



ปีการศึกษา 2530

มอเตอร์เหนียวนำเพลิงเดี่ยวชนิดแยกเฟสสตาร์ท

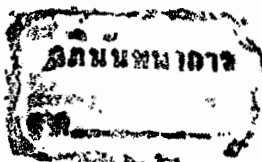
โดย

นายรุ่งทิพย์	รุ่งสรรเสริญ	27.1159
นายสมชาย	ปราชญานุสิทธิ์	27.1252
นายสมนึก	เหล่ารุจิสวัสดิ์	27.1257

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ทองใบ อรรถเศรษฐ

อ. วิเชียร ลิ้มโพธิ์ทอง



ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ 2530

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ท

ผู้จัดทำ

1. นายรุ่งทิพย์ รุ่งสรรเสริญ 27.1159
2. นายสมชาย ปราชญ์นุสิทธิ์ 27.1252
3. นายสมนึก เหล่ารุจิสวัสดิ์ 27.1257

ผศ. ทองใบ อรรถเศรษฐ

อาจารย์ที่ปรึกษา

()

อ. วิเชียร ลิ้มโพธิ์ทอง

อาจารย์ที่ปรึกษา

()

## มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ท

รุ่งทิพย์ รุ่งสรร เสริฐ

สมชาย ปราชญานุสิทธิ์

สมนึก เหล่ารุจิสวัสดิ์

ผศ.ทองใบ อรรถเศรษฐ อาจารย์ที่ปรึกษา

วิเชียร ลิ้มโพธิ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2530

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเป็นมอเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า แต่ขาดการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดี ปริมาณนี้จึงได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบมอเตอร์เฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ท การคำนวณค่าคงที่ต่างๆของมอเตอร์และคุณสมบัติในขณะที่ทำงานบนพื้นฐานทฤษฎีสนามตัดขวาง (Cross Field Theory) ซึ่งพัฒนาโดย C.G.Veinott เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปโลตัส123 เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษา

## SINGLE PHASE INDUCTION SPLIT PHASE MOTOR

Roongtip Roongsunsert

Somchai Prachayanusit

Somnuek Laurujisawat

Associate Professor Thongbai Attaseth Advisor

Wichian Limphothong Advisor

1987

### Abstract

Today, Single phase induction motor is an important apparatus in electrical industrial but it has not been studied and developed for good characteristics and performances for many years. Thus, this thesis was made in order to study and develop single phase induction motor split phase type. The study is about motor constant calculation, performance calculation based on cross field theory which was developed by C.G.Veinott. For convenience, we use Lotus123 package program as the helping apparatus for the study.

## สารบัญ

	เรื่อง	หน้า
บทที่ 1	มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	1
1.1	ผลผลิตที่ได้จากสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์หนึ่งเฟส, จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กขวาง	1
1.1.1	สองทฤษฎีของการกระทำในมอเตอร์หนึ่งเฟส	1
1.1.2	มอเตอร์หนึ่งเฟสกรณีพิเศษของมอเตอร์สองเฟส	2
1.1.3	สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตําานําหลักโดยลำพัง	2
1.1.4	สนามแม่เหล็กที่เกิดจากส่วนของโรเตอร์	2
1.1.5	สนามแม่เหล็กรวม	5
1.1.6	การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์หนึ่งเฟสกับมอเตอร์หลายเฟส	5
1.1.7	มอเตอร์เฟสเดียว เทียบกับมอเตอร์หลายเฟส	6
1.2	ผลผลิตของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เฟสเดียว, จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน	7
1.2.1	คำอธิบายของเฟอริต	7
1.2.2	การแปลงสนามแม่เหล็กในรูปของพัลส์ให้เป็นสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางกันข้ามสองสนามที่มีขนาดคงที่	8
1.2.3	คุณลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ	9
1.2.4	ข้อสังเกตในทฤษฎีทั้งสอง	10
บทที่ 2	ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบมอเตอร์เฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ท	14
2.1	ขนาด	14
2.1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดและขนาดมอเตอร์	14
2.1.2	สมการเอาท์พุท	15
2.1.3	พิจารณาองค์ประกอบที่มีผลต่อขนาดของมอเตอร์	15
2.1.4	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์ (D) และความหนาแน่นของแกนเหล็ก (L)	17
2.2	การออกแบบสเตเตอร์	17
2.2.1	การออกแบบจำนวนสเตเตอร์สล็อต	18
2.2.2	การออกแบบขนาดของสเตเตอร์สล็อต	18

เรื่อง	หน้า
2.2.3 การออกแบบซี่ของสเตเตอร์	18
2.2.4 คอรัของสเตเตอร์	19
2.3 การออกแบบโรเตอร์	19
2.3.1 การออกแบบจำนวนโรเตอร์สล็อต	19
2.3.2 พื้นที่หน้าตัดของโรเตอร์บาร์	19
2.3.3 พื้นที่หน้าตัดของแหวน	20
2.3.4 ความต้านทานของโรเตอร์	20
2.4 ออกแบบขดลวดตัวนำ	20
2.4.1 จำนวนที่ใช้ในการพัน	21
2.4.2 รูปแบบของการพัน	21
2.4.3 ขนาดของขดลวดตัวนำที่ขดขดลวดตัวนำหลัก	23
2.4.4 ความยาวรอบเฉลี่ย	24
2.5 การออกแบบส่วนประกอบย่อยอื่นๆ	24
2.5.1 การเลือกความยาวแอร์แกป	24
2.6 การคำนวณพารามิเตอร์	25
2.6.1 การคำนวณหาพารามิเตอร์	25
2.6.2 การคำนวณรีแอกแตนซ์	25
2.7 การออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ท	28
2.7.1 การออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ทสำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟล สตาร์ท	28
2.7.2 การออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ทสำหรับมอเตอร์แบบ คาปา- ซิเตอร์สตาร์ท	31
<b>บทที่ 3 การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟลเดียว แบบแยกเฟลสตาร์ทด้วย-</b> <b>ไมโครคอมพิวเตอร์</b>	<b>34</b>
3.1 บทนำ	34
3.2 ขั้นตอนการออกแบบ	34
3.3 ตัวอย่างการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟลเดียวแบบแยกเฟล สตาร์ท	34
3.4 การออกแบบมอเตอร์โดยการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์	41
3.5 การปรับค่าต่างๆ เพื่อให้คุณลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์ดีขึ้น	41

	เรื่อง	หน้า
	3.5.1 การปรับค่าจำนวนรอบในการพัน	41
	3.5.2 การปรับค่าขนาดขดลวด	41
	3.5.3 การปรับค่าของขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ท	42
บทที่ 4	การทดสอบมอเตอร์และผลของการทดสอบ	43
4.1	บทนำ	43
4.2	การทดสอบมอเตอร์	43
4.2.1	การทดสอบโดยตรงกับตัวมอเตอร์	43
4.2.2	การทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	43
4.3	ผลจากการทดสอบ	44
4.3.1	ผลจากการทดสอบโดยตรงจากตัวมอเตอร์	44
4.3.2	ผลจากการทดสอบจากตัวโปรแกรมคอมพิวเตอร์	47
4.4	ผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบ	49
บทที่ 5	บทวิจารณ์และสรุป	55
ภาคผนวกที่ 1	รายละเอียดตัวโปรแกรมการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสสตาร์ท	
ภาคผนวกที่ 2ก	การปรับค่าของจำนวนรอบของขดลวดตัวนำหลักเพื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด	
ภาคผนวกที่ 2ข	การปรับค่าของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำหลักเพื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด	
ภาคผนวกที่ 2ค	การปรับค่าของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำหลักต่อพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ทเพื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด	
ภาคผนวกที่ 2ง	การปรับค่าของจำนวนรอบของขดลวดตัวนำหลักต่อจำนวนรอบของขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ทเพื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด	
ภาคผนวกที่ 3	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบ	
ภาคผนวกที่ 4	ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	
ภาคผนวกที่ 5	กราฟที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าคงที่ของมอเตอร์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 สนามแม่เหล็กหมุน ที่สร้างจากสเตเตอร์ที่มี 2 เฟส	3
รูปที่ 1.2 สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	4
รูปที่ 1.3 การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กหมุนระหว่างมอเตอร์เฟสเดียว กับมอเตอร์หลายเฟส	5
รูปที่ 1.4 การอธิบายถึงลักษณะ ความเร็ว-แรงบิดของมอเตอร์เฟสเดียว ตามวิธีของเฟอราริช	8
รูปที่ 1.5 คลื่นหยุดนิ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด ซึ่งเกิดจากการรวมคลื่นหมุน 2 ลูก ที่มีขนาดคงที่แต่ทิศทางตรงกันข้าม	9
รูปที่ 1.6 แสดงวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำ	12
รูปที่ 1.7 แสดงเฟเซอร์กระแสและล๊อคโรเตอร์	12
รูปที่ 2.1 แสดงขนาดของมอเตอร์	14
รูปที่ 2.2 การผันขดลวดแบบคอนเซนตริก	21
รูปที่ 2.3 การผันขดลวดแบบคอนเซนตริกอีกแบบหนึ่ง	22
รูปที่ 2.4 แสดงเส้นฟลักซ์ลึคเกจ	27
รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคอยล์สแปนต่อความยาว ขั้วแม่เหล็กกับสัมประสิทธิ์โอเวอร์แองค์ลึคเกจ	27
รูปที่ 2.6 เซอร์เกิลไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด แยกเฟสสตาร์ท	30
รูปที่ 2.7 เซอร์เกิลไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด คาร์ปาซิเตอร์สตาร์ท	31
กราฟ เปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดที่วัดได้จากมอเตอร์ และค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ	49
กราฟ เปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังที่ป้อนที่วัดได้จากมอเตอร์ และค่ากำลังที่ป้อนที่ได้จากการคำนวณ	50
กราฟ เปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังที่ได้ที่วัดจากมอเตอร์ และค่ากำลังที่ได้จากการคำนวณ	51
กราฟ เปรียบเทียบระหว่างกระแสที่วัดได้จากมอเตอร์ และค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ	52
กราฟ เปรียบเทียบระหว่างค่าประสิทธิภาพที่วัดได้จากมอเตอร์ และค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ	53

กราฟ เปรียบเทียบระหว่างค่าตัวประกอบกำลังที่วัดได้จากมอเตอร์  
และค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการคำนวณ



## สารบัญตาราง

	เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 3.1	การคำนวณคุณสมบัติของ Veinott	40
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการทดสอบของมอเตอร์	44
ตารางที่ 4.2	แสดงผลจากการทำนายทางโปรแกรม	47
ตารางที่ 4.3	ตารางผลการทดสอบเพื่อนำไปเขียนกราฟ	48



## สัญลักษณ์

- $A_m$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของขดลวดตัวนำหลัก
- $A_r$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของตัวนำแท่งโรเตอร์
- $B$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก
- $B_{av}$  = ภาวะจำเพาะทางแม่เหล็ก
- $B_{tm}$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่บริเวณสเตเตอร์ที่ค
- $C_o$  = ลัมประสิทธิ์เอาก์พุท
- $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์
- $D_{ri}$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของวงแหวนลัดวงจร
- $D_{ro}$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนลัดวงจร
- $D_i$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์
- $D_o$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสเตเตอร์
- $E$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- $E_{ff}$  = ประสิทธิภาพ
- $F_m$  = แฟลคเตอร์อิมิตัว
- $I$  = กระแสของมอเตอร์
- $I_m$  = กระแสของขดลวดตัวช่วย
- $I_z$  = กระแสในแต่ละลวดตัวนำ
- $K_{r1\&2}$  = ลัมประสิทธิ์วงแหวน
- $K_w$  = แฟลคเตอร์การกระจายของขดลวด
- $K_{wm}$  = แฟลคเตอร์การกระจายของขดลวดตัวนำหลัก
- $K_{wm}$  = แฟลคเตอร์การกระจายของขดลวดตัวนำช่วย
- $K_s$  = ค่าคงที่สี่ลิตติกเกจ
- $L$  = ความยาวของแกนเหล็กสเตเตอร์
- $L_b$  = ความยาวของแท่งตัวนำที่โรเตอร์
- $L_{mtm}$  = ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดตัวนำหลัก
- $L_{mtm}$  = ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดตัวนำช่วย
- $P$  = พิกัดกำลังของมอเตอร์
- $PF$  = เพาเวอร์แฟคเตอร์
- $Q$  = พิกัด VA ของมอเตอร์
- $R_s$  = ความต้านทานของคาปาซิเตอร์

- S = อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วเชิงโคโรนัล
- $S_r$  = จำนวนของโรเตอร์สลีต
- $S_m$  = จำนวนของสเตเตอร์สลีต
- T = จำนวนรอบของตัวนำสเตเตอร์ทั้งหมด
- $T_m$  = จำนวนรอบทั้งหมดของชุดขดลวดตัวนำช่วย
- $T_{pm}$  = จำนวนรอบของชุดขดลวดตัวนำช่วยต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็ก
- $T_m$  = จำนวนรอบทั้งหมดของชุดขดลวดตัวนำหลัก
- $T_{pm}$  = จำนวนรอบของชุดขดลวดตัวนำหลักต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็ก
- V = พิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า
- $W_{or}$  = ความกว้างของปากสลีตที่โรเตอร์
- $W_{om}$  = ความกว้างของปากสลีตที่สเตเตอร์
- $W_{tr}$  = ความกว้างของทึบที่โรเตอร์
- $W_{tm}$  = ความกว้างของทึบที่สเตเตอร์
- $X_{om}$  = รีแอกแตนซ์เมื่อเปิดวงจรทางด้านโรเตอร์
- Z = จำนวนของตัวนำสเตเตอร์ทั้งหมด
- $a_b$  = พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำช่วย
- ac = ภาระจำเพาะทางไฟฟ้า
- $a_m$  = พื้นที่หน้าตัดของวงแหวนลัดวงจร
- $a_m$  = พื้นที่หน้าตัดของชุดขดลวดตัวนำหลัก
- dcs = ความยาวของส่วนคอร์ของสเตเตอร์
- dss = ความลึกของสเตเตอร์สลีต
- f = ความถี่ของไฟฟ้าที่ใช้
- k = อัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดตัวนำช่วยต่อจำนวนรอบของขดลวดตัวนำหลัก
- $k_{er}$  = สัมประสิทธิ์ของคาร์เตอร์
- $k_{err}$  = องค์กรประกอบแก้ปคอนแทรกชัน (Gap contraction factor) สำหรับโรเตอร์สลีต
- $k_{em}$  = องค์กรประกอบแก้ปคอนแทรกชัน (Gap contraction factor) สำหรับสเตเตอร์สลีต
- $l_p$  = ความยาวของแอร์เก็บ
- n = ความเร็วรอบของมอเตอร์
- $n_p$  = ความเร็วเชิงโคโรนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$p$	=	จำนวนซี่แม่เหล็ก
$r_{r_{nl}}$	=	ความต้านทานทุติยภูมิ แปลงมาทางด้านขดลวดตัวนำช่วย
$r_{r_{ml}}$	=	ความต้านทานทุติยภูมิ แปลงมาทางด้านขดลวดตัวนำหลัก
$r_{nl}$	=	ความต้านทานของขดลวดตัวนำช่วย
$r_{ml}$	=	ความต้านทานของขดลวดตัวนำหลัก
$x_{1m}$	=	ลิกเกจรีเอกแตนซ์รวมในเทอมของขดลวดหลัก
$x_{r_{r_{ml}}}$	=	ลิกเกจรีเอกแตนซ์ทุติยภูมิ แปลงมาทางด้านขดลวดตัวนำหลัก
$x_{1nl}$	=	ลิกเกจรีเอกแตนซ์ปฐมภูมิของขดลวดตัวนำช่วย
$x_{1m}$	=	ลิกเกจรีเอกแตนซ์รวมในเทอมของขดลวดหลัก
$x_m$	=	แมกเนไตซิงรีเอกแตนซ์ของขดลวดตัวนำหลัก
$x_o$	=	โอเวอร์แอ่งรีเอกแตนซ์
$x_{st}$	=	สล็อตลิกเกจรีเอกแตนซ์
$x_{sk}$	=	สกีวลิกเกจรีเอกแตนซ์
$y_{sr}$	=	ระยะห่างระหว่างสล็อตที่โรเตอร์
$y_{st}$	=	ระยะห่างระหว่างสล็อตที่สเตเตอร์
$\phi$	=	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งซี่แม่เหล็ก
$\lambda_{sr}$	=	เปอร์เซ็นต์จำเพาะสำหรับสล็อตที่สเตเตอร์
$\lambda_{st}$	=	เปอร์เซ็นต์จำเพาะสำหรับสล็อตที่โรเตอร์
$\delta_r$	=	ความหนาแน่นกระแสที่แท่งโรเตอร์
$\delta_{st}$	=	ความหนาแน่นกระแสที่วงแหวนลัดวงจร
$\delta$	=	ความหนาแน่นของกระแส
$\delta_r$	=	ความหนาแน่นของกระแสของแท่งโรเตอร์
$\delta_{st}$	=	ความหนาแน่นของกระแสของวงแหวนลัดวงจร
$\tau$	=	ระยะห่างของซี่แม่เหล็ก
$\theta$	=	มุมของการสกีว
$\tau$	=	ระยะห่างระหว่างซี่แม่เหล็ก
$\eta$	=	ประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

(Single phase induction motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้กันในบ้านเรือน ธุรกิจ และโรงงานขนาดเล็ก อาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีประสิทธิภาพต่ำกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในการใช้งานแทนกัน แต่ในระบบไฟสามเฟสนี้ไม่แพร่หลายนัก ยกเว้นในธุรกิจขนาดใหญ่และโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เนื่องจากไฟฟ้าที่ใช้อยู่ภายในบ้านเป็นระบบเฟสเดียวจึงทำให้มอเตอร์ในยุคแรกเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวต่างกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวไม่สามารถสตาร์ทด้วยตัวมันเองได้ สนามแม่เหล็กเฟสเดียวจะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ โดยขั้วแม่เหล็กจะกลับไปมาทุกๆครึ่งรอบของคลื่น แต่มันจะไม่หมุนด้วยตัวมันเองหรืออีกนัยหนึ่งถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนี้ถูกกระทำด้วยแรงทางกลให้ส่วนของโรเตอร์ (Rotor) หมุนอย่างรวดเร็ว มอเตอร์ก็จะหมุนอย่างต่อเนื่องได้และจะมีคุณสมบัติคล้ายกับมอเตอร์สามเฟสแบบซิงโครนัส (Three phase synchronous motor) ในอดีตการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะทำโดยการพัน เชือกหรือหนังแล้วดึงให้เพลาหมุน ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะสตาร์ทโดยการสร้างไฟเฟสที่สองขึ้นในตัวมอเตอร์ โดยใช้ไฟเฟสเดียวเป็นแหล่งจ่าย

#### 1.1 ผลผลิตที่ได้จากสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์หนึ่งเฟส, จากทฤษฎีสานแม่เหล็กขวาง

( Production of Rotating Field in a Single-phase Motor, Cross-field Theory)

1.1.1 สองทฤษฎีของการกระทำในมอเตอร์หนึ่งเฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสโดยทั่วไปจะอธิบายและวิเคราะห์โดยทฤษฎีเดียวคือทฤษฎีสานแม่เหล็กหมุน (revolving-field theory) ส่วนทางมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่นิยมจะใช้สองทฤษฎีในการวิเคราะห์คือทฤษฎีสานแม่เหล็กขวาง (cross-field theory) กับทฤษฎีสานแม่เหล็กหมุน (revolving-field theory) ทฤษฎีทั้งสองนี้เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางคุณภาพ การเข้าใจในทฤษฎีทั้งสองนี้จะสามารถเป็นประโยชน์แก่นักศึกษาได้ (ยังมีทฤษฎีอื่นอีก แต่ในการพิจารณาของเรานี้จะกล่าวเพียงสองทฤษฎี) เรื่องที่เกี่ยวกับของเราคือการแสดงให้เห็นถึงทฤษฎีทั้งสองในเรื่อง สนามแม่เหล็กหมุนสร้างขึ้นได้อย่างไรและบอกอะไรเกี่ยวกับธรรมชาติของมัน และเพื่อที่เราจะรู้ซึ่งในเรื่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำของมอเตอร์หนึ่งเฟส ในการอธิบายนี้แสดงให้เห็นว่าทำไมขณะหยุดนิ่ง (standstill) จึงไม่มีสนามหมุนเวียนและไม่มีแรงบิดเกิดขึ้น ทั้งยังแสดงให้เห็นว่าทำไมในสภาวะไร้ภาระ (no-load) จึงเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่คล้ายกับในมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส

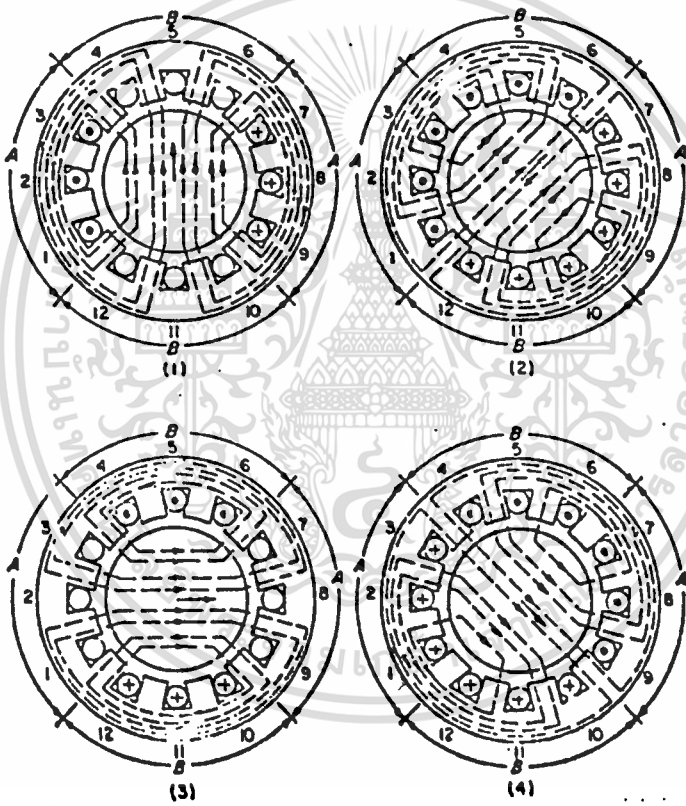
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 มอเตอร์หนึ่งเฟสกรณีพิเศษของมอเตอร์สองเฟส ถ้าเฟส B ในมอเตอร์ที่พิจารณาได้ ถูกทิ้งไปหรือวงจรเปิดด้านซ้าย สิ่งที่เหลืออยู่ก็คือมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส เราเคยศึกษามาแล้วว่า ในมอเตอร์สองเฟสมีสนามแม่เหล็กประกอบสองส่วนซึ่งอยู่ในอากาศ (in space) แต่การเปลี่ยนแปลง (amplitude) ขึ้นกับเวลา เราจะพบว่าสนามแม่เหล็กประกอบทั้งสองนั้นรวมกันในลักษณะที่สร้างสนามแม่เหล็กหนึ่งสนามซึ่งจะมีค่าคงที่ในขนาด แต่หมุนด้วยความเร็วเดียวกัน สนามแม่เหล็กประกอบแต่ละตัวเกิดจากหนึ่งในหลายเฟสของสเตเตอร์ แต่ว่าองค์ประกอบทั้งสองของสนามแม่เหล็กหมุนเกิดจากขดลวดตัวนำหลัก (stator winding) อย่างไรก็ตามในมอเตอร์หนึ่งเฟสจะมีเฉพาะขดลวดตัวนำหลักเท่านั้นทำให้เกิดองค์ประกอบสนามแม่เหล็กหมุนด้วยจังหวะคงที่โดยเกิดขึ้นจากส่วนสเตเตอร์ ควรที่เราจะได้อาจตรวจสอบสนามแม่เหล็กนี้ที่เกิดจากส่วนสเตเตอร์และเพื่อจะให้เห็นผลที่จะเกิดในส่วนโรเตอร์

1.1.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวนำหลักโดยลำพัง รูป 1.2.1 เป็นการสร้างขึ้นจากรูป 1.1.1 ลักษณะและทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นดังรูปได้แสดงไว้ แต่ว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะไซน์กับเวลาเช่นเดียวกับเอ็กไซติงเคอเรนท์ (exciting current) การเปลี่ยนทิศทางเกิดขึ้นเมื่อกระแสเปลี่ยนเมื่อกระแสเปลี่ยนทิศทาง การไหล อย่างไรก็ตามแกนของสนามแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลง ขณะหยุดนิ่งนั้นจะไม่มีสนามแม่เหล็กหมุนนั่นคือ ไม่มีแรงบิดและไม่มีที่ท้าวจะสตาร์ทได้

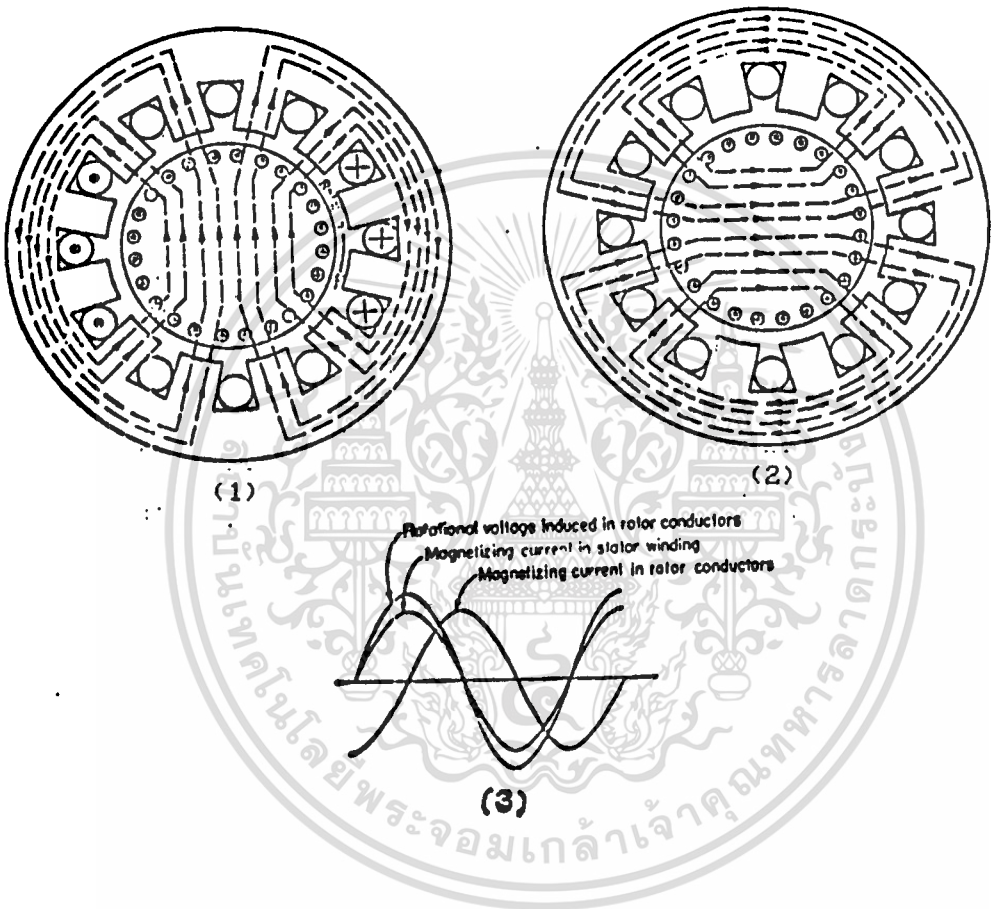
1.1.4 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากส่วนของโรเตอร์ สมมุติว่าโรเตอร์มีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วซึ่งโครนอสตังแสดงในรูป แท่งตัวนำก็จะหมุนเวียนตัดผ่านสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์และโวลเตจก็จะถูกสร้างขึ้นในแต่ละแท่งตัวนำตามการหมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็ก จากการใช้กฎสามนิ้วของเฟลมมิงจะได้ว่า ทิศทางของโวลเตจนี้จะพุ่งเข้าหาผู้ดูในตัวนำทั้งหมดเหนือเส้นแบ่งครึ่งในแวนอนและจะมีทิศพุ่งออกจากผู้ดูในส่วนตัวนำทั้งหมดที่อยู่ใต้เส้นแบ่งครึ่งแวนอน ทิศทางที่ได้นี้แสดงในรูปด้วยสัญลักษณ์จุดและกากบาทในรูป 1.2.1 และ 1.2.2 เพราะว่าโวลเตจเกิดการเหนี่ยวนำโดยการหมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กจึงทำให้โวลเตจมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ความเร็วคงที่ ดังในตัวอย่างนี้ โวลเตจที่ถูกเหนี่ยวนำในตัวนำโรเตอร์นี้จะมีเฟสตรงกับเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์และกระแสแมกเนโตซึ่งดังแสดงในรูป 1.2.3

ถ้ากระแสที่ไหลในตัวนำมีทิศทางดังแสดงไว้นั้น ขดลวดการพันของโรเตอร์ทั้งหมดสามารถเปรียบเทียบได้เหมือนกับขดลวดเพียงขดเดียววางในแนวแกนนอนและสนามแม่เหล็กก็เกิดขึ้นตามแนวนี้ด้วย ดังรูป 1.2.2 แกนที่เกิดขึ้นนี้คือแกนสนามแม่เหล็กขวาง (cross-field axis) แกนนี้จะขึ้นกับสนามแม่เหล็กที่สร้างจากกระแสโดยกระแสนี้คือกระแสเหนี่ยวนำที่ได้จากโวลเตจเหนี่ยวนำในการตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กหลัก และแกนที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับแกนหลักเมื่อดูจากรูป 1.1.3 (จะมีตำแหน่งเดียวกับแกนในเฟส B ที่ขาดหายไปนรูป 1.1.3) และเมื่อโรเตอร์มีการหมุนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 สนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างจากสเตเตอร์ที่มีสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

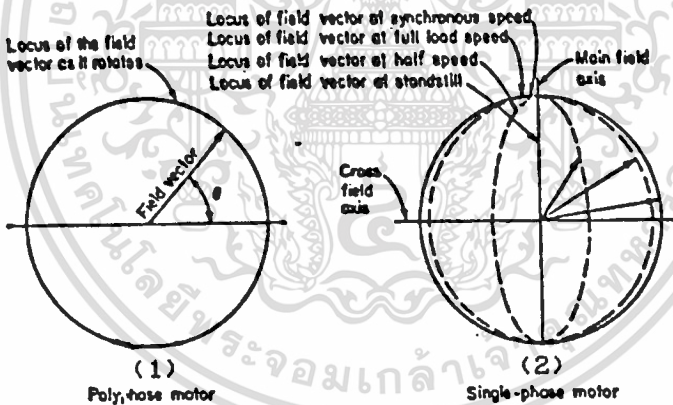
- (1) สนามแม่เหล็กสเตเตอร์และโวลเตจหมุนในโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำจากส่วนสเตเตอร์
- (2) สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างจากกระแสที่ไหลในแท่งตัวนำโรเตอร์
- (3) ค่าของกระแสในสเตเตอร์, โวลเตจในโรเตอร์, และกระแสในสนามแม่เหล็กขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนนี้ก็จะสร้างองค์ประกอบสนามแม่เหล็กที่สองที่ตั้งฉากกับองค์ประกอบสนามแม่เหล็กหลัก

