



Auxiliary Phase Design of Single-Phase Induction Motor

จัดทำโดย



ปริญญาโท สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1)2876

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ปีการศึกษา 2533 12.26.2533
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2533

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง Auxilary Phase Design of Single-Phase Induction
Motor

ผู้จัดทำ

1. นาย บัณฑิตกานต์ ประดิษฐ์กุล 301121

2. นาย ประวิทย์ ครองเมือง 301141



Am am
.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ทองใบ อรรถเศรษฐ)

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ.....	a
บทนำ.....	b
บทที่ 1 ประเภทของมอเตอร์เฟสเดียว.....	1
1. มอเตอร์แบบแยกเฟส.....	1
2. มอเตอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	2
2.1 มอเตอร์แบบใช้ตัวเก็บประจุช่วยสตาร์ท.....	2
2.2 มอเตอร์แบบตัวเก็บประจุถาวร.....	3
2.3 มอเตอร์แบบใช้ตัวเก็บประจุสองตัว.....	4
3. มอเตอร์แบบเซดโพล.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน.....	8
ผลลัพธ์ของแรงบิด.....	16
วงจรมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	18
การทดสอบขณะลือคโรเตอร์.....	22
การทดสอบขณะไร้อโหลด.....	23
แรงบิดขณะสตาร์ท.....	26
แรงบิดขณะสตาร์ทที่สูงสุดต่อกระแสขณะสตาร์ท.....	32
สมการทั่วไปของมอเตอร์ 2 เฟสแบบไม่สมคณย์.....	34
แรงบิด.....	38
สมการขณะมอเตอร์สตาร์ท.....	39
โวลท์เตจคร่อมตัวเก็บประจุขณะลือคโรเตอร์.....	40
กระแสอินพุทขณะลือคโรเตอร์.....	41
เซอร์คิวลาร์มิลเปอร์แอมแปร์.....	41
บทที่ 3 การออกแบบขดลวดสตาร์ท.....	42
การเลือกช่วงค่าอัตราส่วนการพันจากข้อจำกัดเรื่องแรงบิด.....	43
การเลือกช่วงค่าอัตราส่วนการพันจากข้อจำกัดเรื่องแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ.....	45
การเลือกช่วงค่าอัตราส่วนการพันจากข้อจำกัดเรื่องกระแสขณะลือคโรเตอร์.....	47
การเลือกช่วงค่าอัตราส่วนการพันจากข้อจำกัดเรื่องเซอร์คิวลาร์มิลเปอร์แอมแปร์... ..	49
การเลือกช่วงค่าอัตราส่วนการพันจากข้อจำกัดเรื่องความหนาแน่นของขงลือค.....	51
ตัวอย่างการออกแบบ.....	52
บทที่ 4 โปรแกรมและการทดสอบ.....	55
การทดสอบ.....	55

การทำงานของโปรแกรม.....	55
ข้อมูลที่จากการใช้โปรแกรมคำนวณ.....	57
กราฟที่ได้จากโปรแกรม.....	61
โปรแกรมการออกแบบขวดขวดช่วย.....	69
บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์.....	77
กิตติกรรมประกาศ.....	78
หนังสืออ้างอิง.....	79



การออกแบบขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

นาย บัณฑิตกานต์ ประดิษฐ์กุล

นาย ประวิทย์ ครองเมือง

อาจารย์ที่ปรึกษา

พศ. ทองใบ อรรถเฝ้าชัย

บทคัดย่อ

ปฏิญานี้ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงวิธีการออกแบบขดลวดช่วย ซึ่ง เป็นขดลวดช่วยในการสตาร์ทของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยในส่วนที่ทำ จะเป็นการออกแบบขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบใช้ตัวเก็บประจุ ช่วยสตาร์ท แต่วิธีการที่ใช้ในการออกแบบก็ยังสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบ ขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบอื่น ๆ ได้ด้วย เพียงแต่ต้องเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์บางตัวเพื่อความเหมาะสมกับวงจรเทียบเท่าของขดลวดของมอเตอร์ เท่านั้น โดยในการออกแบบนั้นจะเป็นการออกแบบเพื่อจะหาอัตราส่วนการพัน ของจำนวนขดลวดระหว่างขดลวดช่วยกับขดลวดหลักที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ รั้วจำกัดต่าง ๆ ที่สำคัญ ซึ่งมีอยู่ 5 อย่างด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Auxiliary Phase Design of Single-Phase Induction Motor

Bunditkant Praditkool

Prawit Crongmuang

Advisor

Assistant Professor:

Thongbai Attaseth

Abstract

This thesis is the studying of design method of auxiliary phase in single phase induction motor which employed in motor starting. In this thesis is the auxiliary phase design of capacitor-start motor. This design method can also be applied to other types of single phase induction motors but some parameters must be altered to suit its equivalent circuit. The objective of this designing is to find the optimized number of turns of auxiliary phase under five limitation conditions

บทนำ

ปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาถึงวิธีการออกแบบขดลวดอ็อกซีเล็ยรีเฟลของมอเตอร์เหนืยวนำแบบเฟลเดี่ยว โดยในการออกแบบได้เลือกใช้คาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์เป็นตัวอย่างในการออกแบบ แต่วิธีนี้สามารถนำไปใช้กับมอเตอร์เหนืยวเฟลเดี่ยวได้ทุกแบบ เนื่องจากอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีเดียวกัน โดยวิธีการออกแบบจะเป็นวิธีการออกแบบที่หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของอัตราส่วนจำนวนรอบของขลวดช่วยต่อขลวดหลัก ดังนั้นจึงเป็นการประยุกต์วิธีการที่เรียกว่า optimization technique มาใช้ในการออกแบบ ประโยชน์ที่จะได้รับจากปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ก็คือจะทำให้ทราบวิธีการออกแบบขดลวดช่วยของมอเตอร์ได้ ซึ่งจะช่วยให้มอเตอร์ที่ได้รับการออกแบบมานั้นมีสภาวะในขณะสตาร์ทเป็นไปตามที่เราต้องการ ทำให้สภาวะขณะสตาร์ทดีขึ้น และขณะหมุนปกติก็ดีด้วยอันเนื่องมาจากขดลวดหลักซึ่งได้ออกแบบไว้แล้ว โดยที่วิธีการออกแบบนี้เป็นวิธีการใหม่ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร IEEE มาแล้ว จึงนับว่ามีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมมอเตอร์ในประเทศมาก เนื่องจากจะทำให้ไม่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์จากต่างประเทศอีกต่อไป

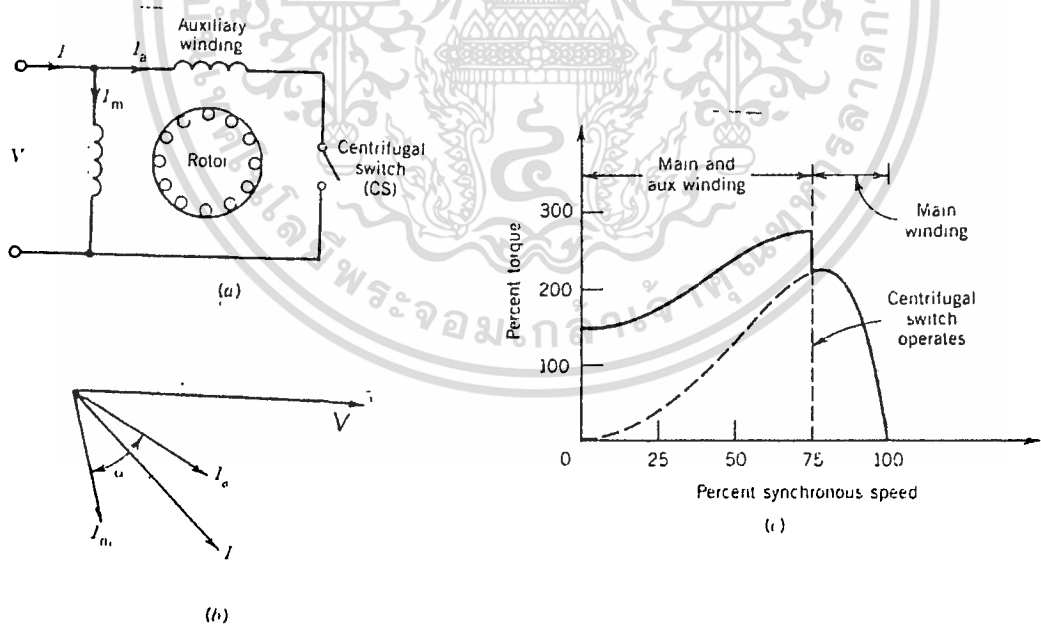
บทที่ 1

การแบ่งประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single phase induction motors)

สามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะของวิธีที่ใช้ในการทำให้กระแสในขดลวดหลัก (Main Winding) และขดลวดช่วย (Auxilliary Winding) เพื่อให้เกิดความแตกต่างของเฟสขึ้น มอเตอร์แบบต่าง ๆ ที่ใช้กันมากมีดังนี้คือ

1. มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split-Phase Motors)

มอเตอร์แบบนี้จะมีขดลวดหลักกับขดลวดช่วยต่อขนานกันอยู่โดยขดลวดช่วยจะต่ออนุกรมกับสวิตช์เซอรัฟิวกัล (Centrifugal Switch) เพื่อทำหน้าที่ปลดขดลวดช่วยออกเมื่อความเร็วของมอเตอร์ถึงค่าประมาณ 75% ของความเร็วซิงโครนัส ขดลวดช่วยของมอเตอร์แบบแยกเฟสนี้จะมีจำนวนน้อยกว่าของขดลวดหลักด้วยทำให้มีค่าของอัตราส่วนระหว่างความต้านทานต่อรีแอกแตนซ์ (reactance) มีค่าสูงกว่าขดลวดหลัก ดังนั้นจึงทำให้กระแสในขดลวดช่วย นำหน้า (lead) กระแสในขดลวดหลักไปประมาณ 30 องศาทางไฟฟ้า และเกือบจะ ทับเฟส (in phase) กับโวลท์ที่ตก เนื่องจากมุมต่างเฟสระหว่างกระแสในขดลวดทั้งสองมีค่าน้อยกว่า 90 องศาทางไฟฟ้ามาก จึงทำให้แรงบิดขณะสตาร์ท (starting torque) มีค่าต่ำ และกระแสขณะสตาร์ทที่มีค่าสูง แรงบิดขณะสตาร์ทสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ โดยการต่อความต้านทานอนุกรมเพิ่มเข้าไปในขดลวดช่วย



รูป 1.1 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส

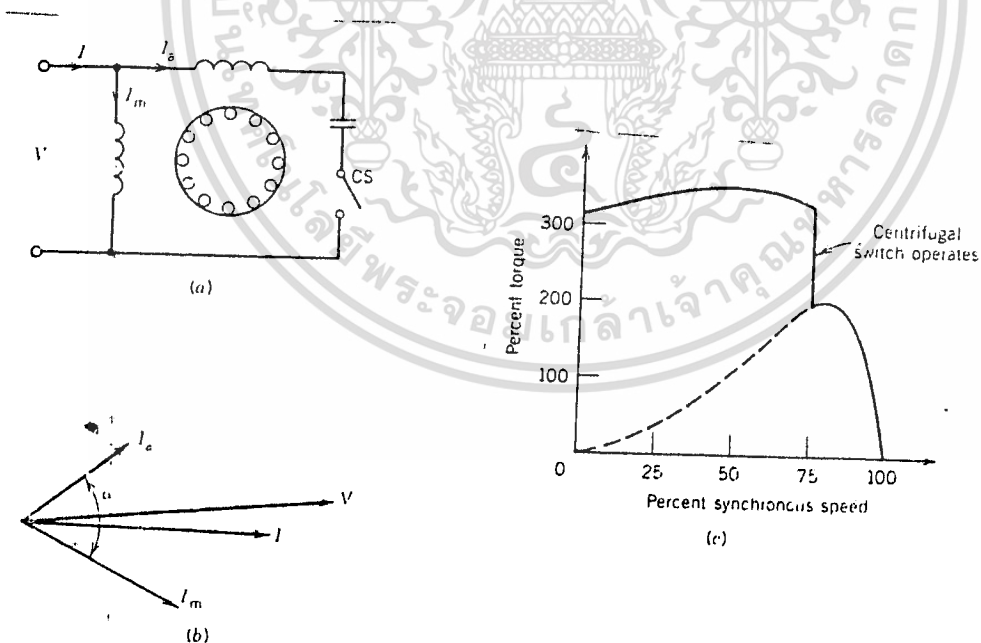
มอเตอร์แบบแยกเฟสจะมีราคาไม่แพงและเนื่องจากให้แรงบิดขณะสตาร์ทต่ำจึงมักจะนำไปใช้งานที่ต้องการแรงบิดขณะสตาร์ทต่ำเช่น พัดลม เลื่อยไฟฟ้า และโม่บด

2. มอเตอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitor Motors).

