12}$$

$$= \frac{\text{ความต้านทานสมมูลโรเตอร์/เฟส}}{\text{ความต้านทานสเตเตอร์/เฟส}} \quad \text{ข-13}$$

ข ทราบได้จากการทดสอบแบบลัดโรเตอร์ โดยใช้แอมมิเตอร์ 2 ตัว วัดกระแสที่สเตเตอร์และโรเตอร์

สมมติว่ามอเตอร์ทำงานกินกระแส = OL ในรูปที่ ข-10 JK แทนความสูญเสียคงที่ JN แทนคอปเปอร์ลอสที่สเตเตอร์ NL แทนอินพุทของโรเตอร์ NM แทนคอปเปอร์ลอสที่โรเตอร์ ML แทนเอาพุทของโรเตอร์ และ LK แทนอินพุทของมอเตอร์ ถ้าเอาส่วนต่าง ๆ ดังที่กล่าวมานี้ คูณกับ  $\sqrt{3}$  และแรงดันไลน์ ( $V_L$ ) ก็จะได้ปริมาณต่าง ๆ ดังนี้

1. กำลังอินพุทของมอเตอร์ =  $\sqrt{3}V_L \cdot LK$  ข-14
2. ความสูญเสียคงที่ (fixed losses) =  $\sqrt{3}V_L \cdot JK$  ข-15
3. คอปเปอร์ลอสสเตเตอร์ =  $\sqrt{3}V_L \cdot JN$  ข-16
4. คอปเปอร์ลอสโรเตอร์ =  $\sqrt{3}V_L \cdot MN$  ข-17
5. ความสูญเสียทั้งหมด (total losses) =  $\sqrt{3}V_L \cdot MK$  ข-18
6. กำลังเอาพุททางกล =  $\sqrt{3}V_L \cdot ML$  ข-19
7. กำลังอินพุทโรเตอร์ =  $\sqrt{3}V_L \cdot NL$  ข-20

α แรงบิด

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพมอเตอร์} &= \frac{\text{เอาพุท}}{\text{อินพุท}} \\ &= \frac{ML}{LK} \quad \text{ข-21} \\ \text{สลิป (s)} &= \frac{\text{คอปเปอร์ลอสโรเตอร์}}{\text{คอปเปอร์ลอสสเตเตอร์}} \\ &= \frac{MN}{NL} \quad \text{ข-22} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพโรเตอร์} &= \frac{\text{เอาพุทโรเตอร์}}{\text{อินพุทโรเตอร์}} \\ &= \frac{ML}{NL} \quad \text{ข-23} \end{aligned}$$

$$= 1 - s \quad \text{ข-24}$$

=  $\frac{N}{OL}$  ข-25

=  $\frac{N}{OL}$   
= ความเร็วโรเตอร์  
ความเร็วเชิงโคโรนัส

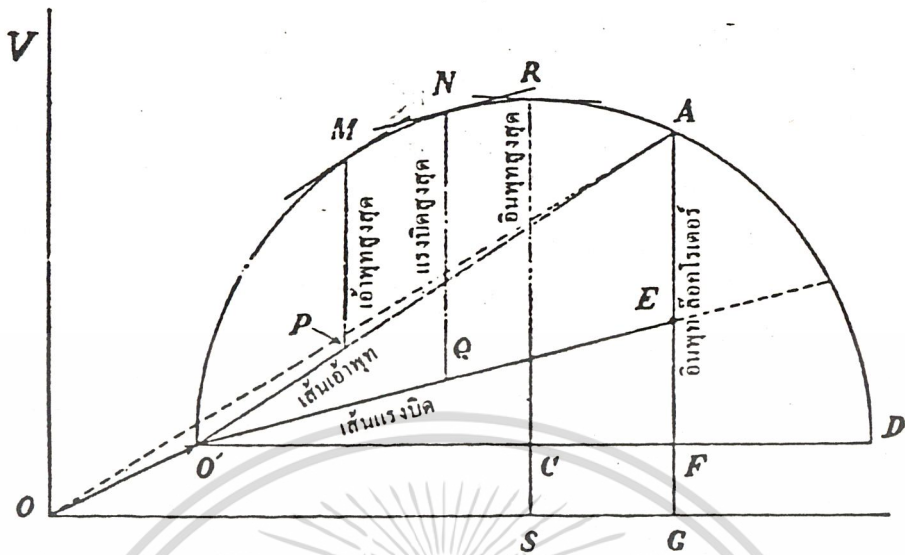
และเพาเวอร์แฟคเตอร์,  $\cos\phi$ , =  $\frac{KL}{OL}$  ข-26

ข-5-1 กำลังเข้าพหุสูงสุด จากรูปที่ ข-10 กำลังเข้าพหุสูงสุดจะเกิดขึ้นที่จุด M ซึ่งเส้นสัมผัสวงกลม (tangent) ณ จุด M นี้จะขนานกับเส้นเข้าพหุ (output line) O'A ลากเส้นตรงในแนวตั้ง จากจุด M มาสัมผัสกับเส้นเข้าพหุ ณ จุด P. ดังนั้น MP ก็คือ กำลังเข้าพหุสูงสุดและเมื่อลากเส้นจากจุด C บนเส้น O'D ไปยังจุด M เส้น CM นี้จะตั้งฉากกับเส้นเข้าพหุ O'A

ข-5-2 แรงบิดสูงสุด จากรูปที่ ข-10 แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่จุด N ซึ่งเส้นสัมผัสวงกลม ณ จุด N นี้จะขนานกับเส้นแรงบิด (torque line) O'E ลากเส้นตรงในแนวตั้งจากจุด N มาสัมผัสกับเส้นแรงบิด ณ จุด Q ดังนั้น NQ ก็คือแรงบิดสูงสุด และเมื่อลากเส้นตรงจากจุด C บนเส้น O'D ไปยังจุด N เส้น CN นี้จะตั้งฉากกับเส้นแรงบิด O'E

ข-5-3 กำลังอินพุทสูงสุด จากรูปที่ ข-10 กำลังอินพุทสูงสุดเกิดขึ้นที่จุด R ซึ่งเป็นจุดที่มีเส้นสัมผัสวงกลมขนานกับเส้น OG ลากเส้นตรงในแนวตั้งจากจุด R ไปสัมผัสกับเส้น OG ณ จุด S ดังนั้น RS ก็คือกำลังอินพุทสูงสุด เมื่อไรก็ตาม ถ้าจุด R อยู่เลยจุดที่เกิดแรงบิดสูงสุด อินตักซ์มอเตอรส์จะไม่อยู่ในสภาวะเสถียรภาพ (stable) ซึ่งกำลังอินพุทสูงสุดนี้ จะดูได้จากขนาดของวงกลม และเป็นตัวชี้ถึงความสามารถของมอเตอร์ที่จะยอมให้เกิดสภาวะโหลตเกิน (overload) ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ได้ โดยปกติแล้ว กำลังอินพุทสูงสุด RS จะมีค่าประมาณ 2-3 เท่าของกำลังอินพุทที่โหลตเต็มชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-10 แสดงให้เห็นเส้นตรงแทนกำลังเอาทุตสูงสุด แรงบิดสูงสุด และกำลังอินพุตสูงสุด

ข-6 การวัดสลิปของอินดักชันมอเตอร์ (Measurement of Slip)

วิธีวัดค่าสลิปของอินดักชันมอเตอร์มีหลายวิธีด้วยกันคือ

ข-6-1 โดยการวัดความเร็วมอเตอร์ วิธีนี้จะต้องวัดความเร็วมอเตอร์ก่อน แล้วจึงนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับความเร็วซิงโครนัส คือ ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ (speedometer) วัดความเร็วโรเตอร์ N แล้วคำนวณหาความเร็วซิงโครนัส  $N_s$  จากสมการ  $N_s = 120f/p$  ต่อจากนั้นจึงคำนวณหาสลิป S จากสมการ  $S = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100$

ข-6-2 โดยการเปรียบเทียบความถี่โรเตอร์และสเตเตอร์

$$\text{จากสมการ } S = \frac{f_r}{f_s}$$

เมื่อ S = สลิป

$f_r$  = ความถี่โรเตอร์

$f_s$  = ความถี่สเตเตอร์

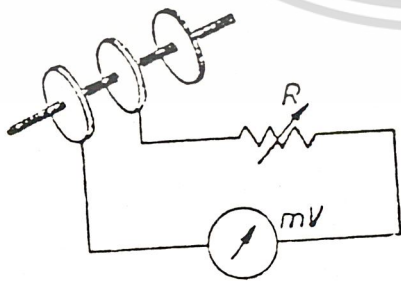
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าทราบปริมาณความถี่ที่สลิปเตอร์  $f$  ก็จะสามารถคาดคะเนได้ว่าความถี่โรเตอร์  $fr$  จะต้องต่ำกว่าความถี่  $f$  ในการวัดค่าความถี่ใช้มิลลิโวลท์มิเตอร์ แบบที่เป็นมูฟวิ่งคอยล์ และมี center zero