ถ้าเราคิดว่าขดลวดตัวนำหลักเป็นเหมือนกับขดลวดเตี้ยวงที่อยู่ในแนวแกนขวางและเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรส่วนใหญ่เป็นค่ารีแอกทีฟ ดังนั้นกระแสที่ไหลในขดลวดจะแลด (lag) จากค่าโวลเตจเหนี่ยวนำ 90 องศา (ทำให้มีการนำทฤษฎีสนามแม่เหล็กขวางมาพิจารณาตัวนำโรเตอร์เมื่อเทียบกับส่วนสเตเตอร์โดยตัวนำจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงและความถี่ก็จะเป็นความถี่มูลฐาน) ถ้ากระแสแมกเนไตซ์ซึ่งในแกนสนามแม่เหล็กขวางของโรเตอร์มีการแลดเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ 90 องศาแล้วองค์ประกอบเส้นแรงแม่เหล็กในแกนขวางก็จะแลดเส้นแรงแม่เหล็กแกนหลัก 90 องศาด้วย

1.1.5 สนามแม่เหล็กรวม เนื่องจากที่ความเร็วเชิงโคโรนัลโรเตอร์จะสร้างองค์ประกอบที่สองของสนามแม่เหล็กที่เป็นจังหวะที่ขึ้นกับเวลา และตั้งฉากกับสนามที่เกิดจากขดลวดตัวนำหลักทำให้สนามแม่เหล็กหมุนเกิดขึ้นเหมือนดังมอเตอร์สองเฟส อย่างไรก็ตามขณะหยุดนิ่งจะไม่มีการเหนี่ยวนำลปิดโวลเตจ (speed voltage) ในแกนขวางทำให้ไม่มีกระแสหรือเส้นแรงแม่เหล็กขวางเกิดขึ้น



(1) มอเตอร์หลายเฟส

(2) มอเตอร์เฟสเดียว

รูปที่ 1.3 การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กหมุนระหว่างมอเตอร์เฟสเดียวกับมอเตอร์หลายเฟส

1.1.6 การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์หนึ่งเฟสกับมอเตอร์หลายเฟส ในมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสที่ได้ออกแบบไว้เป็นอย่างดี ความเข้มของสนามแม่เหล็กหมุนจะไม่เปลี่ยนแปลงเหมือนการหมุนของมัน สภาพเช่นนี้สามารถเสนอในรูปเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กหมุน

รูป 1.3.1 ตำแหน่งมุมของเวกเตอร์ เสนอแทนตำแหน่งมุมของสนามแม่เหล็ก และความยาวของเวกเตอร์ก็แทนความเข้มของสนามแม่เหล็ก สำหรับมอเตอร์หลายเฟสตำแหน่งของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กนี้จะเป็วงกลม แต่สำหรับมอเตอร์เฟสเดียวตำแหน่งจะเป็นรูปวงรีซึ่งขนาดขึ้นกับความเร็ว เนื่องด้วยวิธีการเหล่านี้เป็นการเสนอแทนสนามแม่เหล็กหมุนทำให้บ่อยครั้งที่จะได้ยินไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงลักษณะสนามแม่เหล็กทรงวงรีใช้สำหรับมอเตอร์เฟลเดี่ยว ดังนั้นทรงวงรีนี้จึงแสดงถึงคุณสมบัติของตำแหน่งเวกเตอร์การหมุนซึ่งอธิบายสำหรับสนามแม่เหล็กหาใช้ทรงวงรีเป็นสนามแม่เหล็กไม่ทำไม่ตำแหน่งของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เฟลเดี่ยวซึ่งเป็นรูปวงรี ความเข้มขององค์ประกอบสนามแม่เหล็กขวางจะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของการหมุน เพราะว่าที่ความเร็วเชิงโคโรนีสององค์ประกอบสนามแม่เหล็กขวางจะประมาณเท่ากับสนามแม่เหล็กแกนหลัก ตำแหน่งของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กจึงเป็นวงกลม ที่ความเร็วครึ่งหนึ่งสนามแม่เหล็กขวางจะน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของสนามแม่เหล็กแกนหลักเล็กน้อย จากเหตุนี้ทำให้เวกเตอร์สนามแม่เหล็กบรรยายออกมาเป็นรูปวงรีดังแสดงในรูป 1.3.2 ขณะหยุดนิ่งสนามแม่เหล็กขวางนี้จะยุบลงจากวงรีกลายเป็นเส้นในแนวตั้งโดยสมบูรณ์

1.1.7 มอเตอร์เฟลเดี่ยวเทียบกับมอเตอร์หลายเฟล จากที่ผ่านมาได้มีการพิจารณาถึงคุณลักษณะอย่างสรุปที่อธิบายถึงข้อแตกต่างระหว่างมอเตอร์เฟลเดี่ยวกับมอเตอร์หลายเฟล

ก. แรงบิดที่ล๊อคโรเตอร์ (locked rotor torque) มอเตอร์เฟลเดี่ยวจะไม่มีแรงบิดล๊อคโรเตอร์ เพราะว่าขณะหยุดนิ่งจะไม่มีสนามแม่เหล็กหมุน แต่มอเตอร์หลายเฟลจะมีแรงบิดล๊อคโรเตอร์ เพราะว่าขณะหยุดนิ่งมีสนามแม่เหล็กหมุนด้วย ในมอเตอร์หลายเฟลนั้นแรงบิดล๊อคโรเตอร์สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มค่ารีซิสแตนซ์ของโรเตอร์ขึ้นให้ถึงจุดที่แรงบิดล๊อคโรเตอร์เท่ากับค่าแรงบิดเบรคดาวน์ ในมอเตอร์หนึ่งเฟลจะไม่มีจำนวนของค่ารีซิสแตนซ์ในโรเตอร์ที่จะผลิตค่าแรงบิดล๊อคโรเตอร์ เพราะว่าสนามแม่เหล็กไม่หมุนนั่นเอง

ข. สภาพไร้ภาระ (no-load) ในมอเตอร์หลายเฟลกระแสโรเตอร์และค่าการสูญเสียเปล่าในโรเตอร์ ( $I^2R$ ) นั้นเป็นค่าเล็กน้อย แต่ในมอเตอร์เฟลเดี่ยวครึ่งหนึ่งของสนามแม่เหล็กหมุนถูกสร้างโดยกระแสที่ไหลในโรเตอร์ด้วยเหตุนี้จึงมีค่ากระแสและมีค่าการสูญเสียเปล่าในโรเตอร์ที่มีค่ามากพอจะเกิดผลกระทบได้ขณะไร้ภาระ ข้อเท็จจริงอย่างหนึ่งก็คือครึ่งหนึ่งของการเอ็กไซเตชันเกิดจากส่วนของโรเตอร์เป็นส่วนให้เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างอื่น ๆ ขึ้น ถ้าเราให้กำลังเพียงพอแก่เพลลาของมอเตอร์หลายเฟลที่สามารถชดเชยแรงเสียดทานและการสูญเสียเปล่าเนื่องจากลม(รวมทั้งการสูญเสียเปล่าจากทูล-พัลเซชัน (tooth-pulsation) ที่ความถี่สูงซึ่งชดเชยได้โดยทางกล) แล้วมอเตอร์จะทำงานได้ที่ความเร็วเชิงโคโรนีส้อย่างไรก็ตามมอเตอร์เฟลเดี่ยวไม่สามารถทำงานที่ความเร็วเชิงโคโรนีส แม้ว่าการสูญเสียเปล่าทางกลจะถูกชดเชยจากภายนอกก็ตาม เพราะว่ามีการสูญเสียในแกนสนามแม่เหล็กขวาง ในแกนสนามแม่เหล็กขวางโวลเตจซ์จะถูกสร้างจากพฤติกรรมของความเร็วดังนั้นก็กำลังสำหรับการที่จะทำให้เกิดโวลเตจซ์นี้จำเป็นต้องถูกชดเชยทางกลโดยได้กำลังที่ข้ามผ่านจากช่องแกป (gap) มา เหตุนี้เองทำให้ลิสลิป (slip) ขณะไร้ภาระของมอเตอร์เฟลเดี่ยวมีค่ามากกว่าของมอเตอร์หลายเฟล

ค. ผลกระทบของค่ารีซิสแตนซ์ของโรเตอร์ในเรื่องแรงบิดเบรคดาวน์ ในมอเตอร์หลายเฟลนั้นแรงบิดเบรคดาวน์ไม่ขึ้นกับค่ารีซิสแตนซ์ของโรเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟลบาง

ส่วนของสนามแม่เหล็กจะเกิดจากกระแสในโรเตอร์ ความเข้มของสนามก็จะขึ้นกับค่าของรีซิสแตนซ์ในโรเตอร์ เนื่องด้วยเหตุนี้การเพิ่มค่ารีซิสแตนซ์ของมอเตอร์เฟสเดียวจะทำให้ลดค่าเส้นแรงของสนามแม่เหล็กขวางและแรงบิดเบรคดาวนี้

ง. แรงบิดเบรคดาวนี้อันเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่ป้อนให้ สำหรับเส้นแรงแม่เหล็กขณะไว้ภาวะที่ป้อนให้ นั้น ในมอเตอร์เฟสเดียวจะมีเส้นแรงแม่เหล็กน้อยกว่าในขณะเกิดแรงบิดเบรคดาวนี้ การลดลงของแรงบิดนี้จะมากกว่าที่ได้คาดไว้ ถ้ามอเตอร์หลายเฟสทำงานเป็นมอเตอร์เฟสเดียวแรงบิดเบรคดาวนี้จะลดลงน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าขณะมันทำงานเป็นมอเตอร์หลายเฟส เนื่องด้วยเหตุนี้แรงบิดเบรคดาวนี้ที่ให้นั้นในเครื่องจักรเฟสเดียวจำเป็นต้องการเส้นแรงแม่เหล็กที่มากขึ้นและเหล็กที่มากขึ้นกว่าในมอเตอร์หลายเฟส ความแตกต่างนี้มีค่า 40-50% ของค่าในเครื่องจักรหลายเฟส

จ. จังหวะของแรงบิด (torque pulsations) แรงบิดของมอเตอร์จะแปรเปลี่ยนในช่วงค่าจำกัดที่กว้าง ที่ความถี่ทั้งสองของโวลเตจที่ป้อน เห็นได้ชัดว่ามอเตอร์เฟสเดียวจำเป็นต้องมีพฤติกรรมดังกล่าวสำหรับความต้องการเพาเวอร์เอาพุททันทีทันใดจากไฟหนึ่งเฟสที่แปรเปลี่ยนค่าระหว่างค่าจำกัดที่กว้าง ด้วยเหตุนี้จะให้เพิ่มดับเบิ้ลเฟรควเอนซี ทอร์กกรีเอกชั่น (double frequency torque reaction) ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ สำหรับการใช้งานที่ต้องการความเจียบส่วนใหญ่ต้องการที่จะแยกส่วนการไหลสั้นสเตเตอร์ออกจากที่ติดตั้งเพื่อป้องกันแรงบิดนี้จากการที่จะส่งผ่านไปยังโครงสร้างของเครื่องจักรที่ใช้ขับเคลื่อน นอกเหนือจากนี้บางครั้งก็ต้องการเพิ่มส่วนยึดหยุ่นได้ระหว่างโรเตอร์กับภาระของมัน ตัวอย่างการใช้งานแบบนี้คือ บิมมหมุนเวียนน้ำร้อนที่ใช้สำหรับการทำความร้อนในที่พัก น้ดลมใบพัดเหล็กขนาดใหญ่ที่ติดตั้งบนเพลลาของมอเตอร์เฟสเดียวบางครั้งอาจทำให้เกิดเสียงครางออกมา

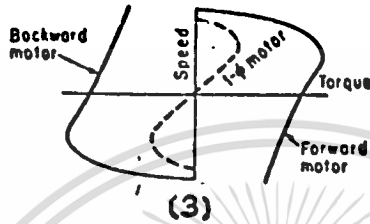
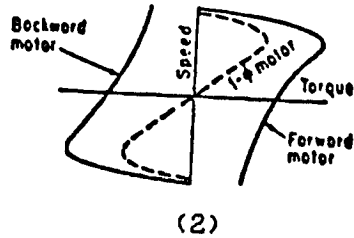
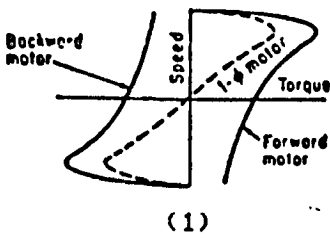
## 1.2 ผลผลิตของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เฟสเดียว, จากทฤษฎีสานแม่เหล็กหมุน

(Production of a Rotating Field in a Single-phase Motor, Revolving-field Theory)

นักศึกษาหลายคนชอบคิดถึงมอเตอร์เฟสเดียวในรูปแบบของทฤษฎีสานแม่เหล็กหมุน ภายหลังกเราจึงใช้ประโยชน์จากทฤษฎีนี้ในการออกแบบมอเตอร์หนึ่งเฟส

1.2.1 คำอธิบายของเฟอราริส เฟอราริสได้ให้คำอธิบายง่ายๆเกี่ยวกับลักษณะแรงบิดของมอเตอร์เฟสเดียว คำอธิบายของเขามีค่าเปรียบดั่งเป็นการช่วยความจำแม้ว่าจะไม่แน่นอนพอสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ นานมาแล้วที่นักคณิตศาสตร์พบว่าผลรวมของเวกเตอร์หมุนสองจำนวนที่เหมือนกัน (คือเท่ากันในขนาดและทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน) จะมีค่าเท่ากันทุกขณะ

เวลา โดยผลลัพธ์จะเป็นเวกเตอร์ที่คงที่และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเกี่ยวกับขนาด จากเหตุนี้เฟอราริสให้เหตุผลว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสควรจะมีแรงบิดทั่วๆไปเหมือนกับมอเตอร์หลาย



รูปที่ 1.4 การอธิบายถึงลักษณะ ความเร็ว-แรงบิด ของมอเตอร์หนึ่งเฟสตามวิธีของเฟอราริส: (1) มอเตอร์ที่มีค่าโรเตอร์รีซิสแตนซ์ต่ำ (2) มอเตอร์ที่มีค่าโรเตอร์รีซิสแตนซ์ปกติ (3) มอเตอร์ที่มีค่าโรเตอร์รีซิสแตนซ์สูง

เฟสสองตัวที่มีพิกัดเดียวกันและมีการต่อประกับทางกลและการต่อเข้าสำหรับตำแหน่งการหมุนที่ตรงข้ามกัน วิธีการของเขาแสดงดังรูป 1.4 ตัวอย่างในรูป 1 ลักษณะของความเร็ว-แรงบิดของฟอร์เวิร์ดมอเตอร์และแบคเวิร์ดมอเตอร์แสดงด้วยเส้นทึบ แรงบิดของเพลาสัททริกักรวมโดยวิธีพีชคณิตได้เป็นแรงบิดที่ความเร็วโดย เส้นที่ได้เป็นเส้นประด้วยลักษณะเส้นกราฟคล้ายกันสำหรับมอเตอร์หลายเฟสสองตัวที่มีค่ารีซิสแตนซ์ของโรเตอร์ที่มากกว่าแสดงไว้ในรูป 2 กับ 3 เส้นกราฟเหล่านี้่อธิบายให้เห็นว่าแรงบิดขณะลือกโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ มอเตอร์จะสตาร์ทเข้าสู่ความเร็วได้ดีเท่ากันทั้งสองทิศทางการหมุนขึ้นอยู่กับว่าขณะสตาร์ทมันเริ่มหมุนในทิศทางใด ค่าสลิปขณะไรร่าจะมีค่ามากกว่าในมอเตอร์หลายเฟส แรงบิดเบรคดาวนั้นก็ค่าน้อยกว่าในมอเตอร์หลายเฟสมาก เส้นกราฟและวิธีของเฟอราริสตามปกติแล้วดังที่ได้กล่าวมาคือ จะเป็นตัวช่วยในการจำแต่มีค่าความไม่แน่นอนมากเกินไปสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

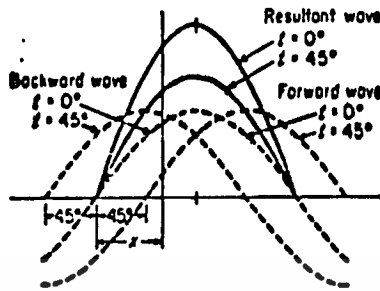
ค่าความผิดพลาดหลักของวิธีเฟอราริสก็คือ การสมมุติว่าโวลเตจมีค่าคงที่ในมอเตอร์ทั้งสองตัว การเปรียบเทียบของเขาควรที่จะมีความแน่นอนมากพอถ้าเขาได้ต่อสเตเตอร์อนุกรมเข้าไปเพื่อเหตุผลที่ว่าให้เกิดการพัฒนาดังจะกล่าวต่อไป

1.2.2 การแปลงสนามแม่เหล็กในรูปของพัลส์ให้เป็นสนามแม่เหล็กหมุนในทิศตรงกันข้ามสองสนามที่มีขนาดคงที่ วิธีที่ดีที่สุดในการแยกสนามแม่เหล็กที่อยู่เบื้องออกเป็นองค์ประกอบที่หมุนได้ก็โดยการลวมมุติให้มีสนามแม่เหล็กหมุนทิศตรงกันข้ามสองจำนวน โดยมีขนาดคงที่ แล้วบวกค่าทั้งสองเข้าด้วยกันในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อจะหาผลลัพธ์ของมัน กระบวนการนี้แสดงในรูป 1.5 ที่

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สนามแม่เหล็กทั้งหมดมีลักษณะ เป็นชายโนเวฟ



รูปที่ 1.5 คลื่นหยุดนิ่งที่มีการแปรเปลี่ยนขนาด ซึ่งเกิดจากการรวมคลื่นหมุน 2 ลูก ที่มีขนาดคงที่แต่ทิศทางตรงข้ามกัน

ที่เวลา  $t=0$  ฟอว์เวิร์ดเวฟกับแบคเวิร์ดเวฟจะทับกันพอดีในแต่ละจุด  $x$  คลื่นทั้งสองจะรวมค่าแต่ละจุดทำให้ได้คลื่นผลลัพธ์ตัวใหม่ขึ้นมาผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เกิดคลื่นลักษณะชายโนเวฟที่มีขนาดเป็นสองเท่าจากเดิม หลังจากเวลาเท่ากับ 45 องศาผ่านไป ฟอว์เวิร์ดเวฟจะเคลื่อน 45 องศาไปทางขวาและแบคเวิร์ดเวฟจะเลื่อน 45 องศาไปทางซ้ายแล้วก็บวกคลื่นองค์ประกอบทั้งสองเข้าด้วยกัน จะได้คลื่นใหม่เกิดขึ้นในลักษณะชายโนเวฟที่มีตำแหน่งเดียวกับขณะเวลาเท่ากับศูนย์แต่มีขนาดลดลง เมื่อทำการศึกษาต่อจะพบว่า การลดค่าขนาดลงเทียบกับเวลาจะมีลักษณะเป็นชายโนเวฟ โดยการทำการระบวณการนี้ซ้ำๆที่ค่า  $t$  ต่างๆจะได้ว่า คลื่นหมุนที่มีทิศทางตรงข้ามทั้งสองนี้จะสร้างให้เกิดคลื่นหยุดนิ่งหนึ่งลูกที่มีการแปรเปลี่ยนในขนาด และมีขนาดมากที่สุดของคลื่นองค์ประกอบในทางกลับกันอาจกล่าวได้ว่าคลื่นหยุดนิ่งใดหนึ่งลูกที่มีการแปรเปลี่ยนในขนาดสามารถที่จะแยกออกเป็นคลื่นหมุนที่มีทิศทางตรงข้ามสองจำนวน โดยมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของคลื่นหยุดนิ่งนั้น

1.2.3 คุณลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ การใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนอธิบายความแตกต่างระหว่างมอเตอร์เฟสเดียวกับมอเตอร์หลายเฟสก็สามารถทำได้เช่นเดียวกับการใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กขวาง

ก. แรงบิดลือกรโรเตอร์ เพราะว่าฟอว์เวิร์ดเวฟกับแบคเวิร์ดเวฟเท่ากันดังนั้นแรงบิดจากสนามหนึ่งก็จะหักล้างแรงบิดจากอีกสนามหนึ่ง เพราะว่าคลื่นทั้งสองนั้นเท่ากันทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เป็นคลื่นหยุดนิ่งที่มีการแปรเปลี่ยนขนาด ในกรณีทฤษฎีสนามแม่เหล็กขวางจะไม่มีสนามแม่เหล็กขวางขณะหยุดนิ่ง เนื่องด้วยเหตุนี้ผลลัพธ์ที่ได้จึงเหมือนกับที่พบโดยใช้ทฤษฎีอื่นๆ

ข. สภาพไร้การะ เพราะว่าโรเตอร์นั้นหมุนด้วยความเร็วใกล้เคียงกับฟอว์เวิร์ดรีโวลวี่งเวฟ (forward revolving wave) ทำให้มีโวลเตจจำนวนเล็กน้อยที่เหนี่ยวนำในแท่งโรเตอร์ จึงทำให้กระแสและค่าสูญเสีย  $I^2R$  น้อยด้วย แต่ว่าแบคเวิร์ดฟิลด์ตัดผ่านแท่งในโรเตอร์ใกล้เคียงกับดับเบิลไลน์เฟรควเอนซี (double line frequency) ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหี่ยวนำค่าโวลเตจที่สูงในตัวมันทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหล จำนวนกระแสเหล่านี้มีทิศทาง การไหลที่มีแนวโน้มในการกำจัดเส้นแรงแม่เหล็กที่จะเหี่ยวนำตัวมันเองและมันก็สามารถจะกำจัดแบคเวียร์ดิโวลริงปลักซ์ได้เกือบสมบูรณ์ ทำให้โวลเตจที่เหี่ยวนำในส่วนขดลวดตัวนำหลักที่เกิดจากการเหี่ยวนำจากแบคเวียร์ดิปลักซ์มีค่าน้อยมาก เพราะว่าผลรวมของโวลเตจที่เหี่ยวนำโดยคลื่นทั้งสองในส่วนสเตเตอร์จะมีค่าเท่ากับโวลเตจ ดังนั้นกระแสสเตเตอร์จะเพิ่มจนกระทั่งฟอร์เวิร์ดเวฟมีขนาดเท่ากับปลักซ์เซตติ้งเวฟ (pulsating wave) และโวลเตจที่ถูกเหี่ยวนำโดยมันจะมีค่าใกล้เคียงกับโวลเตจ ดังนั้นผลลัพท์ที่ได้ก็จะประกอบด้วยฟอร์เวิร์ดเวฟที่มีความเข้มมากกับแบคเวียร์ดิเวฟที่มีค่าน้อยมากๆ ด้วยเหตุนี้ทำให้ผลคลื่นหมุนซึ่งจะแปรเปลี่ยนขนาดขณะที่มันมีการหมุน โดยมันจะมีค่ามากที่สุดเมื่อรีโวลวี่งคอมโพเนนท์ทั้งสองบวกกัน และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อมีการลบกัน เนื่องด้วยเหตุนี้ทำให้มีค่าความสูญเสียเปล่าในโรเตอร์ขณะไร้ภาระซึ่งเนื่องมาจากกระแสแบคเวียร์ดิฟิลด์ในโรเตอร์ และค่าสลิปของมอเตอร์เฟสเดียวจะมีค่ามากกว่าในมอเตอร์หลายเฟส เพราะว่าแบคเวียร์ดิทอร์คที่ได้จากแบคเวียร์ดิฟิลด์และเนื่องจากในฟอร์เวิร์ดิฟิลด์ก็มีค่าค่อนข้างจะน้อยกว่าด้วย

ค. ผลกระทบของรีซิสแตนซ์จากโรเตอร์ในกรณีแรงบิดเบรคดาวน์ การเพิ่มค่ารีซิสแตนซ์ของโรเตอร์จะลดการกำจัดผลกระทบจากแบคเวียร์ดิฟิลด์ทำให้มีค่ามากขึ้นและจะทำให้ฟอร์เวิร์ดิฟิลด์มีค่าน้อยลงผลลัพท์ที่ได้ก็คือจะมีฟอร์เวิร์ดทอร์คที่น้อยลงและแบคเวียร์ดิทอร์คที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงบิดเบรคดาวน์มีค่าน้อยลงด้วย จะเห็นได้ว่าแรงบิดเบรคดาวน์อันเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กที่บ่อนขณะไร้ภาระมีค่าน้อยกว่าในกรณีมอเตอร์หลายเฟส ด้วยเหตุนี้ทำให้มอเตอร์เฟสเดียวต้องการเส้นแรงแม่เหล็กที่มากขึ้นและเหล็กที่มากขึ้นด้วยเพื่อจะรับเส้นแรงแม่เหล็กที่มากกว่า

1.2.4 ข้อสังเกตในทฤษฎีทั้งสอง ทฤษฎีสนามแม่เหล็กขวางและทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนเป็นที่นิยมกว่าทฤษฎีอื่น ทฤษฎีทั้งสองสามารถให้ความกระจ่างและแสดงให้เห็นความจริงหลาย-อย่าง สามารถใช้เพื่อพัฒนาวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณซึ่งให้ผลคำตอบที่เหมือนกัน และทฤษฎีทั้งสองนี้ก็ยังสอดคล้องกับผลลัพท์ที่ได้จากการทดสอบเป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้ทฤษฎีทั้งสองจึงมีข้อดีและยังมีความคล้ายคลึงกันทำให้ใช้อธิบายได้ง่าย แต่จากเหตุผลบางประการทำให้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กขวางใกล้เคียงกับความเป็นจริงทางกายภาพในขณะที่ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนขาดหายไปในเรื่องนี้ อย่างไรก็ตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กขวางก็มีจุดอ่อนคือ ประการแรกจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่สะท้อนกลับของตัวนำโรเตอร์ที่มีผลกระทบต่อสเตเตอร์ในขณะที่ความถี่เป็นค่าไลน์ฟรี ความถี่และตัวมันก็ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วย นั่นคือการพิจารณาสปีดโวลเตจที่สร้างขึ้นในตัวนำ

มอเตอร์เหี่ยวนำชนิดแยกเฟสสตาร์ท ตามคำจำกัดความของมาตรฐานอเมริกัน หมายถึงมอเตอร์เหี่ยวนำเฟสเดียวซึ่งมีขดลวดช่วยสตาร์ทวางห่างจากขดลวดหลักในทางแม่เหล็กและต่อขนานกับขดลวดหลัก นอกจากนี้ขดลวดช่วยสตาร์ทจะถูกตัดออกจากวงจรที่ความเร็วค่าหนึ่ง และขดลวดช่วยสตาร์ทจะต้องไม่มีอิมพีแดนซ์ภายนอกต่ออยู่นอกจากอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้โดยเอกสารสิทธิ์ของหน่วยงานไปจนกว่าจะแจ้งให้ทราบโดยชัดแจ้งจากการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขดลวดเอง

ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดแยกเฟสสตาร์ท

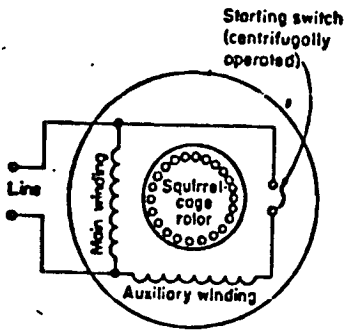
- ส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยขดลวดสองขดวางอยู่บนสเตเตอร์ ซึ่งวางห่างกัน  $90^\circ$  ทางไฟฟ้า ขดหนึ่งเรียกว่าขดลวดหลัก ส่วนอีกขดหนึ่งเรียกว่าขดลวดช่วยสตาร์ท ซึ่งขดลวดแต่ละขดทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กและเป็นวงจรที่ลมนุรณในตัวเอง โดยทั่วไปขดลวดทั้งสองขดจะมีขนาดและจำนวนรอบต่างกัน เพื่อให้เกิดความประหยัดจึงใช้ขดลวดช่วยสตาร์ทที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กจำนวนรอบมาก แทนการต่อความต้านทานเพิ่มจากภายนอก ทำให้มีพื้นที่ว่างภายในลลือตสำหรับขดลวดหลักมากขึ้น ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดแยกเฟสสตาร์ทแบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ทเป็นมอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ทชนิดหนึ่ง ซึ่งขดลวดหลักจะต่อโดยตรงกับแหล่งจ่ายไฟ ส่วนขดลวดช่วยสตาร์ทจะต่ออนุกรมกับคาร์ปาซิเตอร์ โดยขดลวดช่วยสตาร์ทจะต่อในวงจรในช่วงขณะทำการสตาร์ทเท่านั้น เพื่อให้มอเตอร์สามารถสตาร์ทได้จำเป็นต้องต่อขดลวดทั้งสองเข้ากับแหล่งจ่ายไฟพร้อมกัน แล้วหลังจากนั้นเมื่อโรเตอร์มีความเร็วรอบค่าหนึ่ง สวิทช์แรงเหวี่ยงจะทำการเปิดวงจรเพื่อตัดขดลวดช่วยสตาร์ทออกจากวงจร ส่วนประกอบต่างๆดังแสดงในรูป 1.6

- สวิทช์แรงเหวี่ยง ในขณะที่เริ่มสตาร์ทมอเตอร์จะต้องต่อขดลวดทั้งสองเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ เพื่อให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดขณะความเร็วต่างกันได้ เมื่อความเร็วรอบประมาณ 80 % ของความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่สร้างจากขดลวดหลักเพียงอย่างเดียวจะมีค่าใกล้เคียงกับแรงบิดที่ได้จากการขานขดลวดทั้งสอง แต่เมื่อความเร็วประมาณ 85 % ของความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดจากขดลวดหลักเพียงอย่างเดียวมีค่ามากกว่าแรงบิดในกรณีที่มีขดลวดช่วยสตาร์ทในวงจร ดังรูปที่ 1.7 ซึ่งจากกราฟคุณสมบัติของมอเตอร์ทั้งสองแบบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ต่างกันที่มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ทให้แรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทสูงกว่า ดังนั้นเพื่อให้เกิดผลดีในการทำงานจึงทำการตัดขดลวดช่วยสตาร์ทออกจากวงจร สวิทช์ในการตัดขดลวดช่วยสตาร์ทอาจทำงานด้วยแรงเหวี่ยง หรืออาจทำงานโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กก็ได้

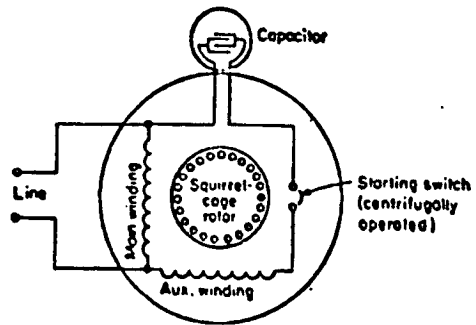
- คาร์ปาซิเตอร์ไฟฟ้ากระแสลับ ใช้สำหรับกรณิมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ท เพื่อให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดได้สูง เพาเวอร์แฟคเตอร์ชนิดเริ่มสตาร์ทสูง กระแสต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดแยกเฟสสตาร์ทและแบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ทแล้วแบบหลังสามารถสร้างแรงบิดลลือคโรเตอร์ต่อกระแสรวมของมอเตอร์สูงกว่าแบบแรก เนื่องจากแรงบิดลลือคโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขึ้นกับองค์ประกอบดังนี้