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบใช้ตัวเก็บประจุหนึ่งเฟส เป็นมอเตอร์ที่ต้องต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรของขดลวดช่วยเพื่อเพิ่มระยะห่างของเฟส (phase shift) ระหว่างกระแสในขดลวดหลักและขดลวดช่วย ซึ่งยังแบ่งออกเป็นแบบย่อย ๆ ได้อีกหลายแบบคือ

2.1 มอเตอร์แบบใช้ตัวเก็บประจุช่วยสตาร์ท (Capacitor-Start Motors)

มอเตอร์แบบนี้จะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับขดลวดช่วย เช่นเดียวกับมอเตอร์แบบแยกเฟส ซึ่ง เมื่อความเร็วของมอเตอร์สูงถึงประมาณ 75% ของความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) สวิตช์เซอร์คูลิฟิคัลก็จะทำการปลดขดลวดช่วยออกไป เนื่องจากขดลวดช่วยมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมอยู่ด้วย ทำให้มุมต่างเฟสระหว่างกระแสในขดลวดหลักและขดลวดช่วยมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้แรงบิดขณะสตาร์ทที่มีค่าสูงชันมากและกระแสขณะสตาร์ทที่มีค่าลดลง แต่ถ้ามอเตอร์มีขนาดน้อยกว่า 1 แรงม้าไปจนถึง 10 แรงม้า ที่แรงดัน 110 โวลต์ ตัวเก็บประจุที่ใช้จะเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีราคาไม่แพงและสามารถให้แรงบิดขณะสตาร์ทได้ถึง 4 เท่าของแรงบิดที่พิกัด (กราฟแสดงแรงบิดกับความเร็วรอบแสดงดังรูป 1.2) มอเตอร์แบบนี้ราคาจะสูงกว่าแบบแยกเฟสอื่นเนื่องมาจากราคาของตัวเก็บประจุที่เพิ่มเข้ามา (ขนาดของตัวเก็บประจุโดยประมาณที่ขนาดกำลังงานต่าง ๆ กันแสดงดังตารางที่ 1.1) จุดเด่นของมอเตอร์แบบใช้ตัวเก็บประจุช่วยสตาร์ทคือให้แรงบิดขณะสตาร์ทที่สูง



รูป 1.2 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบใช้ตัวเก็บประจุช่วยสตาร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับมอเตอร์แบบใช้ตัวเก็บประจุช่วยสตาร์ท ที่ขนาดกำลังงานของมอเตอร์ต่างกัน

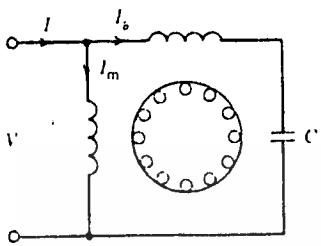
ขนาดพิกัดแรงม้า (Horse Power Rating)	ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยประมาณ (Micro Farads)
1	400
1/2	300
1/3	175
1/4	135
1/8	70

2.2 มอเตอร์แบบตัวเก็บประจุถาวร (Permanant-Capacitor Motor)

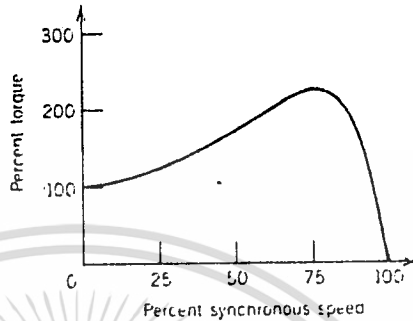
มอเตอร์แบบนี้จะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับขดลวดช่วย แต่จะไม่มีสวิตช์ เซอร์ติฟิเกตลดขดลวดช่วยออกทำให้ราคาลดลง ในการออกแบบขดลวดช่วยและขนาดของตัวเก็บประจุ จึงต้องมีการพิจารณากันระหว่างราคา แรงบิดขณะสตาร์ท และประสิทธิภาพในขณะที่ใช้งาน มอเตอร์แบบนี้จะมีเสียงรบกวนต่ำ ประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลัง (power factor) ค่อนข้างสูง การที่มอเตอร์แบบนี้ไม่มีสวิตช์ เซอร์ติฟิเกต จึงทำให้ลดขนาดและราคาลงได้และปรับปรุงความเชื่อถือ (reliability) ได้ดีขึ้น

ตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 μF และเนื่องจากตัวเก็บประจุของมอเตอร์แบบนี้จะทำงานตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงใช้ชนิดกระดาษน้ำมัน (AC oil paper type) ดังในรูป 1.3 ซึ่งแสดงวงจรและลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดตัวเก็บประจุถาวร

เบรคควานท์ทอร์คของมอเตอร์แบบนี้ต่ำกว่ามอเตอร์แบบอื่น ๆ แต่เราสามารถเพิ่มแรงบิดขณะสตาร์ทให้สูงขึ้นได้ โดย การออกแบบให้มีความต้านทานของโรเตอร์มีค่าสูง ซึ่งจะทำให้เพิ่มแรงบิดขณะทำงานปกติจะต่ำลง ความเร็วของมอเตอร์ที่มีความต้านทานโรเตอร์สูงนี้ สามารถควบคุมได้ โดยการเปลี่ยนแท่งของขดลวดในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในมอเตอร์แบบเชดโพล (shaded-pole) มอเตอร์แบบนี้มักจะใช้ในงานเช่น พัดลมคอมเพรสเซอร์



(a)



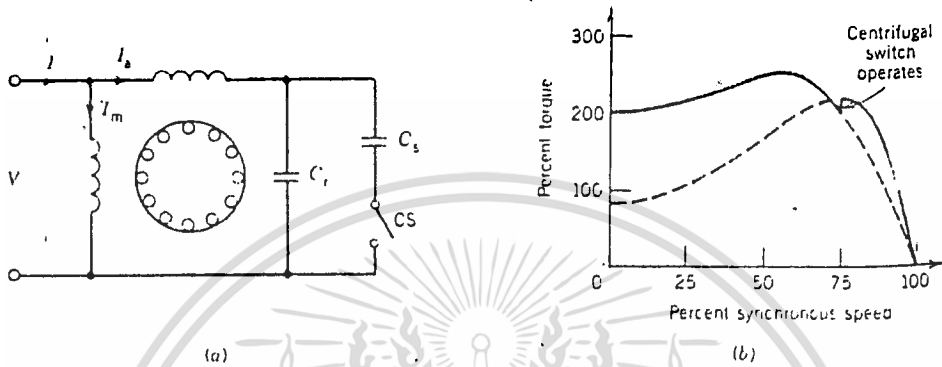
(b)

รูป 1.3 แสดงมอเตอร์แบบตัวเก็บประจุถาวร

2.3 มอเตอร์แบบใช้ตัวเก็บประจุสองตัว (Two-Value Capacitor)

มอเตอร์แบบนี้จะใช้ตัวเก็บประจุ 2 ตัวต่อขนานกันโดยตัวหนึ่งคือ C_p ทำหน้าที่ขณะเริ่มสตาร์ท ซึ่งจะเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ มีขนาดความจุมากกว่าอีกตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ขณะใช้งานปกติคือ C_r ซึ่งจะเป็นแบบกระดาษน้ำมัน (oil paper type) และมีขนาดความจุน้อยกว่าแบบแรก ส่วนขดลวดช่วยก็จะต้องออกแบบเพื่อให้สามารถทำงานได้ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง ตัวเก็บประจุ 2 ชุดทำให้การทำงานของมอเตอร์ทั้งขณะสตาร์ทและขณะใช้งานทำงานในลักษณะมอเตอร์สองเฟสได้ โดยที่ความเร็วขณะที่ใช้งานปกติจะใกล้เคียงกับความเร็วที่ทำให้เกิดแรงม้าที่พิกัดซึ่งประมาณที่ความเร็วที่ทำให้เกิดแรงม้าที่ 80% ของพิกัด

ตัวอย่างขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ที่มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ตัวเก็บประจุ C_p มีค่าประมาณ 300 ไมโครฟารัด และตัวเก็บประจุ C_r มีค่าประมาณ 40 ไมโครฟารัด มอเตอร์แบบนี้ขณะใช้งานจะทำงานได้เรียบมากและไม่มีเสียงรบกวน และประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์แบบที่ทำงานขณะใช้งานด้วยขดลวดหลักอย่างเดียว แต่ในขณะเดียวกันราคาของมอเตอร์ชนิดนี้ก็จะแพงกว่ามอเตอร์ชนิดอื่น ๆ ด้วย



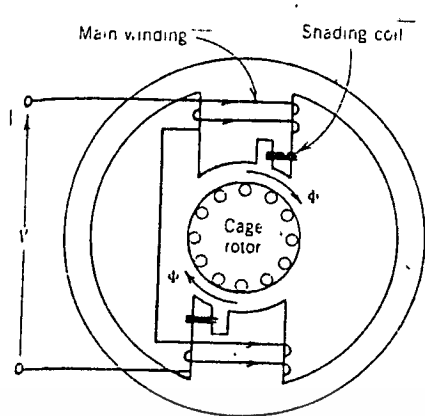
รูป 1.4 แสดงมอเตอร์แบบใช้ตัวเก็บประจุสองตัว

3. มอเตอร์แบบเชดโพล (Shaded-Pole)

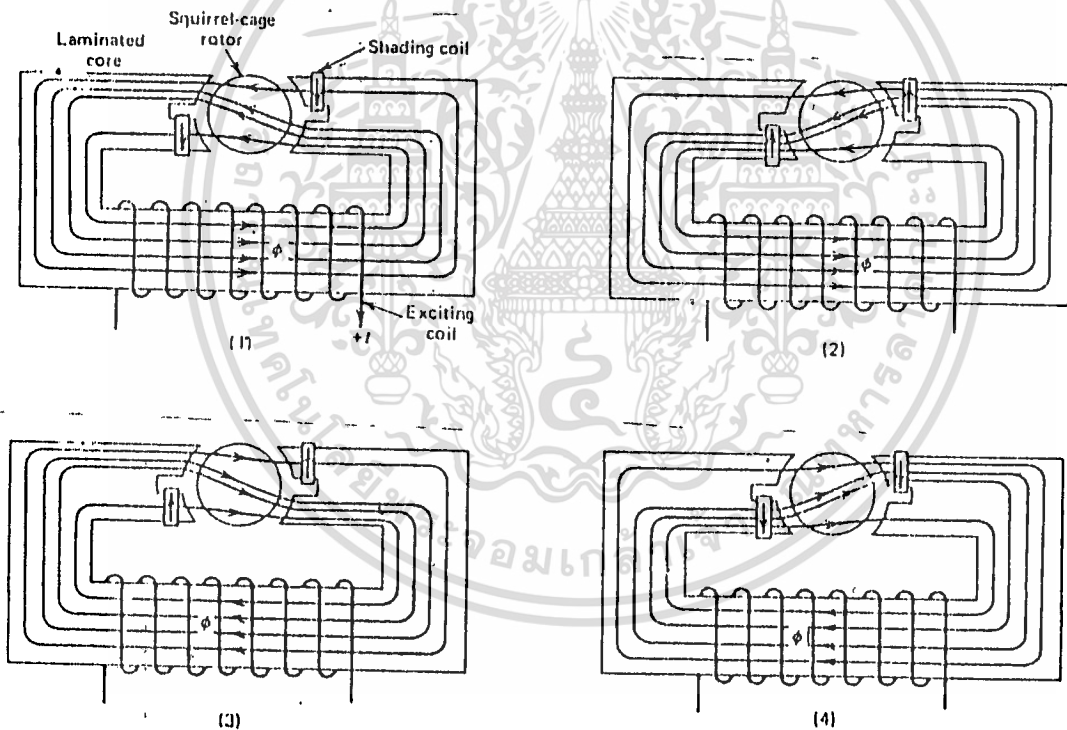
มอเตอร์แบบนี้จะมีขั้วเป็นแบบยื่น (salient pole) ที่สเตเตอร์และมีขดลวดเชด (shading coil) พันอยู่บนส่วนหนึ่งของแต่ละขั้ว โดยเป็นขดลวดทองแดง ซึ่งพันอยู่บนส่วนของหน้าขั้ว และต่อลิตาวจรกันอยู่ ส่วนขดลวดหนึ่งเฟสที่เป็นขดลวดหลักจะพันอยู่บนขั้วอื่น ซึ่งจะก่อให้เกิดกระแสที่เหนี่ยวนำในขดลวด สร้างฟลักซ์แม่เหล็กในส่วนที่เป็นเชด (shaded portion) ของขั้วล่าหลัง (lag) ฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่ในส่วนที่เป็นอันเชด (unshaded portion) ของขั้ว

ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กในเชดจะมีค่าสูงสุดหลังจากฟลักซ์แม่เหล็กในส่วนที่เป็นเชดถึงค่าสูงสุด หลังจากฟลักซ์แม่เหล็กในส่วนอันเชดถึงค่าสูงสุดของมันแล้ว ลักษณะเช่นนี้จะเหมือนกับการเลื่อน (shif) เฟสไปข้างหน้าของฟลักซ์แม่เหล็กจากส่วนที่เป็นอันเชดไปยังส่วนที่เป็นเชดของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ (stator) ผลก็คือทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนไปได้

รูป 1.5 แสดงมอเตอร์แบบเชดโพลและรูป 1.6 แสดงวิธีการทำงานของมอเตอร์แบบเชดโพล จากรูปจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าในขดลวดหลักหนึ่งเฟส ซึ่งเป็นคลื่นรูปไซน์ (sine) นั้นใน 1 รอบสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ช่วงได้ดังนี้คือ



รูป 1.5 แสดงมอเตอร์แบบเชดโพล



รูป 1.6 แสดงการทำงานของมอเตอร์แบบเชดโพล

จากกฎของเลนซ์ที่ว่า "กระแสที่ไหลในขดลวดเชด (shading coils) จะขัดขวางการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเสมอ"

ในช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ฟลักซ์แม่เหล็กค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดของคลื่น (peak value) ในช่วงนี้ฟลักซ์แม่เหล็กเดินทางในทิศทางเข็มนาฬิกาในแกนเหล็กและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แรง

เคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force) MMF ของขดลวดเชดจะขัดขวางการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่เคลื่อนที่ผ่านส่วนที่เป็นอินเซดของหน้าขั้วแม่เหล็ก

ในช่วงที่ 2 ฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ในทิศทางเดิม แต่ค่อย ๆ ลดลงจากค่าสูงสุดจนเหลือศูนย์ ในช่วงนี้จะพบว่า จากกฎของเลนซ์ กระแสในขดลวดเซตจะไหลกลับทิศเพื่อที่จะป้องกันการลดลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้น MMF ขดลวดเซตจะช่วยเหลือกับ MMF ของขดกระตุ้น (exciting coil) และฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ผ่านส่วนที่เป็นเซตของขั้วแม่เหล็ก สังเกตว่าสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านโรเตอร์ได้หมุนไปเล็กน้อย