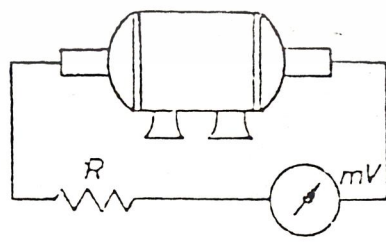
1. ในกรณีสลิปริงมอเตอร์ ให้ต่อสายวัดของมิลลิโวลท์มิเตอร์เข้ากับสลิปริงสองอันที่อยู่ใกล้กันในขณะที่สลิปริงทั้งสองหมุนอยู่ กระแสไฟที่ไหลเข้ามูฟวิ่งคอยล์ของมิลลิโวลท์มิเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามกระแสโรเตอร์ เข็มของมิเตอร์ก็จะแกว่งไปมา การนับจำนวนความถี่ทำได้โดยง่าย เพราะว่าในหนึ่งไซเคิลนั้น เข็มชี้จะเคลื่อนที่จากศูนย์ (0) ไปจนถึงจุดสูงสุดทางซ้าย และกลับมากที่ศูนย์อีกครั้งหนึ่ง เป็นอันว่าครบหนึ่งไซเคิล ดังนั้นในหนึ่งวินาที ก็จะสามารถนับจำนวนความถี่ได้ ดังรูปที่ ข-11

เช่นมอเตอร์ตัวหนึ่ง ชนิด 4 โพล 50 c/s หมุนด้วยความเร็ว 1425 rpm. ดังนั้น  $N = 1500$  rpm  $S = 5\%$  หรือ 0.05 ความถี่โรเตอร์จะมีค่า  $fr = sf = 0.05 \times 50 = 2.5$  c/s. ดังนั้นจำนวนความถี่ 2.5 ไซเคิลในหนึ่งวินาทีนี้สามารถจะนับได้อย่างสบาย

2. ในกรณีมอเตอร์สไลด์เรลเกจ เนื่องจากไม่มีสลิปริง จึงไม่สามารถที่จะต่อสายมิเตอร์โดยตรงกับโรเตอร์ได้ จึงใช้วิธีต่อสายมิเตอร์เข้ากับปลายเพลลาทั้งสองข้าง ดังรูปที่ ข-12



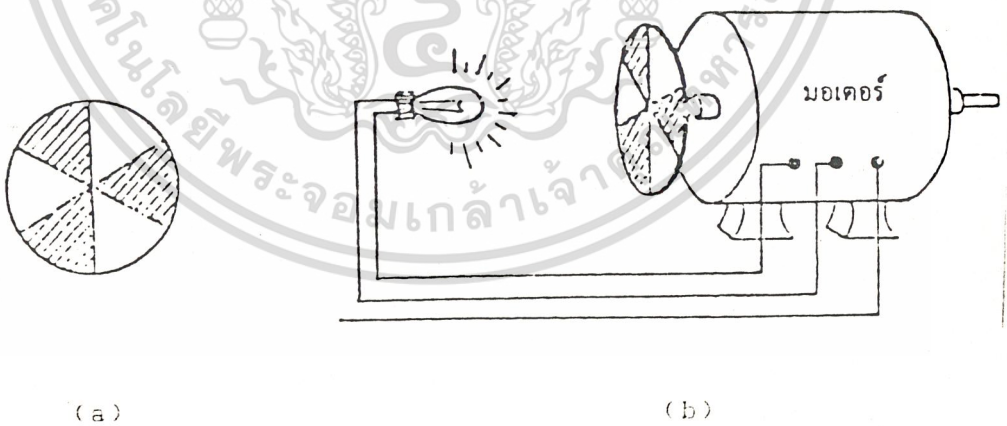
รูปที่ ข-11



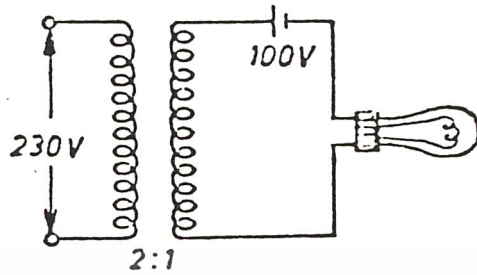
รูปที่ ข-12

3. โดยใช้วิธีสโตรโบสโคปิก (stroboscopic method)

วิธีนี้จะใช้จานโลหะทาสีขาว-ดำสลับกันให้มีลักษณะเป็นเซ็กเมนต์ (segment) จำนวนเซ็กเมนต์ทั้งหมดทั้งขาวและดำจะต้องเท่ากับจำนวนโพลของมอเตอร์ เช่น ถ้ามอเตอร์มี 6 โพล จานโลหะจะต้องมี 6 เซ็กเมนต์คือเป็นสีขาว 3 เซ็กเมนต์ ดังรูปที่ ข-13 นำจานโลหะแผ่นนี้ยึดติดกับเพลานมอเตอร์ แล้วฉายไฟส่องไปที่แผ่นโลหะ จากหลอดนีออน (neon lamp) ที่มีแหล่งจ่ายไฟสลับและไฟตรงรวมกันหรือจากแหล่งจ่ายไฟสลับอย่างเดียว รูปที่ ข-13 ข. แสดงให้เห็นถึงแหล่งจ่ายไฟสลับอย่างเดียวที่ป้อนไฟให้กับหลอดนีออน แต่สำหรับรูปที่ ข-14 เป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟที่มีทั้งไฟตรงและไฟสลับรวมกัน การที่ใช้แหล่งจ่ายไฟตรงและไฟสลับรวมกันนั้นก็เพราะว่า หลอดนีออนจะให้แสงสว่างจ้าตกว่าแหล่งจ่ายไฟที่เป็นไฟสลับอย่างเดียว และการกระพริบของหลอดไฟจะเกิดขึ้นดังนี้ คือ ถ้าไฟตรงและไฟสลับเสริมกันหลอดไฟจะติดจ้า แต่ถ้าไฟตรงและไฟสลับต้านกันหลอดไฟจะดับ และจะกระพริบครั้งเดียวในหนึ่งไซเคิล

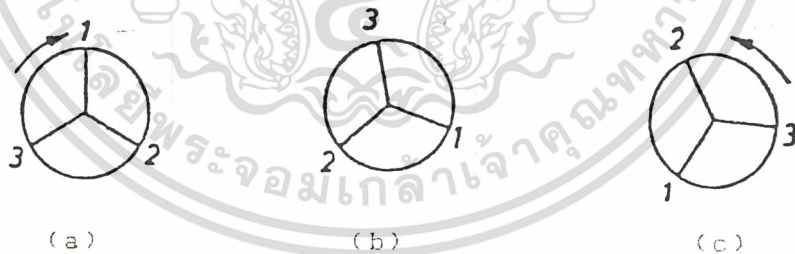


รูปที่ ข-13 วงจรหลอดนีออนที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟสลับอย่างเดียว



รูปที่ ข-14 วงจรหลอดนีออนที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงและไฟสลับร่วมกัน

เมื่อพิจารณาการหมุนของจานที่มีหลอดไฟกระพริบต่อกับแหล่งจ่ายไฟสลับ และไฟตรงร่วมกัน ถ้าจานหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส จะดูเหมือนว่าจานหยุดอยู่กับที่ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ความเร็วของจานหรือความเร็วโรเตอร์จะต่ำกว่าความเร็วเชิงโคโรนัสเล็กน้อย และดูเหมือนว่าจานจะหมุนกลับทางด้วยความเร็วต่ำ ๆ ถ้าพิจารณาจากรูปที่ ข-15 ข้างล่างก็จะทราบว่า ถ้าให้รูปที่ ข-15 (a) แทนตำแหน่งของส่วนที่เป็นสีขาว ที่มีแสงไฟจ้ามากระทบครั้งแรก เมื่อแสงไฟจ้าครั้งที่สองมากระทบอีก จานจะหมุนไปได้อีกประมาณ 1-20 องศา ดัง