- ค่าชาน์ของมุมระหว่างกระแสทั้งสองขด ยกตัวอย่างเช่น สมมติว่ามุมระหว่างกระแสขดลวดหลักและกระแสขดลวดช่วยสตาร์ทของมอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ทเป็น  $24.3^\circ$  ส่วนแบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ทเป็น  $80.8^\circ$  ซึ่งจะได้ค่าชาน์ของมุมทั้งสองเป็น 0.415 และ 0.9871 ตามลำดับ ซึ่งจะได้อัตราส่วนเป็น  $0.9871/0.415 = 2.4$  นั้นแสดงว่ามอเตอร์แบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ทสามารถให้แรงบิดได้สูงกว่ามอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ทถึง 2.4 เท่า

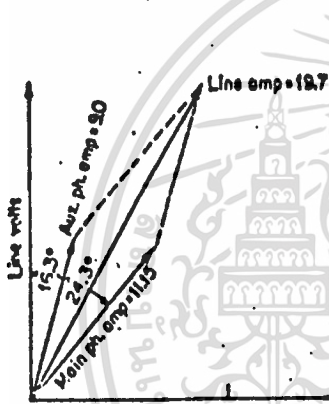


(1)

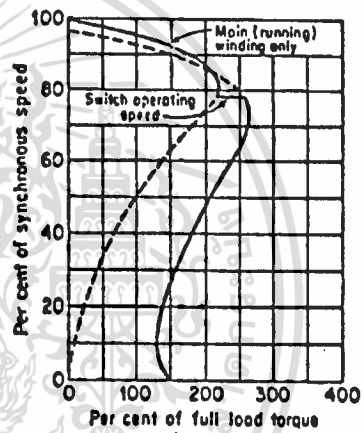


(2)

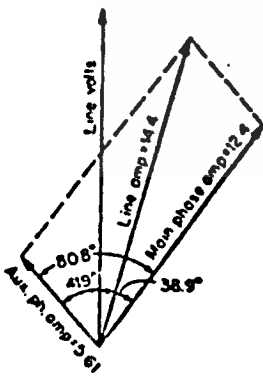
รูปที่ 1.6 แสดงวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำ (1) ชนิดแยกเฟลสสตาร์ท (2) ชนิดคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ท



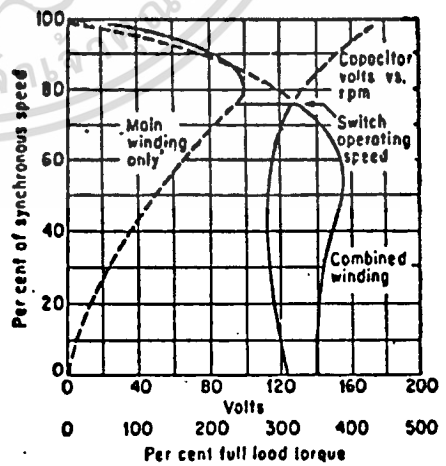
(1)



1.6



(2)



1.7

รูปที่ 1.7 แสดงเฟเซอร์กระแสและลอคโรเตอร์

และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ

(1) ชนิดแยกเฟลสสตาร์ท (2) ชนิดคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลคูณของกระแสในขดลวดหลักและกระแสในขดลวดช่วยสตาร์ทสำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ท ผลรวมทางพีชคณิตของกระแสในขดลวดหลักและขดลวดช่วยสตาร์ทมีค่าเกือบเท่ากับกระแสรวมที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์แบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ทที่มีค่ากระแสรวมที่ป้อนให้กับมอเตอร์ต่ำกว่าผลรวมทางพีชคณิตของกระแสในขดลวดหลักและขดลวดช่วยสตาร์ทมาก เนื่องจากมุมระหว่างกระแสทั้งสองมีค่ามาก ทำให้รับกระแสได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าแรงบิดลือคโรเตอร์ต่อกระแสรวมมีค่าสูงขึ้นได้

- จำนวนรอบของขดลวดช่วยสตาร์ท สำหรับขดลวดช่วยสตาร์ทของมอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ทที่มีค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ต่ำ เพื่อให้กระแสในขณะลือคโรเตอร์มีเฟสใกล้เคียงกับแรงดัน แต่เนื่องจากค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์แปรตามกำลังสองของจำนวนรอบจึงควรมีจำนวนรอบต่ำ แต่สำหรับมอเตอร์แบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ท ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดช่วยสตาร์ทที่มีค่ามากได้เนื่องจากมีค่ารีแอกแตนซ์จากคาร์ปาซิเตอร์มาช่วยแก้ให้ต่ำลง ทำให้สามารถมีจำนวนรอบมากกว่ามอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ท ดังนั้นที่ขนาดกระแสเดียวกันก็จะสามารถสร้าง แอมแปร์-เทอร์น ได้สูงกว่า จึงสามารถสร้างแรงบิดต่อกระแสรวมได้สูงกว่า



## บทที่ 2

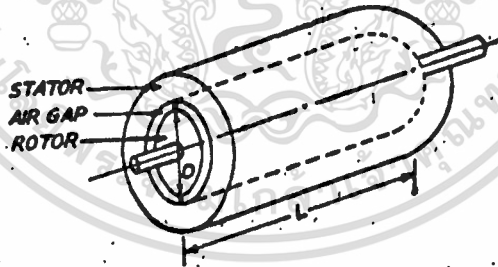
### ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบมอเตอร์เฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ท

**บทนำ** ในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ท จะมีส่วนที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อการออกแบบหลายส่วนด้วยกัน ซึ่งสามารถแยกออกเป็นส่วยย่อยๆ เพื่อง่ายต่อการเข้าใจได้เป็น

1. ส่วนขนาดของมอเตอร์
2. ส่วนของสเตเตอร์
3. ส่วนของโรเตอร์
4. ส่วนของขดลวดตัวนำที่ใช้พัน
5. ส่วนประกอบย่อยอื่นๆ

ซึ่งสามารถพิจารณาแต่ละส่วนย่อยๆ ได้ดังนี้

**2.1 ขนาด (Main Dimension)** ประกอบด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์  $D$  และความยาวของแกนเหล็ก  $L$



รูปที่ 2.1 แสดงขนาดหลักของมอเตอร์

**2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างนิคตและขนาดของมอเตอร์** ในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่านิคตของมอเตอร์กับขนาดรูปร่างของมอเตอร์

#### โหลดจำเพาะ (Specific Loadings)

**โหลดทางแม่เหล็กจำเพาะ (Specific magnetic loading)** คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยเหนือบริเวณแอร์แก๊ป (air gap)

$$B_{av} = \text{จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดรอบขั้วแอร์แก๊ป}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= p\phi/\pi DL \quad \text{เวเบอร์ต่อตารางเมตร} \quad (2.1)$$

$$= \phi/\tau L \quad (2.2)$$

**โหลดทางไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electric loading)** คือ จำนวนแอมแปร์ในตัวนำของสเตเตอร์ต่อความยาวรอบวงของสเตเตอร์บริเวณแอร์แก๊ป

$$\begin{aligned} ac &= \text{จำนวนแอมแปร์ทั้งหมดในตัวนำสเตเตอร์} \\ &\quad \text{ความยาวรอบวงของสเตเตอร์บริเวณแอร์แก๊ป} \\ &= I_z Z/\pi D \end{aligned} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 สมการเอาท์พุท (Output Equation)

พิกัด VA ของมอเตอร์ Q = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาท์พุท x กระแสไฟฟ้า

$$= EI$$

จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E = 4.44f\phi TK_w$

$$Q = 4.44f\phi TK_w I \quad (2.4)$$

โดยที่

ดังนั้นเราจะได้

$$f = pn_p/2$$

$$Q = 2.22pn_p TK_w I$$

เพราะว่า

ดังนั้น

$$\begin{aligned} I_z &= I \quad \text{และ} \quad Z = 2\pi T \\ Q &= 1.11K_w (p\phi)(I_z Z)n_p \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$= 1.11K_w * (\text{โหลดทางแม่เหล็กกรัม}) *$$

$$(\text{ภาระทางไฟฟ้าวรวม}) * (\text{ค่าความเร็วรอบ rps})$$

แต่

$$p\phi = \pi DLB_{av} \quad (\text{จาก 2.1})$$

$$I_z Z = \pi Dac \quad (\text{จาก 2.3})$$

แทนค่าเหล่านี้ในสมการ 1.5 เราจะได้

$$\begin{aligned} Q &= 1.11K_w (\pi DLB_{av}) (\pi Dac)n_p \\ &= (1.11\pi^2 B_{av}^2 ac K_w) D^2 L n_p \\ &= (11B_{av}^2 ac K_w) D^2 L n_p \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$Q = Co D^2 L n_p \quad (2.7)$$

โดยที่

$$Co = 11B_{av}^2 ac K_w \quad (2.8)$$

สมการ 2.7 เรียกว่า สมการเอาท์พุทของมอเตอร์ไฟฟ้าสลับ Co คือ สัมประสิทธิ์เอาท์พุท (Output Co-efficient)

### 2.1.3 นิยามของค้ประกอบที่มีผลต่อขนาดของมอเตอร์ องค์ประกอบที่มีผลต่อขนาด

ของมอเตอร์ เมื่อพิจารณาสมการเอาท์พุท (สมการ 2.7) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า จะพบว่าผลคูณ  $D^2 L$  จะลดลงเมื่อเพิ่มค่าของความเร็ว หรือเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์เอาท์พุท ดังไม่ว่าการนี้ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น ขนาดและค่าใช้จ่ายของมอเตอร์จะลดลง เมื่อเพิ่มค่าของความเร็วหรือเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์เอาท์พุท ต่อไปนี้เราจะพิจารณาในรายละเอียด

2.1.3.1 ความเร็ว (speed) จากผลการ 2.7 จะเห็นได้ว่าปริมาตรของมอเตอร์จะแปรผกผันกับความเร็ว ดังนั้นเมื่อออกแบบที่ความเร็วสูงจะทำให้มอเตอร์มีขนาดเล็กลง ทำให้สามารถประหยัดปริมาตรของเหล็กและกินกระแสขณะเริ่มสตาร์ทต่ำ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วสูงสุดของมอเตอร์จะถูกจำกัดด้วยชนิดของมอเตอร์และคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้ทำมอเตอร์ ดังนั้นจึงควรออกแบบมอเตอร์ที่ความเร็วสูงสุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติของมอเตอร์

2.1.3.2 สัมประสิทธิ์เอาท์พุท (output Co-efficient) ในทำนองเดียวกันกับข้อ

2.1.3.1 ปริมาตรของมอเตอร์จะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์เอาท์พุท แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์เอาท์พุทแปรผันตรงกับผลคูณของโหลดทางแม่เหล็กจำเพาะและโหลดทางไฟฟ้าจำเพาะ ดังนั้นเราสามารถลดขนาดของมอเตอร์ (เพื่อผลที่ดีกว่า) ได้ด้วยการเพิ่มขนาดค่าโหลดจำเพาะ (ค่าโหลดทางแม่เหล็กจำเพาะรวมกับค่าโหลดทางไฟฟ้าจำเพาะ) แต่ค่าโหลดจำเพาะนี้จะมีค่าสูงได้มากเท่าใดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้ออกแบบ การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ (performance) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (temperature rise) ประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลัง (power factor)

- การเลือกค่าโหลดทางแม่เหล็กจำเพาะ

การเลือกค่าโหลดทางแม่เหล็กจำเพาะขึ้นอยู่กับพิจารณาต่างๆดังนี้

- (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกนเหล็ก
- (ข) การสูญเสียในแกนเหล็ก
- (ค) กระแสแมกเนไทท์ซิ่ง

(ก) ความหนาแน่นสูงสุดในแกนเหล็ก ความหนาแน่นสูงสุดในแกนเหล็กในวงจรแม่เหล็กขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์ในส่วนของแกนเหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นฟลักซ์เฉลี่ยในแอร์แกป ในการออกแบบที่ดีความหนาแน่นสูงสุดจะเกิดขึ้นของลีส้อต (teeth)

(ข) การสูญเสียในแกนเหล็ก การสูญเสียในแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์ และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดทางแม่เหล็กจำเพาะ ดังนั้นการเลือกค่าโหลดทางแม่เหล็กจำเพาะสูงจะทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กสูงตามไปด้วย การสูญเสียในแกนเหล็กสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

- การสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis loss)
- การสูญเสียทางกระแสไหลวน (eddy current loss)

การสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิสแปรผันโดยตรงกับความถี่ ส่วนการสูญเสียทางกระแสไหลวนจะแปรผันตรงกับกำลังสองของความถี่ ดังนั้นมอเตอร์ที่ออกแบบใช้งานที่ความถี่สูงจึงควรลดค่าโหลดแม่เหล็กในส่วน ออกห่างหม้อเหน็ดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางแม่เหล็กจำเพาะลง เพื่อให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ มีประสิทธิภาพดี

(ค) กระแสแมกเนโตที่ซึ่ง กระแสแมกเนโตที่ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ใช้ในการส่งเส้นแรงแม่เหล็กผ่านแอร์แกปและแกนเหล็ก และแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้แปรผันตรงกับโหลตทางแม่เหล็กจำเพาะ ดังที่กล่าวมาแล้วว่าความหนาแน่นของฟลักซ์ในแกนเหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าโหลตทางแม่เหล็กจำเพาะ ดังนั้นการเลือกค่าโหลตทางแม่เหล็กจำเพาะต่ำแล้ว ความหนาแน่นฟลักซ์ในแกนเหล็กก็จะต่ำตามด้วย นั่นคือแกนเหล็กทำงานในช่วงเชิงเส้นความต้องการแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่ำจึงสามารถตัดค่ากระแสแมกเนโตที่ซึ่งได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากเลือกค่าโหลตทางแม่เหล็กสูง จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์สูงแกนเหล็กอาจทำงานในช่วงอิ่มตัวเป็นผลให้ค่ากระแสแมกเนโตที่ซึ่งสูงด้วย ซึ่งค่ากระแสแมกเนโตที่ซึ่งมีความสำคัญมากในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะถ้ากระแสแมกเนโตที่ซึ่งสูงย่อมหมายถึงมอเตอร์จะมีค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำด้วย

- การเลือกค่าโหลตทางไฟฟ้าจำเพาะ

(ก) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดความร้อน ดังนั้นการเลือกค่าโหลตทางไฟฟ้าจำเพาะจึงเป็นการพิจารณาผลทางความร้อน ค่าโหลตทางไฟฟ้าสูงสุดถูกจำกัดโดยผลของอุณหภูมิเพิ่ม (temperature rise) การเลือกค่าโหลตทางไฟฟ้าจำเพาะสูงจะทำให้อุณหภูมิสูงตามไปด้วย ซึ่งผลของอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่ยอมได้ขึ้นอยู่กับชนิดและชั้นของฉนวนที่ใช้

(ข) กรณีที่ใช้กับไฟแรงดันสูง ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้จะมีความหนาแน่นกว่ามอเตอร์แรงดันต่ำทำให้ค่าสเปซแฟคเตอร์ (space factor) ต่ำลงด้วย ซึ่งจะทำให้การลงขดลวดลำบาก ดังนั้นค่าโหลตทางไฟฟ้าจำเพาะควรต่ำลงด้วย นอกจากนี้ค่า สเปซแฟคเตอร์ ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวนำด้วย เช่น ตัวนำแบบเหลี่ยมจะมีค่าสเปซแฟคเตอร์ดีกว่าตัวนำแบบกลม

(ค) ความหนาแน่นของกระแส การเลือกค่าความหนาแน่นของกระแสต่ำจะสามารถเลือกใช้ค่าโหลตจำเพาะทางไฟฟ้าที่สูงๆ ได้

#### 2.1.4 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์ (D) และความหนาของแกนเหล็ก (L)

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำอัตราส่วนของความยาวของแกนเหล็กต่อความยาวของขั้วแม่เหล็ก ( $L/\tau$ ) มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างมากค่าของอัตราส่วนนี้ขึ้นอยู่กับความ

เหมาะสมคือเพื่อ : ต้นทุนการผลิตต่ำสุด	$L/\tau$	= 1.5 - 2
: ค่าตัวประกอบกำลังที่ดี	"	= 1.0 - 1.25
: ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูง	"	= 1.4
: ได้ผลดีทุกด้าน	"	= 1.0

#### 2.2 การออกแบบสเตเตอร์ การออกแบบส่วนของสเตเตอร์มีหน้าที่จะนำมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ดังนั้น - จำนวนสเตเตอร์สลอต (number of stator slot)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขนาดของสเตเตอร์สล็อต ( size of stator slot )
- ขนาดซีกของสเตเตอร์ ( stator teeth )

2.2.1 การออกแบบจำนวนสเตเตอร์สล็อต สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำการมีสเตเตอร์สล็อตจำนวนมากจะลดลีสติกเกจรีแอคแตนซ์ ( leakage reactance ) ลงโดยการลดลีสติกเกจรีแอคแตนซ์ (slot leakage reactance) และ ซิกแซกลีสติกเกจรีแอคแตนซ์ (zigzag leakage reactance) ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่า  $D^2L$  ค่าหนึ่งแล้วถ้ามีจำนวนสเตเตอร์สล็อตมากกว่าจะได้ค่าเอาท์พุทเพิ่มขึ้น แรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังอาจดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาเนื่องจากสนามอาร์โมนิคเช่น มอเตอร์วิ่งไม่เรียบหรือไม่สามารถหมุนได้เลย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนสล็อตเพิ่มมากขึ้นจะทำให้สเปซแฟกเตอร์ของสล็อตเลวลง ซึ่งจะทำให้ใส่ขดลวดได้ยากขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องจำกัดจำนวนสล็อตสูงสุดไว้ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์ (D) และจำนวนขั้วแม่เหล็ก (pole) ด้วย

**ข้อแนะนำในการเลือก จำนวนสล็อตกับจำนวนขั้วแม่เหล็ก**

ขั้วแม่เหล็ก	ค่าที่แนะนำสำหรับสเตเตอร์สล็อต											
2	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
4		12		24		36		48		60		72
6			18			36			54			72
8				24				48				

2.2.2 การออกแบบขนาดของสเตเตอร์สล็อต แต่ละสเตเตอร์สล็อตจะมีตัวนำในช่องสล็อตไม่เท่ากัน โดยทั่วไปช่องสล็อตของคอยล์ของขดลวดตัวนำหลักที่มีจำนวนตัวนำมากที่สุดจะตัวกำหนดขนาดของสล็อต เนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำช่วยสตาตร์จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำหลักอยู่แล้ว

อัตราส่วนระหว่างขนาดของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำหุ้มฉนวนต่อพื้นที่สล็อตไม่ควรเกิน 0.5 แต่ในทางปฏิบัติจริงไม่ควรเกิน 0.35 เพื่อความสะดวกขณะใส่ขดลวดลงในช่องสล็อตนั่นเอง

2.2.3 การออกแบบซี่ของสเตเตอร์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในซี่สเตเตอร์ ไม่ควรมีค่ามากเกินไปควรอยู่ระหว่าง 1.4-1.7 เทสลา และถ้าหากเป็นไปได้ควรใช้ค่าต่ำ

ให้ค่าสแต็คกิงแฟคเตอร์ ( stacking factor ) สำหรับแกนเหล็กเท่ากับ 0.95

ดังนั้น ความยาวแกนเหล็กสุทธิ  $L_1 = 0.95 \times L$

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์

$$B_{\text{stator}} = \phi / [(S_{\text{stator}}/p) \times L_{\text{stator}}] \quad (2.9)$$

2.2.4 คอร์ของสเตเตอร์ (stator core) ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์คอร์ไม่ควรเกิน 1.5 เทสลา โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.9 - 1.4 เทสลา

$$\text{เส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์คอร์} \quad \phi_{\text{stator}} = \phi_m / 2$$

ดังนั้น ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์คอร์

$$B_{\text{stator}} = \phi_m / [2 \times L_{\text{stator}}] \quad (2.10)$$

### 2.3 การออกแบบโรเตอร์

การออกแบบส่วนของโรเตอร์มีส่วนที่น่าจะนำมาพิจารณา ดังนี้

- จำนวนโรเตอร์สล็อต ( number of rotor slot )
- พื้นที่หน้าตัดของโรเตอร์บาร์ ( area of rotor bar )
- พื้นที่หน้าตัดของวงแหวน ( area of end ring )
- ความต้านทานของโรเตอร์ ( rotor resistance )
- ขนาดซี่ของโรเตอร์ ( rotor teeth )
- ขนาดของโรเตอร์คอร์ ( rotor core )

2.3.1 การออกแบบจำนวนโรเตอร์สล็อต การเลือกจำนวนโรเตอร์สล็อตที่เหมาะสมมักขึ้นกับจำนวนสเตเตอร์สล็อต และการที่จำนวนโรเตอร์สล็อตมีค่ามากแล้วก็จะให้ผลในทางที่ดี เช่นเดียวกับกรณีจำนวนสเตเตอร์สล็อตจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดจำนวนสล็อตที่แน่นอนจะต้องทำการกำหนดด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากผลต่างระหว่างจำนวนโรเตอร์สล็อตและจำนวนสเตเตอร์สล็อตจะมีผลอย่างมากต่อความสูญเสียจากสเตรย์โหลด (stray load loss) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่จำนวนโรเตอร์สล็อตมากกว่าจำนวนสเตเตอร์สล็อต และจะมีผลอย่างมากในกรณีที่เป็นมอเตอร์แบบหล่อ (die cast)

- ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสเตเตอร์สล็อตและจำนวนโรเตอร์สล็อตที่ควรหลีกเลี่ยง เพื่อให้ให้การรบกวนและการหมุนไม่ราบเรียบเกิดขึ้นน้อยที่สุด  $S_r - S_s$  ต้องไม่เท่ากับ  $\pm 1, \pm 2, \pm P, \pm (P+1)$  หรือ  $\pm (P+2)$

2.3.2 พื้นที่หน้าตัดของโรเตอร์บาร์ ตัวนำในโรเตอร์แบบกรงกระรอก อาจเป็นทองแดงหรืออลูมิเนียมหล่อก็ได้ ซึ่งตัวนำแบบทองแดงจะให้คุณสมบัติที่ดีกว่าตัวนำแบบอลูมิเนียม แต่ตัวนำแบบอลูมิเนียมมีราคาในการผลิตที่ต่ำกว่า โดยทั่วไปอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดงทั้งหมดในโรเตอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดงทั้งหมดในสเตเตอร์ มีค่าประมาณ 0.5 ถึง 0.8 ส่วนในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดตัวนำในโรเตอร์เป็นอลูมิเนียม อัตราส่วนควรจะมีค่า

เป็น 1.๒ ถึง 1.6 เนื่องจากอลูมิเนียมจะมีค่า ีซิสติวิตี ( resistivity ) ประมาณ 2 เท่าของทองแดง

นั่นคือถ้า	พื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่สเตเตอร์: $A_m = 2 * T_m * a_m$	มม. <sup>2</sup>
	พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวนำโรเตอร์: $A_r = S_r * a_b$	มม. <sup>2</sup>
ดังนั้น	$A_r / A_m = 0.5-0.8$	(ทองแดง)
	$A_r / A_m = 1.0-1.6$	(อลูมิเนียม)

### 2.3.3 พื้นที่หน้าตัดของวงแหวน

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของวงแหวน (ae)} = [ 0.32 * A_r / p ] * [ \delta_p / \delta_u ] \quad (2.11)$$

$\delta_p$  = ความหนาแน่นของกระแสต่อตารางมิลลิเมตรที่แท่งตัวนำในโรเตอร์

$\delta_u$  = ความหนาแน่นของกระแสต่อตารางมิลลิเมตรที่วงแหวนของโรเตอร์

โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นกระแสในโรเตอร์บาร์และวงแหวนมักมีค่าเท่ากัน

$$\text{ดังนั้น} = 0.32 * S_r * a_b / P \quad \text{มม.}^2 \quad (2.12)$$

$$\text{ความยาวช่องอากาศ (1g)} = 0.007 D_1 / \text{SQRT}(P) \quad (2.13)$$

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์} = D_1 - 2 * 1g \quad (2.14)$$

### 2.3.4 ความต้านทานของโรเตอร์

ความต้านทานของโรเตอร์เป็นปัจจัยที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในการออกแบบ ควรจะมีค่าต่ำเพื่อให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์ต่ำเพื่อจะได้ประสิทธิภาพและความเร็วที่พิกัดสูง อุ่นหภูมิเพิ่มต่ำแต่ถ้าหากต้องการแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทสูงแล้วจะต้องให้ค่าความต้านทานที่โรเตอร์สูง พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญตัวหนึ่งคือ  $r_{rm} / X_{1m}$

สำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ทควรให้ค่าอยู่ระหว่าง 0.45-0.55

มอเตอร์แบบคาปาซิเตอร์ควรให้ค่าอยู่ระหว่าง 0.45-0.80

เมื่อ  $r_{rm}$  คือค่าความต้านทานของโรเตอร์ในเทอมของขดลวดตัวนำหลัก

$X_{1m}$  คือค่าลิกเกจรีแอคแตนซ์ของขดลวดตัวนำหลักและของโรเตอร์ในเทอมของขดลวดตัวนำหลัก

### 2.4 ออกแบบขดลวดตัวนำ

การออกแบบของขดลวดตัวนำจะมีความสำคัญไม่น้อยกว่าการออกแบบสเตเตอร์ โรเตอร์หรือส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เพราะขนาดของขดลวดโดยเหมาะขดลวดตัวนำหลัก จะเป็นตัวกำหนดค่าของค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ ซึ่งจะมีผลต่อค่าคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ต่อไป

การออกแบบขดลวดตัวนำจะพิจารณาถึงขดลวดหลัก (main winding) เป็นสำคัญ ส่วนค่าของขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ท จะมีการพิจารณาภายหลังในรูปของอัตราส่วน (ratio) ของขดลวด

ลวดตัวนำหลักกับขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ท แล้วพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อไป ซึ่งจะอธิบายอีกครั้งในช่วงหลัง

การออกแบบขดลวดตัวนำหลัก ค่าที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบขดลวดตัวนำหลัก ได้แก่

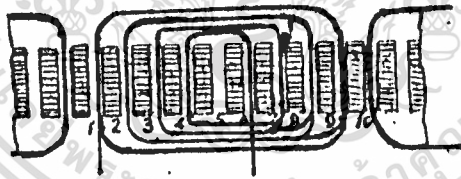
- จำนวนรอบที่ใช้ในการพัน
- รูปแบบของการพัน
- ขนาดของพื้นที่หน้าตัด

2.4.1 จำนวนที่ใช้ในการพัน ( $T_m$ ) จะสามารถหาจากสมการต่อไปนี้

$$T_m = \frac{E}{4.44 * K_{wm} * f * \phi_m} \quad (2.15)$$

2.4.2 รูปแบบของการพัน โดยทั่วไปแล้วขดลวดของสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะมีการพันขดลวดแบบคอนเซนตริกซึ่งแต่ละสล็อดมีจำนวนรอบในการพันไม่เท่ากันทั้งนี้เพื่อต้องการฟลักที่ไหลผ่านแอร์เก็บมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ (sine wave) เพื่อให้ให้อาร์โมนิคเกิดน้อยที่สุด นอกจากนี้ค่าอาร์โมนิคที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ลดลงโดยจัดพื้นที่ประมาณ 70% ของช่องสล็อดเป็นขดลวดหลัก ส่วนพื้นที่ที่เหลือสำหรับขดช่วยสตาร์ท ตัวอย่างการจัดเรียงขดลวดดังรูปที่

2.2



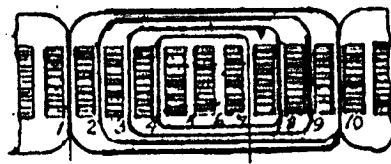
รูปที่ 2.2 การพันขดลวดแบบคอนเซนตริก

สำหรับและสเตเตอร์มี 36 สล็อดและ 4 ขั้วแม่เหล็ก จะได้ว่าเป็นสเตเตอร์แบบ 9 สล็อดต่อขั้วแม่เหล็กและมี 4 ขดลวดต่อ 1 ขั้วแม่เหล็ก โดยที่

ขดลวดชุด	(1-9)	มีจำนวนสล็อดห่างกัน (coil span)	8	สล็อด
"	(2-8)	" "	6	"
"	(3-7)	" "	4	"
"	(4-6)	" "	2	"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ การจัดเรียงขดลวดแบบดังกล่าว สามารถนำมาจัดเรียงใหม่ โดยมีจำนวนคอยล์ต่อขั้วแม่เหล็กได้ ไม่จำกัดเพียงสาม อีกทั้งยังมีหมัดเห็ดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 การพันขดลวดแบบคอนเซนตริกอีกแบบหนึ่ง

โดยที่	ขดลวดชุด (1-10)	มีจำนวนสล็อดห่างกัน (coil span)	9	สล็อด
"	(2-9)	" "	7	"
"	(3-8)	" "	5	"
"	(4-7)	" "	3	"

สำหรับการเรียงการจัดเรียงขดลวด ตามรูป 2.3 จะเห็นได้ว่าจำนวนรอบของขดของในคอกยล์ (1-10) จะต้องมีความยาวเท่ากันเพียงครึ่งหนึ่งของตัวนำในสล็อดที่ 1 ส่วนตัวนำอีกครึ่งหนึ่ง เราจะได้มาจากตัวนำของคอกยล์ในขั้วแม่เหล็กถัดไปที่อยู่ติดกัน

พิจารณาจำนวนรอบในแต่ละคอกยล์ สำหรับการการจัดเรียงขดลวดดังรูปที่ 2.2 ก่อนอื่นเราต้องหาค่าของพิทแฟคเตอร์ (pitch factor)

$$\text{จาก พิตแฟคเตอร์} = \sin(\text{span} \times 90^\circ / (\text{slot per pole}))$$

ค่าพิทแฟคเตอร์ของขดลวดชุด	(1-9)	$\sin(8 \times 90^\circ / 9)$	=	.985
"	"	$\sin(6 \times 90^\circ / 9)$	=	.866
"	"	$\sin(4 \times 90^\circ / 9)$	=	.643
"	"	$\sin(4 \times 90^\circ / 9)$	=	.342

$$\text{ผลรวมของพิทแฟคเตอร์} = 2.836$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเปอร์เซ็นต์รอบของคอกยล์เพื่อที่จะได้ทราบว่าในแต่ละคอกยล์จะต้องพันขดลวดเป็นจำนวนกี่รอบ

เปอร์เซ็นต์รอบต่อขั้วแม่เหล็กในคอกยล์	(1-9)	=	$.985 \times 100 / 2.836 = 34.60$
"	"	=	$.866 \times 100 / 2.836 = 30.60$
"	"	=	$.643 \times 100 / 2.836 = 22.70$
"	"	=	$.342 \times 100 / 2.836 = 12.10$

ค่าของเปอร์เซ็นต์รอบต่อขั้วแม่เหล็กในคอกยล์ที่ได้นี้เมื่อนำไปคูณค่าจำนวนรอบต่อขั้วแม่เหล็กที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการใดๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

หาได้ก่อนหน้านี้ ก็จะสามารถหาค่าจำนวนรอบในแต่ละคอยล์ได้

ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าจำนวนรอบในแต่ละคอยล์ จากรูปที่ 2.3 ได้จากนิทแฟคเตอร์ ได้เป็น