ในช่วง 3 และ 4 ฟลักซ์แม่เหล็กได้กลับทิศและหมุนอีกเล็กน้อย รูปที่ 1.5 จะเห็นว่า สนามแม่เหล็กที่หมุนอย่างไม่สม่ำเสมอไหลผ่านโรเตอร์ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างอ่อน ๆ สังเกตว่าการเคลื่อนที่ที่จะอยู่ในทิศทางจากส่วนที่เป็นอินเซตไปยังส่วนที่เป็นเซตของขั้วแม่เหล็ก ดังนั้นมอเตอร์แบบเซตโพลจะสามารถกลับทิศทางการหมุนได้ โดยการใช้ขดลวดเซต 2 ชุด ดังนั้นจะมีขดลวดเซตทั้งหมด 4 ชุดด้วยกัน ถ้าต้องการกลับทิศทางการหมุน ก็ทำได้โดยการเปิดวงจรขดลวดเซตคู่ที่กำลังใช้อยู่ และทำการปิดวงจรให้กับขดลวดเซตคู่ที่เหลือ ที่ก่อนหน้านี้ได้เปิดวงจรอยู่ เนื่องจากยังไม่ได้ใช้งาน หรือ อาจกลับทิศทางการหมุนแบบถาวรได้โดยการกลับแกนเหล็ก

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบนี้ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าโวลต์ต่อรอบ (volts per turn) ของขดลวดกระตุ้น ซึ่งจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเปลี่ยนไป วิธีที่ประหยัดที่สุด ทำได้โดยการติดตั้งขดลวดกระตุ้นที่ระดับโวลต์เตจของแหล่งจ่ายไฟคงที่ เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดมากจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กลดลง ดังนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์ก็จะลดลงด้วย

มอเตอร์แบบเซตโพลนี้ค่อนข้างจะมีแรงบิดที่ต่ำ แต่ราคาถูก ใช้กับงานที่ต้องการแรงบิดขณะสตาร์ทเพียงเล็กน้อย เช่น พัดลม หลักการที่ใช้กับมอเตอร์แบบเซตโพลนี้ มักจะใช้กับการสตาร์ทนาฬิกาไฟฟ้าและมอเตอร์หนึ่งเฟสซึ่งโรตอร์ไม่มีขั้ว

บทที่ 2

ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน

ในมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวนั้น จากสมการของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ที่เกิดจากการพันขดลวดที่สเตเตอร์แบบกระจายนั้น จะพบว่าค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กพื้นฐาน (fundamental mmf) F_1 ที่ได้จะอยู่ในรูปสมการคือ

$$F_1 = (4/\pi) * K_w * (N_{ph}/P) * i_a * \cos(\theta) \quad (2.1)$$

โดยที่ N_{ph} = จำนวนรอบของขดลวดที่อนุกรมกันอยู่ต่อเฟส
= มมองค่าไฟฟ้าที่วัดเทียบกับแกนแม่เหล็กของขดลวด
 K_w = ค่าตัวประกอบการพัน (winding factor) ของขดลวด
 P = จำนวนขั้วของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์

ในขณะที่ขดลวดได้รับกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบไซน์ซอยด์ (sinusoid)

ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะได้ว่า

$$i_a = I_m \cos(\omega t) \quad (2.2)$$

และดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กพื้นฐานที่กระจายอยู่จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_1 = (F_{max} \cos(\theta)) \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

โดยที่

$$F_{max} = \frac{N}{P} I_m$$



ซึ่งมีค่าคงที่เสมอในอวกาศ

จากนั้นใช้เอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติ เราจะสามารถเขียนสมการ(2.3)ได้ใหม่ในรูป

$$F_1 = F_{max} (0.5\cos(\theta - \omega t) + 0.5\cos(\theta + \omega t)) \quad (2.4)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ωmf ของขดลวดที่พันแบบขิงเกิดเฟสสามารถแยกออกมาเป็น

คลื่น ωmf ที่หมุนในทิศตรงกันข้ามได้ โดยที่แต่ละคลื่นมีขนาดแอมพลิจูดเป็นครึ่งหนึ่งของคลื่น

ωmf รวม (F_1) โดยที่ F_a คือคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง $+\theta$ และอีกคลื่นหนึ่งคือ F_b

ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามคือ $-\theta$ และคลื่นทั้งสองจะมีความเร็วเชิงมุม ω เท่ากัน

$$F_a = 0.5F_{max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.5)$$

$$F_b = 0.5F_{max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.6)$$

สนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองนี้จะเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ถึงแม้ว่าแรงบิดทั้งสององค์ประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกันก็ตาม จากรูปที่ 2.1

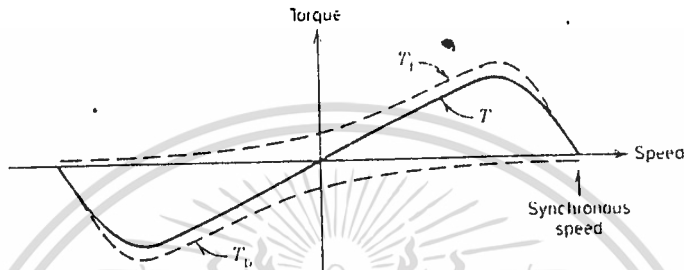
จะเห็นว่า ในขณะที่ความเร็วรอบเป็นศูนย์คือมอเตอร์หยุดนิ่ง จะพบว่าแรงบิดไปข้างหน้า

(forward torque) และแรงบิดไปข้างหลัง(backward torque) จะมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น

ผลรวมของแรงบิดขณะสตาร์ทจึงเป็นศูนย์ แต่ที่ความเร็วอื่นที่ไม่ใช่ศูนย์แรงบิดทั้งสองจะไม่เท่ากัน

และผลรวมของแรงบิดลัพธ์จะไม่เป็นศูนย์ทำให้มอเตอร์หมุนได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.1 แสดงกราฟแรงบิดกับความเร็วยุโรปของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว สามารถอธิบายได้โดยการใช้การ

วิเคราะห์จากทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนสองสนาม (double revolving field theory) ได้
ดังนี้

ในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่และขดลวดที่สเตเตอร์มีเฉพาะขดลวดหลักอย่างเดียว

และในขณะนั้นได้รับไฟจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว ดังนั้นจะทำให้เกิดพัลส์ของ

m mf (pulsating m mf) ϕ_p ดังแสดงในรูปที่ 2.2b เกิดขึ้นในแนวแกนของขดลวดสเตเตอร์

พัลส์ของฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์นี้ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในวงจรรโรเตอร์ โดยวิธีการ

เหนี่ยวนำเช่นเดียวกับที่เกิดในหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer action) ทำให้เกิดพัลส์

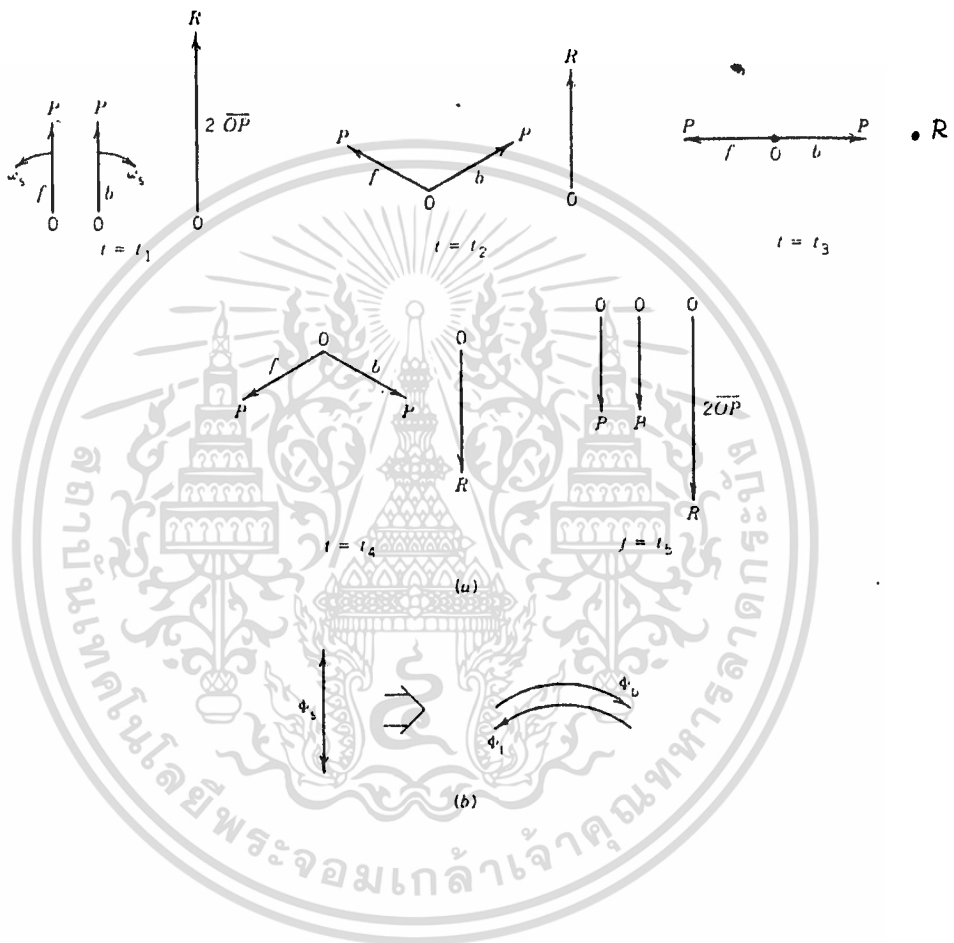
จากกฎของเลนซ์จะได้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กทั้งสองนี้จะต่อต้านซึ่งกันและกัน เนื่องจากมุมระหว่าง
 ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งสองนี้เป็นศูนย์ ดังนั้นจึงไม่มีแรงบิดขณะสตาร์ทเกิดขึ้น ดังนั้นมอเตอร์
 เหนียวนำแบบเฟสเดียวจึงไม่สามารถสตาร์ทด้วยตัวเองได้ แต่ต้องมีวิธีการที่จะช่วยสตาร์ท
 เช่น การเพิ่มขดลวดช่วยเข้ามาที่สเตเตอร์ เพื่อให้เกิดการทํางานในลักษณะของมอเตอร์แบบ
 สองเฟส



รูปที่ 2.2 แสดงมอเตอร์เหนียวนำแบบเฟสเดียวที่ไม่มีขดลวดช่วยสตาร์ท

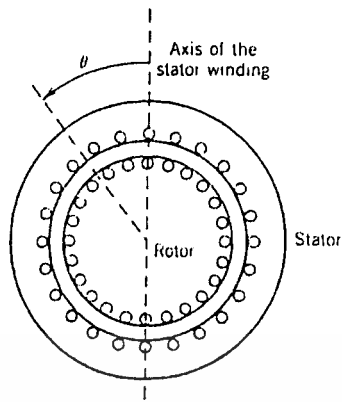
ส่วนในขณะที่มอเตอร์หมุนนั้นไม่ว่าจะด้วยวิธีการใช้มือหมุนหรือโดยการเพิ่มขดลวดช่วย

ก็ตาม จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนสองสนามดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์ ϕ_s จึง
 สามารถแบ่งออกเป็นฟลักซ์แม่เหล็กไปข้างหน้า (forward flux) กับฟลักซ์แม่เหล็กไปข้างหลัง
 (backward flux) หมุนในทิศตรงข้ามกันดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงภาพตัดขวางของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ในขณะที่มอเตอร์หมุนนั้นแรงบิดไปข้างหน้าจะมีค่ามากกว่าแรงบิดไปข้างหลัง ดังนั้น

มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วค่าหนึ่งเท่ากับ n รอบต่อนาที และความเร็วซิงโครนัสมีค่าเท่ากับ n_s รอบต่อนาที

ดังนั้นค่าสลิป (slip) เมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าจะเป็น

$$S_s = (n_s - n) / n_s = S \quad (2.7)$$

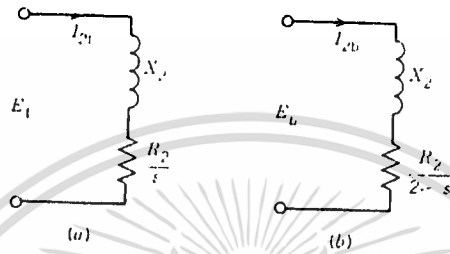
โรเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง ดังนั้น

ความเร็วของโรเตอร์จะเป็นลบเมื่อเทียบกับสนามนี้

$$S_p = (n_p - (-n)) / n_p = 2 - S \quad (2.8)$$

วงจรโรเตอร์สำหรับฟลักซ์แม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและไปข้างหลังแสดงในรูปที่ 2.5

ในขณะหยุดนิ่ง อิมพีแดนซ์ของวงจรโรเตอร์ทั้งสองจะเท่ากัน และดังนั้นกระแสทั้งสองก็จะเท่ากันด้วย ($I_{e_f} = I_{e_b}$) ทำให้ mmf ของฟลักซ์แม่เหล็กไปข้างหน้าและไปข้างหลังของวงจรโรเตอร์เท่ากัน เนื่องจาก mmf ของโรเตอร์จะมีทิศทางหักล้างกับ mmf ของสเตเตอร์เสมอ ดังนั้นผลลัพธ์ของ mmf ของฟลักซ์ไปข้างหน้าของสเตเตอร์กับโรเตอร์จะหักล้างกัน ส่วน mmf ของฟลักซ์ไปข้างหลังก็เช่นเดียวกันจะหักล้างกัน ดังนั้นผลลัพธ์ของ mmf ของฟลักซ์ไปข้างหน้าจะเท่ากับผลลัพธ์ของ mmf ของฟลักซ์ไปข้างหลัง ดังนั้นแรงบิดไปข้างหน้าและข้างหลังจึงเท่ากัน มอเตอร์จึงไม่หมุน



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรเทียบเท่าของทรานส์

(a) สำหรับคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

(b) สำหรับคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง

ในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนอยู่นั้น ค่าสลิปจะน้อยกว่าขณะหยุดนิ่ง ทำให้อิมพีแดนซ์