รูปที่ ข-15 แสดงทิศทางการหมุนของจานโลหะ

รูปที่ ข-15 (b) คือเส้นขาวที่ 3 จะไปแทนตำแหน่งเส้นขาวที่ 1 เส้นขาวที่ 1 ก็จะไปแทนตำแหน่งเส้นขาวที่ 2 และเส้นขาวที่ 2 ก็จะไปแทนตำแหน่งเส้นขาวที่ 3 และเมื่อมีแสงไฟจ้าครั้งที่สามมากระทบ จานก็จะหมุนต่อไปได้อีกประมาณ 120 องศา โดยเส้นขาวที่ 2 ก็จะไปแทนตำแหน่งเส้นขาวที่ 3 ในรูปที่ ข-15(b) เส้นขาวที่ 3 ก็จะไปแทนตำแหน่งเส้นขาวที่ 1 และเส้นขาวที่ 1 ก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไปแทนตำแหน่งเส้นขาวที่ 2 ในรูปที่ ข-15(ข) กลายเป็นรูปที่ ข-15(ค)

โดยการนับจำนวนสีขาวผ่านจุดที่กำหนดไว้ในหนึ่งหน่วยเวลา เช่น วินาทีหรือนาที แล้วเอาค่าที่นับได้ในหนึ่งหน่วยเวลาหารด้วยจำนวนเส้นขาว (3 เส้น) ในกรณี 6 โพล ผลที่ได้ก็คือ ความเร็วของโรเตอร์ในหน่วย rps. หรือ rpm. แล้วแต่กรณี ต่อจากนั้นจะสามารถคำนวณหาความเร็วสลลิปจากสมการ ความเร็วสลลิป =  $N_s - N$  และหาสลลิป  $S$  ได้จากสมการ  $S = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100$

ในกรณีที่ใช้แหล่งจ่ายไฟสลลิปอย่างเดี่ยวต่อเข้ากับหลอดนีออน การกระพริบของหลอดไฟจะเกิดขึ้น 2 ครั้งในหนึ่งไซเคิล และการหมุนของ เส้นขาวบนจานโลหะก็จะมีความเร็วเป็น 2 เท่าด้วย ซึ่งนับได้ยากกว่ามาก



ภาคผนวก ค

ค-1 โปรแกรมออกแบบการพ่นขลวดเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสเฟสเดียว  
แบบกระตุ้นตัวเองไร้ปรองถ่าน

```
Program      esigned_single_phase_brushless_self_excited_
synchronouse_generator;

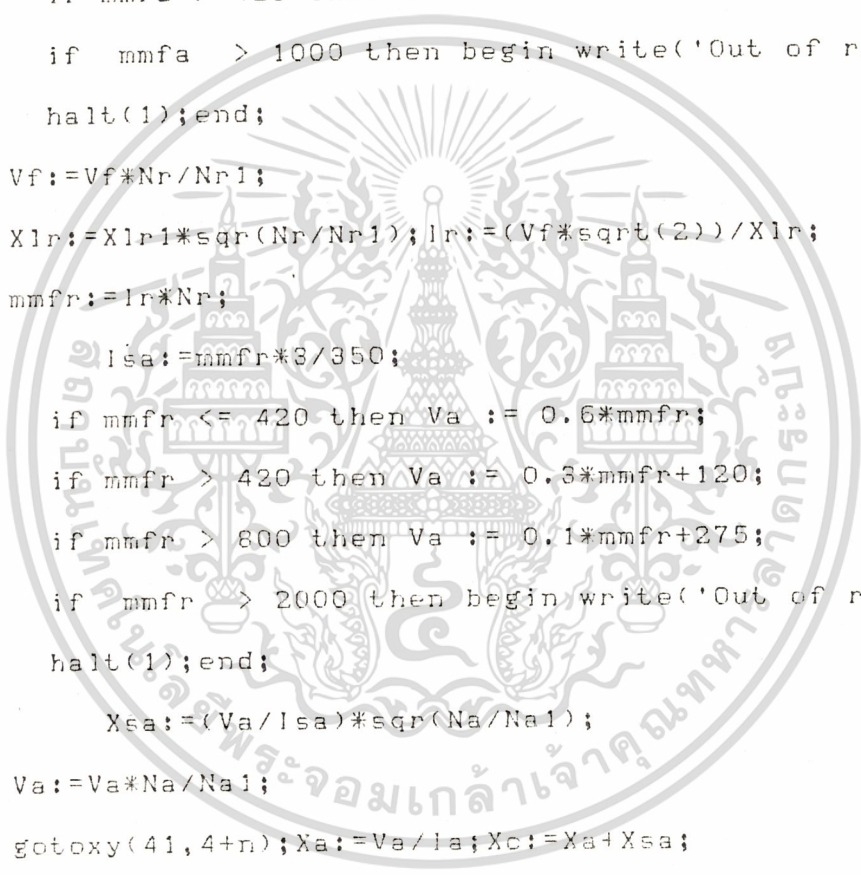
Uses crt;

Var Ir, Ia, Isa, Ism, IL, ILre, ILim, Vf, Va, Vo, Vm, VR, VL, Vdr, Vdi,
VXL, Vo, Vmno, Emno, EmL : real;
Xlr, Xlr1, Xsa, Xsm, Xc, Xa, XL, XT, Zsa, Zsm, Za, ZL : real;
Ra, Ra1, Rm, Rm1, RL, RT, C, Reg, kw : real;
mmfa, mmfr, mmfra, mmf1, mmfT, kVA, pf, pft, zeta, beta, alpha:
real;
Na, Nr, Nm, Nm1, Na1, Nr1, n : integer;

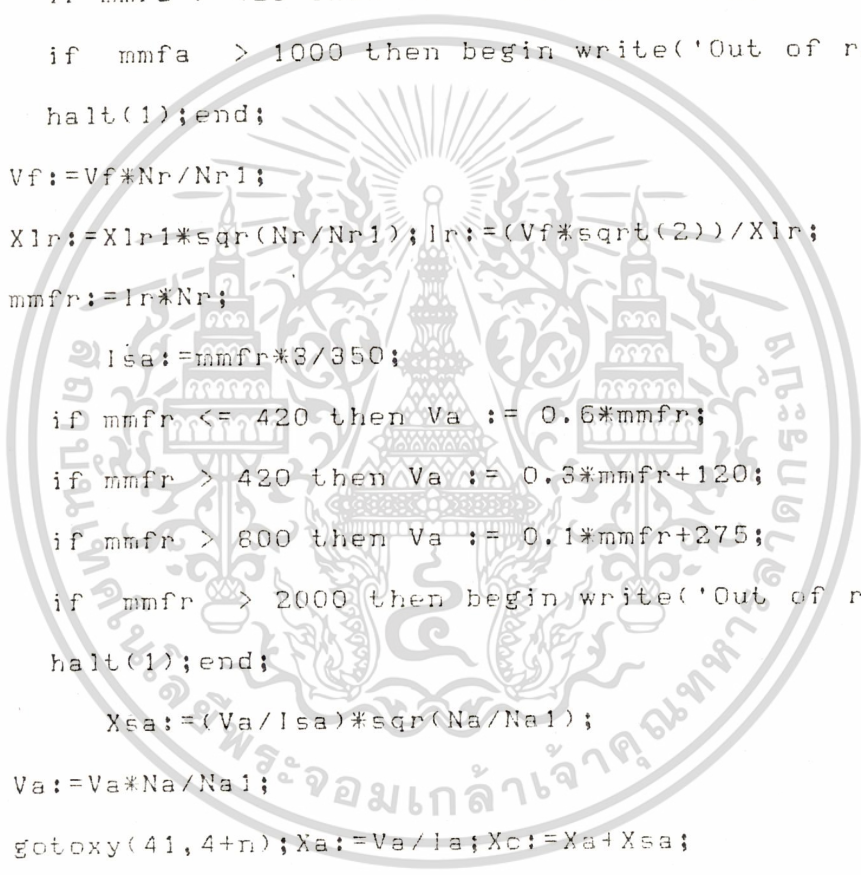
begin
  clrscr;
  Na1:=140;Nr1:=350;Nm1:=60;Xlr1:=750;Ra1:=13;Rm1:
=9.6;kw:=0.773;n:=0;
  writeln(' Program Designed Single-Phase Brushless
Self-Excited Snchronouse Generator. ');
  writeln;
  writeln(' Ia(A) Na(T) Nr(T) Nm(T) C(mif) Vmno(V) ');
  repeat
    gotoxy(18,4+n);readln(Ia);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
gotoxy(24,4+n);readln(Na);
gotoxy(30,4+n);readln(Nr);
gotoxy(36,4+n);readln(Nm);
mmfa:=la*Na;
  if mmfa <= 425 then Vf := 1.43*mmfa;
  if mmfa > 425 then Vf := 0.5*mmfa+400;
  if mmfa > 1000 then begin write('Out of rang.');
```



```
  halt(1);end;
Vf:=Vf*Nr/Nr1;
Xlr:=Xlr1*sqr(Nr/Nr1);lr:=(Vf*sqr(2))/Xlr;
mmfr:=lr*Nr;
  Isa:=mmfr*3/350;
  if mmfr <= 420 then Va := 0.6*mmfr;
  if mmfr > 420 then Va := 0.3*mmfr+120;
  if mmfr > 800 then Va := 0.1*mmfr+275;
  if mmfr > 2000 then begin write('Out of rang.');
```



```
  halt(1);end;
  Xsa:=(Va/Isa)*sqr(Na/Na1);
Va:=Va*Na/Na1;
gotoxy(41,4+n);Xa:=Va/la;Xc:=Xa+Xsa;
  C:=1000000/(2*pi*50*Xc);write(C:2:2);
Vc:=la*Xc;
mmfra:=mmfr+mmfa;
  if mmfra <= 420 then Emno := 0.6*mmfra;
  if mmfra > 420 then Emno := 0.3*mmfra+120;
  if mmfra > 800 then Emno := 0.1*mmfra+275;
```

```
if mmfra > 2000 then begin write('Out of rang.');
```

```
halt(1);end;
```

```
gotoxy(49,4+n);Vmno:=(Emno*Nm)/(Na1*kw);write(Vmno:
```

```
5:2);
```

```
n:=n+1;
```

```
until n = 25;
```

```
end.
```