ค่านิทแฟคเตอร์ของขดลวดชุด	(1-10)	$1/2 * \sin(8 * 90^\circ / 9)$	=	.500
"	"	(2-9)	$\sin(6 * 90^\circ / 9)$	= .940
"	"	(3-8)	$\sin(4 * 90^\circ / 9)$	= .766
"	"	(4-7)	$\sin(4 * 90^\circ / 9)$	= .500
ผลรวมของนิทแฟคเตอร์				= 2.700
เปอร์เซ็นต์รอบต่อขั้วแม่เหล็กในคอยล์	(1-10)	=	$.500 * 100 / 2.7$	= 18.5
"	"	(2-9)	= $.944 * 100 / 2.7$	= 34.7
"	"	(3-8)	= $.766 * 100 / 2.7$	= 28.3
"	"	(4-7)	= $.500 * 100 / 2.7$	= 18.5

**แฟคเตอร์การกระจายของขดลวด (winding factor : Kw)**

แฟคเตอร์การกระจายของขดลวด หมายถึงการหานิทแฟคเตอร์เฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (weight) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยการหาค่าของผลรวมของผลคูณของค่านิทแฟคเตอร์ของแต่ละคอยล์ด้วยจำนวนรอบของคอยล์นั้น แล้วหารด้วยจำนวนรอบทั้งหมด

สมมุติให้การเรียงตัวของขดลวดเป็นตามรูปที่ 2.2

ค่านิทแฟคเตอร์ของขดลวดชุด	(1-9)	$\sin(8 * 90^\circ / 9)$	=	.985
"	"	(2-8)	$\sin(6 * 90^\circ / 9)$	= .866
"	"	(3-7)	$\sin(4 * 90^\circ / 9)$	= .643
"	"	(4-6)	$\sin(4 * 90^\circ / 9)$	= .342

หรือเราอาจจะเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$K_w = \frac{\{(P1-9 * T1-9) + (P2-8 * T2-8) + (P3-7 * T3-7) + (P4-6 * T4-6)\}}{(T1-9 + T2-8 + T3-7 + T4-6)}$$

$$= (0.302 * 12.1 + 0.643 * 22.7 + 0.866 * 30.6 + 0.985 * 34.6) / 100$$

$$= 0.8$$

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าแฟคเตอร์การกระจายของขดลวด (K<sub>w</sub>) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.75-0.85

จาก  $I = \text{Watt} / (V * \text{EFF} * P.F)$  (2.16)

เมื่อ Watt อาจหาได้จาก แรงม้าของมอเตอร์\*746 กรณีที่บอกค่าเอาท์พุทเป็นแรงม้า

ดังนั้น จะได้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำหลัก  $a_m = I_m / \delta_m$  มม.<sup>2</sup> (2.17)

เมื่อ  $\delta_m$  เป็นค่าความหนาแน่นของกระแสในขดลวดตัวนำหลัก (density current )

โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 3-4 A/mm<sup>2</sup>

2.4.4 ความยาวรอบเฉลี่ย ( length of mean turn ) ความยาวรอบเฉลี่ยของแต่ละคอยล์สำหรับการพันขดลวดแบบคอนเซนตริก

$L_{mc} = 8.4(D+d_{cu}) * (\text{คอยล์สแปน}) / S_u + 2L$  (2.18)

2.5 การออกแบบส่วนประกอบย่อยอื่นๆ

2.5.1 การเลือกความยาวแอร์แกป (choice of air gap length) ความยาวแอร์แกปเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ การเลือกต้องเลือกด้วยความระมัดระวัง ซึ่งบางครั้งอาจได้ค่าที่ทำให้มอเตอร์ให้ค่าที่ดีที่สุดออกมา แต่ก็ยังขึ้นกับองค์ประกอบอื่นๆอีกมาก ดังนั้นจึงควรออกแบบให้ความยาวแอร์แกปมีค่าต่างๆกันหลายค่า แล้วพิจารณาว่า แบบใดให้ค่าออกมาที่ดีที่สุด

พิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการเลือกความยาวแอร์แกป โดยสมมุติว่าเราสามารถออกแบบความยาวแอร์แกปที่ดีที่สุดได้แล้ว ถ้าเพิ่มความยาวแอร์แกปอีกเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- แรงเคลื่อนแม่เหล็กในแอร์แกป จะเพิ่มขึ้นเกือบจะสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวแอร์แกป ซึ่งจะทำให้กระแสแมกเนไทซิง (magnetizing current) เพิ่มขึ้นซึ่งมีความสำคัญมากโดยเฉพาะกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว และผลที่ปรากฏให้เห็นเด่นชัดก็คือ ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพจะลดลง
- ฟลักซ์เซชันฟลักซ์ (pulsation flux) ซึ่งเป็นฟลักซ์ที่ก่อให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก ทั้งในสเตเตอร์และซีของโรเตอร์จะลดลง
- สัญญาณแม่เหล็กบริเวณความถี่สูงจะลดลง แปรผันตาม ฟลักซ์เซชันฟลักซ์
- เสียงคราง (hum) ดังมากขึ้น เนื่องจาก double-frequency pulsation torque เพิ่มมากขึ้น
- ลิกเกจรีแอคแตนซ์ลดลง เนื่องจากซิกแซกลิกเกจและสกลิวลิกเกจรีแอคแตนซ์ลดลง ซึ่งจะมีผลส่งให้ ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าความสามารถในการรับโหลดเกินจะสูงขึ้นด้วย

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 8 นิ้ว มักใช้สมการหาค่าความยาวในแอร์แกปเป็น  $lg = 0.005 + 0.0042D / p$  นิ้ว (2.19)

เมื่อ p เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็กและมีค่าไม่เกิน 6

แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับมอเตอร์ 2 ขั้วแม่เหล็ก ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเกินกว่า 5 นิ้ว มักใช้ค่าที่มากกว่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.19)

## 2.6 การคำนวณพารามิเตอร์ (parameter)

### 2.6.1 การคำนวณความต้านทาน

1. ความต้านทานของขดลวดหลัก (main winding resistance)

$$r_{mm} = 0.021 * T_{mm} * L_{mm} / am \quad \text{ที่ } 75^\circ \text{ c} \quad (2.20)$$

$$r_{mm} = 0.017 * T_{mm} * L_{mm} / am \quad \text{ที่ } 20^\circ \text{ c} \quad (2.21)$$

2. ความต้านทานของโรเตอร์ (rotor resistance) ความต้านทานของโรเตอร์ในเทอมของขดลวดหลัก

$$r_{r.m.} = 8 * T_{mm} * K_{wm}^2 \rho \left[ \frac{L_b}{S_a} + \frac{2 * D_r * K_{ring}}{\pi p^2 a_r} \right] \quad (2.21)$$

### 2.6.2 การคำนวณรีแอกแตนซ์

**ลิกเกจรีแอกแตนซ์ (Leakage Reactance)** อินดักแตนซ์คือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวค้ำล้อมวงจรต่อหนึ่งหน่วยกระแส นิยามขดลวด 1 ชุด มีจำนวน T รอบ แต่ละรอบรับกระแสไฟฟ้า I และค่าเปอร์มีนซ์ (permeance) คือ  $\Lambda$

$$\begin{aligned} \text{อินดักแตนซ์} &= \frac{\text{จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวด}}{\text{กระแส}} \\ &= \frac{T\phi}{I} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แต่ว่า} \quad \phi &= \mu n i \times \text{เปอร์มีนซ์} = T I \Lambda \\ \text{ฉะนั้น อินดักแตนซ์} &= T \times T I \Lambda = T^2 \Lambda \end{aligned}$$

เมื่อเป็นไฟฟ้ากระแสสลับมีความถี่ f เราจะได้รีแอกแตนซ์เท่ากับ

$$\begin{aligned} X &= 2\pi f \times \text{อินดักแตนซ์} \\ &= 2\pi f T^2 \Lambda = 2\pi f T^2 L \lambda \quad (2.22) \end{aligned}$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ค่าสเปกตริกเปอร์มีนซ์ของส่วนที่เกิดลิกเกจ

1. สล็อตลิกเกจรีแอกแตนซ์ (Slot leakage reactance) สล็อตลิกเกจรีแอกแตนซ์ หมายถึงลิกเกจที่เกิดจากฟลักซ์ซึ่งค้ำล้อมผ่านสล็อต และตัวนำภายในสล็อตที่ทำให้เกิดเส้นฟลักซ์นั้น โดยตั้งสมมติฐานในการคำนวณดังนี้

- กระแสในตัวนำกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ
- นิยามเฉพาะเพอร์มีนซ์ของอากาศ

- เพอร์มีนซ์ (permeability) ของแกนเหล็กมีค่าเป็นอนันต์  
 - ลิกเกจฟลักซ์ที่ค้ำล้อมผ่านสล็อตเป็นเส้นตรง

การพันขดลวดแบบคอนเซนตริกโดยในแต่ละสล็อตมีจำนวนตัวนำเป็น  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots$  โดยมีจำนวนตัวนำ  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots$  จำนวน  $2p$  กลุ่ม ดังนั้นสเตเตอร์สล็อตลิกเกจรีแอคแตนซ์

$$\begin{aligned} X_{\sigma} &= 2\pi f T^2 L \lambda \\ &= 2\pi f [Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots] L \lambda_{\sigma} * 2p \\ &= 4\pi f [Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots] p L \lambda_{\sigma} * \\ &= 4\pi f (Z K_{wm})^2 L \lambda_{\sigma} C_x / S_{\sigma} \\ &= 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L \lambda_{\sigma} C_x / S_{\sigma} \end{aligned} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $X_{\sigma}$  ค่าเพอร์มีนจำเพาะ (Specific permeance) ของสเตเตอร์สล็อต  $C_x$  เป็นแฟกเตอร์ที่ทำให้สามารถใช้ทอม ( $T_m K_{wm}$ ) ในสมการสเตเตอร์สล็อตลิกเกจรีแอคแตนซ์ได้ สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบสมการจะได้

$$C_x = (Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots) * p S_{\sigma} / (Z K_{wm})$$

$$\text{แต่ } Z = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots) * 2P$$

แทนค่าในสมการ (2.23) จะได้

$$C_x = \frac{(Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots) * 1 * S_{\sigma}}{(Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots) K_{wm} 4p}$$

## 2. โรเตอร์สล็อตลิกเกจรีแอคแตนซ์ (Rotor slot leakage reactance)

จากสมการ (2.23) จะเห็นว่าสล็อตลิกเกจรีแอคแตนซ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเพอร์มีนจำเพาะหารด้วยจำนวนสล็อต ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการสำหรับโรเตอร์สล็อตลิกเกจรีแอคแตนซ์ในทอมของสเตเตอร์

$$X_{\sigma r} = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L \lambda_{\sigma r} / S_r \quad (2.24)$$

ดังนั้น สล็อตลิกเกจรีแอคแตนซ์ในทอมของขดลวดหลัก

$$X_{\sigma} = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L \lambda_{\sigma} C_x + (S_{\sigma} / S_r) \lambda_{\sigma r} J / S_{\sigma} \quad (2.25)$$

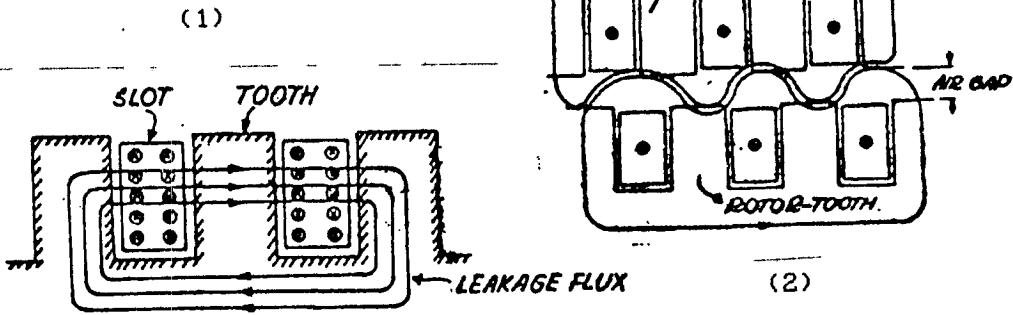
## 3. ซิกแซกลิกเกจรีแอคแตนซ์ (Zigzag leakage reactance)

เกิดจากเส้นฟลักซ์ที่คดโค้งผ่านจากสเตเตอร์ที่โรไปยังโรเตอร์ในลักษณะซิกแซกผ่านแอร์แกปดังรูป 2.4 ขนาดของเส้นฟลักซ์ขึ้นอยู่กับความยาวแอร์แกป และระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างซี่ของสเตเตอร์และซี่ของโรเตอร์ ในทำนองเดียวกันจะได้สมการซิกแซกลิกเกจรีแอคแตนซ์

$$X_z = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L \lambda_z / S_{\sigma} \quad (2.26)$$

$$\text{Zigzag specific permeance } \lambda_s = \frac{\mu_0 W_{\sigma} W_r (W_{\sigma}^2 + W_r^2)}{121 y_{\sigma}^2 y_r}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 (1) แสดงเส้นฟลักซ์สล็อตสติกเกจ (2) แสดงเส้นฟลักซ์ซิกแซกสติกเกจ

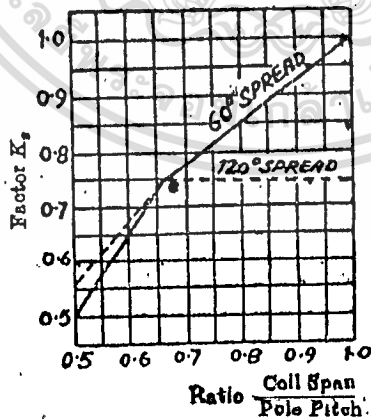
#### 4. โอเวอร์แองค์สติกเกจรีแอกแตนซ์ (Overhang leakage reactance)

คือเส้นฟลักซ์ที่เกิดจากส่วนของลวดตัวนำที่พันเลยแกนเหล็ก ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงขดลวด ส่วนที่พันเลยแกนเหล็ก และสารแม่เหล็กที่อยู่ใกล้เคียง ในทำนองเดียวกันจะได้สมการของโอเวอร์แองค์สติกเกจรีแอกแตนซ์

$$X_o = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L_{\mu} [\pi(D+d_{\text{coil}}) * (\text{คอยล์สแปนเฉลี่ย})] / [6.4 S_p]$$

Specific overhang permeance  $\lambda_o = \frac{\mu K_{\tau}^2}{L_{\mu} \pi y}$  (2.27)

โดยที่  $K_{\tau} =$  ค่าที่หาได้จากรูป 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคอยล์สแปนต่อความยาวขั้วแม่เหล็กกับแฟคเตอร์โอเวอร์แองค์สติกเกจ ( $k_s$ )

#### 5. สคิวสติกเกจรีแอกแตนซ์ (Skew leakage reactance)

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำการสควิโรเตอร์สล็อต หรือวางให้ช่องสล็อตบิดเอียงเพื่อเป็นการกำจัดแรงบิดฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวน การสควิโรเตอร์สล็อตทำให้แรงดันเหนี่ยวนำในตัวนำของโรเตอร์ลดลง ทำให้เส้นฟลักซ์เหนี่ยวนำร่วม (mutual flux) ลดลง ทำให้เส้นฟลักซ์รวมแตกต่างจากเส้นฟลักซ์เหนี่ยวนำร่วมมาก ค่าสควิลิตเกจรีแอคแตนซ์หาได้จาก

$$x_{sk} = X_m \cdot \theta_m^2 \cdot k_1 / 12 \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\theta_m$  มุมบิดเอียงของโรเตอร์ในหน่วย เรเดียน

$$= \pi / (Sr/P) \cdot (\text{โรเตอร์สล็อตตื้นที่โรเตอร์บาร์บิดเอียงไป})$$

$k_1$  = สเตเตอร์สล็อตลิตเกจแฟคเตอร์ (Stator slot leakage factor)  $\sim 0.95$

$$X_m = \text{แมกเนไทซิงค์รีแอคแตนซ์}$$

### 6. แมกเนไทซิงค์รีแอคแตนซ์

$$X_m = \frac{16\pi f (T_m K_{wm})^2 \cdot \mu_0 L \tau}{(10^7 \mu_r K_p \cdot p \cdot F_m)} \quad (2.29)$$

แฟคเตอร์การอิ่มตัว (saturation factor) หมายถึงอัตราส่วนแรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมในวงจรแม่เหล็กต่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กในแอร์แกน

$$F_m = \frac{\text{แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมในวงจรแม่เหล็ก}}{\text{แรงเคลื่อนแม่เหล็กในแอร์แกน}}$$

### 7. ลิตเกจรีแอคแตนซ์ทั้งหมด (Total leakage reactance)

ลิตเกจรีแอคแตนซ์ทั้งหมดของโรเตอร์และสเตเตอร์ในเทอมของสเตเตอร์

$$X_{1m} = X_m + X_r + X_o + X_{sk} \quad (2.30)$$

รีแอคแตนซ์วงจรเปิด (Open circuit reactance) หมายถึง รีแอคแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์เมื่อทางทุติยภูมิเปิดวงจร

$$X_{om} = X_m + X_{1m} / 2 \quad (2.31)$$

ลิตเกจฟลักซ์แฟคเตอร์ (Leakage flux factor)

$$K_r = (X_{om} - X_{1m}) / X_{om} \quad (2.32)$$

และ  $K_1 = \text{SQRT}((X_{om} - X_{1m}) / X_{om})$

## 2.7 การออกแบบขดลวดตัวนำสตาร์ท

### 2.7.1 การออกแบบขดลวดตัวนำสตาร์ทสำหรับมอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ท

หลังจากทำการออกแบบขดลวดหลักเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบขดลวดตัวนำสตาร์ท เพื่อให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดหมุนโรเตอร์ได้ในขณะสตาร์ท เส้นฟลักซ์ที่สร้างจาก

ขดลวดช่วยสตาร์ทจะต้องมีเฟสแตกต่างจากเฟสของปลั๊กซึ่งสร้างจากขดลวดหลัก นั่นคือรีแอกแตนซ์ของขดลวดหลักจะต้องสูง ส่วนความต้านทานต้องต่ำ ซึ่งจะต้องตรงข้ามกับของขดลวดช่วยสตาร์ท สำหรับขดลวดหลักที่ออกแบบเรียบร้อยแล้วแบบหนึ่งสามารถสร้างขดลวดช่วยสตาร์ทได้มากมายหลายแบบ ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกแบบที่เหมาะสม

2.7.1.1 การออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ทเพื่อให้ได้แรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทสูงสุด จากการพัฒนาสมการแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทของ CR.Bothby จะได้สมการแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ท

$$T = [ p * K * r_{rm} * I_m * I_u \sin(\theta_m - \theta_u) ] / ( 2\pi f )$$

นิวตัน-เมตร (2.33)

ซึ่งสมการดังกล่าวไม่ได้รวมผลเนื่องจากกระแสแมกเนไตซิงค์ ดังนั้น P.H.Trickey จึงปรับปรุงสมการดังกล่าวโดยเพิ่มตัวคูณ  $C_r$  ในสมการ

$$C_r = K_r / [ 1 + (r_{rm} / X_{1m})^2 ]$$

(2.34)

ดังนั้นจะได้สมการแรงบิดเป็น

$$T = [ p * C_r * K * r_{rm} * I_m * I_u \sin(\theta_m - \theta_u) ] / ( 2\pi f )$$

นิวตัน-เมตร (2.35)

สมการ 2.35 สามารถเขียนในเทอมของอิมพีแดนซ์ต่างๆของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$T = p * C_r * K * r_{rm} * V^2 * [ (R_u X_{1m} - R_m X_{1u}) / (Z_m^2 * Z_u^2) ] / ( 2\pi f )$$

นิวตัน-เมตร (2.36)

เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ต่างๆของขดลวดหลักคงที่แล้ว สมการ 2.35 จะแปรตาม  $k, I_s$  และ  $\theta_u$  และถ้าหากกำหนดให้อัตราส่วน  $K$  คงที่ที่ค่าหนึ่งจะทำให้  $X_{1u}$  คงที่ตามไปด้วย เมื่อพิจารณาเซอร์เคิลไดอะแกรมสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ทตามรูป 2.5 โดยที่  $I_m$  เป็นกระแสในขดลวดหลัก มีมุมเฟสช้ากว่าแรงดันแหล่งจ่ายไฟ  $V$  ส่วนครึ่งวงกลมบนเส้นผ่าศูนย์กลาง  $AB (=V/X_{1u})$  แทนเวกเตอร์ทางเดินของกระแสในขดลวดช่วยสตาร์ท  $I_u$  ที่เป็นไปได้ ยกตัวอย่างเช่น จุด  $C$  เส้นตรง  $AC$  จะแทนขนาดและมุมเฟสของกระแส  $I_u$  ค่าหนึ่งสำหรับค่าตัวแปร  $R_u$  ที่ยังไม่ทราบค่า แต่ทราบค่า  $X_{1u}$  ส่วนกระแสที่ป้อนให้มอเตอร์

$OC$  เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสในขดลวดหลักและขดลวดช่วยสตาร์ท ซึ่งถ้าแรงบิดลือคโรเตอร์เป็นส่วนโดยตรงกับความยาวของเส้นตรง  $CK$  ซึ่งตั้งฉากกับเส้นตรง  $AG$  เนื่องจาก

$$CK = I_u \sin(\theta_m - \theta_u)$$

(2.37)

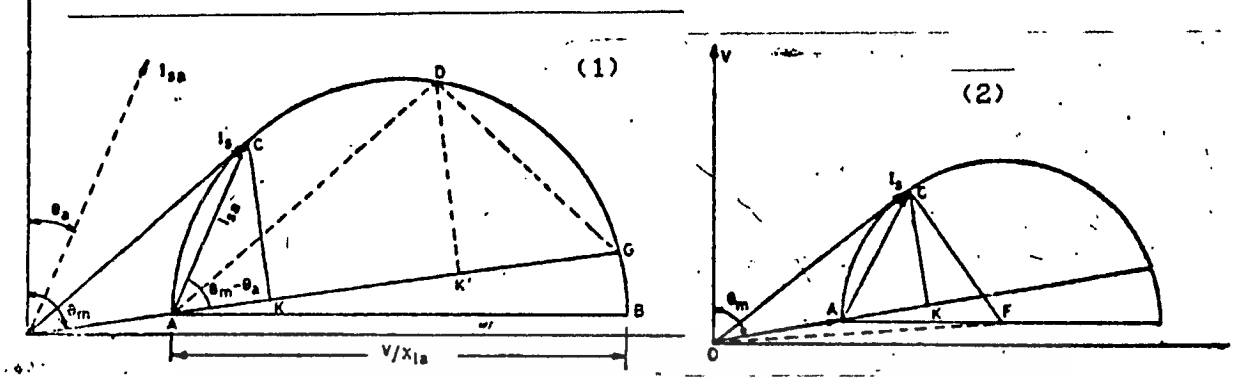
ดังนั้นแรงบิดเริ่มสตาร์ทจึงเป็นส่วนโดยตรงกับเส้นตรง  $CK$  เนื่องจากเทอมอื่นๆในสมการ 2.35 เป็นค่าคงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจนกระทั่ง  $CK$  มีความยาวมากที่สุดแล้ว จะได้แรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทสูงสุดด้วย ซึ่ง  $CK$  จะมีความยาวมากที่สุดที่จุด  $D$  เมื่อจุด  $D$  อยู่ครึ่งทางระหว่างจุด  $A$  และ  $G$  บนส่วนโค้งของครึ่งวงกลม นั่นคือ

$$\overline{AD} = \overline{AG} / 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมุม  $DAH = \theta_u = \theta_m / 2$



รูปที่ 2.6 เซอร์เคิลไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดแยกเฟสสตาร์ท

- (1) แรงบิดสตาร์ทที่สูงสุด
- (2) แรงบิดต่อกระแสรวมที่สูงสุด

จากตรีโกณมิติ

$$\begin{aligned} \tan \theta_u &= \tan (\theta_m / 2) \\ &= \sin \theta_m / [1 + \cos \theta_m] \\ \frac{X_{1u}}{R_u} &= \frac{X_{1m}}{Z_m (1 + R_m / Z_m)} \\ R_u &= (R_m + Z_m) * X_{1m} / X_{1m} \\ R_u &= K^2 * (R_m + Z_m) \end{aligned} \tag{2.38}$$

ดังนั้นจะ ได้ความต้านทานของขดลวดช่วยสตาร์ท

$$r_{2u} = R_u - r_{2a} \tag{2.39}$$

และอิมพีแดนซ์ของขดลวดช่วยสตาร์ทขณะเริ่มสตาร์ท

$$\begin{aligned} Z_u &= \sqrt{R_u^2 + X_{1u}^2} \\ &= K^2 \sqrt{2Z_m (R_m + Z_m)} \end{aligned} \tag{2.40}$$

ดังนั้นกระแสในขดลวดช่วยสตาร์ทขณะลือคโรเตอร์

$$\begin{aligned} I_{2u} &= V / Z_u \\ &= V / [K^2 \sqrt{2Z_m (R_m + Z_m)}] \end{aligned} \tag{2.41}$$

และกระแสที่ป้อนให้มอเตอร์

$$I_u = I_{2u} (Z_m + Z_u) / Z_u \tag{2.42}$$

### 2.7.1.2 แรงบิดต่อแอมแปร์ที่สูงสุด

ขดลวดช่วยสตาร์ทที่ให้แรงบิดต่อกระแสรวมที่สูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วน CK/OC มีค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อ OC สัมผัสกับครึ่งวงกลม จากรูป 2.5 จุด C เป็นจุดสัมผัสครึ่งวงกลม

จุด F เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลม และสามเหลี่ยม OCF เป็นมุมฉากที่จุด C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มอนอญได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= OA^2 + AF^2 + 2OA*AF*\sin \theta_m - AF^2 \\
 &= I_{sm}^2 + 2I_{sm} \frac{V}{2X_{1m}} * \frac{X_{1m}}{Z_m} \\
 &= I_{sm}^2 + I_{sm}^2 * X_{1m} / X_{1m} \\
 I_{sm}^2 &= I_{sm}^2 (1 + X_{1m} / X_{1m}) \quad (2.43)
 \end{aligned}$$

จาก  
จะได้

$$\begin{aligned}
 I_{sm} &= I_{sm} (Z_m + Z_{1m}) / Z_m \\
 R_{sm} &= \frac{R_m X_{1m} + Z_m \sqrt{X_{1m} (X_{1m} + X_{1m})}}{X_{1m}} \quad (2.44)
 \end{aligned}$$

สมการ 2.44 เป็นค่าความต้านทานขดลวดช่วยสตาร์ท เมื่อทราบค่ารีแอคแตนซ์ของขดลวดช่วยสตาร์ท แต่โดยมากมักทราบค่ากระแส  $I_{sm}$  และ  $I_{sc}$  ดังนั้น

$$R_{sm} = \frac{R_m + Z_m (I_{sc} / I_{sm})}{(I_{sc} / I_{sm})^2 + 1} \quad (2.45)$$

สมการที่ได้เป็นประโยชน์ในการออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ทเพื่อให้ได้แรงบิดต่อกระแสรวมสูงสุดสำหรับขดลวดหลัก และกระแสรวมที่กำหนดซึ่งเมื่อทำการออกแบบแล้วจะต้องตรวจค่าความหนาแน่นกระแสในขดลวดไม่ให้มีค่าสูงเกินไป

### 2.7.2 การออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ทสำหรับมอเตอร์แบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ท

ปัญหาในการออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ทสำหรับแบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ทจะเหมือนกับการออกแบบสำหรับแบบแยกเฟสสตาร์ท ปัญหาที่เพิ่มขึ้นคือคาร์ปาซิเตอร์ที่ต่อเข้าไปในวงจร การออกแบบนอกจากให้ความสนใจกับแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ท กระแสไฟฟ้า แล้วยังรวมถึงขนาดและแรงดันตกคร่อมคาร์ปาซิเตอร์ที่ใช้ด้วย จากสมการแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ท (2.35) จะได้สมการแรงบิดสำหรับมอเตอร์แบบคาร์ปาซิเตอร์เป็น

$$T = \frac{p * C_r * K * r_{sm} * V^2 * [ R_m X_{1m} - R_{sm} (X_{1m} - X_c) ]}{2\pi f [ (R_m^2 + X_{1m}^2) (R_{sm}^2 + (X_{1m} - X_c)^2) ]} \quad (2.46)$$

เมื่อ  $X_c$  เป็นรีแอคแตนซ์ของคาร์ปาซิเตอร์

#### 2.7.2.1 ขนาดของคาร์ปาซิเตอร์ที่ให้แรงบิดสูงสุด

วิธีในการหาขนาดของคาร์ปาซิเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทสูงสุดสามารถหาได้โดยวิธีการเดียวกับการหาความต้านทานในกรณีของมอเตอร์แบบแยกเฟสสตาร์ท จากเซอร์เคิลไดอะแกรม สำหรับมอเตอร์แบบคาร์ปาซิเตอร์สตาร์ท โดยที่ OA แทนกระแสลัดโรเตอร์ในขดลวดหลัก  $I_{sm}$  สมมติให้ ความต้านทานของขดลวดช่วยสตาร์ทเป็น  $R_{sm}$  โลกซ์ของกระแสลัดโรเตอร์ในขดลวดช่วยสตาร์ทจะเป็นวงกลมบนเส้นผ่าศูนย์กลาง AB

$$AB = V/R_{sm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แรงบิดขณะสตาร์ทจะสูงสุดเมื่อเส้นตรงภายในวงกลมซึ่งตั้งฉากกับ OA มีค่ามากที่สุดเมื่อไม่ผ่านการเฉยทางสน ยกทั้งห้ามมิให้เกิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

$I_{sc}$  อยู่ที่จุด D ซึ่ง DK ผ่านจุดศูนย์กลางของวงกลมตามรูป 2.7 (1)

จากรูปจะได้

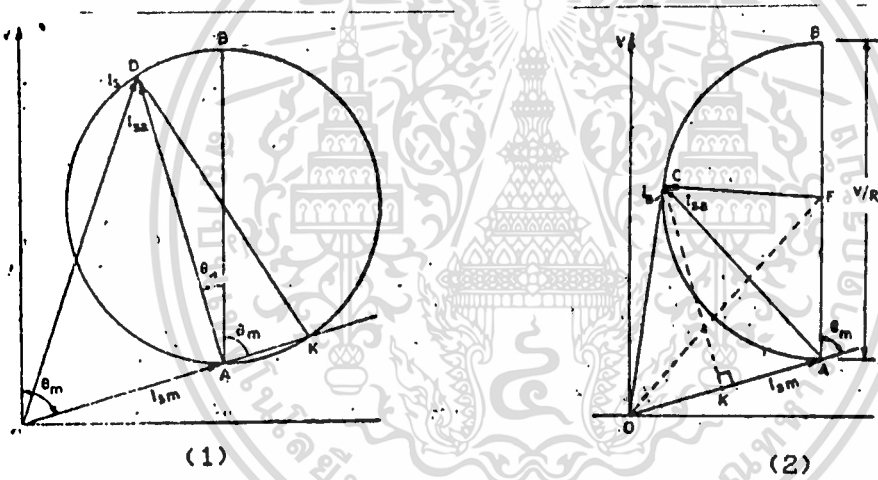
$$\begin{aligned} \theta_m &= (90^\circ - \theta_m)/2 \\ \tan \theta_m &= \sqrt{(1 - \cos 2\theta_m)/(1 + \cos 2\theta_m)} = \sqrt{(1 - \sin \theta_m)/(1 + \sin \theta_m)} \\ &= \sqrt{(Z_m - X_{1m})/(Z_m + X_{1m})} \\ &= R_m / (Z_m + X_{1m}) \end{aligned}$$