ของวงจรทรานส์ทั้งสองไม่เท่ากัน

โดยที่อิมพีแดนซ์ของวงจรสำหรับฟลักซ์ไปข้างหน้าจะ

มากกว่าของวงจรฟลักซ์ไปข้างหลัง

ทำให้กระแส $I_{2f} < I_{2b}$ ดังนั้น mmf ของฟลักซ์

ไปข้างหลังของวงจรทรานส์จะมากขึ้น

ในขณะที่ mmf ฟลักซ์ไปข้างหน้าของวงจรทรานส์

จะลดลง แต่ mmf ของฟลักซ์ไปข้างหน้าและฟลักซ์ไปข้างหลังของวงจรสเตเตอร์เท่าเดิมเสมอ

และมีขนาดเท่ากันด้วยคือ $0.5 * F_{max}$

ดังนั้นจะเห็นว่า mmf ลัพธ์ของฟลักซ์ไปข้างหลังซึ่ง

เท่ากับ mmf ของฟลักซ์ไปข้างหลังของสเตเตอร์ลบด้วย mmf ของฟลักซ์ไปข้างหน้าซึ่งไปต่อกับการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

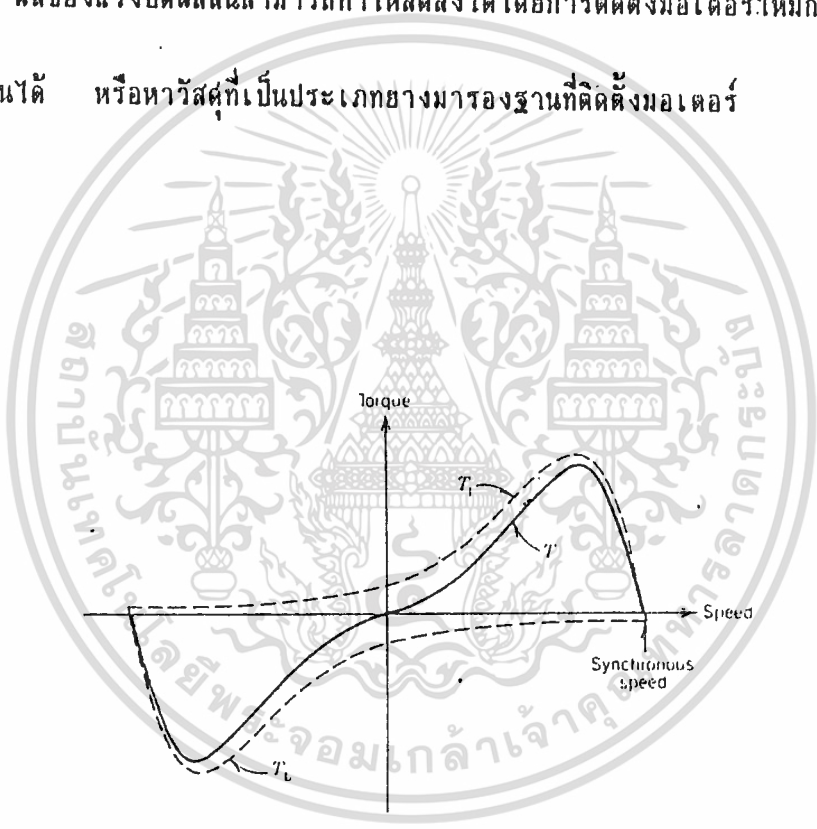
จะมีค่าน้อยลงกว่าขณะมอเตอร์อยู่นิ่ง ในขณะที่ $m\phi$ ลัพธ์ของฟลักซ์ไปข้างหน้าซึ่งเท่ากับ $m\phi$ ของฟลักซ์ไปข้างหน้าของสเตเตอร์ลบด้วย $m\phi$ ของฟลักซ์ไปข้างหน้าโรเตอร์จะมีค่ามากกว่าขณะมอเตอร์อยู่นิ่ง ดังนั้นเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้น ก็จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นในขณะที่ฟลักซ์แม่เหล็กหมุนไปข้างหลังลดลง แต่ผลรวมลัพธ์ของฟลักซ์แม่เหล็กก็ยังคงที่เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำโวลต์ที่คงในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งมีขนาดเกือบจะเท่ากับขนาดโวลต์ที่คงของแหล่งจ่าย (ถ้าโวลต์ที่คงรวมความต้านทานและรีแอคแตนซ์รั่วไหล (leakage reactance) สามารถละเลยได้) ดังนั้นในขณะที่โรเตอร์กำลังหมุนจะทำให้แรงบิดไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นในขณะที่แรงบิดไปข้างหลังลดลง ดังนั้น ถ้ามอเตอร์กำลังหมุนอยู่แล้ว ถึงแม้ว่าสเตเตอร์จะมีเพียงขดเดียวก็ตาม มอเตอร์ก็ยังคงหมุนต่อไปเรื่อย ๆ ตลอดไป กราฟแสดงแรงบิด-ความเร็วรอบที่แท้จริงจะแสดงในรูป 2.6

พัลส์ของแรงบิด (Torque Pulsation)

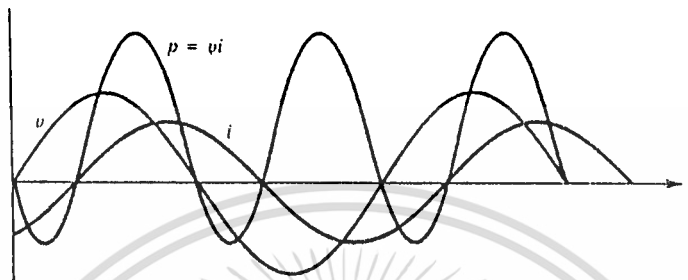
ในมอเตอร์เฟสเดียวนั้น กำลังงานชั่วคราวยังเคลื่อนที่ในลักษณะพัลส์ที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าดังในรูป 2.7 ดังนั้นจึงมีพัลส์ของแรงบิดเกิดขึ้นโดยมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ของสเตเตอร์ แรงบิดพัลส์ (pulse torque) นี้เป็นแรงบิดที่เกิดเพิ่มขึ้นมาดังแสดงในรูป 2.6 แรงบิดที่แสดงในรูป 2.6 เป็นค่าเฉลี่ยของเวลาของแรงบิดชั่วขณะ (Instantaneous Torque) แรงบิดพัลส์นี้เกิดจากปฏิริยาระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กหมุนและคลื่น $m\phi$ ที่ตรงข้ามกัน ซึ่งวิ่งผ่านกันด้วยความเร็วเป็น 2 เท่าของความเร็วเชิงโคโรนัส เช่นปฏิริยาระหว่างฟลักซ์ไปข้างหน้า (Forward flux) กับ $m\phi$

flux) กับ mmf ไปข้างหน้าของโรเตอร์ (Forward rotor mmf) ในขณะที่ปฏิกิริยา
 ระหว่างฟลักซ์ไปข้างหน้ากับ mmf ไปข้างหน้าของโรเตอร์ และระหว่างฟลักซ์ไปข้างหลังกับ
 mmf ไปข้างหลังของโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงบิดที่คงที่ (constant torque)

แรงบิดพัลส์นี้ไม่ได้สร้างแรงบิดเฉลี่ยขึ้นมา แต่จะทำให้เกิดผลที่เรียกว่าปฏิกิริยา
 ฮัมมิง (humming effect) ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เฟสเดียวเกิดเสียงรบกวนมากกว่ามอเตอร์
 หลายเฟส ผลของแรงบิดพัลส์นี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการติดตั้งมอเตอร์ให้มีการยื้อย่นต่อ
 การสั่นสะเทือนได้ หรือหาวัสดุที่เป็นประเภทยางมารองฐานที่ติดตั้งมอเตอร์



รูป 2.6 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟส
 เดียวที่แท้จริง ซึ่งคิดผลของการเปลี่ยนแปลงของคลื่นฟลักซ์ไปข้างหน้าและคลื่นฟลักซ์ไปข้างหลังด้วย



รูป 2.7 แสดงรูปคลื่นของโวลต์เตจ , กระแส และกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว

(Equivalent circuit of a single-phase induction motor)

จากหัวข้อก่อนนี้เราพบว่า เมื่อสแตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวถูกต่อ

เข้ากับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า กระแสในขดลวดสแตเตอร์จะสร้างพัลส์ของ μmf ขึ้น ซึ่งเสมือน

กับมีคลื่น μmf สองคลื่นที่มีขนาดเท่ากัน แต่หมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน ด้วยความเร็วเท่ากับ

ความเร็วซิงโครนัส และคลื่นแต่ละคลื่นทั้งสองนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสขึ้นในวงจรโรเตอร์

ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวมีการทำงานที่คล้ายกับมอเตอร์แบบหลายเฟสได้ ทฤษฎี

สนามแม่เหล็กหมุนสองสนามนี้จึงใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรั้รงรเบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุอจะอให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
พิจารณา ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ และขดลวดสแตเตอร์ได้รับโวลต์เตจจากแหล่งจ่าย
ไม่ว่ากรณีใดตทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงาน ลักษณะเช่นนี้จะเสมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิถูกลัดวงจร

วงจรเทียบเท่าแสดงในรูปที่ 2.8 (a) โดยที่

R_1 = ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

X_1 = รีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์

X_m = แมกนีไทซ์ (Magnetizing reactance)

X_2 = รีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์โดยที่แปลงไปยังด้านสเตเตอร์

R_2 = ความต้านทานของวงจรโรเตอร์ที่ refer ไปยังด้านสเตเตอร์

V = โวลต์เตจของแหล่งจ่ายกำลังงาน

E = โวลต์เตจที่ถูกเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์ โดยคลื่นฟลักซ์ในช่องอากาศที่อยู่กับที่ ซึ่งถูกสร้างมาจากผลรวมของกระแสโรเตอร์และกระแสสเตเตอร์

และ

$$E = 4.4fN\phi$$

(2.9)

โดยที่ ϕ คือฟลักซ์ในช่องอากาศ (air gap flux)

จากทฤษฎีสันนามแม่เหล็กสองสันนาม (Double revolving field theory) วงจร

เทียบเท่าสามารถแยกออกเป็นสองส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (2) ซึ่งแสดงถึงผลของ

สันนามไปข้างหน้า (Forward Field) และไปข้างหลัง (Backward Field)

$$E_r = 4.44fN\phi \quad (2.10)$$

$$E_s = 4.44fN\phi \quad (2.11)$$

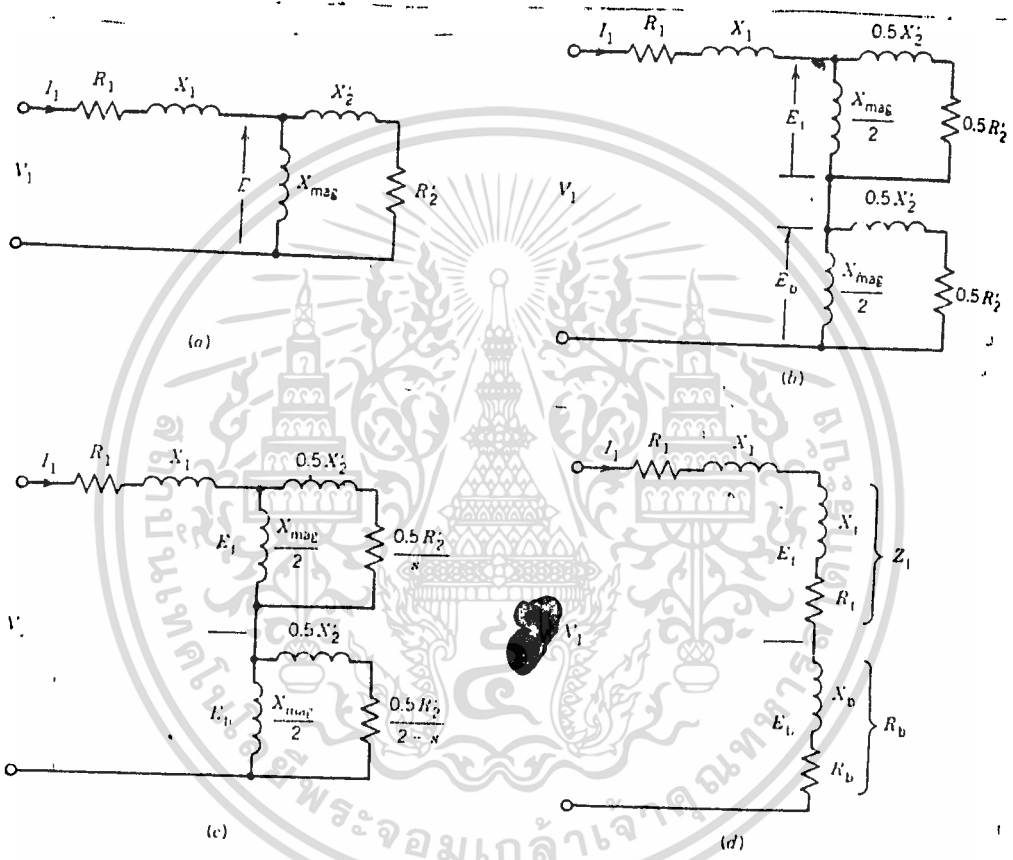
ขณะหยุดนิ่ง $\phi_r = \phi_s$ และแสดงดังนั้น $E_r = E_s$

พิจารณาขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนอยู่กับที่ความเร็วโคจรเร็วหนึ่ง ในทิศทาง
ของสนามไปข้างหน้า สลิปมีค่าเป็น s กระแสโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามไปข้างหน้า
มีความถี่ sf โดยที่ sf เป็นความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังงานเช่นเดียวกันในมอเตอร์แบบ
หลาย ๆ เฟส m ของโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วสลิปเมื่อเทียบกับโรเตอร์ แต่
จะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคจรเมื่อเทียบกับสเตเตอร์ ผลลัพธ์ของ m ไปข้างหน้าของ
สเตเตอร์และโรเตอร์จะสร้างฟลักซ์ในช่องอากาศไปข้างหน้า ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์เตจ
 E_r วงจรโรเตอร์ที่แปลงไปยังสเตเตอร์นั้น จะมีมิตินแดนซ์เท่ากับ $j0.5X_r + 0.5R_r/s$
ดังในรูป 2.8(c)

พิจารณาสถาณแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง (backward rotation field) ซึ่ง
จะเหนี่ยวนำกระแสในวงจรโรเตอร์ที่ความถี่สลิป $(2-s)f$ m ของโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจะหมุน
อยู่ในช่องอากาศที่ความเร็วเชิงโคจรในทิศทางไปข้างหลัง ผลลัพธ์ของ m ไปข้างหลังของ
สเตเตอร์และโรเตอร์จะสร้างฟลักซ์ในอากาศไปข้างหลังขึ้น ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์เตจ
 E_s ขึ้น วงจรโรเตอร์ที่แปลงไปยังสเตเตอร์ จะมีมิตินแดนซ์เท่ากับ $j0.5X_r + 0.5R_r/(2-s)$
ดังในรูปที่ 2.8(c) ที่ค่าสลิปต่ำ ๆ ปร่าางของคลื่นของกระแสโรเตอร์จะแสดงองค์ประกอบ
ความถี่สูง (ที่สลิป $(2-s)f = 2f$) เนื่องจากสนามไปข้างหลังซึ่งจะแทนที่องค์ประกอบ

จะเห็นว่าจากวงจรเทียบเท่าในขณะกำลังหมุนว่า $Z_r > Z_b$, $R_r > R_b$ และดังนั้น

ฟลักซ์ในช่องอากาศไปข้างหน้า ϕ_f จะมีค่ามากกว่าฟลักซ์ในช่องอากาศไปข้างหลัง ϕ_b



รูป 2.8 แสดงวงจรเทียบเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

รูป (a) และ (b) แสดงวงจรมอเตอร์หยุดนิ่ง

รูป (c) และ (d) แสดงวงจรมอเตอร์กำลังหมุนด้วยสลิป s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 นวัตกรรมที่ต่าง ๆ ของวงจรในรูปที่ 2.8(c) ได้มาโดยการทำการทดสอบ 2 แบบคือ

1. การทดสอบขณะไร้โหลด (no-load test)

การทดสอบนี้จะกระทำในขณะที่มอเตอร์หมุนตัวเปล่าไม่มีโหลด เพื่อจะหาค่า x_m และ

ความสูญเสียระหว่างการหมุน (rotational loss)

2. การทดสอบขณะล๊อคโรเตอร์ (block rotor test)

การทดสอบนี้จะกระทำโดยในขณะที่มอเตอร์หมุนไปนานพอสมควรจนสวิทช์เซอร์ติฟิเคชัน

ตัดขดลวดช่วยออกไปแล้ว แล้วจึงทำการจับโรเตอร์ให้หยุดนิ่งแล้วจึงทำการวัดค่าต่าง ๆ

คือ กำลังงาน , โวลต์เตจ , กระแส โดยที่มอเตอร์ได้รับโวลต์เตจจากแหล่งจ่าย

ที่จำกัดโวลต์เตจและความถี่ที่กัคมอเตอร์ และจากการทดสอบนี้จะทำให้ทราบ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ R_2 , X_1 , X_2

การทดสอบขณะล๊อคโรเตอร์

จะให้โรเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่ ดังนั้นสลิปเท่ากับ 1 วงจรเทียบเท่าขณะล๊อคโรเตอร์

แสดงดังรูป 2.9(a)

ในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่งจะได้ว่า

$$j0.5X_2 + 0.5R_2 \ll 0.5X_m$$

และจากค่าที่วัดได้ขณะล๊อคโรเตอร์คือ

$$P_{BL} , V_{BL} , I_{BL}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_{BL} = (I_{BL})^2 (R_1 + R_2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_e = (P_{BL} / (I_{BL})^2) - R_1 \quad (2.12)$$

และจาก

$$V_{BL} = I_{BL} Z_{BL}$$

$$Z_{BL} = V_{BL} / I_{BL}$$

และ

$$(Z_{BL})^2 = (R_1 + R_e)^2 + (X_1 + X_e)^2$$

ถ้ากำหนดให้ $X_1 = X_e$ จะได้ว่า

$$X_1 = X_e = (\sqrt{(Z_{BL})^2 - (R_1 + R_e)^2}) / 2 \quad (2.13)$$

การทดสอบขณะไว้โหลด

ที่ขณะไว้โหลด ค่าสลิปจะมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์ ดังนั้นจะประมาณได้ว่า

$$j0.5X_e + 0.5R_e / S \gg 0.5X_m$$

และ

$$j0.5X_e + 0.5R_e / (2-S) \sim j0.5X_e + 0.25R_e \ll 0.5X_m$$

วงจรเทียบเท่าขณะไว้โหลดแสดงในรูปที่ 2.9(b) R_{eq} ในวงจรมาจาก

การสูญเสียเนื่องจากการหมุน (Rotational losses) ถ้าให้ค่าที่วัดได้จากการทดสอบเป็น

$$P_{NL}, V_{NL}, I_{NL}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$R_{NL} = P_{NL} / (I_{NL})^2 \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{NL} = V_{NL} / I_{NL} \quad (2.15)$$

และจาก $Z_{NL} = [(R_{NL})^2 + (0.5X_m + X_1 + 0.5X_2)^2]^{1/2}$

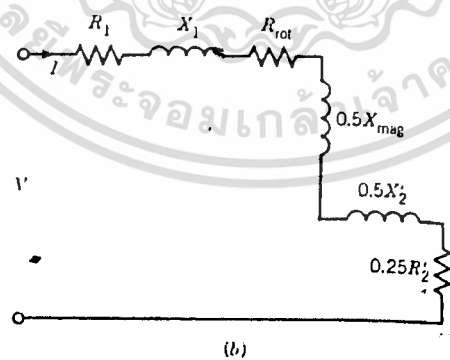
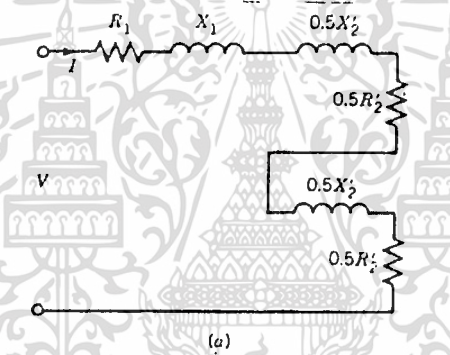
ดังนั้น $X_m = 2[\sqrt{((Z_{NL})^2 - (R_{NL})^2)} - X_1 - 0.5X_2]$ (2.16)

และจาก $P_{NL} = (I_{NL})^2 (R_1 + R_{rot} + 0.25R_2)$

ดังนั้น $R_{rot} = (P_{NL} / (I_{NL})^2) - R_1 - 0.25R_2$ (2.17)

ดังนั้น การสูญเสียเนื่องจากการหมุน (Rotational losses)

$$P_{rot} = P_{NL} - (I_{NL})^2 (R_1 + 0.25R_2) \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรเทียบเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

(a) วงจรเทียบเท่าขณะล๊อคโรเตอร์ (Block rotor)

(b) วงจรเทียบเท่าขณะไร้โหลด (No-load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบทั้ง 2 อย่างข้างต้น จะทำให้สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทุกตัว ของวงจรเทียบเท่า ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาลักษณะการทำงานของมอเตอร์ขณะหมุน ณ. ที่ค่า สลิตใดๆ ได้ดังนี้ คือ

$$Z_e = R_e + jX_e$$

$$= [j0.5X_m(j0.5X_e + 0.5R_e/S) / (0.5R_e/S + j0.5(X_m + X_e))] \quad (2.19)$$

$$Z_b = R_b + jX_b$$

$$= [j0.5X_m(j0.5X_e + 0.5R_e/(2-S)) / (0.5R_e/(2-S) + 0.5(X_m + X_e))] \quad (2.20)$$

และ กำลังงานในช่องอากาศ เนื่องมาจากสนามไปข้างหน้าและสนามไปข้างหลัง จะเป็น

$$P_{\text{แฟ}} = I_1^2 R_e \quad (2.21)$$

$$P_{\text{แบ}} = I_1^2 R_b \quad (2.22)$$

แรงบิดคือ

$$\text{แรงบิดไปข้างหน้า ; } T_e = P_{\text{แฟ}} / \omega_m \quad (2.23)$$

$$\text{แรงบิดไปข้างหลัง ; } T_b = P_{\text{แบ}} / \omega_m \quad (2.24)$$

$$\text{แรงลัพธ์คือ } T = T_e - T_b = I_1^2 (R_e - R_b) / \omega_m \quad (2.25)$$

$$\text{และกำลังทางกลที่เกิดขึ้นคือ } P_{\text{mech}} = T \omega_m \quad (2.26)$$

$$= T \omega_s (1-S) \quad (2.27)$$

$$= I_1^2 (R_e - R_b) (1-S) \quad (2.28)$$

$$= (P_{\text{แฟ}} - P_{\text{แบ}}) (1-S) \quad (2.29)$$

$$\text{กำลังเข้าทั้งหมดคือ } P_{\text{out}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rot}} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P_{fric} จะหมายความรวมถึงความสูญเสียเนื่องมาจากความเสียด (Friction loss)

และความสูญเสียจากการต้านลม (Windage loss)

เนื่องจากสนามช่องอากาศ ทั้ง 2 สนามจะสร้างกระแสในวงจรรโรเตอร์ที่ความถี่ต่างกัน

ดังนั้นความสูญเสียในวงจรรโรเตอร์ (Rotor copper losses) จึงเป็นผลรวมของความสูญเสียที่เกิดจากสนามแต่ละสนามทั้งสอง

ความสูญเสียในวงจรรโรเตอร์ที่เกิดจากสนามไปข้างหน้าคือ

$$P_{\text{ef}} = Sp_{\text{rf}} \quad (2.31)$$

และ ความสูญเสียในวงจรรโรเตอร์ที่เกิดจากสนามไปข้างหลังคือ

$$P_{\text{eb}} = (2-s)P_{\text{rb}} \quad (2.32)$$

ผลรวมของความสูญเสียของโรเตอร์คือ

$$P_{\text{e}} = SP_{\text{rf}} + (2-s)P_{\text{rb}} \quad (2.33)$$

ส่วนกำลังงานในช่องอากาศรวม หาได้จากผลรวมของ กำลังงานในช่องอากาศ ของแต่ละสนามซึ่งได้จาก สเตเตอร์ คือ

$$P_{\text{st}} = P_{\text{ef}} + P_{\text{eb}} \quad (2.34)$$

แรงบิดขณะสตาร์ท

พิจารณาการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ขดลวดของสเตเตอร์ทั้ง 2 ขด และ

กระแสที่ไหลภายในขดลวดแสดงในรูป 2.10(a) โรเตอร์สามารถแทนได้ด้วยขดลวด 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เสมือน แทนด้วยขดลวด a-b และ c-d สมมติว่าขดลวดแต่ละขดมีจำนวนรอบเท่ากับ N_{e}
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีความต้านทานเท่ากับ R_e และมีรีแอคแตนซ์เท่ากับ X_e (ที่ความถี่สแตเตอร์) กระแสที่ไหลผ่านขดลวดหลักจะสร้างฟลักซ์สนามแม่เหล็กขึ้นมาซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์เตจเท่ากับ e_{e_m} (โดยวิธีการแบบเดียวกับในหม้อแปลงไฟฟ้า) และกระแส i_{e_m} ในขดลวด a-b ของโรเตอร์ กระแส i_{e_m} จะไหลในทิศทางที่จะสร้างฟลักซ์ขึ้นมาในทิศที่ต่อต้านกับฟลักซ์ ϕ_m ในทำนองเดียวกัน ϕ_m ในขดลวดช่วยจะเหนี่ยวนำโวลต์เตจ e_{e_m} และกระแส i_{e_m} ในขดลวด c-d ของโรเตอร์

$$E_{e_m} = 4.44fN_e\phi_m \quad (2.35)$$

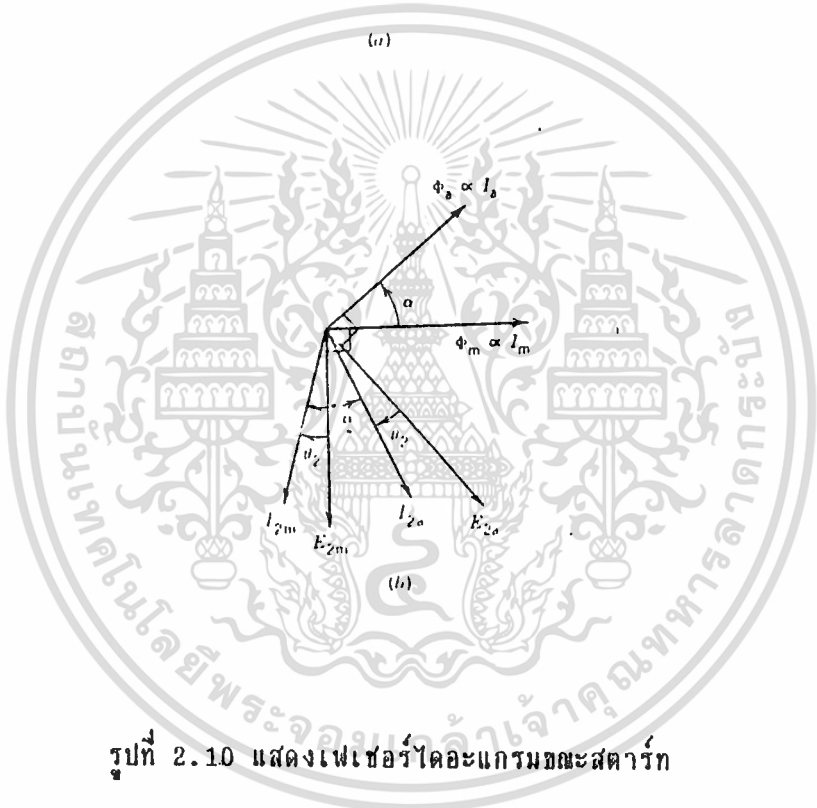
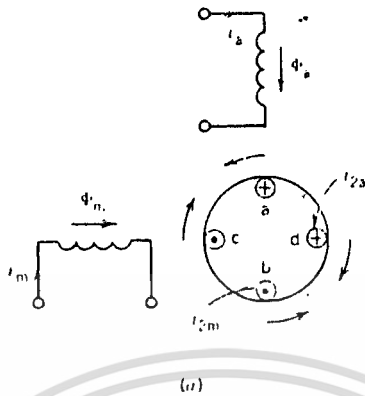
$$E_{e_m} = 4.44fN_e\phi_m \quad (2.36)$$