ช-2 ผลการทำงานของโปรแกรม

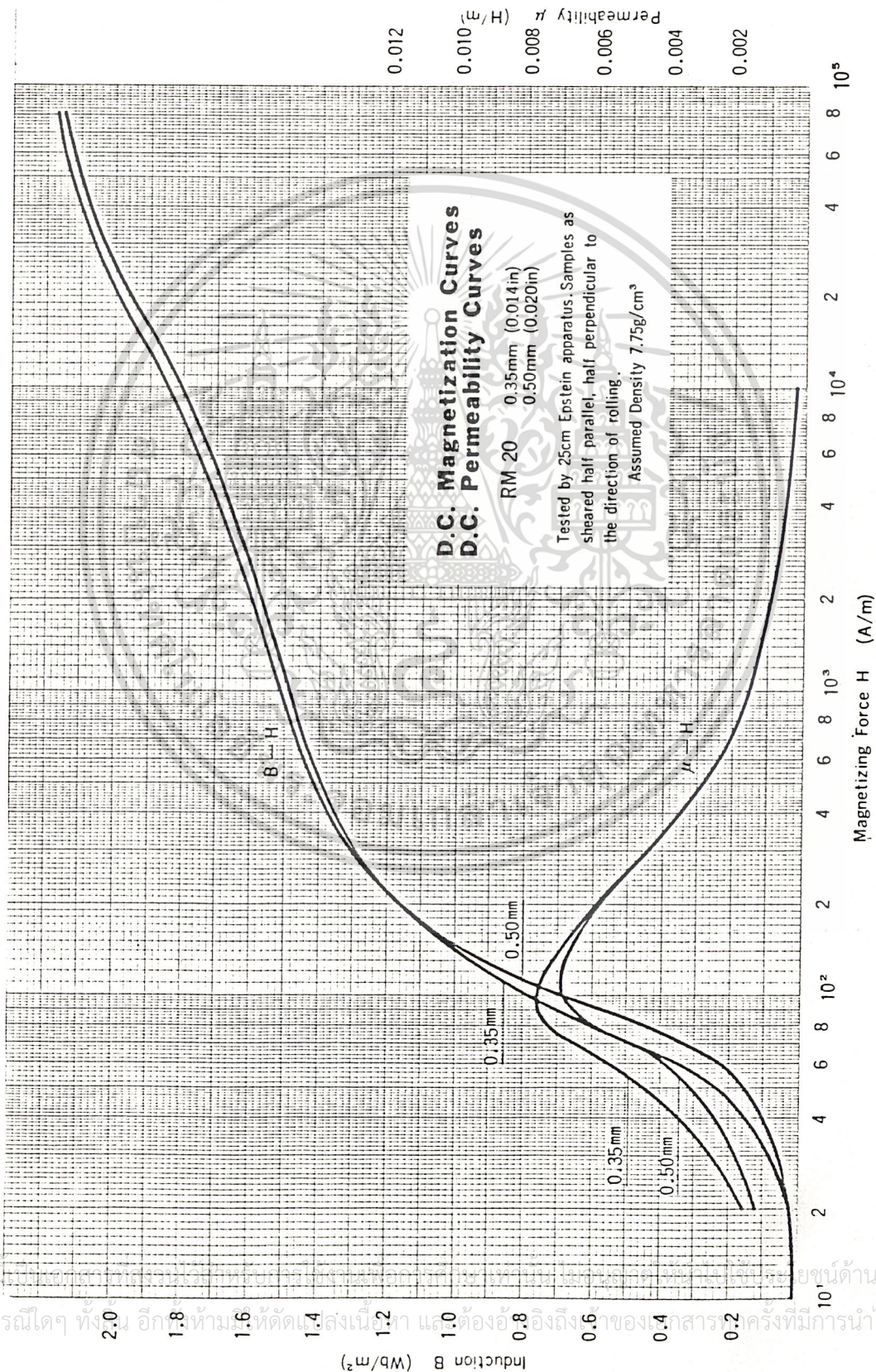
Program Designed Single-Phase Brushless  
Self-Excited Synchronous Generator.

Ia(A)	Na(T)	Nr(T)	Nm(T)	C(mif)	Vmno(V)
1	250	250	60	6.69	147.36
1	250	300	60	6.69	147.36
1	250	500	60	6.69	147.36
1	250	800	60	6.69	147.36
2	250	250	60	7.27	203.97
2	250	300	60	7.27	203.97
2	250	500	60	7.27	203.97
2	250	800	60	7.27	203.97
1	250	250	60	6.69	147.36
2	250	250	60	7.27	203.97
3	250	250	60	8.80	222.41
4	250	250	60	9.95	240.84
5	250	250	60		

Out of rang.