แต่  $\tan \theta_m = (X_m - X_{1m}) / R_m$

ดังนั้น  $X_m = X_{1m} + R_m * R_m / (Z_m + X_{1m})$  (2.47)

2.7.2.2 ขนาดของคาร์ปาซิเตอร์ซึ่งทำให้แรงบิดขณะสตาร์ทต่อกระแสรวมสูงสุด

จากรูป 2.7(ข)แรงบิดต่อกระแสรวมสูงสุดเมื่อ CK/OC มีค่ามากที่สุด เมื่อ OC เป็นกระแสรวมขณะสตาร์ทที่สัมพันธ์วงกลม



รูปที่ 2.7 เซอร์เคิลไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ท (1) แรงบิดเริ่มสตาร์ทสูงสุด (2) แรงบิดต่อกระแสสูงสุด

$$\begin{aligned} I_m^2 &= OC^2 = OF^2 - CF^2 \\ &= OF^2 - AF^2 \\ &= OA^2 + AF^2 + 2OA*AF\cos \theta_m - AF^2 \\ &= OA^2 + 2OA*AF\cos \theta_m \\ &= I_{sm}^2 + 2I_{sm}(V/(2R_m))(R_m/Z_m) \\ &= I_{sm}^2(1 + R_m/R_m) \end{aligned}$$

หรือ  $R_m = \frac{R_m}{(I_m/I_{sm})^2 - 1}$  (2.48)

กระแสขณะสตาร์ทรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_u = \frac{I_{um} \cdot \sqrt{[(R_m + R_u)^2 + (X_{1m} + (X_{1u} - X_u))^2]}}{\sqrt{[R_u^2 + (X_{1u} - X_u)^2]}} \quad (2.49)$$

แทนค่าของ  $I_u/I_{um}$  ในสมการข้างบน เราจะได้

$$X_{1u} - X_u = \frac{X_{1m} Ra - Z_m \sqrt{[R_u (R_m + R_u)]}}{R_m} \quad (2.50)$$

จากสมการ 2.48 เราจะหาค่าของ  $X_u$  ได้

เราสามารถเขียนสมการ 2.48 เป็นดังนี้

$$X_{1u} - X_u = \frac{X_{1m} - Z_m \sqrt{[1 + R_m/R_u]}}{R_m/R_u} \quad (2.51)$$

จากสมการ 2.48  $R_m/R_u = (I_u/I_{um})^2 - 1$

แทนค่าเหล่านี้ในสมการ 2.51 เพราะฉะนั้นจะได้

$$X_{1u} - X_u = \frac{X_{1m} - Z_m (I_u/I_{um})}{(I_u/I_{um})^2 - 1} \quad (2.52)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถใช้ช่วยในการออกแบบขดลวดช่วยสตาร์ทสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาร์ปาสีเตอร์สตาร์ท

## บทที่ 3

### การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสสตาร์ทด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

3.1 บทนำ ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีเริ่มต้นของมอเตอร์และการออกแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบมอเตอร์เฟสเดียวแบบแยกเฟสนี้ตั้งแต่เริ่มมีการกำหนดขนาดที่พิกัด (rated) ของมอเตอร์ต่างๆที่ต้องการไปจนถึงการได้ค่าต่างๆที่ครบถ้วน เนื่องจากการออกแบบมอเตอร์นี้มีขั้นตอนการออกแบบที่ซับซ้อนพอสมควร และยังมีค่าต่างๆ เพื่อให้ได้ผลที่ดีกว่า (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3) จึงใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

3.2 ขั้นตอนของการออกแบบ ลามารกลรูปเป็นขั้นตอนง่ายๆดังนี้

- หาขนาดค่า  $D^2L$
- หาขนาดค่าของ  $D$  และ  $L$
- หาส่วนรายละเอียดของสเตเตอร์
- หาค่าของปลั๊กแม่เหล็ก
- หาค่าของตัวนำได้แก่ จำนวนรอบ, พื้นที่หน้าตัด
- หาส่วนรายละเอียดของโรเตอร์
- หาส่วนของ gap contraction factor
- หาส่วนของความต้านทานและรีแอคแตนซ์
- หาส่วนของคุณสมบัติต่างๆ
- หาส่วนของขดลวดอาร์ท

3.3 ตัวอย่างการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสสตาร์ท

ต้องการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสสตาร์ทขนาดเอาท์พุท 120 วัตต์ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต 4 ขั้วแม่เหล็ก ค่าประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังต้องไม่น้อยกว่า 0.40 และ 0.60 ตามลำดับ ค่าแรงบิดขณะสตาร์ทประมาณ 3 เท่าของแรงบิดที่พิกัดและกระแสขณะสตาร์ทไม่ควรเกิน 20 แอมป์

การออกแบบ จากสมการที่ 2.7 เนื่องจากเราทราบค่าของ กำลังที่พิกัด, ค่าความเร็วรอบที่พิกัด, ค่าตัวประกอบกำลังและค่าประสิทธิภาพจากการกำหนดค่าที่ต้องการ ดังนั้น

- การออกแบบค่า  $D^2L$  เราจะทราบว่าขึ้นอยู่กับค่าไหลดจําเพาะ ( $C_u$ ) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1.2 ทำให้เราทราบว่าค่าไหลดจําเพาะขึ้นอยู่กับค่าไหลดทางแม่เหล็กจําเพาะกับค่าไหลดทางไฟฟ้าจําเพาะ

เอกสารเลือกค่า ไหลดทางแม่เหล็กจําเพาะ ( $B_{av}$ ) ที่ 0.55 ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลตทางไฟฟ้าจำเพาะ( $\epsilon_u$ ) ที่ 10000

ลมมิติให้ แฟคเตอร์การกระจายของขดลวด( $K_u$ ) = 0.8

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นค่า } C_u &= 11 * 0.8 * 0.55 * 10000 * 10^{-3} \\ &= 48.01 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D^2 L &= 0.12 / (0.55 * 0.6 * 48.01 * 25) \\ &= 3.03 * 10^{-4} \end{aligned}$$

- การออกแบบค่า D และ L จากหัวข้อที่ 2.1.4 เราจะหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอเตอร์(D) โดยการเลือกค่า  $L/\tau = 1$

$$\text{ดังนั้นค่า } L / (\pi * D / 4) = 1 ; L = 0.785 * D$$

แทนค่า  $L = 0.785 * D$  ในค่า  $D^2 L$  ที่หาได้

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น } 0.785 * D^3 &= 3.03 * 10^{-4} \\ D &= 7.28 * 10^{-2} \\ L &= 7.28 * 10^{-2} / 0.785 \end{aligned}$$

- การออกแบบส่วนของสเตเตอร์ จากค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางที่ได้เราสามารถนำไปเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นเหล็กปั๊ม(stamping) ที่การผลิตจำหน่ายในท้องตลาด เราก็จะได้ขนาดของสเตเตอร์ออกมา รังค่าที่ได้จากแผ่นเหล็กปั๊มจะประกอบด้วย

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสเตเตอร์}(D_o) = 13.8 * 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์}(D_i) = 8.89 * 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$\text{ความยาวของแกนสเตเตอร์}(L) = 5.24 * 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$\text{ความลึกของช่องสลีตของสเตเตอร์}(d_{st}) = 1.44 * 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$\text{ความลึกของคอรของสเตเตอร์}(d_{cr}) = 1.03 * 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$\text{ค่าระยะห่างของสลีตของสเตเตอร์}(Y_{st}) = 9.97 * 10^{-3} \text{ เมตร}$$

$$\text{ค่าความกว้างของสลีตของสเตเตอร์ที่เปิด}(W_{st}) = 1.65 * 10^{-3} \text{ เมตร}$$

$$\text{ค่าความกว้างของซี่ของสเตเตอร์}(W_{cr}) = 4.0 * 10^{-3} \text{ เมตร}$$

$$\text{จำนวนสเตเตอร์สลีต}(S) = 28 \text{ ช่องสลีต}$$

จากค่าข้อมูลที่ได้เราสามารถนำมาออกแบบในขั้นตอนต่อไป

- การออกแบบปลั๊กแม่เหล็ก จากหัวข้อ 2.2.3 ในที่นี้เราเลือกค่า  $B_{cr} = 1.1$  ดังนั้นจะสามารถหาค่าของปลั๊กแม่เหล็กได้ จากสมการ 2.9

- การพันในขดของสเตเตอร์ จากหัวข้อที่ 2.4.3 เราจะให้มอเตอร์ที่ทำการออกแบบเป็นการพันแบบคอนเซนตริกดังในรูปที่ 2.2 และเนื่องจากมอเตอร์ที่จะทำการออกแบบมีจำนวนสเตเตอร์สลีต = 28 สลีสต และจำนวนขั้วแม่เหล็ก = 4 ขั้วแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ค่าสลีสตต่อขั้วแม่เหล็กเป็น 7 สลีสตต่อขั้วแม่เหล็ก และได้ค่าการวางจำนวนสลีสตที่ห่างกันเป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดชุด (1-7)	มีจำนวนลลิตห่างกัน (coil span)	6	สล๊อต
" (2-6)	" "	4	"
" (3-5)	" "	2	"

และหาค่าของ ฟิทแฟคเตอร์ ตามสมการในหัวข้อ 2.4.2 ได้เป็น

ค่าฟิทแฟคเตอร์ของขดลวดชุด (1-7)	$\sin(6 \times 90^\circ / 9) = .97$
" (2-6)	$\sin(4 \times 90^\circ / 9) = .78$
" (3-5)	$\sin(2 \times 90^\circ / 9) = .43$

ผลรวมของฟิทแฟคเตอร์ = 2.19

- หาจำนวนรอบที่พันในแต่ละคอยล์ จะได้

$$T_m = 0.95 * V / (4.44 * f * \phi_m * K_{wrm})$$

$$T_m = 768.64 \text{ รอบ}$$

เลือกค่าจำนวนรอบ = 692 รอบ

เพราะฉะนั้นจำนวนรอบที่พันต่อคอยล์มีค่าเป็น  $692 / 4 = 173$  รอบ

จากหัวข้อที่ 2.4.2 สามารถหาเปอร์เซ็นต์รอบต่อขั้วแม่เหล็กคอยล์เป็น

เปอร์เซ็นต์รอบต่อขั้วแม่เหล็กในคอยล์ (1-7)	$= .97 * 100 / 2.19 = 45$
" (2-6)	$= .78 * 100 / 2.19 = 36$
" (3-5)	$= .43 * 100 / 2.19 = 20$

นำค่าของเปอร์เซ็นต์รอบต่อขั้วแม่เหล็กในคอยล์ที่ได้นี้ เมื่อนำไปคูณค่าจำนวนรอบต่อขั้วแม่เหล็กที่หาได้ก่อนหน้านี ก็จะสามารหาค่าจำนวนรอบในแต่ละคอยล์ได้

ขดลวดชุด (1-7)	มีจำนวนรอบเป็น	77	รอบ
" (2-6)	"	62	"
" (3-5)	"	34	"

เพราะฉะนั้นเราสามารถค่าของสัมประสิทธิ์ของการกระจายของขดลวด (winding factor : Kw)

$$\text{ได้ค่า } K_w = (0.97 * 77 + 0.78 * 62 + 0.43 * 20) / 100$$

$$= 0.80$$

- การหาขนาดของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำที่ขดขดลวดตัวนำหลัก

จากสมการที่ 2.16 จะได้ว่า

$$I = 120 / (220 * 0.40 * 0.6)$$

$$= 2.27 \text{ แอมป์}$$

เลือกค่า  $\delta_m = 5$  แอมป์ต่อตารางมิลลิเมตร

เพราะฉะนั้นขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำหลัก =  $2.27 / 5$  ตารางมิลลิเมตร

$$= 0.45 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$



$$= 611 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าต่างๆของโรเตอร์อีกบางค่าได้แก่

ค่าความลึกของวงแหวน (de)	=	$7.00 \times 10^{-3}$	เมตร
ค่าความกว้างของวงแหวน (te)	=	$5.00 \times 10^{-3}$	เมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของวงแหวน (Dero)	=	$8.69 \times 10^{-2}$	เมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของวงแหวน (Deri)	=	$7.29 \times 10^{-2}$	เมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวงแหวน (Der)	=	$7.99 \times 10^{-2}$	เมตร

ในการออกแบบมาถึงขั้นนี้ เราจะต้องคำนึงว่าค่าที่ออกแบบขึ้นมาจะมีการผิดไปจากทฤษฎีเบื้องต้นหรือไม่ จากหัวข้อที่ 2.3.1 ถ้าค่าอัตราส่วนของโรเตอร์สล็อตต่อสเตเตอร์สล็อตมีค่าไม่เกิน 1.5 เราถือว่าการออกแบบยังยอมรับได้

-หาค่าของความต้านทาน ก่อนอื่นเราต้องหาค่า Gap contraction factor (Kg) จะได้

$$Wos/lg = 5.3$$

นำค่าที่ได้ไปเปิดกราฟ หาค่าของสัมประสิทธิ์ของ Carter (Kcs) ได้ = 0.65

$$\text{จากค่าของ } Kg_{ss} = y_{ss}/(y_{ss}-Kcs*Wos) = 1.12$$

$$Wor/lg = 3.21$$

นำค่าที่ได้ไปเปิดกราฟ หาค่าของสัมประสิทธิ์ของ Carter (Kcr) ได้ = 0.49

$$\text{จากค่าของ } Kg_{rs} = y_{rs}/(y_{rs}-Kcr*Wor) = 1.037$$

ดังนั้นค่า Gap contraction factor (Kg) ได้เป็น = 1.16

$$\text{กำหนดค่า saturation factor} = 1.15$$

จากหัวข้อ 2.6.1 จะได้ค่าสมการของความต้านทานเป็น

ค่าความต้านทานที่ขดลวดตัวนำหลัก

$$r_{wm} = 0.021 * T_m * L_{mcm} / am \quad \text{ที่ } 75^\circ \text{ c}$$

$$= 8.02$$

$$r_{wm} = 0.017 * T_m * L_{mcm} / am \quad \text{ที่ } 20^\circ \text{ c}$$

$$= 6.5$$

ความต้านทานของโรเตอร์ในเทอมของขดลวดหลัก

$$r_{rm} = 8 * T_m * K_{wm}^2 * p \left[ \frac{L_b}{S_{ab}} + \frac{2 D_o * K_{ring}}{\pi p^2 a_o} \right]$$

$$= 11.71$$

-หาค่าของรีแอกแตนซ์

ลิกเกจรีแอกแตนซ์ จากสมการที่ 2.23 - 2.32 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
- สล็อตลิกเกจรีแอกแตนซ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้อตล็คเกอร์แอคแทนซ์

$$X_m = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L [\lambda_{xx} C_x + (S_x/S_r) \lambda_{xx}] / S_{xx}$$

$$= 7.93$$

- ซิกแซกล็คเกอร์แอคแทนซ์

$$X_z = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L \lambda_z / S_{xx}$$

$$= 10.49$$

- โอเวอร์แองค์ล็คเกอร์แอคแทนซ์

$$X_o = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 L \mu_o [\pi(D+d_{xx}) * (\text{คอยล์สแปนเฉลี่ย})]$$

$$/ [6.4 S_{xx} p]$$

$$= 2.18$$

โดยที่

$$K_{wm} = \text{ค่าที่หาได้จากรูป 2.5}$$

- ลควิล็คเกอร์แอคแทนซ์

$$X_{sk} = X_m * \theta^2 * k_1 / 12$$

$$= 4.94$$

- แมกเนไทซิ่งคิริแอคแทนซ์

$$X_m = 16\pi f (T_m K_{wm})^2 * \frac{\mu_o L T}{(10 * 1g K_{sk} * p * F_{sk})}$$

$$= 309.65$$

- ล็คเกอร์แอคแทนซ์ทั้งหมด

$$X_{1m} = X_m + X_z + X_o + X_{sk}$$

$$= 25.54$$

- รีแอคแตนซ์วงจรเปิด

$$X_{om} = X_m + X_{1m} / 2$$

$$= 322.42$$

$$K_r = (X_{om} - X_{1m}) / X_{om}$$

$$= 0.92$$

$$K_1 = \text{SQRT}((X_{om} - X_{1m}) / X_{om})$$

$$= 0.96$$

- หาค่าคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ ในการหาค่าคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์เราจะใช้หลักการหาของ VEINOTT ซึ่ง VEINOTT ได้อาศัยทฤษฎีของสนามแม่เหล็กตัดขวาง รูปแบบของการหาค่าคุณสมบัติของ VEINOTT นี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตารางที่ 1 การหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ด้วยวิธีของ VEINOTT

1

\*\*\*\*\*  
 # Veinott's Method #  
 \*\*\*\*\*

the calculations are done in the following steps

## Performance Calculations

WATT=                      VOLTAGE=                      SPEED=

## MOTOR CONSTANT

-----

Line voltage V =	F1 = (2-K1 <sup>2</sup> )r <sub>m</sub> '	=
x <sub>lm</sub> =	F2 = (2r <sub>sm</sub> +r <sub>rm</sub> ')r <sub>rm</sub> '/X <sub>om</sub>	=
X <sub>om</sub> =	F3 = (I <sub>m</sub> *r <sub>rm</sub> ')r <sub>rm</sub> '/X <sub>om</sub>	=
r <sub>sm</sub> =	F4 = 2*I <sub>m</sub> *r <sub>rm</sub> '	=
r <sub>rm</sub> ' =	F5 = (I <sub>m</sub> *r <sub>rm</sub> ')K1	=
K1 =	F6 = [(I <sub>m</sub> *r <sub>rm</sub> ')K1] <sup>2</sup> *r <sub>rm</sub> '	=
r <sub>sm</sub> /X <sub>lm</sub> =	F7 = VK1	=
r <sub>rm</sub> '/X <sub>om</sub> =	F8 = (VK1) <sup>2</sup> *r <sub>rm</sub> '	=
I <sub>m</sub> = V/X <sub>om</sub> =	F9 = Core loss/2V	=
I <sub>m</sub> *r <sub>rm</sub> ' =	Core loss	=
	Friction and windage loss =	=

-----

1 c = r <sub>pm</sub> /s <sub>rpm</sub>	=
2 c <sup>2</sup>	=
3 (1-c <sup>2</sup> )	=
4 (1-c <sup>2</sup> )*r <sub>rm</sub> '	=
5 F1	=
6 U = (4)+(5)	=
7 (1-c <sup>2</sup> )*X <sub>lm</sub>	=
8 F2	=
9 W = (7)-(8)	=
10 SQRT(U <sup>2</sup> +W <sup>2</sup> )	=
11 (1-c <sup>2</sup> )*E	=
12 F3	=
13 M = (11)-(12)	=
14 F9*U	=
15 N = (13)+(14)	=
16 SQRT(N <sup>2</sup> +F4 <sup>2</sup> )	=
17 I1 = (16)/(10)	=
18 (1-c <sup>2</sup> )*F7	=
19 SQRT((18) <sup>2</sup> +F5 <sup>2</sup> )	=
20 I2 = (19)/(10)	=
21 c*F5	=
22 I3 = (21)/(10)	=
23 (1-c <sup>2</sup> )*F8	=
24 F6	=
25 (23)-(24)	=
26 Pri. copper loss	=
= I1 <sup>2</sup> *r <sub>sm</sub>	=
27 Sec. copper loss (m)	=
= I2 <sup>2</sup> *r <sub>rm</sub> '	=

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
28 \text{ Sec. copper loss (s)} &= I_3^2 r_{rrm}' &= \\
29 \text{ Core loss (m)} &= \text{core loss}/2 &= \\
30 &= (25) \cdot (2)/(10)^2 &= \\
31 \text{ Input} &= (26) + (27) + (28) &= \\
&+ (29) + (30) &= \\
32 \text{ core loss}/2 + \text{F\&W loss} &= \\
33 \text{ Output} &= (30) - (32) &= \\
34 \text{ RPM} &= \\
35 \text{ Torque} &= (60/(2\pi)) \cdot (33)/(34) &= \\
36 \text{ Efficiency} &= (33)/(31) &= \\
37 \text{ Power factor} &= (31)/\text{EI1} &= \\
38 \text{ Percent full load} &= \\
39 \text{ No-load Current} &=
\end{aligned}$$

3.4 การออกแบบมอเตอร์โดยการใช้อยู่ไม่โครคอมพิวเตอร์ จากการออกแบบในหัวข้อที่ 3.3 นั้นเราสามารถ นำหลักการออกแบบนั้นมาทำการออกแบบโดยไมโครคอมพิวเตอร์ โดยการป้อนค่าต่างๆที่จำเป็นและส่วนในการคำนวณให้แก่คอมพิวเตอร์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เราเลือกใช้ซึ่งได้แก่ โลตัส 123 เนื่องจากมีความคล่องตัวในการใช้สูง ทั้งในการใช้ของรูปแบบเวอร์ดรีท และในแง่ของการเก็บค่าข้อมูลต่างๆ รวมทั้งการแสดงผลในรูปของกราฟ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการพิจารณาค่าคุณสมบัติของมอเตอร์

ตัวโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบมอเตอร์เห็นยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสลดตาร์ทที่ได้ทำการสร้างขึ้นได้แสดงไว้แล้วในภาคผนวกที่ 1

### 3.5 การปรับค่าต่างๆเพื่อให้คุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ดีขึ้น

3.5.1 การปรับค่าจำนวนรอบในการหัน (Tm) ในการพิจารณาค่าของคุณสมบัติต่างๆ เช่น แรงบิด ตัวประกอบกำลัง ค่าประสิทธิภาพ ฯลฯ จะเห็นว่าขึ้นอยู่กับค่าของค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ของมอเตอร์ ซึ่งค่าเหล่านี้จะแปรตามค่า  $Tm^2$  ดังนั้นการปรับค่าของ Tm จะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์

เนื่องจากเราใช้ไมโครคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ จึงเป็นการง่ายที่จะทำการปรับค่าของ Tm ที่ค่าต่างๆ แล้วจึงเลือกค่าของ Tm ที่ให้ผลของคุณสมบัติที่ดีที่สุดออกมา จากตัวโปรแกรมนี้เราได้เลือกค่าของ Tpm ที่ 90% ของค่าที่คำนวณได้ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก 2 ก

3.5.2 การปรับค่าขนาดขดลวด (SWG.) ในการพิจารณาค่าของคุณสมบัติต่างๆ เช่น แรงบิด, ตัวประกอบกำลัง, ค่าประสิทธิภาพ ฯลฯ จะเห็นว่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานซึ่งค่าเหล่านี้จะแปรตามค่าของขนาดของเส้นลวดตัวนำ ดังนั้นการปรับค่าของ SWG. จะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์

เนื่องจากเราใช้ไมโครคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ จึงเป็นการง่ายที่จะทำการปรับค่าของ SWG. ที่ค่าต่างๆ แล้วจึงเลือกค่าของ SWG. ที่ให้ผลของคุณสมบัติที่ดีที่สุดออกมา จากตัวโปรแกรมนี้เราได้เลือกค่าของ SWG. ที่ 22.5 ดังแสดงไว้ในภาคผนวก 2 ข

**3.5.3 การปรับค่าของขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ท** เช่นเดียวกับการปรับจำนวนรอบในการพัน ค่าของคุณสมบัติต่างๆในการสตาร์ทของมอเตอร์ เช่น แรงบิดขณะสตาร์ท กระแสขณะสตาร์ท ฯลฯ จะเห็นว่าขึ้นอยู่กับค่าของขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ทเป็นหลัก ดังนั้นเราสามารถปรับค่าคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ โดยการปรับค่าของขดลวดตัวนำหลัก ซึ่งการปรับค่านี้เราสามารถทำได้ 2 กรณีคือ

**3.5.3.1 การปรับค่าของอัตราส่วนของ  $A_2/A_M$**

ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ ในการปรับค่าของ  $A_2/A_M$  ที่ค่าต่างๆ แล้วจึงเลือกค่าของ  $A_2/A_M$  ที่ให้ผลของคุณสมบัติที่ดีที่สุดออกมา จากตัวโปรแกรมนี้เราได้เลือกค่าของ  $A_2/A_M = 0.8$  ดังแสดงไว้ในภาคผนวก 2 ค

**3.5.3.2 การปรับค่าของอัตราส่วนของ  $T_a/T_M$**

ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ ในการปรับค่าของ  $T_a/T_M$  ที่ค่าต่างๆ แล้วจึงเลือกค่าของ  $T_a/T_M$  ที่ให้ผลของคุณสมบัติที่ดีที่สุดออกมา จากตัวโปรแกรมนี้เราได้เลือกค่าของ  $T_a/T_M = 0.9$  ดังแสดงไว้ในภาคผนวก 2 ง



## บทที่ 4

### การทดสอบมอเตอร์และผลของการทดสอบ

**4.1 บทนำ** จากการที่เราได้ศึกษาทฤษฎีและการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสสตาร์ท ก่อนที่เราจะนำค่าการออกแบบที่ได้ไปทำการสร้างมอเตอร์เพื่อให้ได้ขนาดพิกัดกำลังและคุณสมบัติต่างๆตามต้องการเพื่อนำไปใช้งานนั้น เราจะต้องมีการทดสอบตัวโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เราได้ทำการสร้างขึ้นมา ว่ามีการถูกต้องแม่นยำเพียงไร เพื่อสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้ที่จะทำการออกแบบมอเตอร์ต่อไป ทั้งนี้เพราะในการสร้างมอเตอร์ตัวหนึ่งมีการลงทุนสูงและใช้เวลาในการทำมาก ในกรณีที่ตัวโปรแกรมที่ทำการออกแบบมา ยังมีข้อผิดพลาดจะทำให้มีการเสียหายให้แก่ผู้สร้างสูง

**4.2 การทดสอบมอเตอร์** มอเตอร์ที่เราใช้ทดสอบมีค่าที่แผ่นบอกรายละเอียด (name plate) ดังนี้

Manufacturer	: TOSHIBA
Model Number	: 7128708 K
Rated HP	: 1/4
Rated Torque	: 1250
Rated Volts	: 220
Rated Amps	: 2.7
Rated Speed	: 1430
Insulation	: E
Motor Type	: SPLIT PHASE

และการทดสอบเราจะทำการทดสอบเป็น 2 กรณีคือ การทดสอบวัดค่าคุณสมบัติที่ได้โดยตรงจากตัวมอเตอร์ และทำการทดสอบโดยการป้อนค่ารายละเอียดของมอเตอร์ที่ทำการทดสอบเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำการออกแบบไว้และคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของตัวมอเตอร์

**4.2.1 การทดสอบโดยตรงกับตัวมอเตอร์** การทดสอบมอเตอร์ จะทดสอบด้วยเครื่องทดสอบมอเตอร์ (ZTEST) ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ทันสมัย สามารถเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและแน่นอน และได้รับการอนุญาตจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ให้ยืมในการทดสอบ

**4.2.2 การทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์** การทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เราจะทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้จากตัวมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบนั่นเอง ป้อนใส่ในตัวโปรแกรมที่เราได้ออกแบบและแสดงไว้แล้วในบทที่ 3

### 4.3 ผลจากการทดสอบ

#### 4.3.1 ผลจากการทดสอบโดยตรงจากตัวมอเตอร์ แสดงได้ดังตาราง 4.1 ดังนี้

RPM	Torque Setpoint	Watts	Line	PF.	Watt Diss	Eff	HP.
1023	3600	1100.83	5.91	0.85	636.36	42	0.62
1246	3500	1026.85	5.53	0.85	568.32	45	0.61
1267	3450	986.08	5.32	0.84	528.53	46	0.61
1281	3400	933.10	5.10	0.84	488.37	49	0.61
1293	3350	916.26	4.97	0.83	462.62	50	0.61
1305	3300	884.52	4.84	0.83	433.52	51	0.60
1313	3250	865.48	4.75	0.82	418.33	52	0.60
1315	3150	836.67	4.62	0.82	402.87	52	0.58
1320	3175	845.95	4.63	0.83	406.87	52	0.59
1321	3200	853.27	4.66	0.83	411.54	52	0.59
1322	3125	834.23	4.54	0.83	401.50	52	0.58
1323	3100	824.22	4.53	0.82	394.71	52	0.58
1330	3075	805.91	4.44	0.82	377.60	53	0.57
1335	3050	793.46	4.41	0.81	366.96	54	0.57
1339	3025	778.81	4.35	0.81	354.38	54	0.57
1341	3000	774.66	4.32	0.81	353.11	54	0.57
1345	2975	761.96	4.30	0.80	342.68	55	0.56
1346	2950	750.49	4.23	0.80	334.50	55	0.56
1348	2925	758.54	4.22	0.81	345.46	54	0.55
1351	2900	734.86	4.16	0.80	324.48	56	0.55
1352	2875	726.50	4.12	0.80	319.34	56	0.55
1358	2850	724.61	4.09	0.80	319.21	56	0.54
1360	2825	708.01	4.05	0.79	305.65	57	0.54
1363	2800	699.95	4.01	0.79	300.20	57	0.54
1366	2775	695.00	3.97	0.79	297.94	57	0.53
1368	2750	682.37	3.94	0.78	288.32	58	0.53
1371	2725	676.27	3.91	0.78	285.01	58	0.52
1372	2675	672.36	3.88	0.78	288.00	57	0.52
1372	2650	664.06	3.83	0.78	283.29	57	0.51
1373	2700	669.43	3.89	0.78	281.06	58	0.52
1375	2625	656.00	3.81	0.78	277.88	58	0.51
1377	2600	647.46	3.77	0.77	272.45	58	0.50
1380	2575	642.82	3.74	0.78	270.67	58	0.50
1381	2550	642.82	3.73	0.78	273.95	57	0.49
1385	2525	626.71	3.69	0.77	260.46	58	0.49
1386	2500	623.78	3.66	0.77	260.83	58	0.49
1388	2475	619.63	3.64	0.77	259.86	58	0.48
1389	2450	614.74	3.62	0.77	258.29	58	0.48
1391	2425	604.25	3.61	0.76	250.86	58	0.47
1396	2400	588.87	3.56	0.75	237.99	60	0.47
1397	2375	580.32	3.53	0.74	232.85	60	0.47
1398	2325	571.53	3.49	0.74	231.01	60	0.46
1399	2350	575.19	3.51	0.74	230.89	60	0.46
1401	2300	562.50	3.47	0.73	224.91	60	0.45
1403	2275	558.59	3.45	0.73	224.26	60	0.45
1405	2250	552.24	3.43	0.73	221.06	60	0.44
1407	2225	555.91	3.41	0.74	227.87	59	0.44