กระแส i_m ล้าหลัง e_{e_m} และ i_{e_m} ล้าหลัง e_{e_m} ไปเป็นมุม θ_e โดยที่

$$\cos \theta_e = R_e / (\sqrt{R_e^2 + X_e^2}) = R_e / Z_e \quad (2.37)$$

เฟเซอร์ไดอะแกรมของฟลักซ์แม่เหล็ก, โวลต์เตจ, กระแส แสดงดังรูปที่ 2.10(b)

สังเกตว่าแรงที่เกิดขึ้น (Developed Torque) จากการกระทำระหว่าง ϕ_m กับ I_e และ หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา แรงบิดอีกอันหนึ่งเกิดจากการกระทำระหว่าง ϕ_m และ I_{e_m} และ กระทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แต่จะไม่มีแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการกระทำระหว่างกันระหว่าง ϕ_m และ I_{e_m} หรือ ϕ_m และ I_e



รูปที่ 2.10 แสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์

$$I_m \propto \frac{\Phi_m I_{2a} \cos \alpha}{\Phi_m I_{2a}}$$

$$\propto I_{2a} \cos(90^\circ + \epsilon_2 - \alpha)$$

แรงบิดที่เกิดจาก Φ_m และ I_{2m} คือ

$$T \propto \frac{\Phi_m I_{2m} \cos \alpha}{\Phi_m I_{2m}}$$

$$\propto \cos(90^\circ + \epsilon + \alpha)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดขณะสตาร์ทสุทธิคือ

$$T_s \propto [\phi_m I_{2m} \cos(90 + \theta_2 - \alpha) - \phi_a I_{2m} \cos(90 + \theta_2 + \alpha)]$$

แต่ $\phi_m / \phi_a = E_{2m} / E_{2a} = I_{2m} / I_{2a}$

หรือ $\phi_m I_{2a} = \phi_a I_{2m}$

ดังนั้น $T_s \propto I_{2m} I_{2a} R_2 \cos(\theta_2)$ (2.38)

จากสมการ (2.36), (2.39), (2.37)

$$T_s \propto I_{2m} I_{2a} R_2 \sin(\alpha) / 4.44 f N_2$$

จากทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า I_{2m} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_m และ I_{2a} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_a ดังนั้น

$$T_s \propto I_m I_a \sin(\alpha)$$
 (2.40)

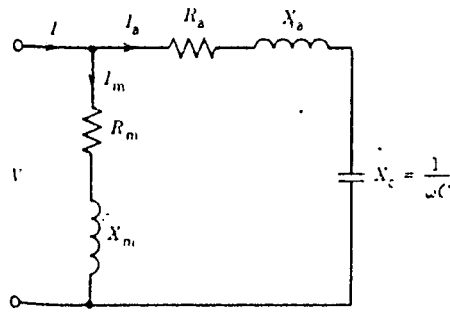
หรือ $T_s = K I_m I_a \sin(\alpha)$ (2.41)

สมการที่ได้มีความสำคัญมาก เพราะเป็นสิ่งที่บอกว่าแรงบิดขณะสตาร์ทขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสในขดลวดหลัก และขดลวดช่วย และมุมความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง

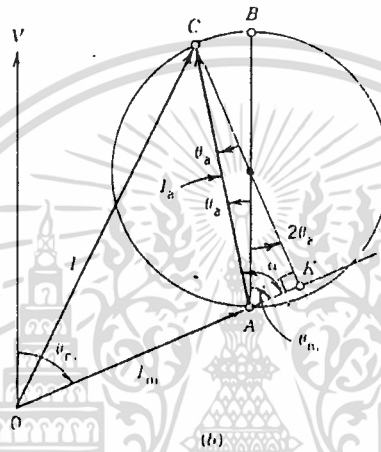
มอเตอร์แบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท (Capacitor Start Motors)

ในขณะสตาร์ทนั้น มอเตอร์แบบคาปาซิเตอร์สามารถแทนได้ด้วยวงจรดังรูปที่

2.11(a) ส่วนเฟเซอร์ไดอะแกรมขณะอยู่นิ่งแสดงดังรูปที่ 2.11(b)



(a)



(b)

รูป 2.11 แสดงมอดเดอร์แบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทขณะสตาร์ท

จากรูป 2.11(b) จะเห็นได้ว่ากระแสของขดลวดหลักคือ I_m มีขนาดเท่ากับ OA

และ ตามไปเป็นมุม ϕ_m กระแสของขดลวดช่วย $I_a (=OA)$ จะนำหน้า V ไปเป็นมุม θ_c

กระแสขณะสตาร์ทคือ $I = I_m + I_a = OC$

ถ้า X_c มีค่ามากเป็นอนันต์ กระแส I_a จะเป็นศูนย์

และ $I = I_m = OA$

ถ้า X_c เท่ากับ X_a กระแส I_a จะมีค่าสูงสุดซึ่งเท่ากับ v / R_a และทับเฟสกันกับ

โวลต์เตจของแหล่งจ่าย V ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นตรง AB ในรูปที่ 2.11(b) โลคัสของ I_a

จะเป็นรูปครึ่งวงกลม ACB ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง $AB = V / R_a$

เนื่องจากให้ I_m คงที่ ดังนั้น

$$T_e \propto I_m \sin(\alpha)$$

α ความยาว CK ในรูปที่ 2.11 (b)

ความยาว CK จะมีค่ามากที่สุดเมื่อผ่านจุดศูนย์กลางของวงกลมดังในรูปที่ 2.11(b) สังเกตว่าเฟเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.11(b) เป็นรูปแสดงในกรณีที่แรงบิดขณะสตาร์ทมีค่าสูงสุด

จากเรขาคณิตจะได้ว่า

$$\theta_m = (90 - \theta_m) / 2$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \tan \theta_m &= \sqrt{[(1 - \cos 2\theta_m) / (1 + \cos 2\theta_m)]} \\ &= \sqrt{[(1 - \cos(90 - \theta_m)) / (1 + \cos(90 - \theta_m))] = \sqrt{[(1 - \sin \theta_m) / (1 + \sin \theta_m)]} \\ &= \sqrt{[(1 - (X_m / Z_m)) / (1 + (X_m / Z_m))] = \sqrt{[(|Z_m| - X_m) / (|Z_m| + X_m)]} \\ &= R_m / (|Z_m| + X_m) \end{aligned} \quad (2.42)$$

และจาก

$$\tan \theta_m = (X_e - X_a) / R_m \quad (2.43)$$

จากสมการที่ 2.42 และ 2.43 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} X_e &= 1 / (WC) = X_m + R_m R_m / (|Z_m| + X_m) \\ C &= 1 / [W(X_m + R_m R_m / (|Z_m| + X_m))] \end{aligned} \quad (2.44)$$

จากสมการที่ 2.44 จะเห็นได้ว่า จากขดลวดช่วยที่มีอยู่ เราจะสามารถหาค่า

C เพื่อนำมาต่ออนุกรมกับขดลวดช่วยได้เพื่อให้แรงบิดขณะสตาร์ทสูงสุด

แรงบิดขณะสตาร์ทที่สูงสุดต่อกระแสขณะสตาร์ท

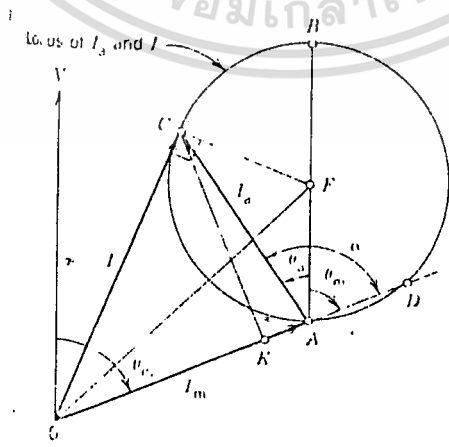
การออกแบบโดยการต้องการให้แรงบิดขณะสตาร์ทที่สูงสุดตามสมการที่ 2.44 นั้น อาจจะไม่เป็นการออกแบบที่ดีที่สุดของมอเตอร์ แต่การออกแบบโดยจุดประสงค์เพื่อต้องการให้เกิดแรงบิดขณะสตาร์ทที่สูงสุดต่อกระแสขณะสตาร์ท อาจจะเป็นสิ่งที่ต้องการมากที่สุด

เฟเซอร์ไดอะแกรมขณะสตาร์ทแสดงดังรูป 2.12 กระแสขณะสตาร์ท แทนได้ด้วยเส้นตรง OC และแรงบิดขณะสตาร์ทแสดงด้วยเส้นตรง CK อัตราส่วนระหว่าง CK/OC คือแรงบิดขณะสตาร์ทต่อกระแสสตาร์ท และจะมีค่าสูงสุดเมื่อเส้นตรง OC สัมผัสกับเส้นรอบวงของวงกลม ACBD ซึ่งคือโลคัสของ I_a และ I พอดี สังเกตว่าเฟเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.12 แสดงสภาวะที่เส้นตรง OC สัมผัสกับเส้นรอบวงของวงกลม ACBD ซึ่งมีจุดศูนย์กลางที่ F พอดี

จากรูปสรุปได้ว่า

$$\angle OCF = 90^\circ$$

$$\angle OAF = 180^\circ - \theta_m$$



รูปที่ 2.12 แสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมขณะที่แรงบิดต่อกระแสมีค่าสูงสุด

$$|I|^2 = OC^2$$

$$= OF^2 - AF^2$$

$$= OA^2 + AF^2 - 2(OA)(AF)\cos\theta_{OAF} - AF^2$$

$$= OA^2 + 2(OA)(AF)\cos\theta_m$$

$$= |I_m|^2 + 2|I_m||V|R_m/2R_m Z_m$$

$$= |i_m|^2 (1+R_m/R_m)$$

$$|I|^2 / |I_m|^2 = (R_m + R_m) / R_m \quad (2.45)$$

และจาก

$$I_m = V/Z_m$$

$$I_n = V/Z_n$$

$$I = I_m + I_n = V(Z_n + Z_m) / Z_n Z_m$$

$$I/I_m = (Z_n + Z_m) / Z_n$$

$$|I|^2 / |I_m|^2 = |Z_n + Z_m|^2 / |Z_n|^2 \quad (2.46)$$

จากสมการที่ 2.45 และ 2.46

$$\begin{aligned} (R_m + R_m) / R_m &= |Z_n + Z_m|^2 / |Z_n|^2 \\ &= (R_m + R_m)^2 + (X_m - X_n)^2 / (R_m^2 + X_n^2) \end{aligned} \quad (2.47)$$

โดยที่ $X_n = X_c - X_m$

สมการที่ 2.47 เป็นสมการควอดราติกในรูปของ X_n ดังนั้นเราจะได้

ว่า คำตอบของ X_n ก็คือ

$$X_n = (-X_m R_m + |Z_m| \sqrt{[R_m (R_m + R_m)]}) / R_m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ถ้า I_m นำหน้า V ที่แยกแยะพร้อมของขดลวดช่วยคือ X_n จะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ
ไม่ว่ากรณีใดก็ตามอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\begin{aligned} X_A &= X_c - X_m = (-X_m R_m + |Z_m| \sqrt{[R_m(r_m + R_m)]}) / R_m \\ X_c &= 1 / (WC) = (-X_m R_m + |Z_m| \sqrt{[R_m(r_m + R_m)]}) / R_m \end{aligned} \quad (2.48)$$

ค่าของ C ที่ได้จากสมการ 2.48 นี้วงจรให้ค่าแรงบิดต่อกระแสและสตาร์ทสูงสุด

โดยที่ X_m = ค่ารีแอคแตนซ์รวมทั้งหมดของขดลวดหลัก

R_m = ความต้านทานรวมทั้งหมดของขดลวดหลัก

X_m = รีแอคแตนซ์รวมทั้งหมดของขดลวดช่วย

r_m = ความต้านทานรวมทั้งหมดของขดลวดช่วย

Z_m = อิมพีแดนซ์รวมทั้งหมดของขดลวดหลัก

Z_m = อิมพีแดนซ์รวมทั้งหมดของขดลวดช่วย

สมการในรูปทั่วไปของมอเตอร์ 2 เฟสแบบไม่สมดุล (The General Equation of an Unbalanced Two-Phase Motor)

ในมอเตอร์แบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทนั้น ถึงแม้ว่าในขณะที่หมุนปกติจะมีขดลวดหลัก

เพียงขดเดียวที่ทำงานก็ตาม แต่ในขณะที่สตาร์ทนั้นจะเกิดจากการกระทำของขดลวดทั้งสองขดคือ

ขดลวดหลักและขดลวดช่วย ดังนั้นในขณะที่มอเตอร์สตาร์ทจึงมีการทำงานโดยอาศัยหลักการ

ของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบ 2 เฟสไม่สมดุล (Unbalanced two-phase Machine) มาใช้นั่นเอง

ดังนั้นก่อนที่จะพิจารณาถึงการสตาร์ทมอเตอร์แบบคาปาซิเตอร์สตาร์ทนั้น จึงขอกล่าวถึงทฤษฎีของ

มอเตอร์ 2 เฟสไม่สมดุลก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในมอเตอร์แบบนี้

ขดลวดหลักและขดลวดช่วยจะได้รับการกระตุ้นจากกระแส

i_m และ i_a ตามลำดับดังรูปที่ 2.13 ฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดหลัก (main winding flux)

สามารถแยกออกเป็นฟลักซ์แม่เหล็กหมุน 2 ส่วนคือส่วนแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า ϕ_{pm} และ

ส่วนแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง ϕ_{bm}

ในลักษณะเดียวกันฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดช่วย ϕ_a ก็สามารถแยกออกเป็น ϕ_{pa} และ ϕ_{ba} ฟลักซ์

แม่เหล็กหมุนทั้ง 4 นี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์เตจขึ้นในขดลวดทั้งสอง