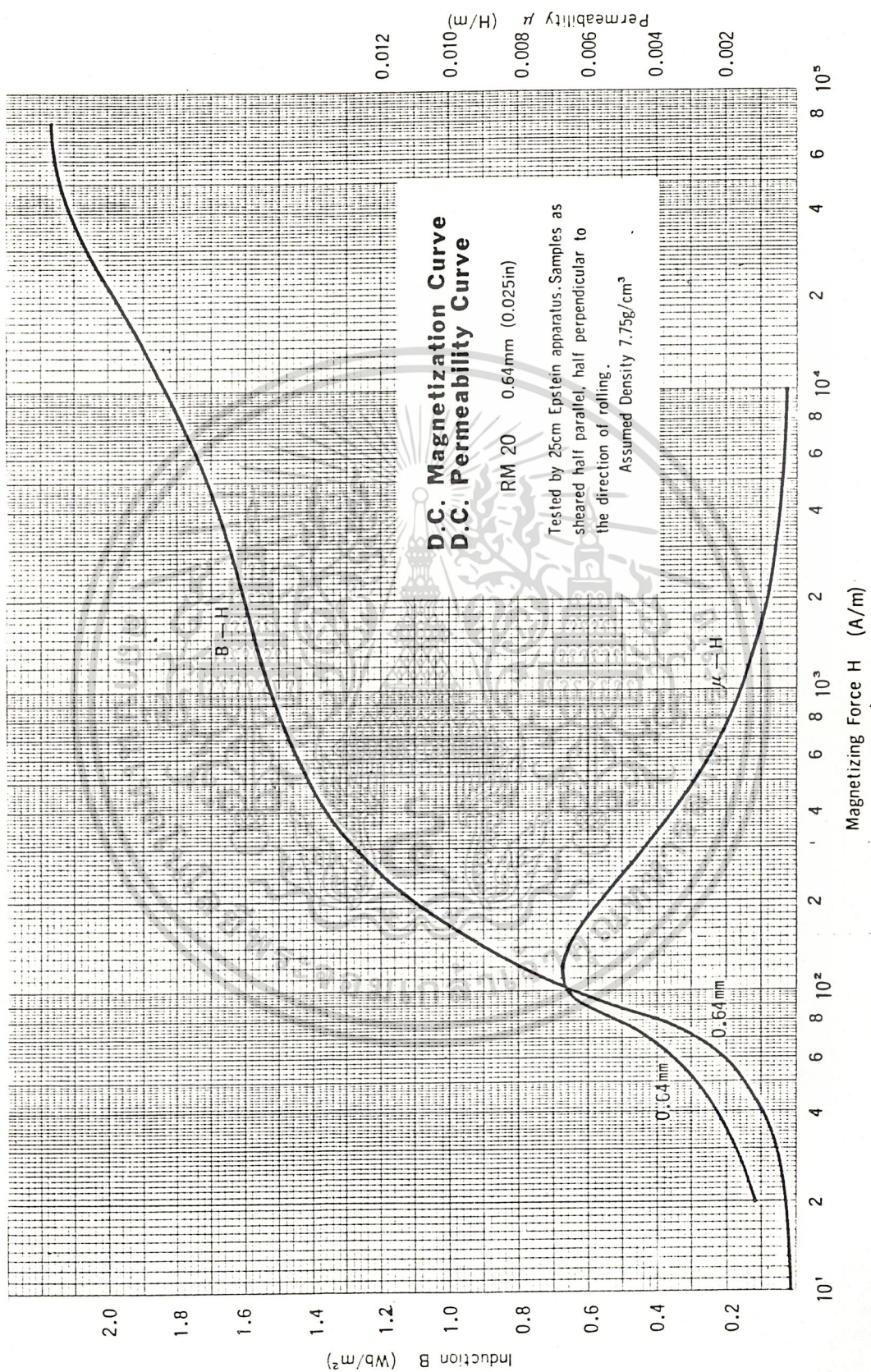
ภาคผนวก ง

ง-1 กราฟแสดงคุณสมบัติ B-H ของแกนเหล็ก



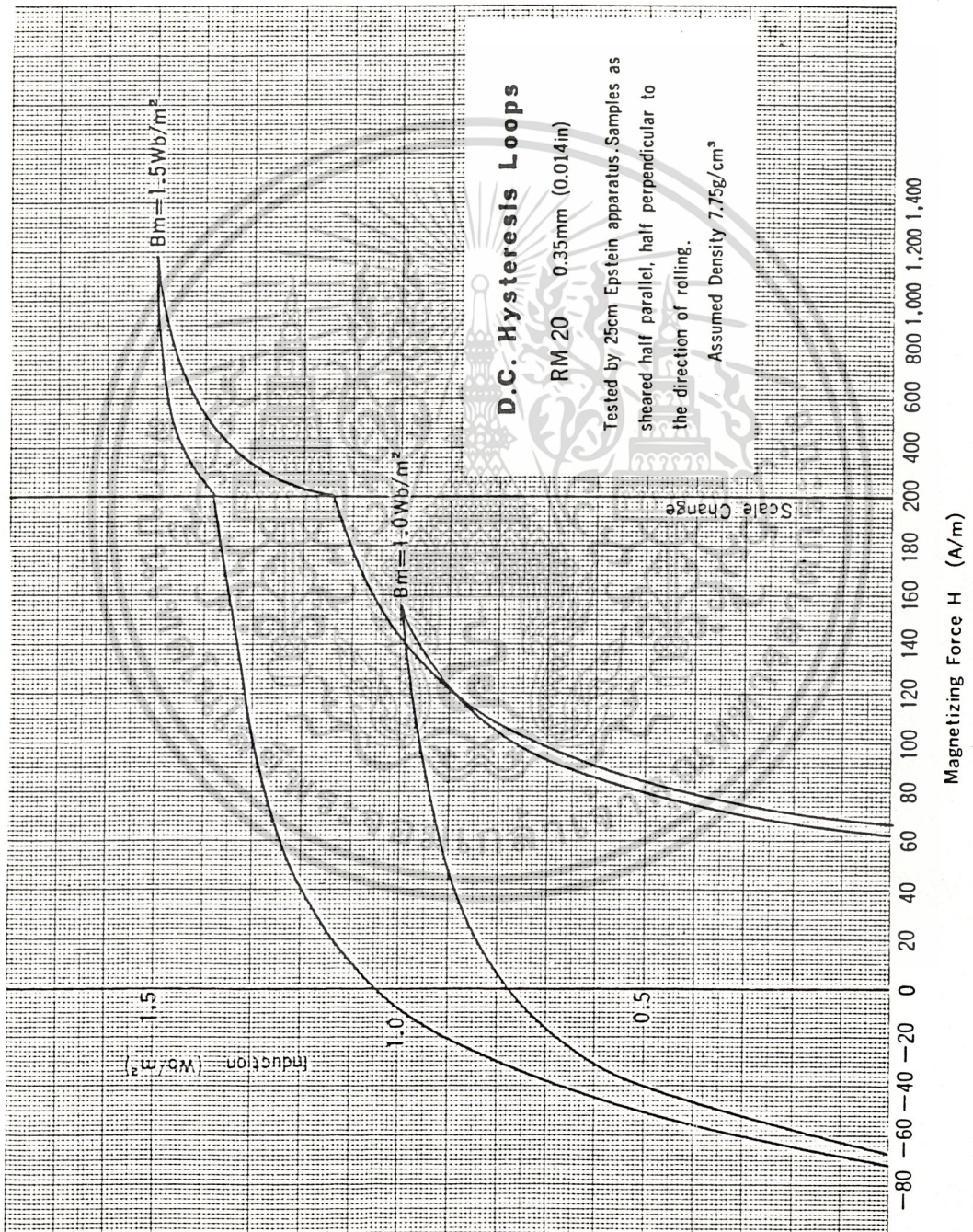
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานานาชาติ โดยศูนย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้อีกห้ามคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมการศึกษานานาชาติ

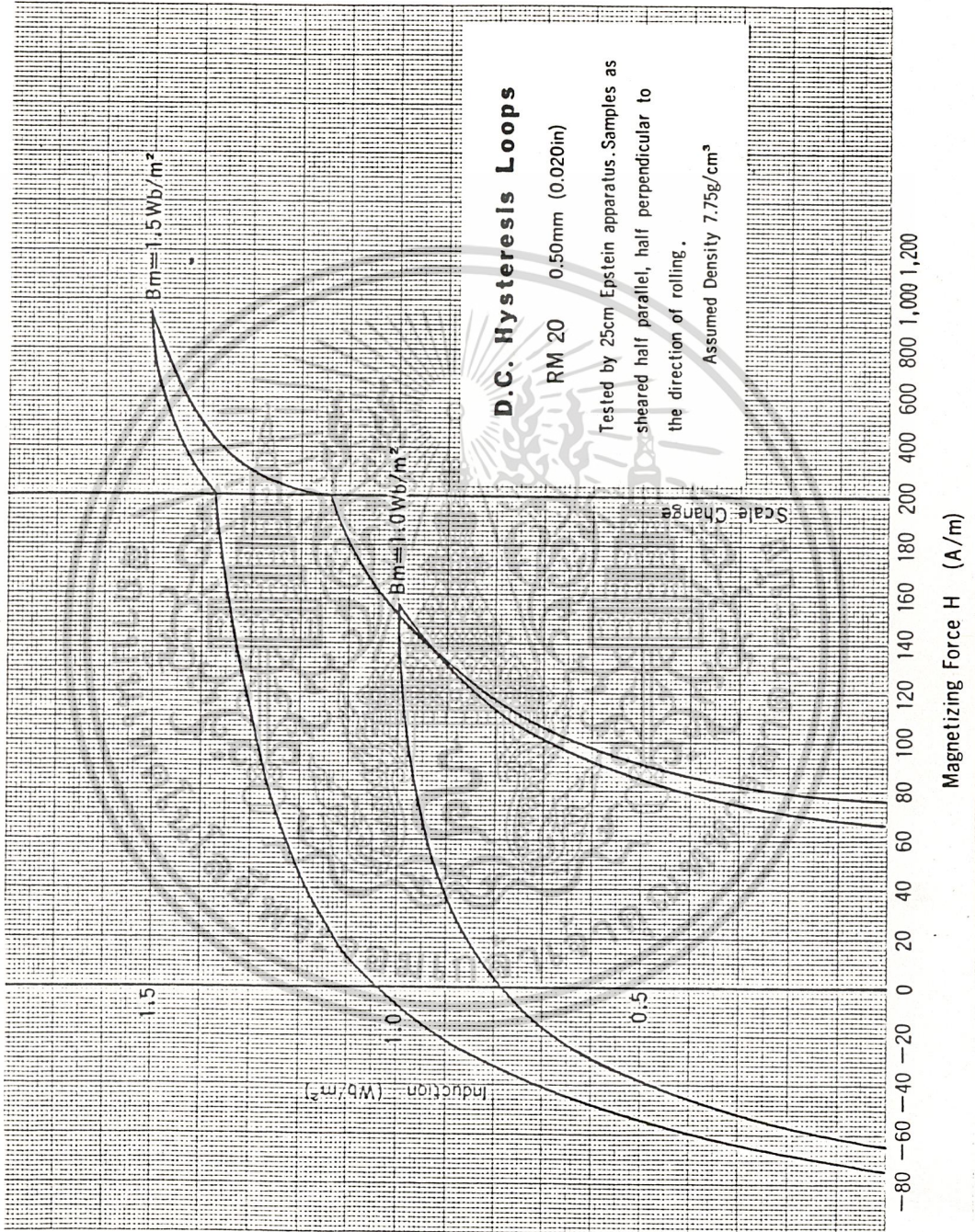


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

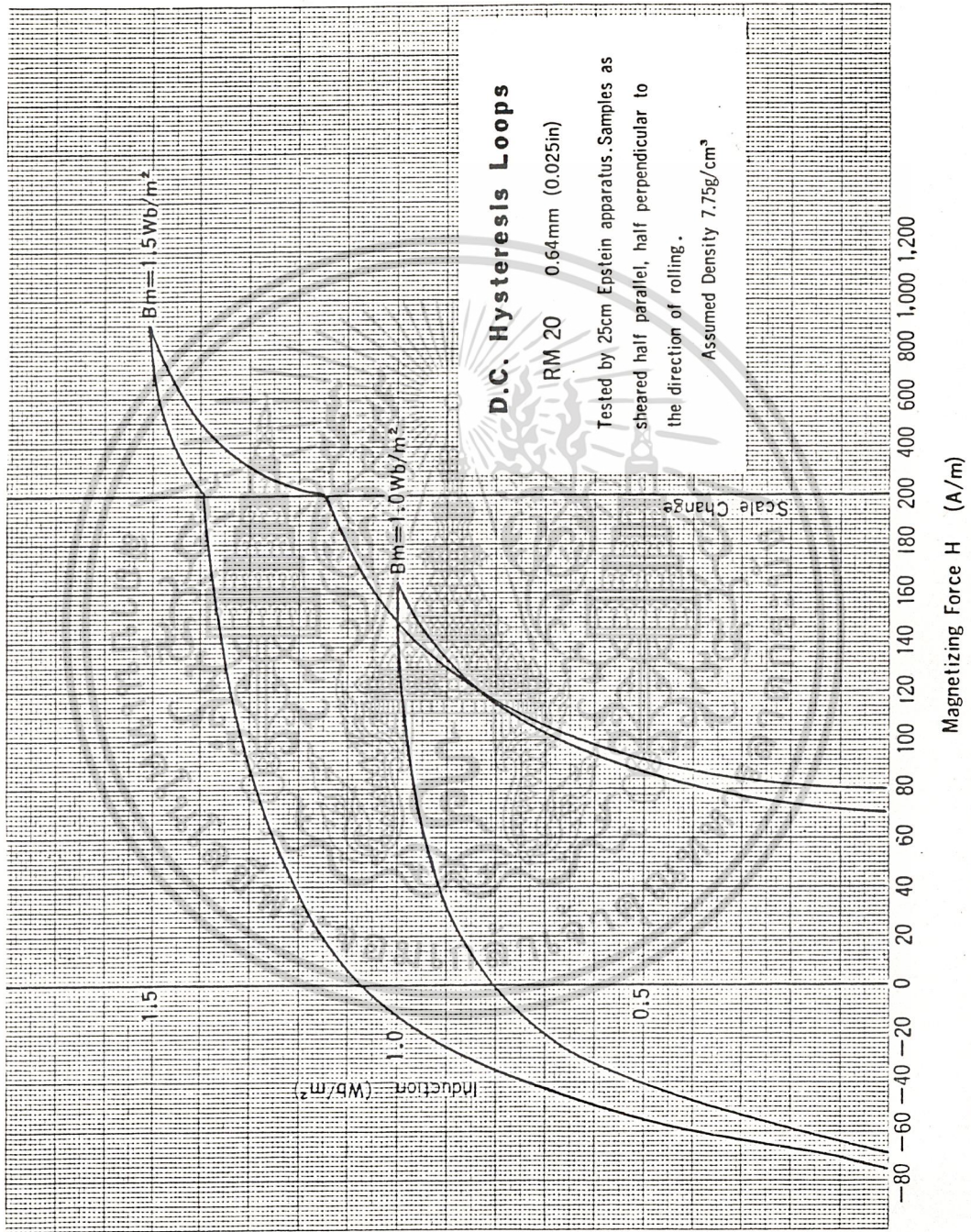
ง-2 กราฟแสดงคุณสมบัติฮิสเตอรีซิสลูปของแกนเหล็ก



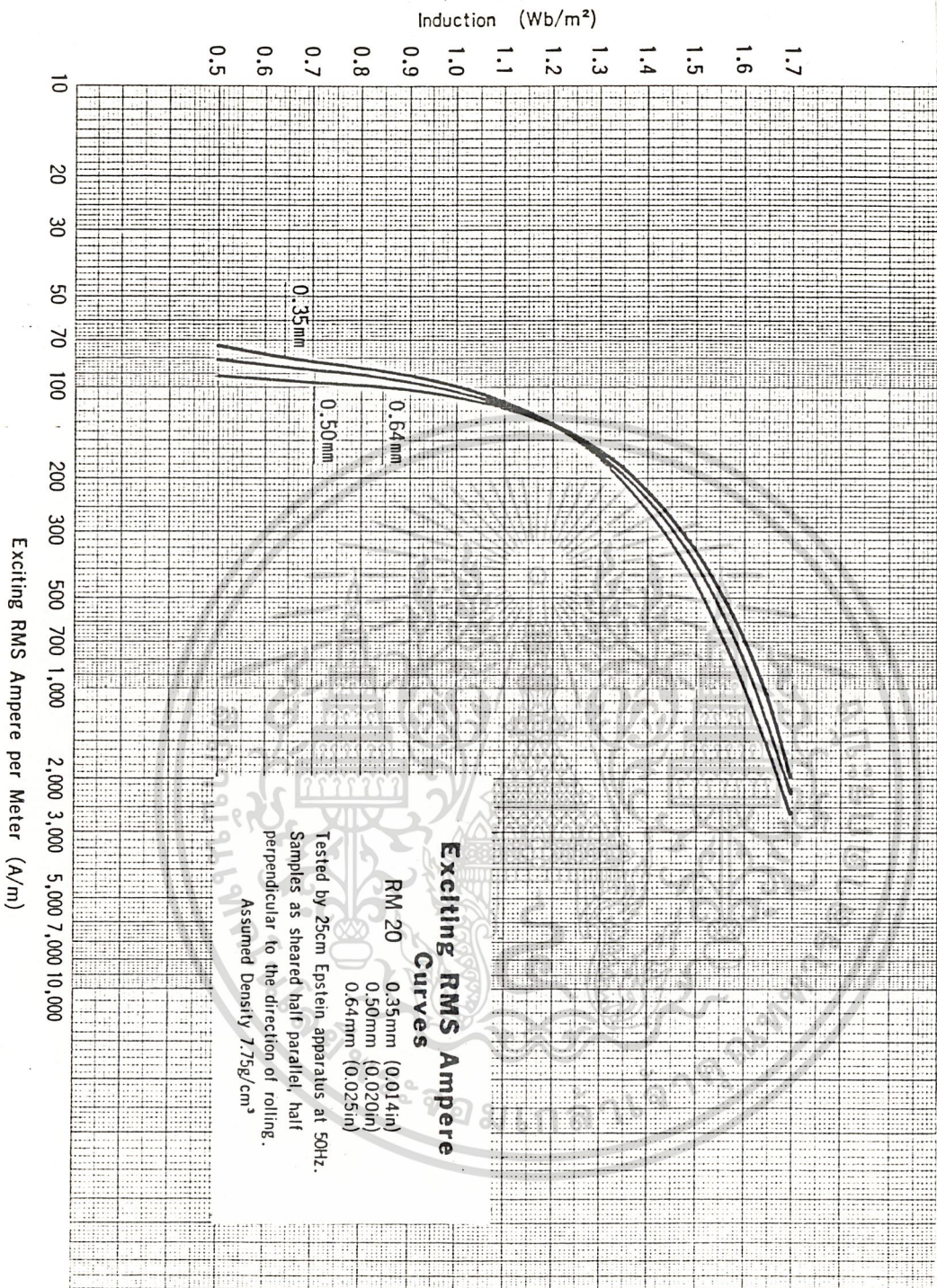
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