RPM	Torque Setpoint	Watts	Line	PF.	Watt Diss	Eff	HP.
1408	2200	552.00	3.40	0.73	227.42	59	0.44
1409	2125	535.40	3.33	0.73	221.66	59	0.42
1409	2150	540.28	3.35	0.73	223.02	59	0.43
1410	2175	540.04	3.38	0.72	218.86	59	0.43
1411	2100	531.49	3.31	0.72	221.01	58	0.42
1414	2075	513.67	3.28	0.71	206.39	60	0.41
1416	2050	514.40	3.27	0.71	210.40	59	0.41
1418	2025	507.81	3.25	0.71	207.04	59	0.40
1419	2000	503.66	3.24	0.70	206.34	59	0.40
1419	1975	503.42	3.22	0.71	203.91	58	0.39
1420	1900	482.66	3.16	0.69	200.06	59	0.38
1420	1950	493.90	3.20	0.70	203.75	59	0.39
1420	1925	489.99	3.20	0.69	203.61	58	0.38
1421	1875	479.49	3.13	0.69	200.31	58	0.37
1424	1825	473.39	3.09	0.69	201.22	57	0.36
1424	1850	477.78	3.12	0.69	201.89	58	0.37
1427	1800	456.05	3.07	0.67	187.05	59	0.36
1428	1775	453.86	3.06	0.67	188.40	58	0.36
1429	1675	454.59	3.06	0.67	203.87	55	0.34
1430	1700	448.24	3.03	0.67	193.51	57	0.34
1430	1750	444.58	3.05	0.66	182.50	59	0.35
1430	1725	444.09	3.04	0.66	185.71	58	0.35
1431	1650	436.77	2.97	0.66	189.44	57	0.33
1432	1625	427.00	2.96	0.65	183.17	57	0.33
1434	1600	428.95	2.96	0.65	188.58	56	0.32
1434	1575	420.16	2.93	0.65	183.51	56	0.32
1437	1525	406.74	2.89	0.63	177.11	56	0.31
1437	1550	415.28	2.91	0.64	181.97	56	0.31
1439	1500	391.11	2.89	0.61	165.02	58	0.30
1440	1475	385.50	2.85	0.61	162.94	58	0.30
1441	1425	385.01	2.86	0.61	169.88	56	0.29
1441	1450	383.30	2.86	0.60	164.40	57	0.29
1442	1400	370.12	2.82	0.59	158.65	57	0.28
1444	1375	367.19	2.82	0.59	159.21	57	0.28
1446	1350	361.08	2.83	0.58	156.57	57	0.27
1447	1325	358.40	2.82	0.57	157.57	56	0.27
1448	1300	354.00	2.80	0.57	156.79	56	0.26
1450	1250	355.47	2.79	0.57	165.55	53	0.25
1450	1275	348.88	2.79	0.56	155.22	56	0.26
1452	1200	350.10	2.75	0.57	167.59	52	0.24
1452	1175	334.72	2.76	0.55	156.01	53	0.24
1452	1225	347.17	2.78	0.56	160.82	54	0.25
1454	1150	336.91	2.74	0.55	161.77	52	0.23
1455	1125	321.14	2.74	0.53	149.62	53	0.23
1456	1100	315.18	2.71	0.53	147.42	53	0.22
1457	1075	316.62	2.69	0.53	152.53	52	0.22
1459	1025	309.33	2.68	0.52	152.65	51	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RPM	Torque Setpoint	Watts	Line	PF.	Watt Diss	Eff	HP.
1408	2200	552.00	3.40	0.73	227.42	59	0.44
1409	2125	535.40	3.33	0.73	221.66	59	0.42
1409	2150	540.28	3.35	0.73	223.02	59	0.43
1410	2175	540.04	3.38	0.72	218.86	59	0.43
1411	2100	531.49	3.31	0.72	221.01	58	0.42
1414	2075	513.67	3.28	0.71	206.39	60	0.41
1416	2050	514.40	3.27	0.71	210.40	59	0.41
1418	2025	507.81	3.25	0.71	207.04	59	0.40
1419	2000	503.66	3.24	0.70	206.34	59	0.40
1419	1975	503.42	3.22	0.71	203.91	58	0.39
1420	1900	482.66	3.16	0.69	200.06	59	0.38
1420	1950	493.90	3.20	0.70	203.75	59	0.39
1420	1925	489.99	3.20	0.69	203.61	58	0.38
1421	1875	479.49	3.13	0.69	200.31	58	0.37
1424	1825	473.39	3.09	0.69	201.22	57	0.36
1424	1850	477.78	3.12	0.69	201.89	58	0.37
1427	1800	456.05	3.07	0.67	187.05	59	0.36
1428	1775	453.86	3.06	0.67	188.40	58	0.36
1429	1675	454.59	3.06	0.67	203.87	55	0.34
1430	1700	448.24	3.03	0.67	193.51	57	0.34
1430	1750	444.58	3.05	0.66	182.50	59	0.35
1430	1725	444.09	3.04	0.66	185.71	58	0.35
1431	1650	436.77	2.97	0.66	189.44	57	0.33
1432	1625	427.00	2.96	0.65	183.17	57	0.33
1434	1600	428.95	2.96	0.65	188.58	56	0.32
1434	1575	420.16	2.93	0.65	183.51	56	0.32
1437	1525	406.74	2.89	0.63	177.11	56	0.31
1437	1550	415.28	2.91	0.64	181.97	56	0.31
1439	1500	391.11	2.89	0.61	165.02	58	0.30
1440	1475	385.50	2.85	0.61	162.94	58	0.30
1441	1425	385.01	2.86	0.61	169.88	56	0.29
1441	1450	383.30	2.86	0.60	164.40	57	0.29
1442	1400	370.12	2.82	0.59	158.65	57	0.28
1444	1375	367.19	2.82	0.59	159.21	57	0.28
1446	1350	361.08	2.83	0.58	156.57	57	0.27
1447	1325	358.40	2.82	0.57	157.57	56	0.27
1448	1300	354.00	2.80	0.57	156.79	56	0.26
1450	1250	355.47	2.79	0.57	165.55	53	0.25
1450	1275	348.88	2.79	0.56	155.22	56	0.26
1452	1200	350.10	2.75	0.57	167.59	52	0.24
1452	1175	334.72	2.76	0.55	156.01	53	0.24
1452	1225	347.17	2.78	0.56	160.82	54	0.25
1454	1150	336.91	2.74	0.55	161.77	52	0.23
1455	1125	321.14	2.74	0.53	149.62	53	0.23
1456	1100	315.18	2.71	0.53	147.42	53	0.22
1457	1075	316.62	2.69	0.53	152.53	52	0.22
1459	1025	309.33	2.68	0.52	152.65	51	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลจากการทดสอบจากตัวโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงได้ดังตาราง 4.2 ดังนี้

RPM (rpm.)	Torque Setpoint (N-m.)	INPUT (watts)	CURRENT Line (amp.)	POWER FACTOR	EFFICIENCY	OUTPUT (watts)
1204	4.43	1063.68	6.70	0.76	0.53	558.93
1307	4.05	890.19	5.19	0.82	0.62	554.51
1322	3.92	853.68	4.93	0.83	0.64	543.24
1336	3.78	816.34	4.67	0.84	0.65	529.29
1348	3.64	781.62	4.45	0.84	0.66	514.41
1358	3.51	750.66	4.25	0.84	0.67	499.74
1369	3.36	714.34	4.04	0.85	0.67	481.04
1374	3.28	697.01	3.93	0.85	0.68	471.58
1383	3.13	664.49	3.75	0.85	0.68	452.97
1391	2.98	634.10	3.58	0.85	0.69	434.63
1399	2.83	602.24	3.42	0.84	0.69	414.49
1406	2.68	573.13	3.27	0.84	0.69	395.31
1410	2.60	555.96	3.18	0.84	0.69	383.67
1417	2.44	524.96	3.03	0.83	0.69	362.07
1420	2.37	511.30	2.97	0.82	0.69	352.32
1424	2.27	492.73	2.89	0.82	0.69	338.84
1429	2.15	468.93	2.78	0.81	0.68	321.21
1432	2.07	454.33	2.72	0.80	0.68	310.20
1437	1.93	429.48	2.61	0.79	0.68	291.13
1441	1.82	409.11	2.53	0.77	0.67	275.19
1446	1.68	383.03	2.43	0.75	0.66	254.41
1451	1.53	356.27	2.34	0.73	0.65	232.64
1454	1.44	339.89	2.28	0.71	0.64	219.09
1459	1.28	312.02	2.19	0.68	0.63	195.69
1462	1.18	294.97	2.14	0.66	0.61	181.14
1466	1.05	271.85	2.07	0.63	0.59	161.15
1471	0.88	242.33	2.00	0.58	0.56	135.16
1474	0.77	224.29	1.96	0.55	0.53	119.04
1478	0.63	199.87	1.91	0.50	0.48	96.90
1482	0.48	175.04	1.87	0.45	0.42	74.02
1484	0.40	162.47	1.85	0.42	0.38	62.30
1488	0.25	137.05	1.82	0.36	0.28	38.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

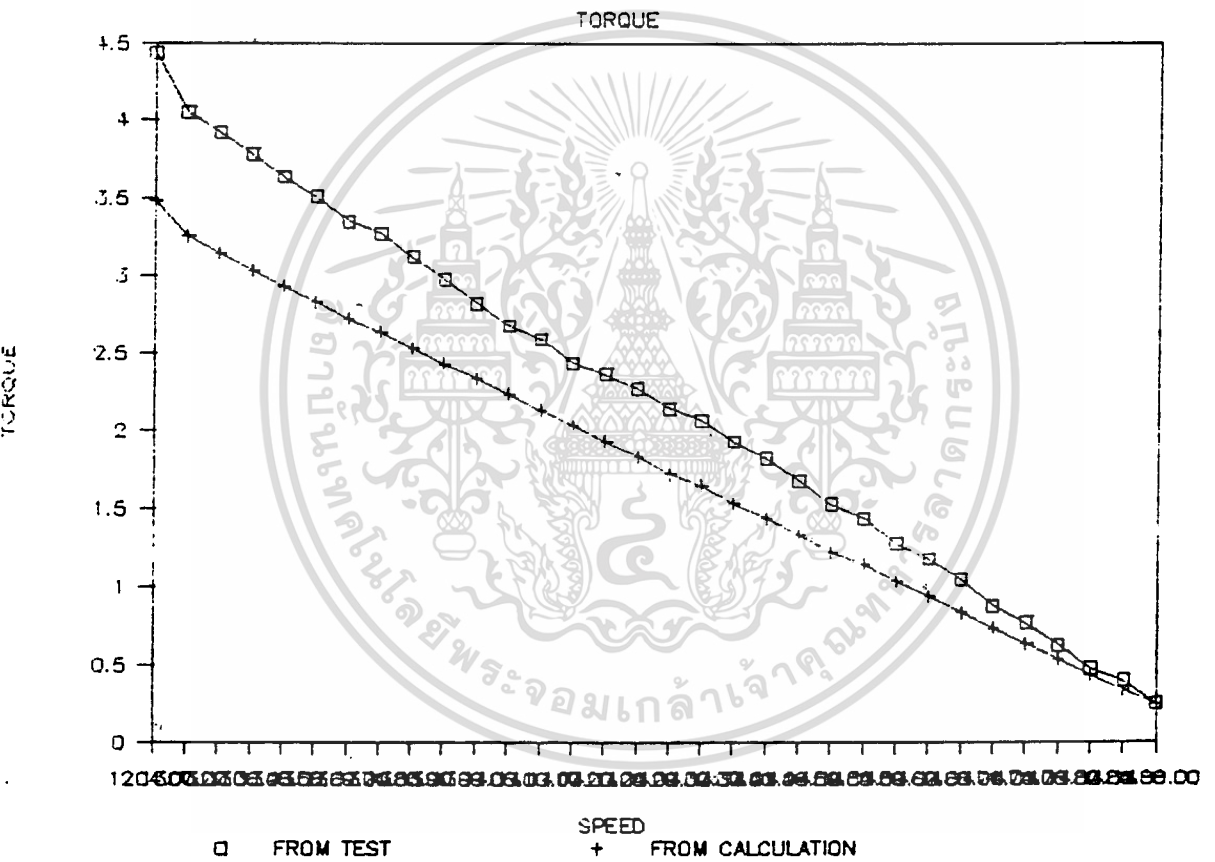
4.3.3 ผลจากการทดสอบโดยตรงจากตัวมอเตอร์ และทำการคำนวณทางสถิติเพื่อนำไปสร้างกราฟเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณของคอมพิวเตอร์ แสดงได้ดังตารางที่ 4..3 ดังนี้

RPM (rpm.)	Torque Setpoint (N-m.)	INPUT (watts)	CURRENT Line (amp.)	POWER FACTOR	EFFICIENC	OUTPUT (watts)
1204	3.49	1011.72	5.47	0.85	45.50	456.93
1307	3.26	875.73	4.80	0.83	51.25	445.74
1322	3.15	839.42	4.59	0.83	52.00	436.41
1336	3.04	788.21	4.38	0.81	53.75	425.22
1348	2.94	751.46	4.23	0.80	55.00	414.03
1358	2.84	714.77	4.07	0.80	56.50	404.71
1369	2.73	681.50	3.93	0.78	57.50	391.65
1374	2.64	659.24	3.83	0.78	57.75	380.46
1383	2.54	634.03	3.71	0.78	57.75	367.41
1391	2.44	606.87	3.61	0.76	58.50	354.35
1399	2.34	572.39	3.50	0.74	60.00	343.16
1406	2.24	554.69	3.42	0.73	59.50	330.11
1410	2.14	536.90	3.34	0.73	58.75	317.05
1417	2.04	509.89	3.26	0.71	59.25	302.13
1420	1.94	492.49	3.20	0.70	58.50	287.21
1424	1.84	471.68	3.10	0.69	58.00	272.29
1429	1.73	450.32	3.05	0.67	57.25	259.23
1432	1.65	434.20	2.98	0.66	57.00	248.05
1437	1.54	408.32	2.91	0.63	56.50	231.26
1441	1.44	380.98	2.85	0.60	57.00	216.34
1446	1.34	360.17	2.82	0.58	56.50	201.42
1451	1.23	347.29	2.77	0.56	53.50	184.64
1454	1.15	330.10	2.74	0.54	53.00	173.45
1459	1.04	310.24	2.68	0.52	51.25	160.39
1462	0.94	293.09	2.65	0.50	49.25	143.61
1466	0.84	273.65	2.64	0.47	47.25	126.82
1471	0.74	256.11	2.61	0.44	44.50	111.90
1474	0.64	237.24	2.56	0.42	41.50	96.98
1478	0.54	222.06	2.53	0.40	37.50	82.06
1482	0.43	194.95	2.52	0.35	34.50	67.14
1484	0.34	189.58	2.58	0.33	27.75	52.22
1488	0.24	163.39	2.56	0.28	23.25	50.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบ จากผลจากการทดสอบที่ได้ในหัวข้อ 4.3.1 เราจะนำมาประมวลผลทางสถิติโดยการหาค่าเฉลี่ย (average) ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวจากค่าที่ได้จากการทดสอบครั้งละ 4 ตัว เช่นค่าที่ได้จากค่า torque ครั้งที่ 1-4 จะได้เป็นค่า torque average ครั้งที่ 1 เป็น 3.49 เป็นต้น และใช้ค่าคุณสมบัติความเร็วรอบเป็นตัวแปรต้นเพื่อนำมาวาดกราฟเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อ 4.3.2 ก็จะได้กราฟออกมา ดังนี้

### COMPARIS ON TEST AND CALCULATION



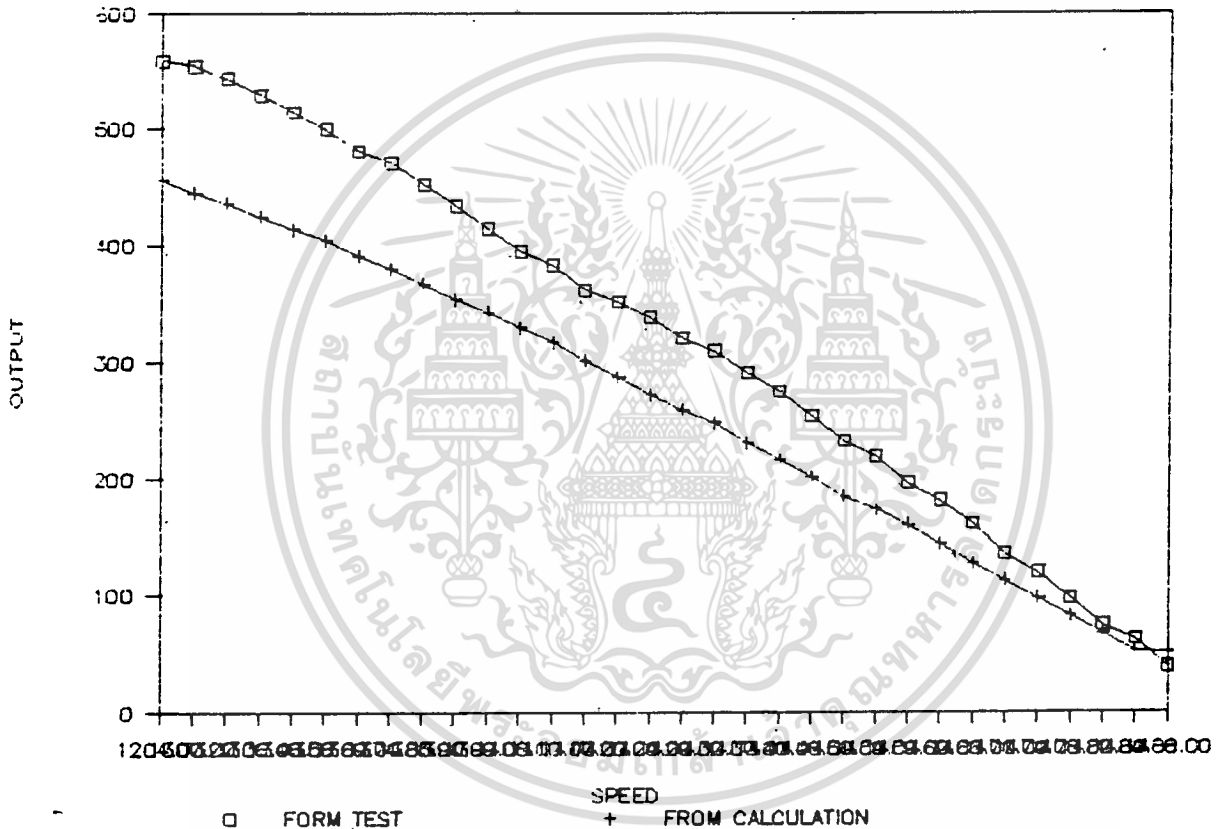
กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดที่วัดได้จากมอเตอร์และค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## COMPARIS ON TEST AND CALCULATION

OUTPUT

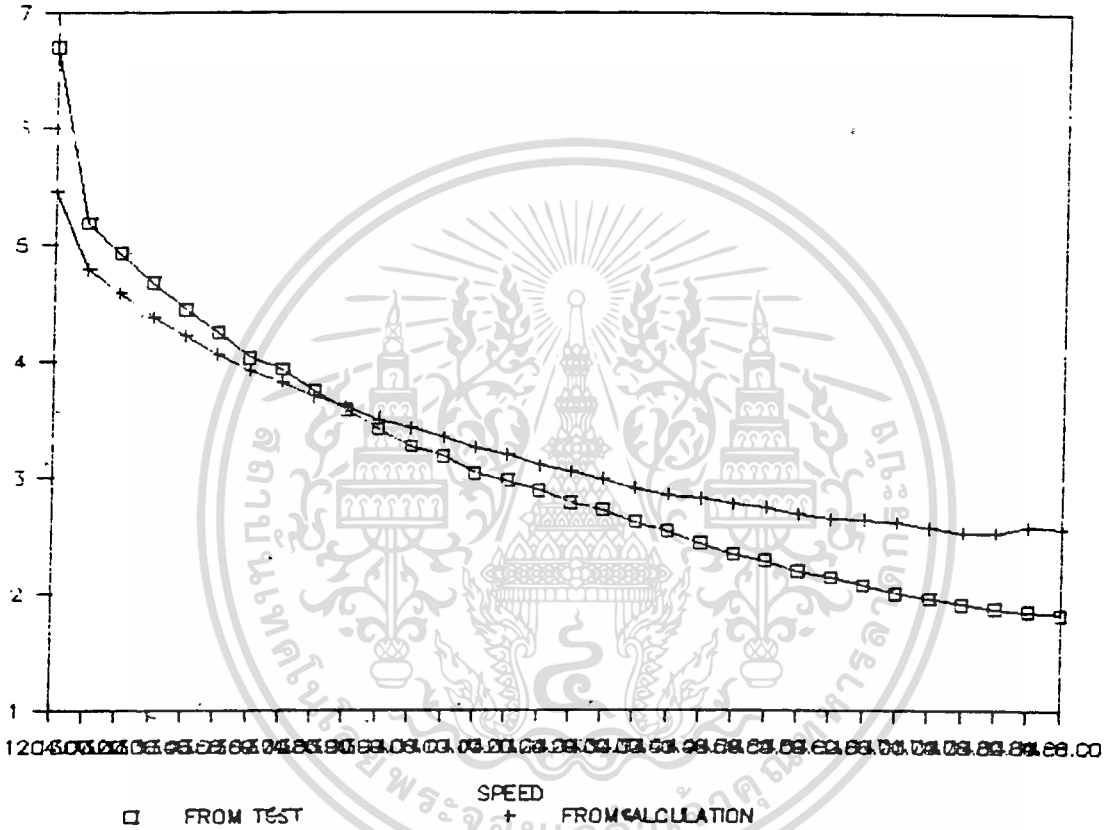


กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังที่ได้ที่วัดได้จากมอเตอร์  
และค่ากำลังที่ได้ที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

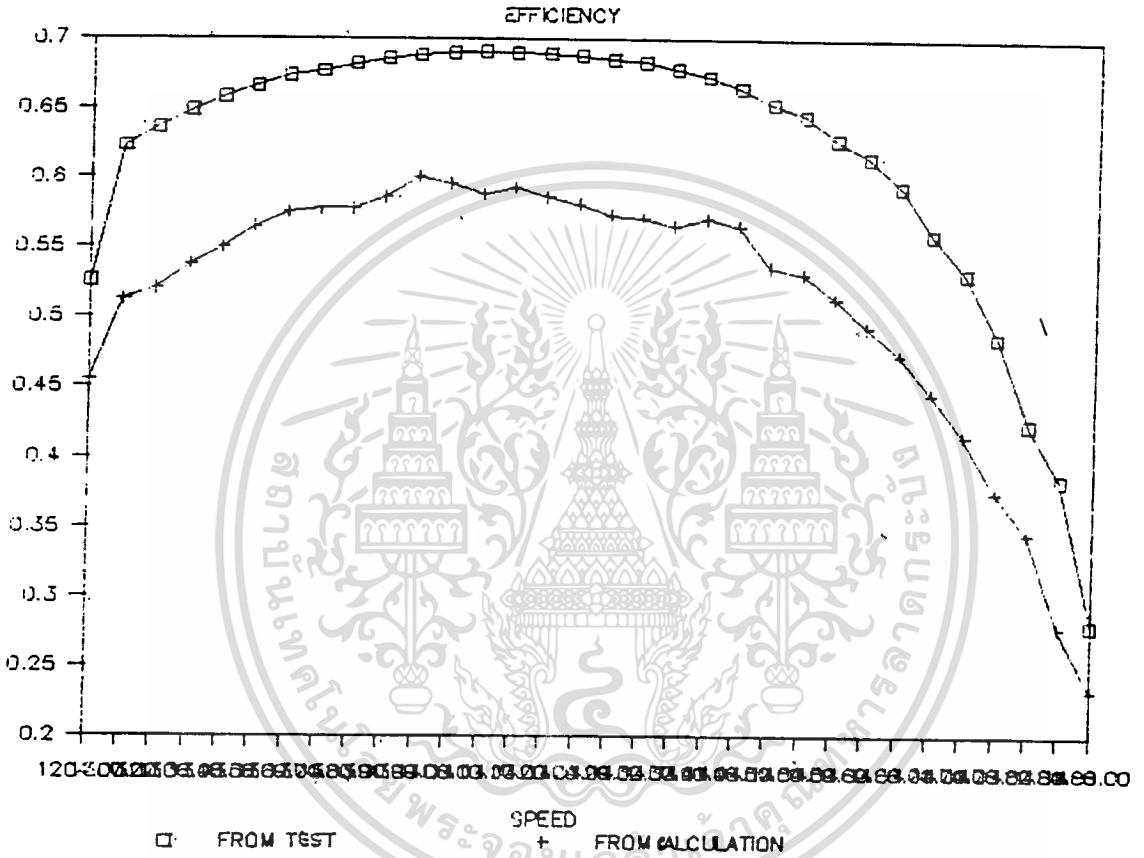
# COMPARIS ON TEST AND CALCULATION

CURRENT



กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสที่ได้ที่วัดได้จากมอเตอร์  
และค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ

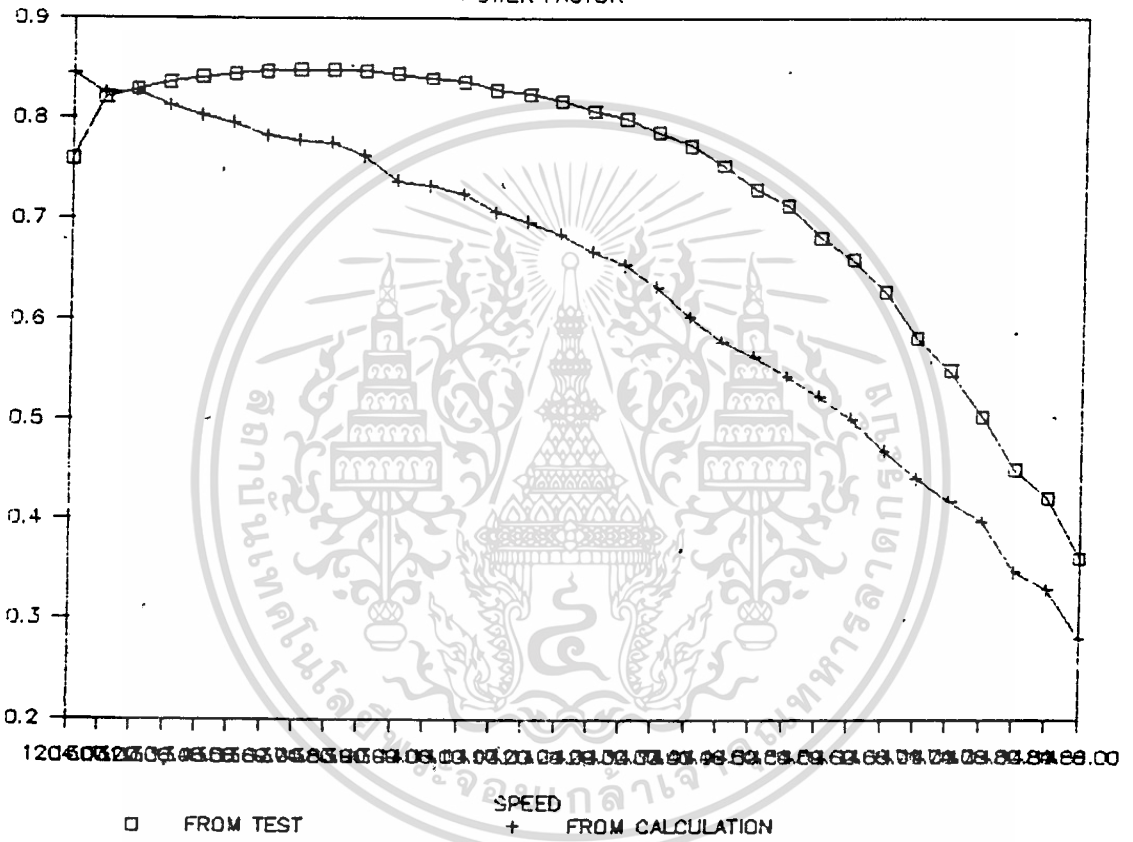
# COMPARIS ON TEST AND CALCULATION



กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าประสิทธิภาพที่วัดได้จากมอเตอร์  
และค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ

## COMPARIS ON TEST AND CALCULATION

### POWER FACTOR



**กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวประกอบกำลังประสิทธิภาพที่วัดได้จากมอเตอร์  
และค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการคำนวณ**

## บทวิจารณ์และสรุป

การศึกษาการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดแยกเฟสสตาร์ท ในปริญญาณินทร์นี้แบ่งการทำงานออกเป็น สองส่วน คือ การศึกษาทางทฤษฎีและสมการต่างๆ ในการคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของมอเตอร์ เช่น การคำนวณค่า ลีคเกจรีแอกแตนซ์ต่างๆ การคำนวณหาความต้านทานของขดลวด ความต้านทานของโรเตอร์ที่นำมาพิจารณาในเทอมของสเตเตอร์และอื่นๆ แล้วนำสมการต่างๆ มาเขียนเป็นโปรแกรม โดยโปรแกรมที่ใช้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป โลตัส 123 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถสูง มีความคล่องตัวในการใช้งาน สมการต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาได้จากหนังสือ และ วารสารทางวิชาการต่างๆ จำนวนมากพอสมควร และอีกส่วนหนึ่งเป็นการสร้างเครื่องต้นแบบ จากผลการศึกษาทางโปรแกรม แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการสร้างเครื่องต้นแบบมีราคาสูงมาก ดังนั้นในการศึกษาปริญญาณินทร์ฉบับนี้จึงเปลี่ยนแนวทางในการศึกษาโดยนำข้อมูลของแกนเหล็กทางสเตเตอร์ โรเตอร์ และขดลวดต่างๆ ของมอเตอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมาป้อนในโปรแกรม แล้วใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาทำนายคุณสมบัติต่างๆ ขณะทำงาน เช่น แรงบิด อินพุต เอาท์พุต กระแส และอื่นๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง แสดงให้เห็นในรูปของกราฟ ซึ่งจากกราฟผลการทดลองจะเห็นว่า เส้นกราฟจากการทดลอง และจากการทำนายทางโปรแกรม มีค่าแตกต่างกันบ้าง แต่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แสดงว่าโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบมีแนวโน้มที่จะมีความถูกต้องแม่นยำพอสมควร แต่เนื่องจากเป็นการศึกษาในขั้นเริ่มต้น จึงไม่สามารถบอกได้ว่า โปรแกรมมีความถูกต้องจริงๆ ซึ่งความถูกต้องของโปรแกรมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น

1) การคำนวณลีคเกจรีแอกแตนซ์ต่างๆ การคำนวณเป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น มีการสมมุติว่าไม่มีการอิ่มตัวของแกนเหล็ก และตัดค่าพารามิเตอร์บางตัวซึ่งมีผลในการคำนวณนี้ทิ้ง ทำให้การคำนวณมีค่าผิดพลาดบ้าง

2) การคำนวณค่าความสูญเสียต่างๆ เป็นค่าประมาณ เนื่องจากไม่ทราบค่าที่แน่นอน เช่น ไม่ทราบการสูญเสียที่แน่นอนของแกนเหล็กและเป็นการประมาณด้วยค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริง การสูญเสียในแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามโหลด

การศึกษาในขั้นต่อไปเป็นการพัฒนาให้สมการในโปรแกรมมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นในรุ่นต่อไปซึ่งวิธีการทดสอบมอเตอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดหลายๆแบบจำนวนมากแล้วนำข้อมูลของแกนเหล็กสเตเตอร์ โรเตอร์ และขดลวดต่างๆของมอเตอร์ป้อนในโปรแกรมดังที่ทำในปริญญาณินทร์จะสามารถช่วยในการพัฒนาโปรแกรมให้มีความถูกต้องได้มากยิ่งขึ้น