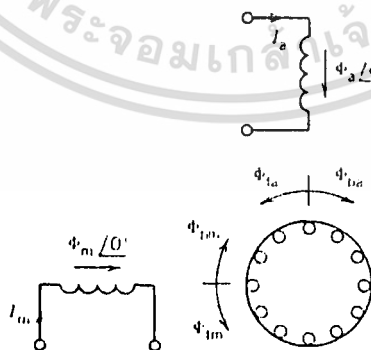
ขดลวดหลักสามารถแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าในรูปที่ 2.14(a) โดยที่ E_{pm} และ

E_{bm} คือโวลต์เตจที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยฟลักซ์แม่เหล็กหมุนของตัวเองคือ ϕ_{pm} และ ϕ_{bm}

ตามลำดับ ส่วนโวลต์เตจที่ถูกเหนี่ยวนำเกิดขึ้นคือ $-jE_{pa}/a$ และ jE_{ba}/a ($a=N_m/N_a$)

ในขดลวดหลักนั้นเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กหมุน ϕ_{pm} และ ϕ_{bm} ตามลำดับ ขดลวดช่วยจะแสดงอยู่

ในรูปโวลต์เตจภายในวงจร



รูป 2.13 แสดงส่วนแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์แบบ 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในมอเตอร์แบบนี้

ขดลวดหลักและขดลวดช่วยจะได้รับการกระตุ้นจากกระแส

i_m และ i_a ตามลำดับดังรูปที่ 2.13 ฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดหลัก (main winding flux)

สามารถแยกออกเป็นฟลักซ์แม่เหล็กหมุน 2 ส่วนคือส่วนแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า $\phi_{r,m}$ และ

ส่วนแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง $\phi_{b,m}$

ในลักษณะเดียวกันฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดช่วย ϕ_a ก็สามารถแยกออกเป็น $\phi_{r,a}$ และ $\phi_{b,a}$ ฟลักซ์

แม่เหล็กหมุนทั้ง 4 นี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์เตจขึ้นในขดลวดทั้งสอง

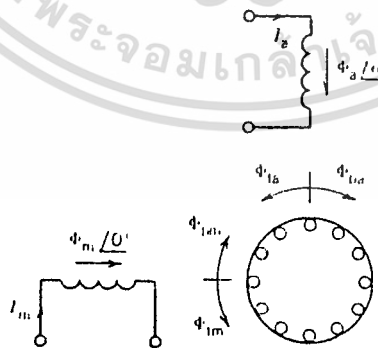
ขดลวดหลักสามารถแทนได้ด้วยวงจรถือเท่ากับในรูปที่ 2.14(a) โดยที่ $E_{r,m}$ และ

$E_{b,m}$ คือโวลต์เตจที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยฟลักซ์แม่เหล็กหมุนของตัวเองคือ $\phi_{r,m}$ และ $\phi_{b,m}$

ตามลำดับ ส่วนโวลต์เตจที่ถูกเหนี่ยวนำเกิดขึ้นคือ $-jE_{r,a}/a$ และ $jE_{b,a}/a$ ($a=N_a/N_m$)

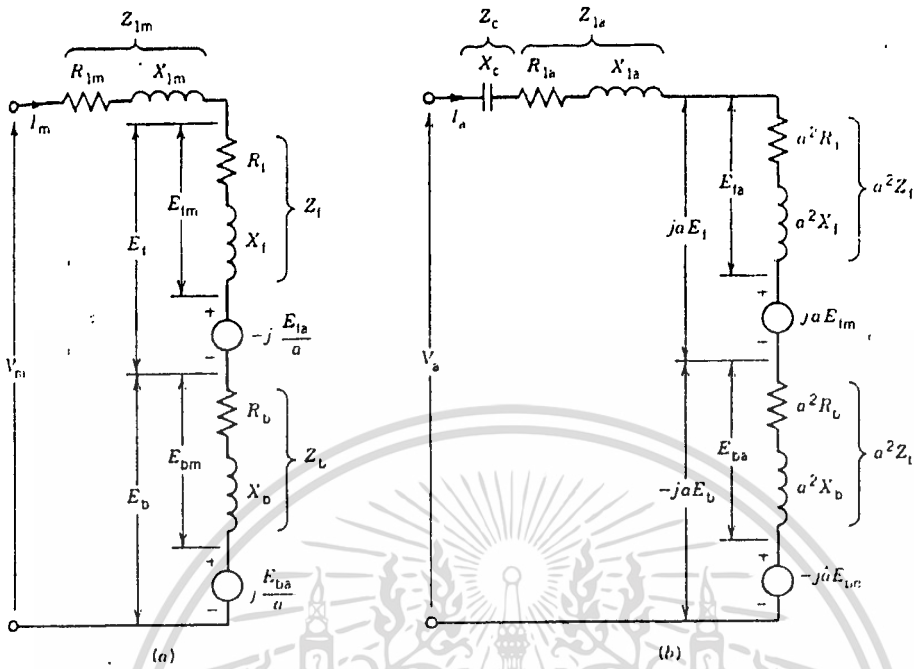
ในขดลวดหลักนั้นเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กหมุน $\phi_{r,m}$ และ $\phi_{b,m}$ ตามลำดับ ขดลวดช่วยจะแสดงอยู่

ในรูปโวลต์เตจภายในวงจร



รูป 2.13 แสดงส่วนแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์แบบ 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.14 แสดงวงจรเทียบเท่าของมอเตอร์แบบ 2 เฟส

ฟลักซ์แม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า ϕ_{pm} ของขดลวดช่วยจะเหนี่ยวนำโวลต์เตจ E_{pm} ในขดลวด
 ของตัวมันเอง จากรูป 2.13 ฟลักซ์ ϕ_{pm} นี้จะเหนี่ยวนำโวลต์เตจในขดลวดหลักซึ่งจะมีค่าสูง
 สุดที่มุม $\pi/2$ เรเดียนต่อมา ถ้า a คืออัตราส่วนจํารอบของขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก โวลต์
 เตจเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดหลักก็คือ $-jE_{pm}/a$ โดยที่ $-j$ แสดงมุมเฟสล่าหลัง (Phase lag)
 ไปเป็นมุม $\pi/2$ เรเดียน ในทำนองเดียวกันฟลักซ์ ϕ_{sm} จะเหนี่ยวนำโวลต์เตจ E_{sm} ใน
 ขดลวดช่วยและโวลต์เตจ jE_{sm}/a ในขดลวดหลักซึ่งมีค่าสูงสุด (peak) ที่มุม $\pi/2$ ก่อนหน้านั้น

ขดลวดช่วยจะแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าในรูป 2.14(b) โดยที่โวลต์เตจภายใน jE_{sm}
 และ $-jE_{pm}$ เป็นโวลต์เตจเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดช่วยโดยฟลักซ์ ϕ_{sm} และ ϕ_{pm} ของขดลวด

สมการของโวลต์ที่เตจและกระแสสำหรับขดลวดทั้งสองคือ

$$V_m = I_m(Z_m + Z_p + Z_b) - jE_{p_m}/a + jE_{b_m}/a \quad (2.49)$$

$$= I_m(R_{T_m} + jX_{T_m}) - I_m a [(R_p - R_b) + j(X_p - X_b)] \quad (2.50)$$

$$V_a = I_a(Z_c + Z_{1_a} + a^2 Z_p + a^2 Z_b) + jaE_{p_m} - jaE_{b_m} \quad (2.51)$$

$$= I_a(R_{T_a} + jX_{T_a}) - I_a a [(R_p - R_b) + j(X_p - X_b)] \quad (2.52)$$

โดยที่ $Z_{1_m} = R_{1_m} + jX_{1_m}$ คืออิมพีแดนซ์รั่วไหล (leakage Impedance) ของขดลวดหลัก

$Z_{1_a} = R_{1_a} + jX_{1_a}$ คืออิมพีแดนซ์รั่วไหล (leakage Impedance) ของขดลวดช่วย

$Z_c = R_c - jX_c$ คืออิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับขดลวดช่วย

$R_{T_m} = R_{1_m} + R_p + R_b$ คือความต้านทานรวมของขดลวดหลัก

$R_{T_a} = R_{1_a} + R_c + a^2 R_p + a^2 R_b$ คือความต้านทานรวมของขดลวดช่วย

และ

$$E_{p_m} = I_m a^2 Z_p \quad (2.53)$$

$$E_{b_m} = I_m a^2 Z_b \quad (2.54)$$

$$E_{p_a} = I_a Z_p \quad (2.55)$$

$$E_{b_a} = I_a Z_b \quad (2.56)$$

จากสมการที่ 2.50 และ 2.52 สามารถหากระแส I_m และ I_a ได้เป็น

$$I_m = \frac{V_m (R_{T_a} + jX_{T_a}) + jV_a a [(R_p - R_b) + j(X_p - X_b)]}{(R_{T_m} + jX_{T_m})(R_{T_a} + jX_{T_a}) - a^2 [(R_p - R_b) + j(X_p - X_b)]^2} \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ (R_{Tm} + jX_{Tm})(R_{Ta} + jX_{Ta}) - a² [(R_p - R_b) + j(X_p - X_b)]² นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_m = \frac{V_m(R_{Tm} + jX_{Tm}) - jV_m a [(R_f - R_b) + j(X_f - X_b)]}{(R_{Tm} + jX_{Tm})(R_{Tm} + jX_{Tm}) - a^2 [(R_f - R_b) + j(X_f - X_b)]^2} \quad (2.58)$$

และ $I_L = I_m + I_m =$ กระแสเข้ามอเตอร์ (Line current) (2.59)

ถ้าให้กระแสในขดลวดหลักเป็น

$$I_m = I_{mcr} + I_{m1} \quad (2.60)$$

และกระแสในขดลวดช่วยเป็น

$$I_m = I_{mcr} + I_{m1} \quad (2.61)$$

แรงบิด (Torque)

แรงบิดที่เกิดขึ้นโดยมอเตอร์สามารถแสดงได้อยู่ในรูปผลต่างระหว่างแรงบิดไปข้างหน้า

และแรงบิดไปข้างหลัง

$$T = T_f - T_b = (P_{mf} - P_{mb}) / \omega_m \quad (2.62)$$

จากรูปที่ 2.14

$$P_{mf} = \text{Re}(E_f I_m^* + ja E_f I_m^*)$$

$$P_{mb} = \text{Re}(E_b I_m^* - ja E_b I_m^*)$$

$$P_{mf} - P_{mb} = \text{Re}[(E_f - E_b) I_m^* + ja(E_f - E_b) I_m^*] \quad (2.63)$$

สมการที่ 2.63 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายในรูปคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (|I_m^{*}|² + |aI_m^{*}|²) (R_f - R_b) + 2a(R_f + R_b)(I_{mcr}I_{m1}^{*} - I_{mcr}^{*}I_{m1}) โดย (2.64) ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการทั้งหมดนี้ใช้ได้เสมอเมื่อการทำงานของมอเตอร์เป็นแบบ 2 เฟสคือทั้งขดลวดหลัก และขดลวดช่วยทำงานทั้ง 2 เฟสในขณะที่มอเตอร์หมุน

สมการในขณะที่มอเตอร์สตาร์ท

ในขณะที่มอเตอร์สตาร์ทนั้นโดยจะใช้ขดลวดช่วยช่วยในการสตาร์ท มอเตอร์ขณะ สตาร์ทจึงทำงานในลักษณะ 2 เฟส ดังนั้นสมการในกรณีของมอเตอร์แบบ 2 เฟสจึงสามารถนำมาใช้ได้สำหรับมอเตอร์แบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท

$$V_m = V_a = V$$

และขณะสตาร์ทค่าสลิป $S=1$

จากสมการที่ 2.19-2.20 จะพบว่า $R_r = R_b$, $X_r = X_b$

และจากสมการที่ 2.53-2.56 จะเป็น $E_{r_m} = E_{b_m}$

$$E_{r_a} = E_{b_a}$$

ดังนั้นวงจรเทียบเท่าของขดลวดทั้งสองขณะสตาร์ทจึงไม่มีโวลต์เตจภายใน (internal voltage) เหล่านี้เนื่องจากจะเกิดการหักล้างกันหมดไปพอดี

ส่วนความต้านทานรวมและรีแอกแตนซ์รวมของทั้ง 2 ขดลวดจะลดรูปเป็น

$$R_{T_m} = R_{1_m} + 2R_r \tag{2.65}$$

$$R_{T_a} = R_{1_a} + R_c + 2a^2 R_r \tag{2.66}$$

$$X_{T_m} = X_{1_m} + 2X_r \tag{2.67}$$

$$X_{T_a} = X_{1_a} + X_c + 2a^2 X_r \tag{2.68}$$

จากสมการที่ 2.57 , 2.58 ดังนั้นกระแส I_m และ I_a จะเป็น

$$I_{mr} = VR_{Tm} / (R_{Tm}^2 + X_{Tm}^2) \quad (2.69)$$

$$I_{mi} = -VX_{Tm} / (R_{Tm}^2 + X_{Tm}^2) \quad (2.70)$$

$$I_{mR} = VR_{Ta} / (R_{Ta}^2 + X_{Ta}^2) \quad (2.71)$$

$$I_{mi} = -VX_{Ta} / (R_{Ta}^2 + X_{Ta}^2) \quad (2.72)$$

$$I_m = I_{mr} + jI_{mi} \quad (2.73)$$

$$I_a = I_{mR} + jI_{mi} \quad (2.74)$$

$$I_L = I_m + I_a \quad (2.75)$$

จากสมการ 2.64 แรงบิดขณะสตาร์ทจะเป็น

$$\begin{aligned} T_s &= [2a(R_f + R_b)(I_{mr}I_{mi} - I_{mR}I_{mi})] / W_m \\ &= [4a(R_f)(I_{mr}I_{mi} - I_{mR}I_{mi})] / W_m \end{aligned} \quad (2.76)$$

สมการที่ 2.76 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปตัวแปร a ได้โดยการแทนค่าจากสมการที่

2.69-2.72 ลงในสมการที่ 2.76 ก็จะได้สมการของแรงบิดขณะสตาร์ทที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปร a

โวลท์เตจคร่อมคาปาซิเตอร์ขณะลัดวงจร

$$\begin{aligned} E_c &= I_a \sqrt{X_c^2 + R_c^2} \\ &= I_a \sqrt{X_c^2 + X_c^2 (P_{fc})^2} \\ &= I_a X_c \sqrt{1 + (P_{fc})^2} \end{aligned} \quad (2.77)$$

เช่นเดียวกับแรงบิด ถ้าต้องการสมการของ E_c อยู่ในรูปฟังก์ชันของ a ก็

สามารถแทน I_a ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ a อยู่แล้ว เข้าไปในสมการ 2.77
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในพหุขณะล็อกโรเตอร์ (Locked rotor line current)

$$I_L = I_m + I_u$$
$$= \sqrt{(I_{mr} + I_{ur})^2 + (I_{mi} + I_{ui})^2} \quad (2.78)$$

เช่นเดียวกับสมการที่ 2.78 สามารถทำให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ a ได้

เซอร์คิวลาร์มีเนเปอร์แอมแปร์

$$cmil/A = d^2 W * 10^6 / I_u I_u = [d^2 W * 10^6 / \sqrt{R_{ra}^2 + X_{ra}^2}] / V I_u \quad (2.79)$$

โดยที่ $I_u = \text{unit current} = 746 \text{hp} / V_u$

$V_u =$ โวลต์เตจที่พิกัดของขดลวดหรือมอเตอร์

$V =$ เปอรียูนิต ของโวลต์เตจคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย ซึ่งเท่ากับ 1 p.u.