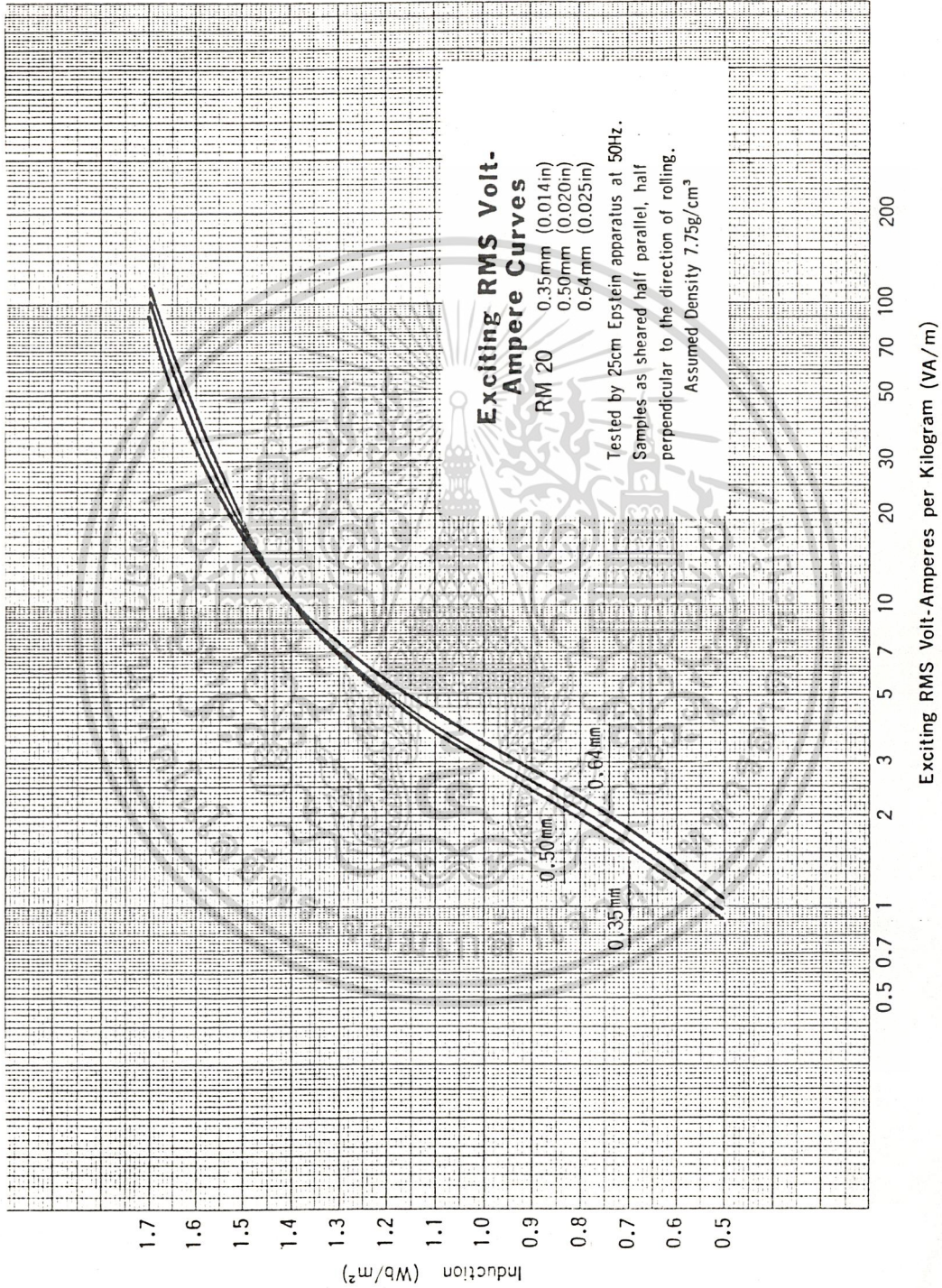


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



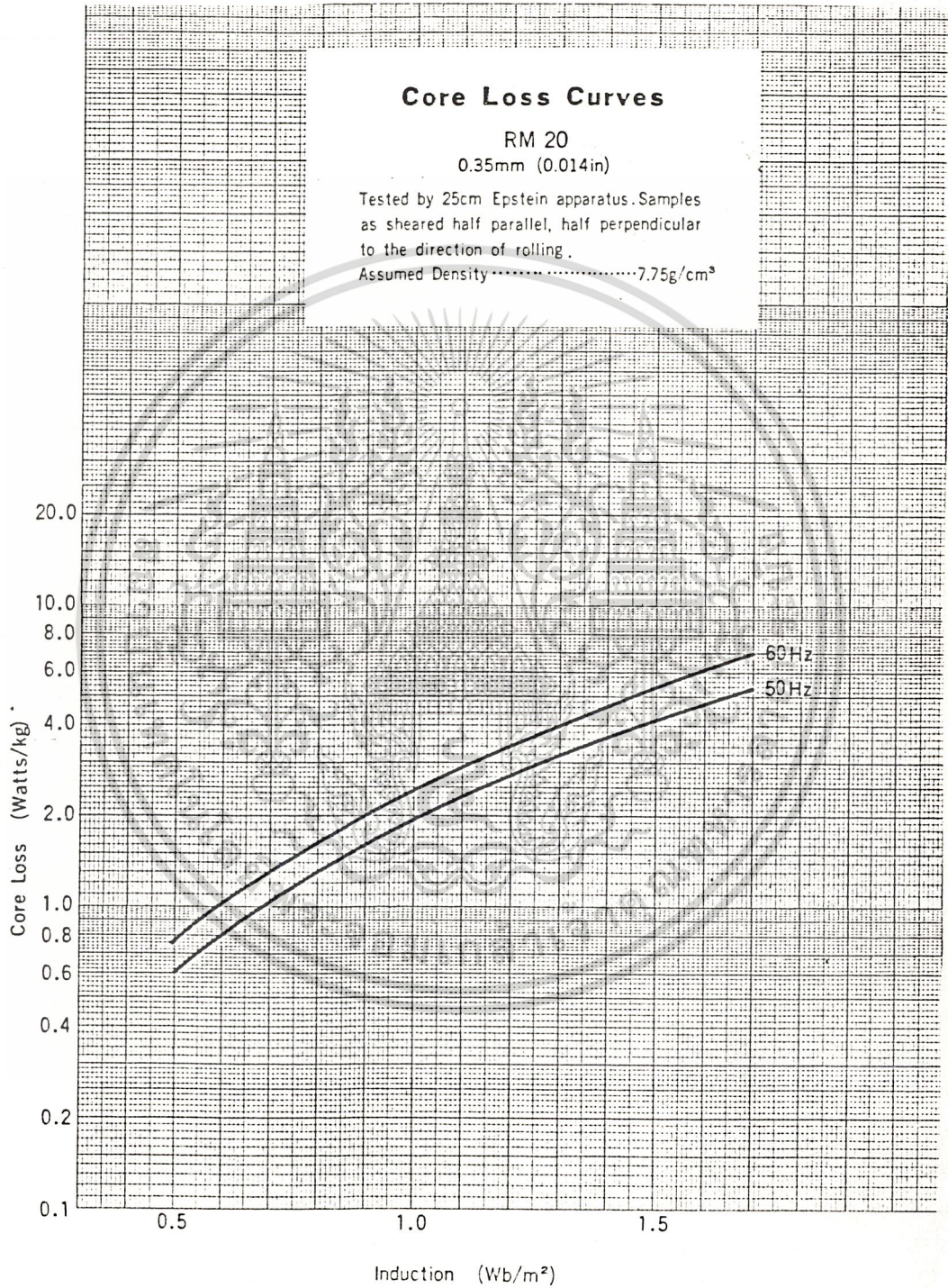
๖-๘ การแปรสภาพของเหล็กไฟฟ้าในกระบวนการอบชุบเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