ภาคผนวกที่ 1

รายละเอียดตัวโปรแกรมการออกแบบจอเทอร์เทียลเอนิเมชันแบบแยกเฟรมสตาร์ท

## DESIGN OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR

=====

\*\*\*\*\*

### Motor Specifications :

#### TYPE OF MOTOR:

The type of motor shall be SPLIT PHASE MOTOR RESISTANCE START

#### RATING:

Rated output (w)	120
Rated voltage (volt)	220
Rated power source (Hz)	50
Number of pole	4
Rated speed (rpm)	1455
Rated torque (N-m)	0.90
Rate current (amp)	2.00

#### CHARACTERISTICS:

Rated power source (Hz)	50.00
Voltage (volt)	220.00
Synchronous speed (srpm.)	1500.00
Starting current (amp)	20.00
Starting torque (N-m)	10.00
Maximum torque (N-m)	36.00
Efficiency (%)	0.40
Power factor (%)	0.60

#### MAIN DIMENSION:

we use Length per pole pitch =1	
$K_{wm}$ = winding factor	0.80
$\eta$ = Efficiency (%)	0.40
PF = Power factor (%)	0.60
$B_{av}$ = Specific magnetic loading (wb/sq.m.)	0.55
$a_c$ = Specific electric loading (AT/m.)	10000.00
$N_s$ = Synchronous speed (rps.)	25.00
$C_o = 11 * K_{wm} * B_{av} * a_c * 1e-3$	48.33
$D^2 * L = KW / (\eta * pf * C_o * N_s)$	4.14E-04
D = Inside diameter of stator stamping (m.)	8.08E-02

#### SELECTED MOTOR DIMENSION FOR STATOR:

Select Stamping No.	12
Outer diameter of stator stamping $D_o$ =	1.38E-01
Inside diameter of stator stamping D =	8.89E-02
L = Stack height of stator (m.)	5.24E-02
Depth of stator slot, $D_{ss}$ (m.)	1.44E-02
Depth of stator core, $D_{cs}$ (m.)	1.03E-02
Width of stator slot opening, $W_{os}$ (m.)	1.65E-03
Stator slot pitch, $Y_{ss}$ (m.)	9.97E-03
Width of stator tooth, $W_{ts}$ (m.)	4.00E-03
Stator slots	28
Number of pole	4

#### STATOR DESIGN :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Set: Flux density in the stator teeth, $B_{ts}$ (wb/sq.cm.)	1.1
Flux per pole, (wb.)	1.53E-03
Flux density in stator core, $B_{cs}$ (wb/sq.cm.)	1.5

STATOR WINDING:

Slot per pole	7
Winding arrangement	
Coil ( 1-7 ) give coil span	6
Coil ( 2-6 ) give coil span	4
Coil ( 3-5 ) give coil span	2

Turn require for each coil to form a sinusoidal distribution

Pitch factor for coil ( 1-7 )	0.97
Pitch factor for coil ( 2-6 )	0.78
Pitch factor for coil ( 3-5 )	0.43

Total 2.19

Percentage of turn per pole in coil ( 1-7 )	45
Percentage of turn per pole in coil ( 2-6 )	36
Percentage of turn per pole in coil ( 3-5 )	20

Winding factor for main winding,  $K_{wm}$  (turns) 0.80

Number of series turn in main winding,  $T_m$  (turns) 768.64

Number of series turn per pole,  $T_{pm}$  (turns) 192.16

##### 150%

Chooosed  $T_{pm}$  (turns) 288

$T_m$  (turns) 1153

Turns in each coil per pole

			Choose
Coil ( 1-7 )	128.28	turn	128
Coil ( 2-6 )	102.87	turn	103
Coil ( 3-5 )	57.09	turn	57

TOTAL 288

CONDUCTOR SIZE (mm.);

Current in main winding (amp.)	2.27
Assume current density of conductor (amp/sq.mm.)	5.00
Cross section area of main winding conductor (sq.mm.)	0.45
Diameter of conductor (mm.)	0.76
main winding SWG. No.	21.50

USED;

Using main winding SWG. No. 21.50

Diameter of main conductor (mm.) 0.75

Maximum of main conductor resistance	
at 20 dec.C (ohm/Km)	39.87
Area of main winding conductor, $a_m$ (sq.mm.)	0.44
Overall cross section area (sq.mm.)	0.54

LENGTH OF MEAN TURN,  $L_{mt}$  (m.):

$$L_{mt} = 8.4 \cdot (D + d_{ss}) / S \cdot COIL \ SPANS + 2 \cdot l$$

$L_{mt}$ ( 1-9 )	0.29	$L_{mt} \cdot T =$	37.29
$L_{mt}$ ( 2-8 )	0.23	"	23.53
$L_{mt}$ ( 3-7 )	0.17	"	9.52
$L_{mt}$ ( 4-6 )	0.10	"	0.00

Length of mean turn of main winding, $L_{mtm}$ (m.)	0.24
---	------

ROTOR DESIGN:

SELECTED MOTOR DIMENSION FOR ROTOR:

Length of Air Gap $l_g =$	3.11E-04
Rotor slots, $S_r = S + 2 \cdot P$	20
Rotor diameter $D_r = D - 2 \cdot l_g$	8.82E-02
Width of rotor slot opening, $W_{or}$ (m.)	1.00E-03
Rotor slot pitch, $Y_{sr}$ (m.)	1.39E-02
Width of rotor tooth, $W_{tr}$ (m.)	1.29E-02

ROTOR BARS:

Rotor Bars area, $a_b$ (sq.mm.)	20.00
Total Rotor Bars area, $A_r$ (sq.mm.)	400.00

END RINGS:

End Rings area, $a_e$ (sq.mm.)	32.00
Use $a_e$ (sq.mm.)	32
Depth $d_e =$	7.00E-03
thickness $t_e =$	5.00E-03
Outer diameter of ring $D_{ero} =$	8.69E-02
Inner diameter of ring $D_{eri} =$	7.29E-02
Mean diameter of ring $D_{er} =$	7.99E-02

Check; ratio rotor slot/stator slot 0.71  
(If less than 1.5 is satisfied)

Total area of rotor bar, $A_r$ (sq.mm.)	400.00
Total area of stator conductor, $A_m$ (sq.mm.)	1018.72
Ratio $A_r/A_m$	0.39

Gap contraction factor,  $K_g$ :

Ratio $W_{os}/l_g$	5.30
$K_{cs} =$ Carter's coefficient (from fig. 4.9)	0.65
$K_{gss} = y_{ss}/(y_{ss} - K_{cs} \cdot W_{os})$	1.12
Ratio $W_{or}/l_g$	3.21
$K_{cr} =$ Carter's coefficient (from fig. 4.9)	0.49
$K_{grs} = y_{sr}/(y_{sr} - K_{cr} \cdot W_{or})$	1.037
$K_g = K_{gss} \cdot K_{grs}$	1.16

Saturation Factor: 1.15



-Skew leakage reactance, $X_{sk}$	4.94
Total leakage reactance refer to main winding, $X_{lm}(\text{ohm})$	62.17
Ratio $R_{rm}'(\text{hot})/X_{lm} =$	0.523
from fig 12.6 given $C(\text{rpm}/\text{srpm})$ , at max. torque =	0.825
Open circuit reactance, $X_{om}(\text{ohm})$	340.73
Leakage factor, $K_r =$	0.82
$K_1(\text{new})$	0.90

**CORE LOSS:**

Core material : H40L	
Thickness (m.)	0.0005
Density of lamination, (Kg/m. <sup>3</sup> )	7600
Maximum core loss at 1.5 wb/sq.m. (Watt/Kg.)	8.5
Weight of stator teeth, (Kg)	0.64
Maximum flux density in stator teeth, (wb/sq.m.)	1.73
loss per kg at flux density in stator teeth	11.00
iron loss in stator teeth	7.07
Mean diameter of stator core( $D_o-dcs$ )	0.13
Weight of stator core, (Kg.)	1.64
	1.50
flux density in core (Bcs.)	3.60
iron loss in core	5.24
Core loss due to fundamental flux, (Watt)	11.53
TOTAL core loss (stator + rotor)	25.37
Friction and windage loss is assume to be	6.00
(Assume about 5% of W output)	

**PERFORMANCE CALCULATION FOR SPLIT PHASE MOTOR**

#####  
 # Veinott's Method #  
 #####

the calculations are done in the following steps

Performance Calculations  
 WATT= 120.00 VOLTAGE= 220.00 SPEED= 1455

**MOTOR CONSTANT**

Line voltage V = 220.00	$F1 = (2-K_1^2)r_{rm}'$	= 38.447
$X_{lm} = 62.17$	$F2 = (2r_{sm} + r_{rm}')r_{rm}'/X_{om}$	= 5.66
$X_{om} = 340.73$	$F3 = (I_m r_{rm}')r_{rm}'/X_{om}$	= 2.00
$r_{sm} = 13.37$	$F4 = 2I_m r_{rm}'$	= 41.99
$r_{rm}' = 32.51$	$F5 = (I_m r_{rm}')K_1$	= 18.98
$K_1 = 0.90$	$F6 = [(I_m r_{rm}')K_1]^2 r_{rm}'$	= 11715.27
$r_{sm}/X_{lm} = 0.22$	$F7 = VK_1$	= 198.920
$r_{rm}'/X_{om} = 0.10$	$F8 = (VK_1)^2 r_{rm}'$	= #####
$I_m = V/X_{om} = 0.65$	$F9 = \text{Core loss}/2V$	= 0.026
$I_m r_{rm}' = 20.99$	Core loss	= 11.533
	Friction and windage loss	= 25.373

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

1	$c = rpm/srpm$	=	0.970
2	$c^2$	=	0.941
3	$(1-c^2)$	=	0.059
4	$(1-c^2)*rrm'$	=	1.922
5	F1	=	38.447
6	$U = (4)+(5)$	=	40.368
7	$(1-c^2)*X1m$	=	3.674
8	F2	=	5.655
9	$W = (7)-(8)$	=	-1.981
10	$SQRT(U^2+W^2)$	=	40.417
11	$(1-c^2)*E$	=	13.002
12	F3	=	2.003
13	$M = (11)-(12)$	=	10.999
14	$F9*IU$	=	1.058
15	$N = (13)+(14)$	=	12.057
16	$SQRT(N^2+F4^2)$	=	43.684
17	$I1 = (16)/(10)$	=	1.081
18	$(1-c^2)*F7$	=	11.756
19	$SQRT((18)^2+F5^2)$	=	22.328
20	$I2 = (19)/(10)$	=	0.552
21	$c*F5$	=	18.412
22	$I3 = (21)/(10)$	=	0.456
23	$(1-c^2)*F8$	=	*****
24	F6	=	*****
25	$(23)-(24)$	=	*****
26	Pri. copper loss = $I1^2*rs$	=	15.624
27	Sec. copper loss (m) = $I2^2*rrm'$	=	17.962
28	Sec. copper loss (s) = $I3^2*rrm'$	=	14.812
29	Core loss (m) =core loss/2	=	5.767
30	$(25)*(2)/(10)^2$	=	37.048
31	Input = $(26)+(27)+(28)$ + $(29)+(30)$	=	91.213
32	core loss/2+F&W loss	=	31.140
33	Output = $(30)-(32)$	=	5.908
34	RPM	=	1455.000
35	Torque = $(60/(2*pi))*$ $(33)/(34)$	=	0.039
36	Efficiency = $(33)/(31)$	=	0.065
37	Power factor = $(31)/EI1$	=	0.404
38	Percent full load	=	0.049
39	No-load Current	=	1.092

---

### Design of Starting Winding

---

#### Winding arrangement

Coil ( 4-11 ) give coil span  
Coil ( 5-10 ) give coil span

7  
5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coil ( 6-09 ) give coil span 3

Turn require for each coil to form a sinusoidal distribution

Pitch factor for coil ( 4-11 ) 0.50  
 Pitch factor for coil ( 5-10 ) 0.90  
 Pitch factor for coil ( 6-09 ) 0.62

Total 2.02

Percentage of turn per pole in coil ( 4-11 ) 25  
 Percentage of turn per pole in coil ( 5-10 ) 45  
 Percentage of turn per pole in coil ( 6-09 ) 31

Winding factor for starting winding,  $K_{wa}$  (turns) 0.72

Select starting turn/main winding turn,  $T_m/T_a (K) =$  0.90

Number of series turn in starting winding,  $T_a$  (turns) 1037.66

Number of series turn per pole,  $T_{pa}$  (turns) 259.41

Chooosed  $T_{pa}$  (turns) 259

$T_a$  (turns) 1038

Turns in each coil per pole

Coil ( 4-11 ) 64.07 turn 64  
 Coil ( 5-10 ) 115.45 turn 115  
 Coil ( 6-09 ) 79.89 turn 80

TOTAL 259

Select starting area/main conductor area ( A ) = 0.80

Area of starting winding conductor,  $aa$  0.35

USED;

Area of starting winding conductor, (  $aa$  ) 0.33

Overall cross section area (sq.mm.) 0.72

Diameter of starting conductor (mm.) 0.65

Maximum of starting conductor resistance  
 at 20 dec.C (ohm/Km) 53.26

Using starting winding SWG. No. 22.50

LENGTH OF MEAN TURN,  $L_{mt}$  (m.);

$L_{mt} = 8.4 * (D+d_{ss}) / S * COIL SPANS + 2 * L$

$L_{mt}$  ( 4-11 ) 0.32  $L_{mt} * T =$  20.61

$L_{mt}$  ( 5-10 ) 0.26 " 29.98

$L_{mt}$  ( 6-09 ) 0.20 " 15.80

0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Resistance of starting winding ( $r_{sa}$ )	16.81
Rotor resistance in terms of main winding ( $r_{ra}'$ )	39.02
Total resistance in term of main winding ( $R_m$ )	52.39
Rotor resistance in term of starting winding ( $r_{ra}'$ )	31.60
Total resistance in term of starting winding ( $R_a$ )	48.41
Total leakage reactance in term starting winding ( $X_{la}$ )	50.36
Locked rotor impedance of main winding ( $Z_m$ )	81.30
Locked rotor current in main winding ( $I_{sm}$ )	2.71
Impedance of starting winding ( $Z_a$ )	69.85
Locked rotor current in starting winding ( $I_{sa}$ )	3.15
Current density in starting winding ( $A/sq.mm$ )	9.49
Locked rotor current for both winding ( $I_s$ )	5.86
Starting torque from Eq, 12.80 ( $T_s$ )	7.21
Ratio ( starting torque / full load torque )	185.94





ภาคผนวกที่ 2 ก  
การปรับค่าของจำนวนรอบของตลาดหัวหน้าหลักเพื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

##### VARIATION RESPECT TO Tpm #####			
% of Tpm		20%	
% of Tpm	20%	I	18.32
OUTPUT	120.00	i1^2*irms	598.46
D	0.09	i2^2*irms	10.46
L	2381.00	i3^2*irms	0.32
COIL1	17	INPUT	3625.36
COIL2	14	OUTPUT	2979.21
COIL3	8	TORQUE	19.55
COIL4	0	EFF	0.82
Tm	154	PF.	0.95
Tpm	38	AT SWG. No.	21.50

##### VARIATION RESPECT TO Tpm #####			
% of Tpm		30%	
% of Tpm	30%	I	9.00
OUTPUT	120.00	i1^2*irms	216.51
D	0.09	i2^2*irms	11.45
L	2381.00	i3^2*irms	0.78
COIL1	26	INPUT	1831.61
COIL2	21	OUTPUT	1565.97
COIL3	11	TORQUE	10.28
COIL4	0	EFF	0.85
Tm	231	PF.	0.97
Tpm	58	AT SWG. No.	21.50

##### VARIATION RESPECT TO Tpm #####			
% of Tpm		40%	
% of Tpm	40%	I	5.26
OUTPUT	120.00	i1^2*irms	98.68
D	0.09	i2^2*irms	11.68
L	2381.00	i3^2*irms	1.40
COIL1	34	INPUT	1040.93
COIL2	27	OUTPUT	892.26
COIL3	15	TORQUE	5.86
COIL4	0	EFF	0.86
Tm	307	PF.	0.95
Tpm	77	AT SWG. No.	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
% of Tpm		50%	
% of Tpm	50%	I	3.51
OUTPUT	120.00	i1^2*rsm	55.00
D	0.09	i2^2*rrm'	11.77
L	2381.00	i3^2*rrm'	2.17
COIL1	43	INPUT	662.21
COIL2	34	OUTPUT	556.35
COIL3	19	TORQUE	3.65
COIL4	0	EFF	0.84
Tm	384	PF.	0.90
Tpm	96	AT SWG. No.	21.50

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
% of Tpm		60%	
% of Tpm	60%	I	2.59
OUTPUT	120.00	i1^2*rsm	35.95
D	0.09	i2^2*rrm'	11.89
L	2381.00	i3^2*rrm'	3.09
COIL1	51	INPUT	456.74
COIL2	41	OUTPUT	368.90
COIL3	23	TORQUE	2.42
COIL4	0	EFF	0.81
Tm	461	PF.	0.84
Tpm	115	AT SWG. No.	21.50

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
% of Tpm		70%	
% of Tpm	70%	I	2.07
OUTPUT	120.00	i1^2*rsm	26.68
D	0.09	i2^2*rrm'	12.09
L	2381.00	i3^2*rrm'	4.13
COIL1	60	INPUT	334.29
COIL2	48	OUTPUT	254.48
COIL3	27	TORQUE	1.67
COIL4	0	EFF	0.76
Tm	538	PF.	0.77
Tpm	135	AT SWG. No.	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
% of Tpm		80%	
% of Tpm	80%	I	1.75
OUTPUT	120.00	i1^2 <trsm< td=""> <td>21.85</td> </trsm<>	21.85
D	0.09	i2^2 <trrm'< td=""> <td>12.41</td> </trrm'<>	12.41
L	2381.00	i3^2 <trrm'< td=""> <td>5.28</td> </trrm'<>	5.28
COIL1	68	INPUT	256.20
COIL2	55	OUTPUT	179.75
COIL3	30	TORQUE	1.18
COIL4	0	EFF	0.70
Tm	615	PF.	0.70
Tpm	154	AT SWG. No.	21.50

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
% of Tpm		90%	
% of Tpm	90%	I	1.55
OUTPUT	120.00	i1^2 <trsm< td=""> <td>19.22</td> </trsm<>	19.22
D	0.09	i2^2 <trrm'< td=""> <td>12.85</td> </trrm'<>	12.85
L	2381.00	i3^2 <trrm'< td=""> <td>6.53</td> </trrm'<>	6.53
COIL1	77	INPUT	203.89
COIL2	62	OUTPUT	128.38
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.63
Tm	692	PF.	0.63
Tpm	173	AT SWG. No.	21.50

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
% of Tpm		100%	
% of Tpm	100%	I	1.41
OUTPUT	120.00	i1^2 <trsm< td=""> <td>17.74</td> </trsm<>	17.74
D	0.09	i2^2 <trrm'< td=""> <td>13.44</td> </trrm'<>	13.44
L	2381.00	i3^2 <trrm'< td=""> <td>7.84</td> </trrm'<>	7.84
COIL1	86	INPUT	167.56
COIL2	69	OUTPUT	91.63
COIL3	38	TORQUE	0.60
COIL4	0	EFF	0.55
Tm	769	PF.	0.57
Tpm	192	AT SWG. No.	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
	% of Tpm		110%
% of Tpm	110%	I	1.31
OUTPUT	120.00	i1^2*rsn	16.89
D	0.09	i2^2*rrn'	14.16
L	2381.00	i3^2*rrn'	9.21
COIL1	94	INPUT	141.67
COIL2	75	OUTPUT	64.51
COIL3	42	TORQUE	0.42
COIL4	0	EFF	0.46
Tm	846	PF.	0.52
Tpm	211	AT SWG. No.	21.50

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
	% of Tpm		120%
% of Tpm	120%	I	1.24
OUTPUT	120.00	i1^2*rsn	16.38
D	0.09	i2^2*rrn'	14.99
L	2381.00	i3^2*rrn'	10.60
COIL1	103	INPUT	122.87
COIL2	82	OUTPUT	43.98
COIL3	46	TORQUE	0.29
COIL4	0	EFF	0.36
Tm	922	PF.	0.48
Tpm	231	AT SWG. No.	21.50

***** VARIATION RESPECT TO Tpm *****			
	% of Tpm		130%
% of Tpm	130%	I	1.18
OUTPUT	120.00	i1^2*rsn	16.06
D	0.09	i2^2*rrn'	15.92
L	2381.00	i3^2*rrn'	12.02
COIL1	111	INPUT	109.06
COIL2	89	OUTPUT	28.15
COIL3	49	TORQUE	0.18
COIL4	0	EFF	0.26
Tm	999	PF.	0.44
Tpm	250	AT SWG. No.	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#####		VARIATION RESPECT TO Tpm		#####	
% of Tpm		140%			
% of Tpm	140%	I	1.13		
OUTPUT	120.00	i1^2/rsm	15.83		
D	0.09	i2^2/rm'	16.92		
L	2381.00	i3^2/rm'	13.42		
COIL1	120	INPUT	98.82		
COIL2	96	OUTPUT	15.75		
COIL3	53	TORQUE	0.10		
COIL4	0	EFF	0.16		
Tm	1076	PF.	0.42		
Tpm	269	AT SWG. No.	21.50		

#####		VARIATION RESPECT TO Tpm		#####	
% of Tpm		150%			
% of Tpm	150%	I	1.08		
OUTPUT	120.00	i1^2/rsm	15.62		
D	0.09	i2^2/rm'	17.96		
L	2381.00	i3^2/rm'	14.81		
COIL1	128	INPUT	91.21		
COIL2	103	OUTPUT	5.91		
COIL3	57	TORQUE	0.04		
COIL4	0	EFF	0.06		
Tm	1153	PF.	0.40		
Tpm	288	AT SWG. No.	21.50		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวกที่ 2 ข**

**การปรับค่าของน้ำที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำหลักเพื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีโดยที่สืบ ลีจซึ่งห่วยเบิให้ดัดแปลง บื้อหา และต่อว่าวจิงฉิงฉื่อของเอกสารทอด้งซึ่งมีการนำไ้ใช้

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		20.00	
No. of SWG.	20.00	I	1.55
OUTPUT	120.00	$i1^2/rsm$	13.33
D	0.09	$i2^2/rm'$	12.85
L	2381.00	$i3^2/rm'$	6.52
COIL1	77	INPUT	197.80
COIL2	62	OUTPUT	128.19
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.65
Tm	692	PF.	0.61
Tpm	173	AT % OF TPM.	90%

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		20.50	
No. of SWG.	20.50	I	1.55
OUTPUT	120.00	$i1^2/rsm$	14.95
D	0.09	$i2^2/rm'$	12.85
L	2381.00	$i3^2/rm'$	6.52
COIL1	77	INPUT	199.48
COIL2	62	OUTPUT	128.25
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.64
Tm	692	PF.	0.62
Tpm	173	AT % OF TPM.	90%

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		21.00	
No. of SWG.	21.00	I	1.55
OUTPUT	120.00	$i1^2/rsm$	16.88
D	0.09	$i2^2/rm'$	12.85
L	2381.00	$i3^2/rm'$	6.52
COIL1	77	INPUT	201.48
COIL2	62	OUTPUT	128.31
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.64
Tm	692	PF.	0.62
Tpm	173	AT % OF TPM.	90%

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		21.50	
No. of SWG.	21.50	I	1.55
OUTPUT	120.00	$i1^2 \text{rms}$	19.22
D	0.09	$i2^2 \text{rms}$	12.85
L	2381.00	$i3^2 \text{rms}$	6.53
COIL1	77	INPUT	203.89
COIL2	62	OUTPUT	128.38
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.63
$T_m$	692	PF.	0.63
$T_{pm}$	173	AT % OF TPM.	90%

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		22.00	
No. of SWG.	22.00	I	1.55
OUTPUT	120.00	$i1^2 \text{rms}$	22.07
D	0.09	$i2^2 \text{rms}$	12.86
L	2381.00	$i3^2 \text{rms}$	6.53
COIL1	77	INPUT	206.81
COIL2	62	OUTPUT	128.45
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.62
$T_m$	692	PF.	0.64
$T_{pm}$	173	AT % OF TPM.	90%

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		22.50	
No. of SWG.	22.50	I	1.55
OUTPUT	120.00	$i1^2 \text{rms}$	25.61
D	0.09	$i2^2 \text{rms}$	12.86
L	2381.00	$i3^2 \text{rms}$	6.53
COIL1	77	INPUT	210.43
COIL2	62	OUTPUT	128.52
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.61
$T_m$	692	PF.	0.65
$T_{pm}$	173	AT % OF TPM.	90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		23.00	
No. of SWG.	23.00	I	1.55
OUTPUT	120.00	i1^2/rsm	30.07
D	0.09	i2^2/rm'	12.86
L	2381.00	i3^2/rm'	6.53
COIL1	77	INPUT	214.94
COIL2	62	OUTPUT	128.58
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.60
Tm	692	PF.	0.66
Tpm	173	AT % OF TPM.	90Z


***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		23.50	
No. of SWG.	23.50	I	1.55
OUTPUT	120.00	i1^2/rsm	30.07
D	0.09	i2^2/rm'	12.86
L	2381.00	i3^2/rm'	6.53
COIL1	77	INPUT	214.94
COIL2	62	OUTPUT	128.58
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.60
Tm	692	PF.	0.66
Tpm	173	AT % OF TPM.	90Z

***** VARIATION RESPECT TO SWG. *****			
No. of SWG.		24.00	
No. of SWG.	24.00	I	1.55
OUTPUT	120.00	i1^2/rsm	35.79
D	0.09	i2^2/rm'	12.86
L	2381.00	i3^2/rm'	6.53
COIL1	77	INPUT	220.69
COIL2	62	OUTPUT	128.61
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.58
Tm	692	PF.	0.68
Tpm	173	AT % OF TPM.	90Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

##### VARIATION RESPECT TO SWG. #####			
	No. of SWG.	25.00	
No. of SWG.	25.00	I	1.55
OUTPUT	120.00	i1^2#rms	43.29
D	0.09	i2^2#rms	12.86
L	2381.00	i3^2#rms	6.53
COIL1	77	INPUT	228.15
COIL2	62	OUTPUT	128.56
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.56
Tm	692	PF.	0.71
Tpm	173	AT % OF TPM.	90%

##### VARIATION RESPECT TO SWG. #####			
	No. of SWG.	26.00	
No. of SWG.	26.00	I	1.55
OUTPUT	120.00	i1^2#rms	53.37
D	0.09	i2^2#rms	12.85
L	2381.00	i3^2#rms	6.53
COIL1	77	INPUT	238.01
COIL2	62	OUTPUT	128.35
COIL3	34	TORQUE	0.84
COIL4	0	EFF	0.54
Tm	692	PF.	0.74
Tpm	173	AT % OF TPM.	90%



ภาคผนวกที่ 2 ค  
การปรับค่าของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำหลัก  
ต่อพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำช่วยสตาร์ทเมื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.10	0.90	4.47	5.31	8.85	34.00	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.20	0.90	7.07	8.39	10.39	30.00	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.30	0.90	8.76	10.40	11.60	27.50	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.40	0.90	9.46	11.23	12.24	26.00	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A	Ratio K	StartingT	ratio	StartingI	SWG.	SWG.
aux/main	aux/main	(Ts)	(Ts/Tf1)	(Is)	aux	main
0.50	0.90	9.93	11.78	12.78	25.00	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A	Ratio K	StartingT	ratio	StartingI	SWG.	SWG.
aux/main	aux/main	(Ts)	(Ts/Tf1)	(Is)	aux	main
0.60	0.90	10.21	12.12	13.22	24.00	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A	Ratio K	StartingT	ratio	StartingI	SWG.	SWG.
aux/main	aux/main	(Ts)	(Ts/Tf1)	(Is)	aux	main
0.70	0.90	10.37	12.30	13.59	23.00	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A	Ratio K	StartingT	ratio	StartingI	SWG.	SWG.
aux/main	aux/main	(Ts)	(Ts/Tf1)	(Is)	aux	main
0.80	0.90	10.43	12.37	13.90	22.50	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.90	0.90	10.43	12.38	14.15	22.00	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.00	0.90	10.39	12.34	14.36	21.50	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.10	0.90	10.39	12.34	14.36	21.50	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.20	0.90	10.34	12.27	14.53	21.00	21.50

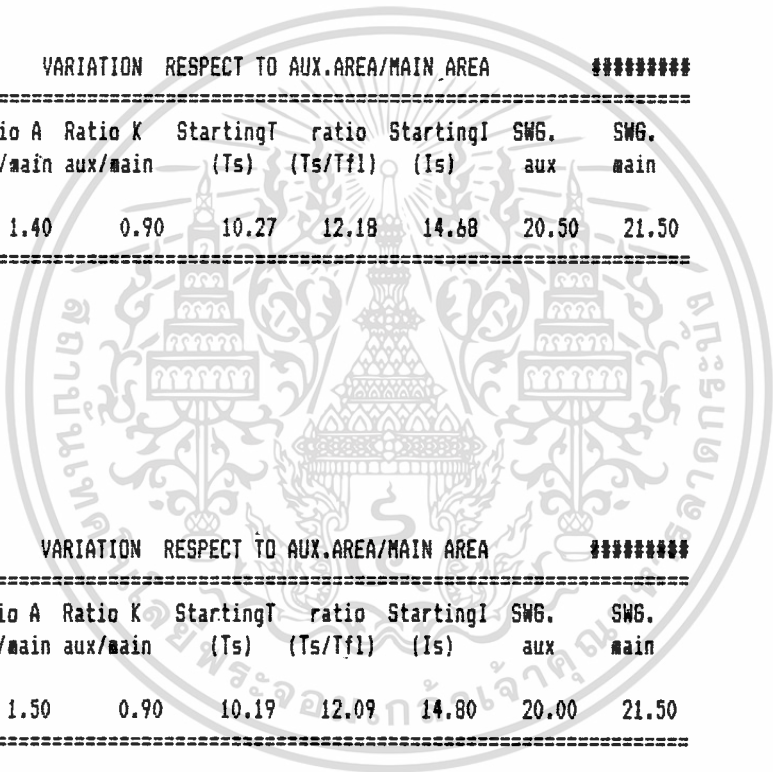
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.30	0.90	10.27	12.18	14.68	20.50	21.50


***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.40	0.90	10.27	12.18	14.68	20.50	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.50	0.90	10.19	12.09	14.80	20.00	21.50

***** VARIATION RESPECT TO AUX.AREA/MAIN AREA *****						
Ratio A aux/main	Ratio K aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.60	0.90	10.19	12.09	14.80	20.00	21.50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวกที่ ๒ ง  
การปรับค่าของจำนวนรอบของชุดลดตัวนำหลัก  
ต่อจำนวนรอบของชุดลดตัวนำช่วยสตาร์ทเพื่อหาค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.10	0.80	4.06	4.82	177.52	22.50	21.50

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.20	0.80	6.71	7.97	80.26	22.50	21.50

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.30	0.80	8.32	9.87	49.11	22.50	21.50

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.40	0.80	9.26	10.99	34.46	22.50	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.50	0.80	9.81	11.64	26.29	22.50	21.50

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.60	0.80	10.12	12.01	21.24	22.50	21.50

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.70	0.80	10.30	12.22	17.90	22.50	21.50

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.80	0.80	10.39	12.33	15.58	22.50	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
0.90	0.80	10.43	12.37	13.90	22.50	21.50

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.00	0.80	10.43	12.38	12.64	22.50	21.50

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.10	0.80	10.42	12.37	11.68	22.50	21.50

##### VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING #####

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingI (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.20	0.80	10.39	12.34	10.93	22.50	21.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.30	0.80	10.36	12.30	10.33	22.50	21.50