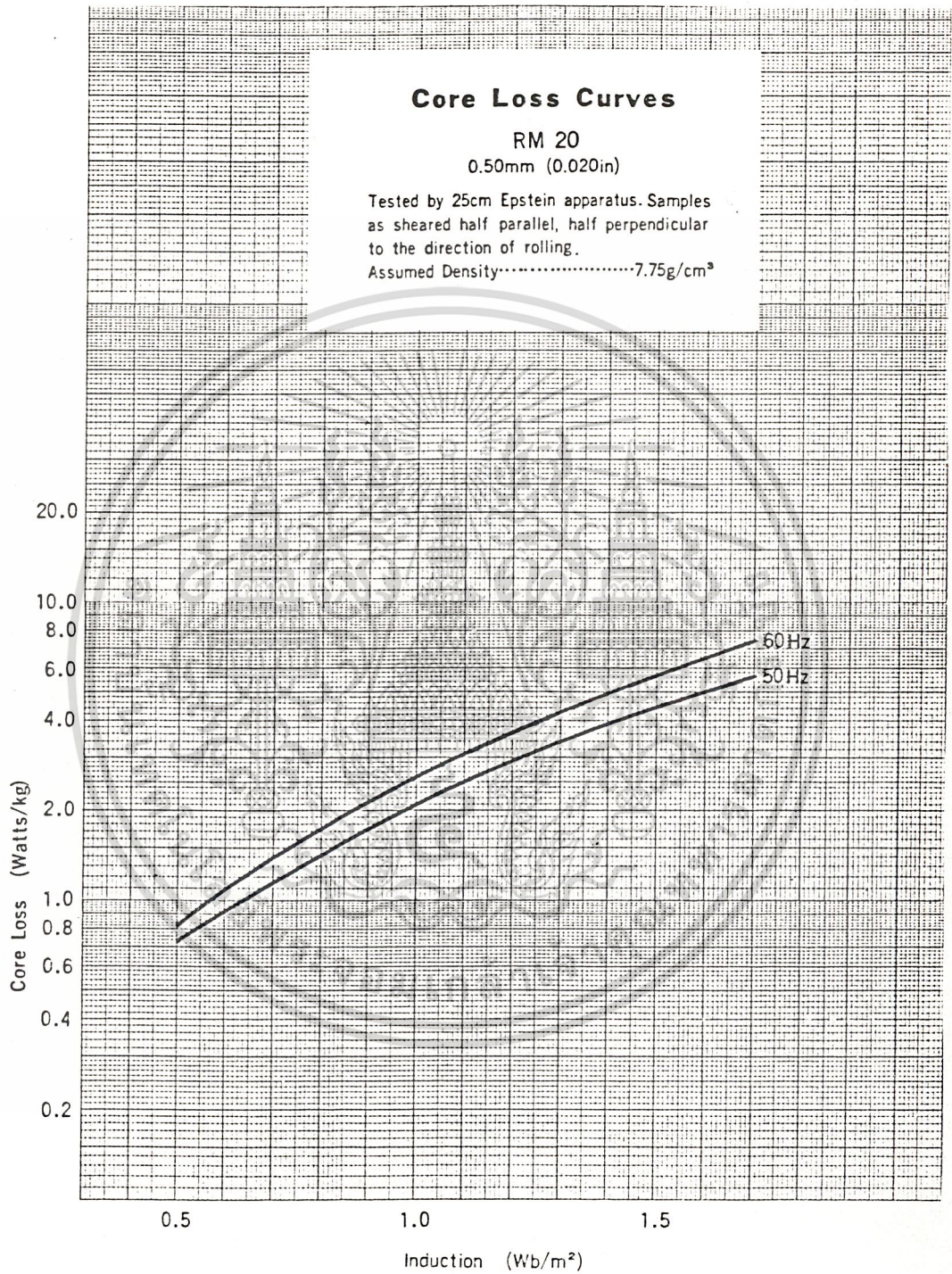


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

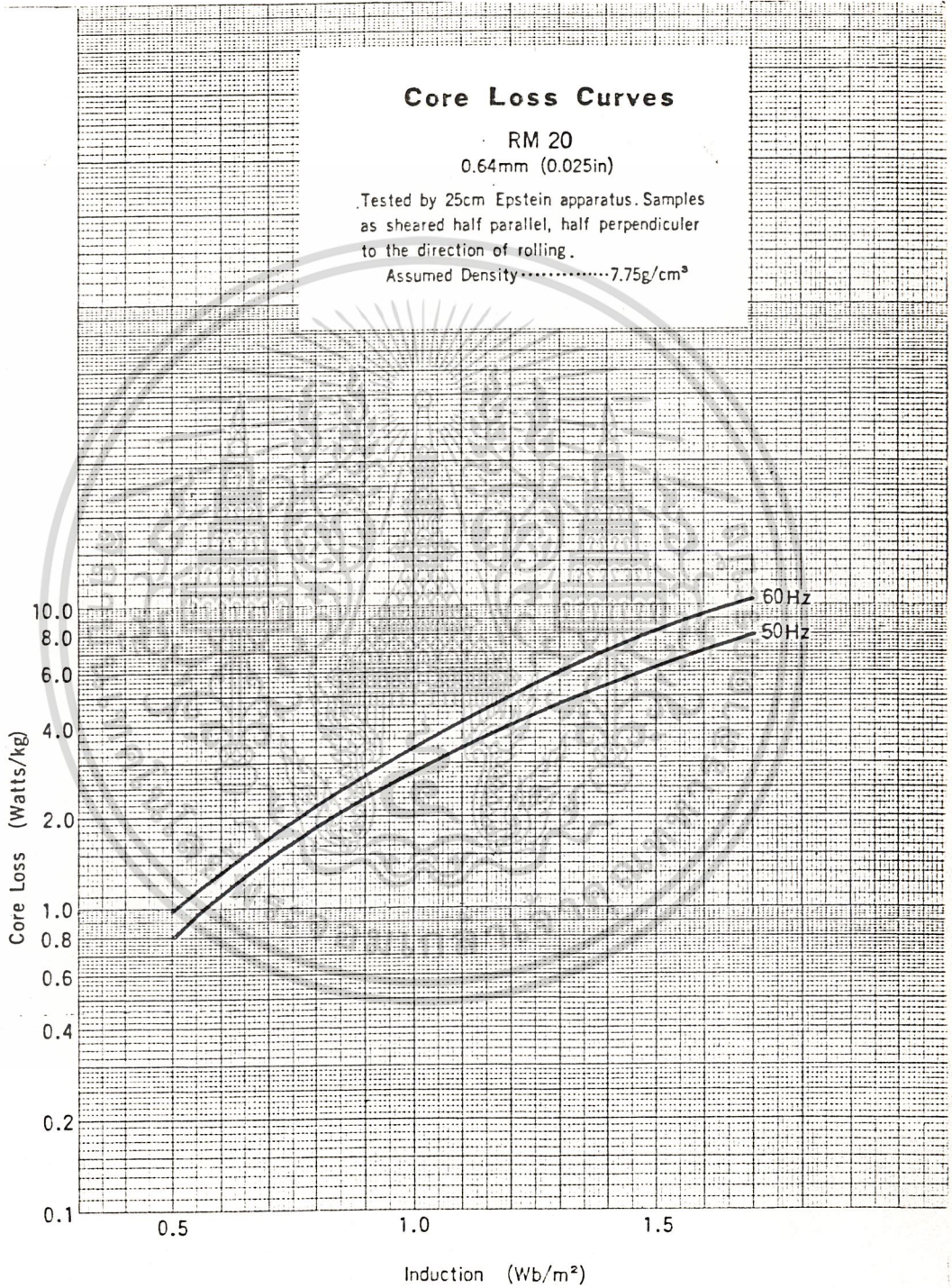
ง-4 กราฟแสดงคุณการสูญเสียในแกนเหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์พีชิต ล้ายอง ที่ให้คำปรึกษา  
แนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเป็นพิเศษ

คุณศุภชัย ศรีสวัสดิ์ จากบริษัท ไทย-เจเนเนอรัลเรเตอร์ จำกัด  
ศูนย์คอมพิวเตอร์คณะวิศวกรรมศาสตร์พระจอมเกล้าลาดกระบัง  
หม่อม ชวง และ กิ่ง ที่มีส่วนช่วยพิมพ์  
และทุกท่านที่ช่วยให้กำลังใจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. จรุง หอศิวาลัย, "เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่านและ สามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง", วิทยานิพนธ์สำหรับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 128 หน้า, 2532.
2. วิริยะ พิเศษส์จำเริญ, "เอ.ซี.มอเตอร์คอนโทรล", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 275 หน้า, 2529.
3. ณรงค์ ชอนตะวัน, "เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ", เอราวัณการพิมพ์, 141 หน้า, 2530.
4. ณรงค์ ชอนตะวัน, "มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ", เอราวัณการพิมพ์, 282 หน้า, 2531.
5. Fukuo Shibata, "A Brushless Self-Excite single phase Synchronous Generator Operating With Load and Exciteing Current Flowing in Armature", IEEE Trans.on Energy Conversion, Vol. EC-2 , No.2 , 1987 , pp 254-261.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. K.Inoue , H. Yamashita and t. Fujikawa, "Brushless Self-Exciteing Three-Phase Synchronous Generator Utilizing The 5<sup>th</sup> Harmonic component of Magneto Motive Force Through Armature Currents ", IEEE Trans.on Energy Conversion, Vol. 7, No.2, 1992 , PP 517-524.
7. S.Nonaka and K.Kesamaru , "Brushless Three-Phase Synchronous Gerenerator Without Exciter Theory", Electrical Engineering in Japan, Vol. 105 , No.6 ,1985, PP.91-99.
8. A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen D Umans, "Electrical Machinery", Megrav-Hill ,4<sup>th</sup> Edition, 144 P,1983.
9. George Mopherson , Robert D. Laram More , "An Introduction To Electrical Machines And Transformers" , John Wiley & Sons, 256 P,1990.