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.40	0.80	10.32	12.25	9.84	22.50	21.50

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.50	0.80	10.28	12.20	9.45	22.50	21.50

\*\*\*\*\* VARIATION RESPECT TO AUX.WINDING/MAIN WINDING \*\*\*\*\*

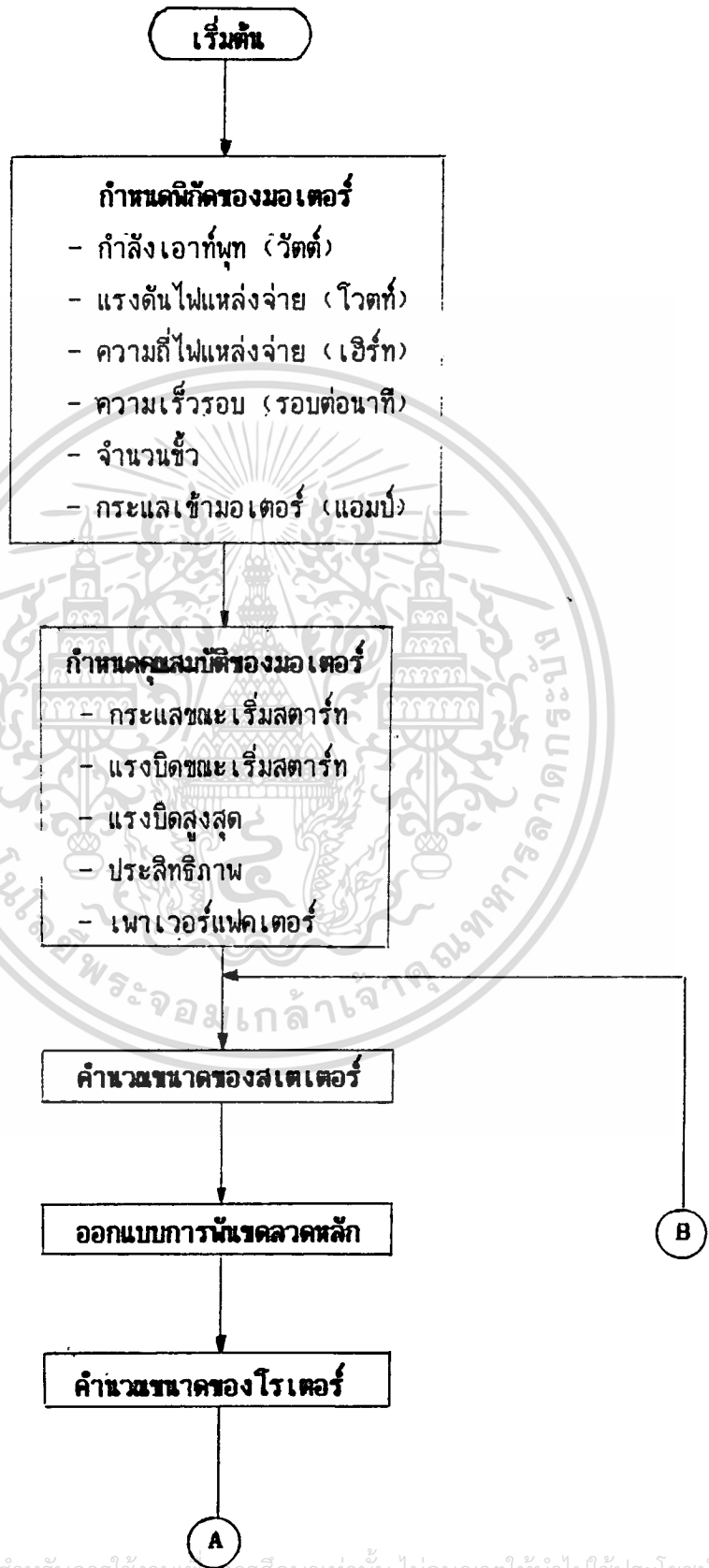
Ratio K aux/main	Ratio A aux/main	StartingT (Ts)	ratio (Ts/Tf1)	StartingI (Is)	SWG. aux	SWG. main
1.60	0.80	10.24	12.16	9.11	22.50	21.50

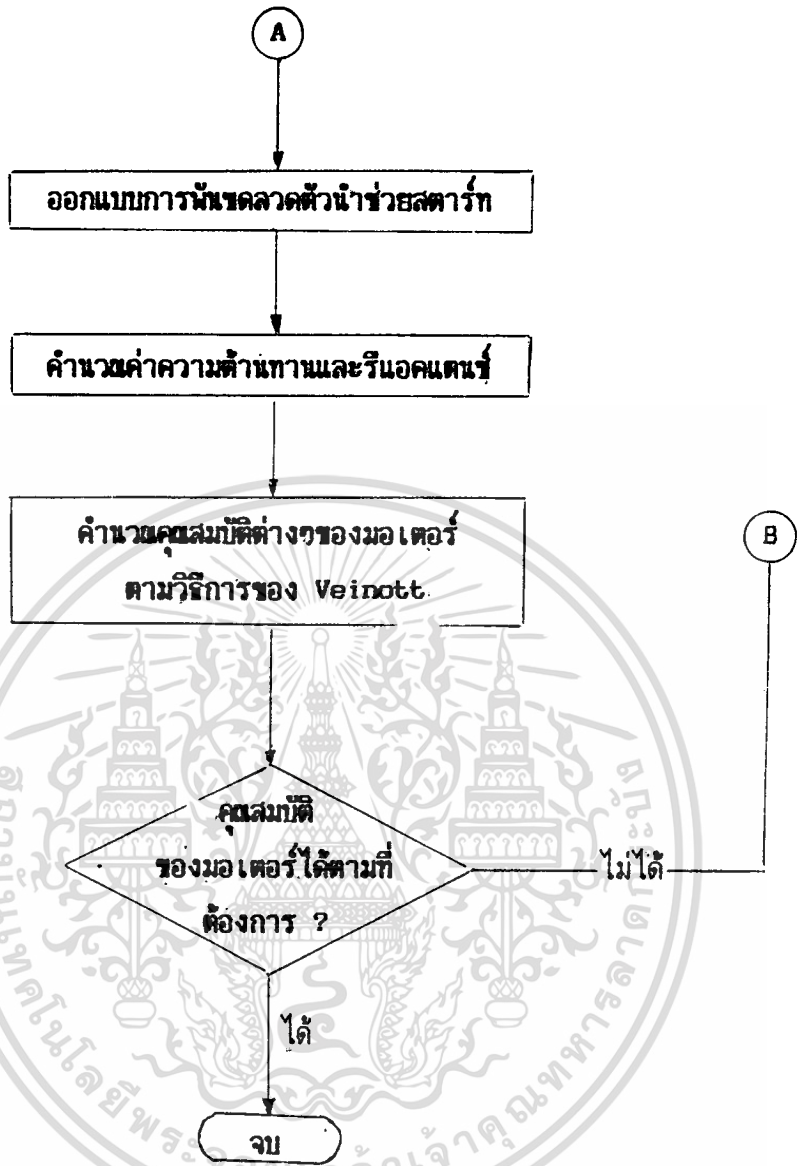
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

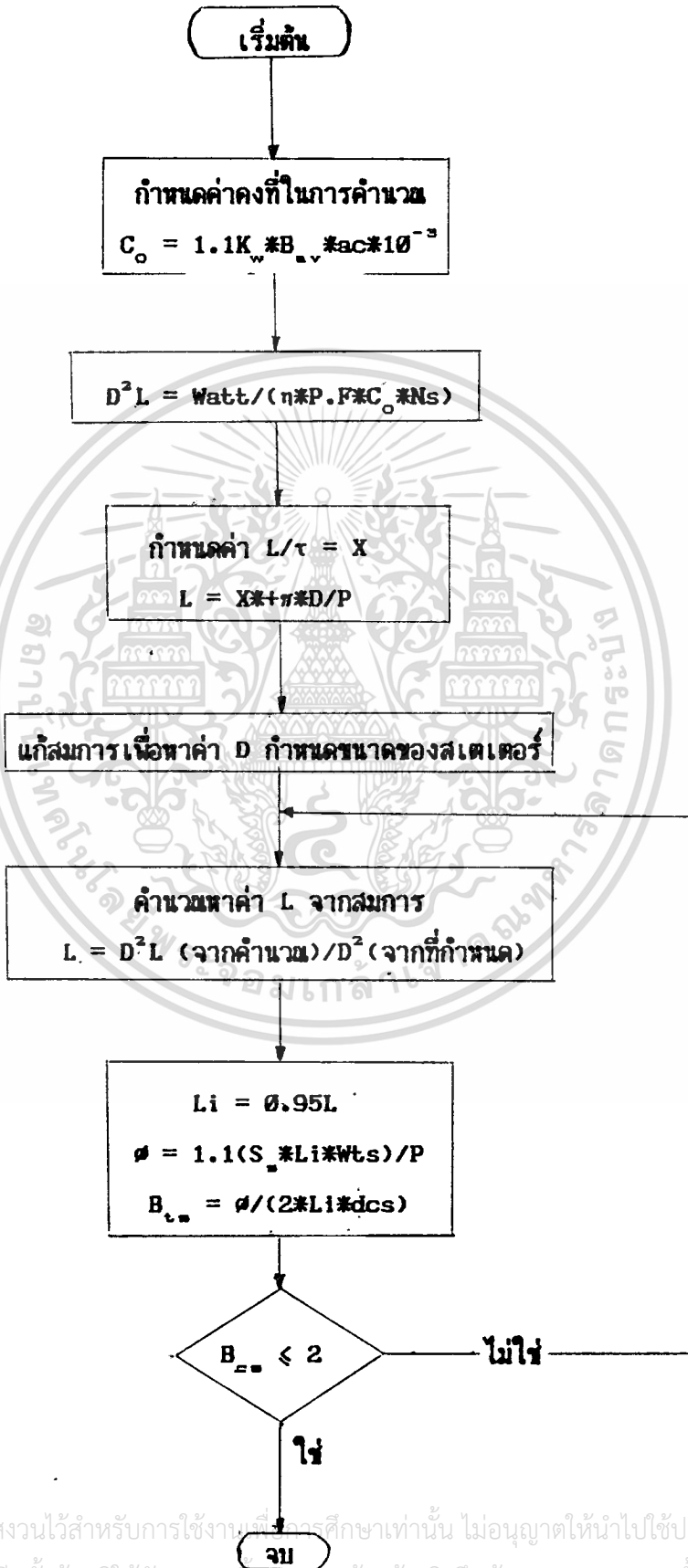
## ขั้นตอนในการออกแบบ



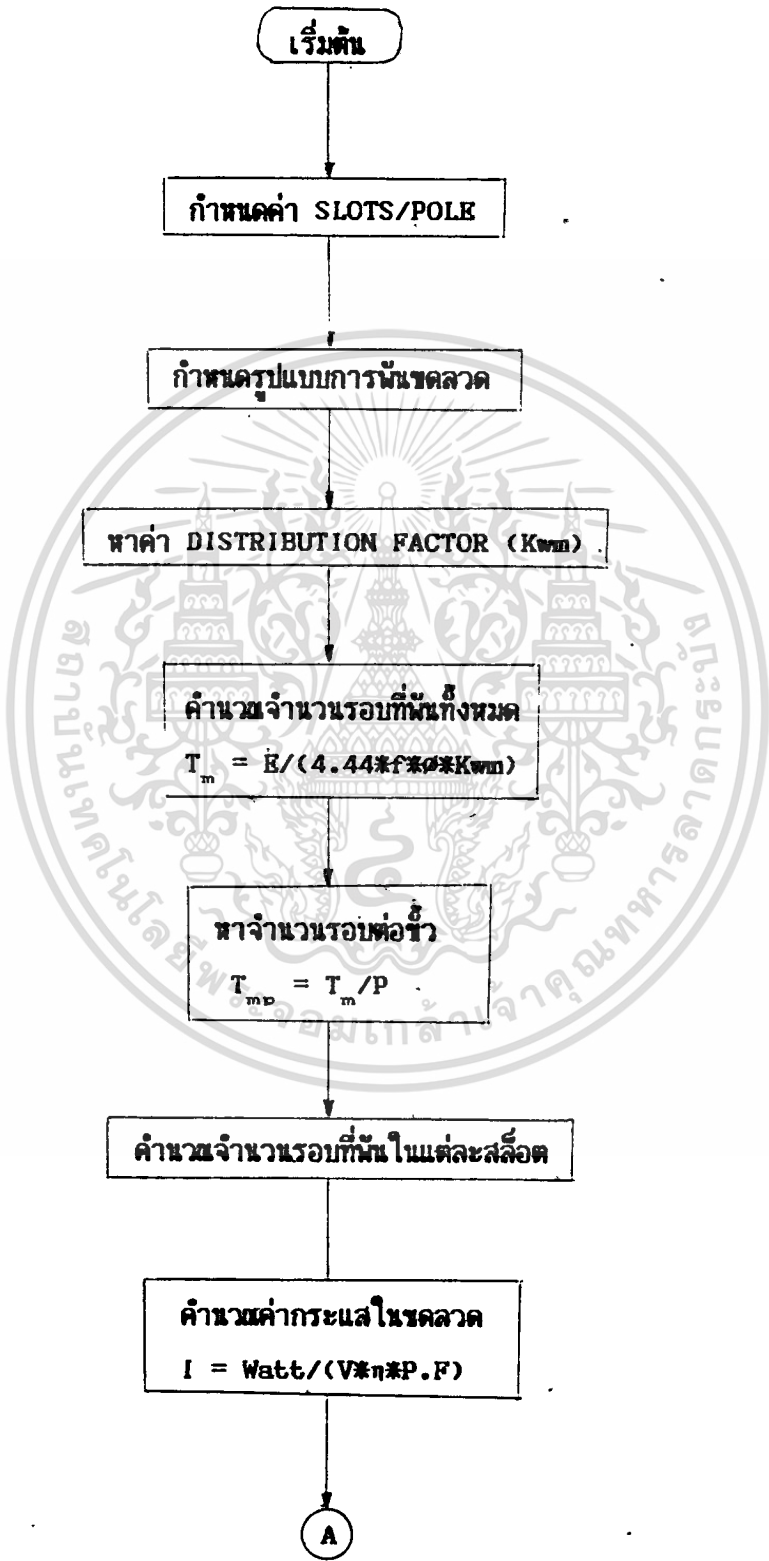


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การออกแบบสเตเตอร์



# การออกแบบขดลวดหลัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

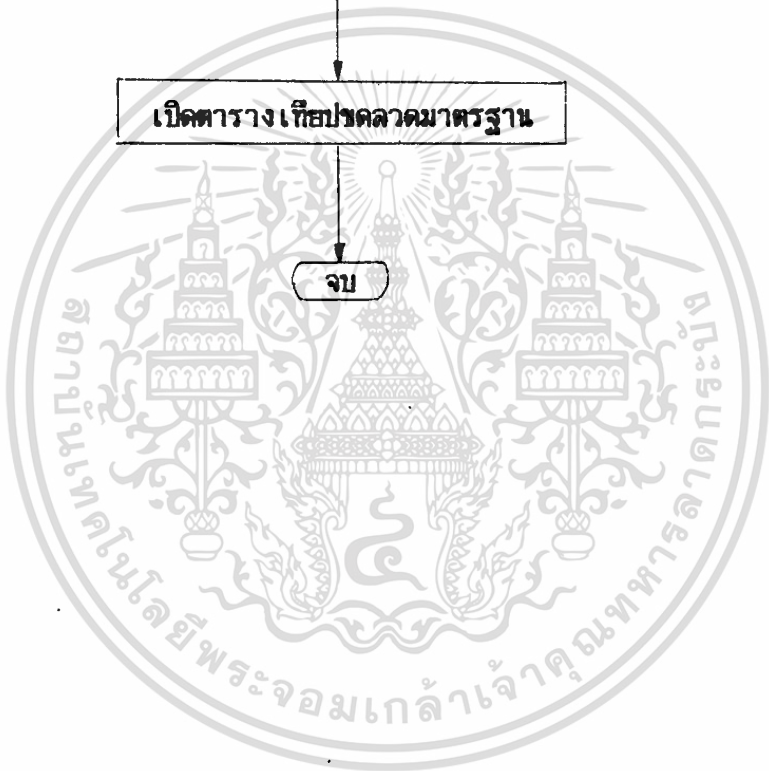
A

กำหนดค่า CURRENT DENSITY ( $\delta$ )

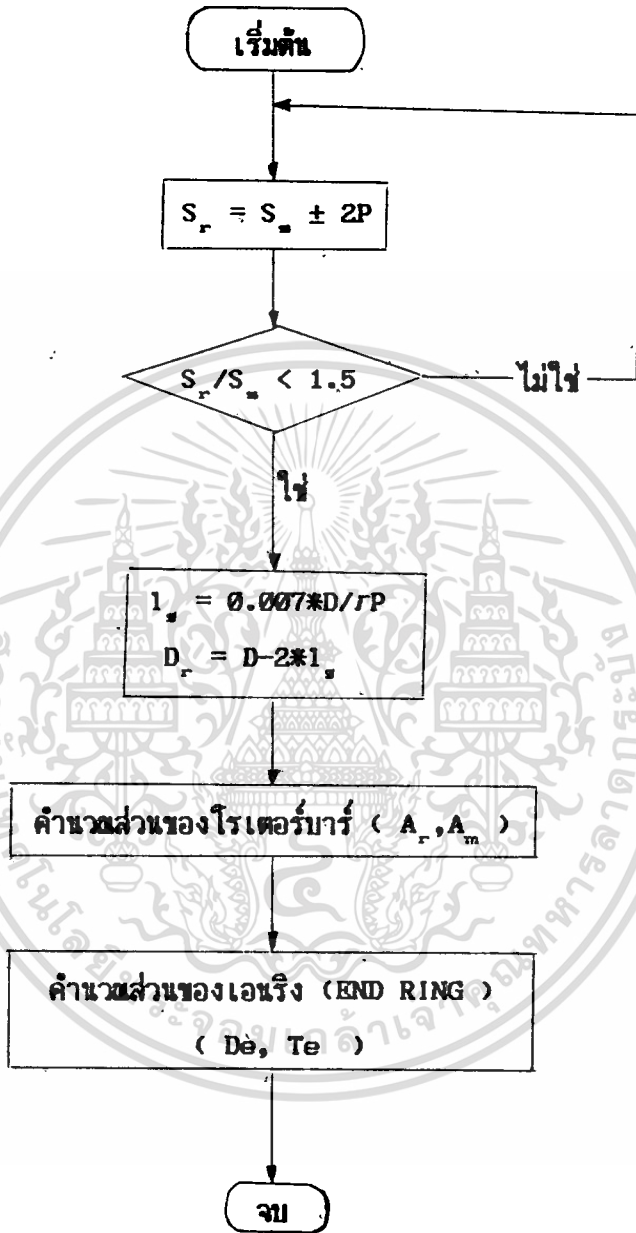
หาค่าพื้นที่หน้าตัดของขดลวด  
 $A_m = I / \delta$

เปิดตารางเทียบขดลวดมาตรฐาน

จบ

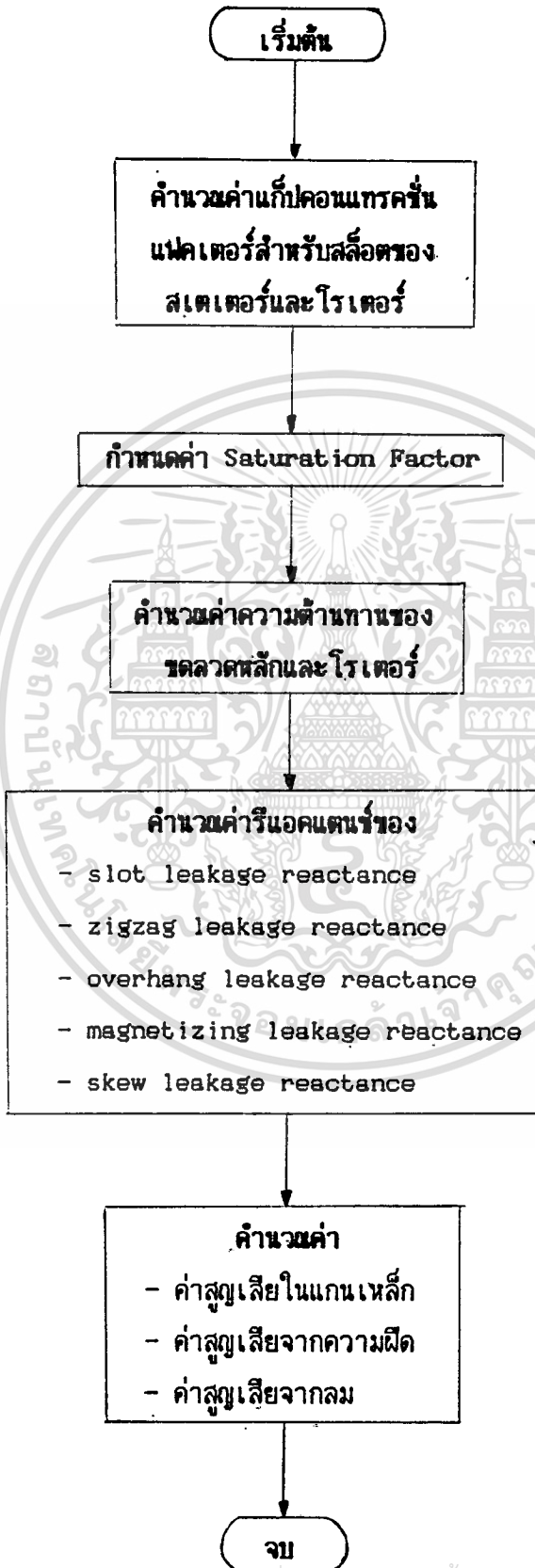


# ออกแบบโรเตอร์



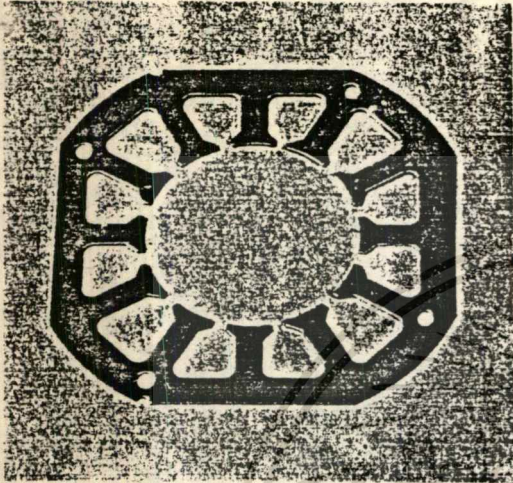
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การคำนวณค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของมอเตอร์

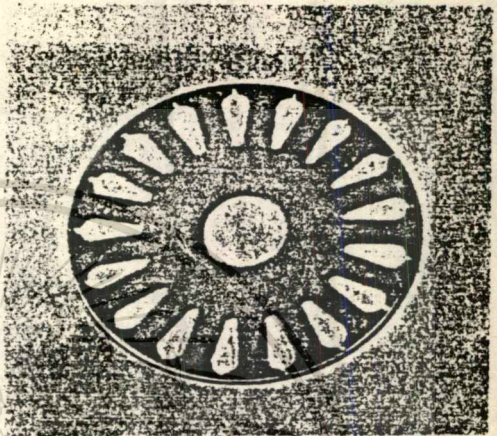


ภาคผนวกที่ 4

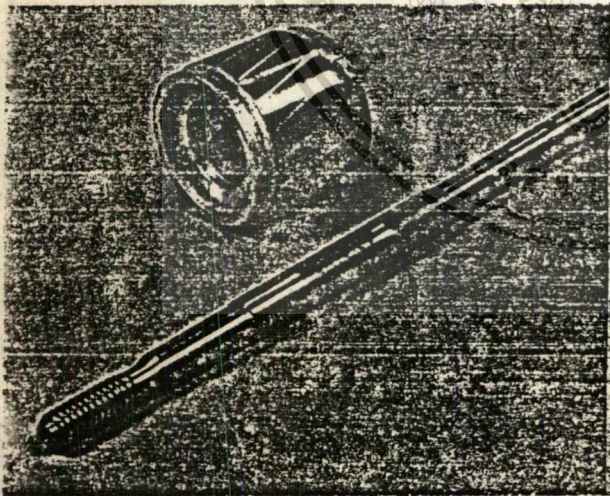
ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว



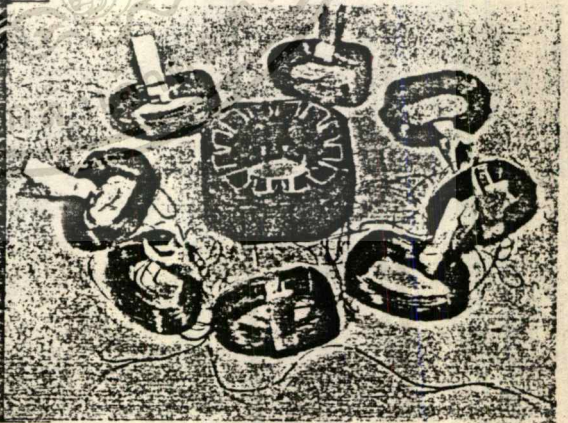
แผ่นแกนเหล็กสเตเตอร์



แผ่นแกนเหล็กโรเตอร์



ท่อนโรเตอร์และเฟลา

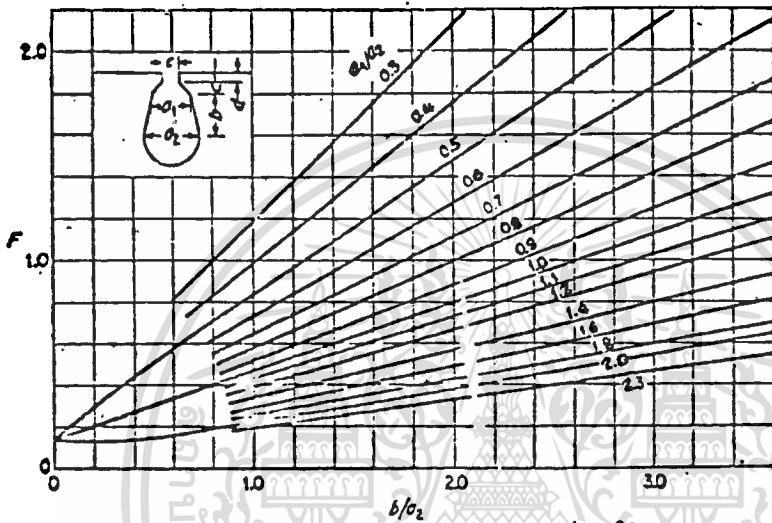


แกนสเตเตอร์และชุดขดลวดหลักและชุดขดลวดช่วยสตาร์ท

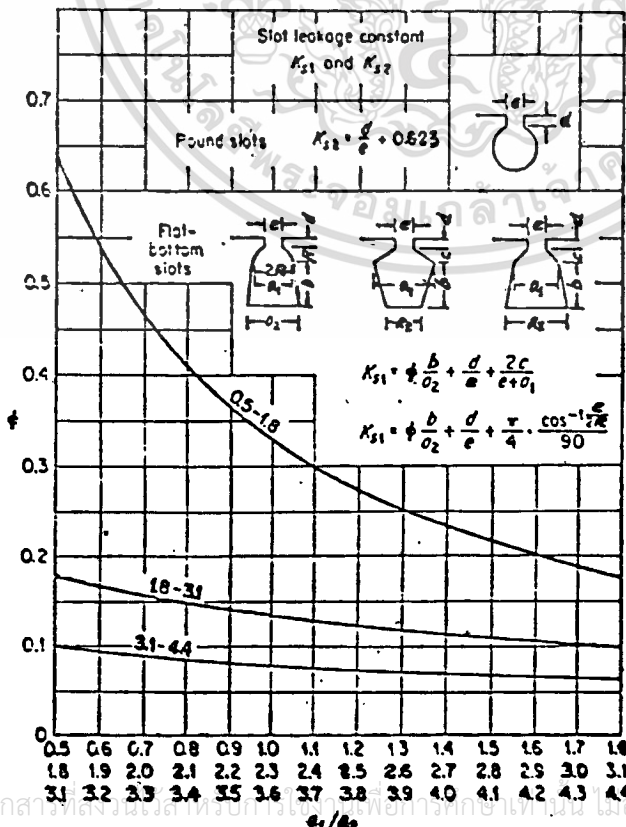
### ภาคผนวกที่ 5

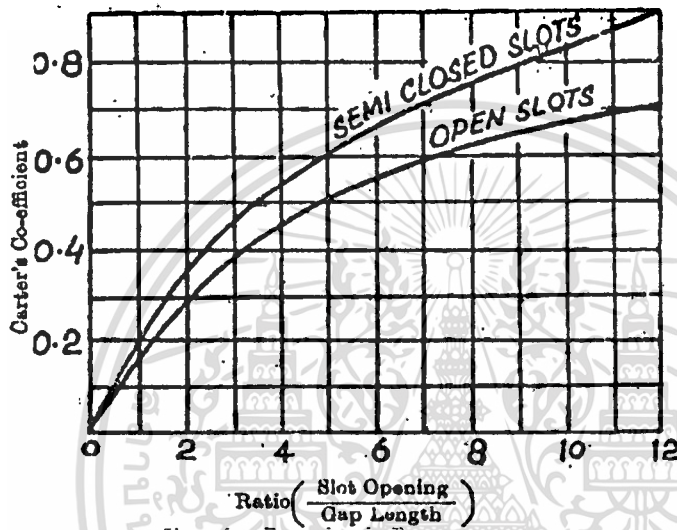
กราฟที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าคงที่ของมอเตอร์

ค่าเปอร์เซ็นต์ของสล๊อต  $\lambda = \mu_0 k_m$



Slot constant for round-bottom slots,  $K_s = F + \frac{d}{e} + \frac{2c}{e+a_1}$





กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์เตอร์และอัตราส่วนระหว่างความยาวปากสลิตต่อความยาวแอร์แกป

## กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ก็ด้วยความอนุเคราะห์และช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านและหน่วยงานหลายฝ่าย จึงขอกล่าวานามมา ณ ที่นี้เพื่อแสดงความขอบคุณ

1. ผศ. ทองไข่ อรรถเศรษฐ์ ในการให้คำปรึกษาและแนะนำแนวความคิดต่างๆ ทั้งยังให้ความช่วยเหลือในด้านอื่นๆ ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้
2. อ.วิเชียร ลิ้มโพธิ์ทอง ในการให้คำปรึกษาและแนะนำแนวความคิดต่างๆ ทั้งยังให้ความช่วยเหลือในด้านอื่นๆ ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้
3. ภาควิชาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน ในการให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และบุคลากร
4. บริษัทชัชโยธินเวิลด์เซลส์อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ในการให้ข้อมูลและมอเตอร์ตัวอย่าง รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ในด้านสถานที่ ซึ่งช่วยในการออกแบบมอเตอร์ได้เป็นอย่างมาก



## หนังสืออ้างอิง

1. A.K. Sawhney, "A course in Electrical Machine Design",  
Dhanpat Rai & Sons, 1128 p., 1983
2. Cyril G. Veinott, "Fractional Horsepower Electric Motors",  
3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1970
3. Cyril G. Veinott, "Performance Calculation on Induction Motors",  
Trans. AIEE, Vol.51, September, 1932, pp.743-754
4. Cyril G. Veinott, "Theory and Design of Small Induction Motors",  
McGraw-Hill Book Company, INC., 477 p., 1959.