$dW =$ เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดช่วย หน่วยเป็นนิ้ว

บทที่ 3

การออกแบบเฟสช่วยสตาร์ทของมอเตอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุช่วยสตาร์ท

(Auxilliary Phase Design of Capacitor-Start Motor)

ขั้นตอนในการออกแบบขดลวดช่วย (Auxilliary winding)

1. ออกแบบขดลวดหลัก (main winding) ก่อน
2. เลือกค่าตัวประกอบการกระจาย (Distribution factor) ของขดลวด

จากนั้นจึงทำการออกแบบขดลวด โดยมีหัวข้อที่ต้องคำนึงถึง 5 หัวข้อดังนี้คือ

- 1) แรงบิดขณะล๊อคโรเตอร์ (locked rotor torque) ที่ได้ต้องมีค่า $>=$ แรงบิดขณะล๊อคโรเตอร์ที่กำหนด (K_L)
- 2) แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุขณะล๊อคโรเตอร์ (locked rotor capacitor volts) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากขดลวดช่วย (auxilliary winding) จะต้องมีค่า $<=$ แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดบนตัวเก็บประจุ (K_C)
- 3) กระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอรืขณะล๊อคโรเตอร์ (line current at locked rotor) จะต้องมีค่า $<=$ กระแสเข้ามอเตอรืขณะล๊อคโรเตอร์ที่กำหนด (K_L)
- 4) ค่าเซอร์คิวลาร์มิลเพอร์แอมแปร์ (circular mils per ampere) ขณะล๊อคโรเตอร์จะต้องมีค่า $>=$ ค่าเซอร์คิวลาร์มิลเพอร์แอมแปร์ที่กำหนด (K_A)
- 5) ความหนาแน่นของช่องสล๊อท (slot fullness) จะต้องไม่เกินค่าสูงสุดที่กำหนด (K_{SF}) โดยทั่วไปจะไม่เกิน 65%

ในการออกแบบขดลวดช่วยนั้นทำได้โดยการคำนวณค่าต่าง ๆ ทั้ง 5 อย่างจากสมการทั้ง 5 สมการที่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนการพัน a (winding ratio = N_u/N_m) ซึ่งเป็นสมการกำลังสี่ของ a แล้วทำการพล็อตเป็นกราฟออกมา แล้วเปลี่ยนค่าของขนาดของตัวเก็บประจุใหม่หรือเปลี่ยนขนาดของขดลวดช่วยใหม่แล้วคำนวณเช่นเดิมแล้วพล็อตกราฟ ก็จะได้กราฟของขดลวดแต่ละขนาดกับตัวเก็บประจุแต่ละขนาดหลายกราฟที่ค่า a ค่าต่าง ๆ กัน แล้วจึงทำการเลือกค่า a ที่เป็นช่วงที่จะให้ได้เป็นไปตามข้อกำหนดทั้ง 5 ข้อ โดยเลือกช่วงของค่า a ที่ละหัวข้อ เมื่อได้ช่วงของค่า a จากทั้ง 5 หัวข้อแล้ว จึงเลือกช่วงของค่า a ที่จะให้ค่าที่เป็นไปตามข้อจำกัดทั้ง 5 อย่างได้ ถ้าช่วงของค่า a ที่ได้ไม่สามารถหาช่วงที่ให้เป็นไปตามข้อจำกัดทั้ง 5 อย่าง หลังจากทำการเปลี่ยนขนาดของขดลวดช่วยและตัวเก็บประจุที่มีอยู่ทุกขนาดแล้ว ก็จำเป็นต้องออกแบบขดลวดหลักใหม่แล้วจึงเข้ามาออกแบบขดลวดหลักนี้อีกที่ตามวิธีเดิม แต่ถ้าเปลี่ยนขดลวดช่วยหรือเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุแล้วได้ช่วง a ออกมาหลาย ๆ แบบ เรา

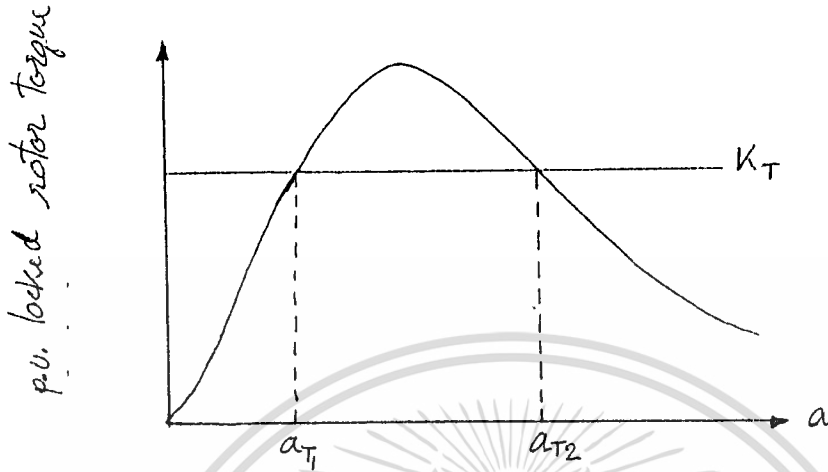
จะต้องเลือกแบบที่ให้ค่าคาปาซิเตอร์เฟส (capacitor phase) ที่ดีที่สุดมาใช้ ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกช่วงของค่า a จากข้อจำกัดที่หนึ่ง (แรงบิดขณะล๊อคโรเตอร์)

ค่า a หาได้จากสมการที่ 2.76 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

-รากที่ได้ของค่า a เป็นจำนวนจริงบวกที่ต่างกัน 2 จำนวนคือ a_{T1} , a_{T2}



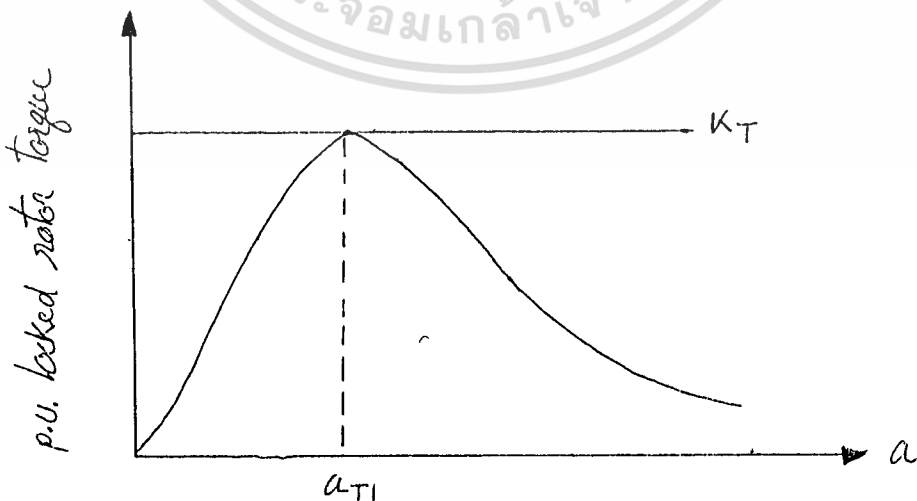
จากข้อจำกัดข้อแรกจะได้ว่าช่วงของ a ที่ใช้ได้คือ $a_{T1} \leq a \leq a_{T2}$

ค่า a ที่หาได้นี้หาได้ 2 วิธีคือ

1. พิจารณาจากกราฟ

2. ทำการแก้สมการกำลังสี่ (a^4) ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากกว่าวิธีแรก และคำตอบที่ได้จากสมการกำลังสี่จะมีอยู่ 4 คำตอบซึ่งอาจจะเป็นจำนวนจริง (real number) หรือจำนวนเชิงซ้อน (complex number) หรือจะมีทั้ง 2 แบบก็ได้ เราจะเลือกเอาเฉพาะคำตอบที่เป็นจำนวนจริงเท่านั้นไปใช้ ส่วนที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนจะไม่ใช้เพราะจะไม่ได้ค่าต่าง ๆ ได้ตามที่เรากำหนด

-รากที่ได้เป็นจำนวนจริงบวก 2 จำนวนที่มีค่าเท่ากัน



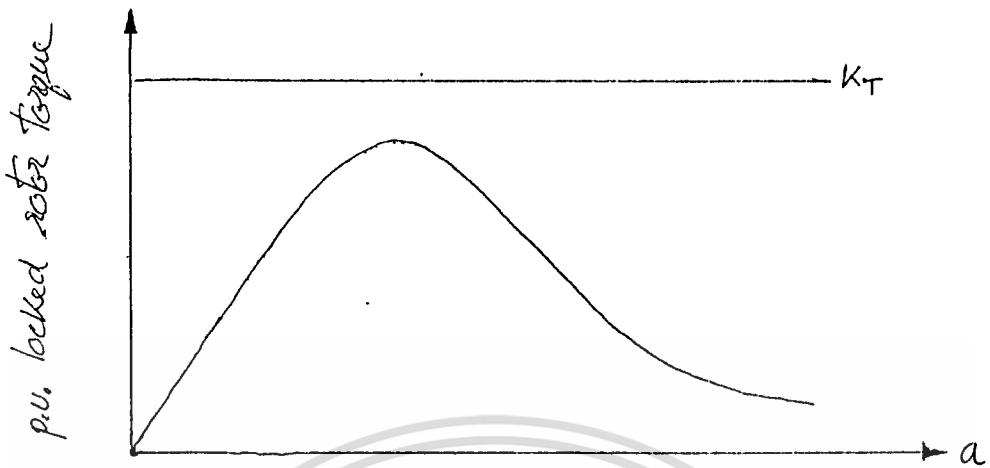
จากรูป ช่วง a คือ $a = a_{T1}$ ที่จุดเดียวกับเท่านั้นและค่า K_T เป็นแรงบิดสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

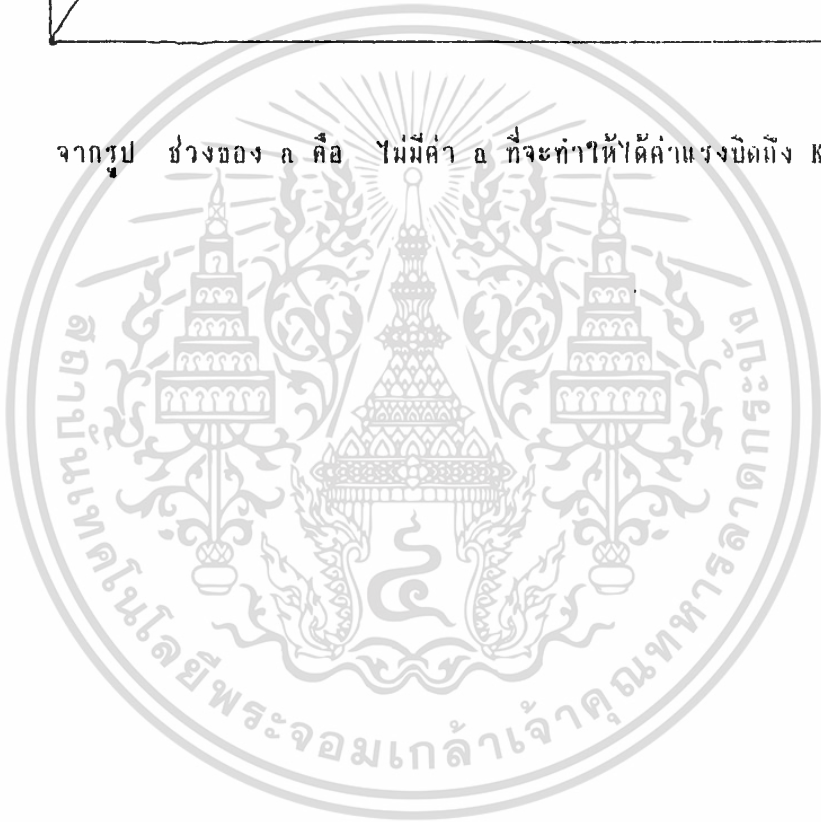
เพราะว่าหาจุดตัดระหว่างเส้นตรงกับเส้นโค้งของชดลวดไม่ได้เลย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รากที่ได้ไม่ใช่จำนวนจริงบวกคือเป็นจำนวนเชิงซ้อน



จากรูป ช่วงของ a คือ ไม่มีค่า a ที่จะทำให้ได้ค่าแรงบิดถึง K_T เลย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกช่วงของ a จากข้อจำกัดเรื่องโวลต์เตจคร่อมตัวเก็บประจุขณะล๊อคโรเตอร์

(locked rotor capacitor volts)

จากข้อจำกัดที่ 2 นี้ค่า a หาได้จากสมการที่ 2.77

ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

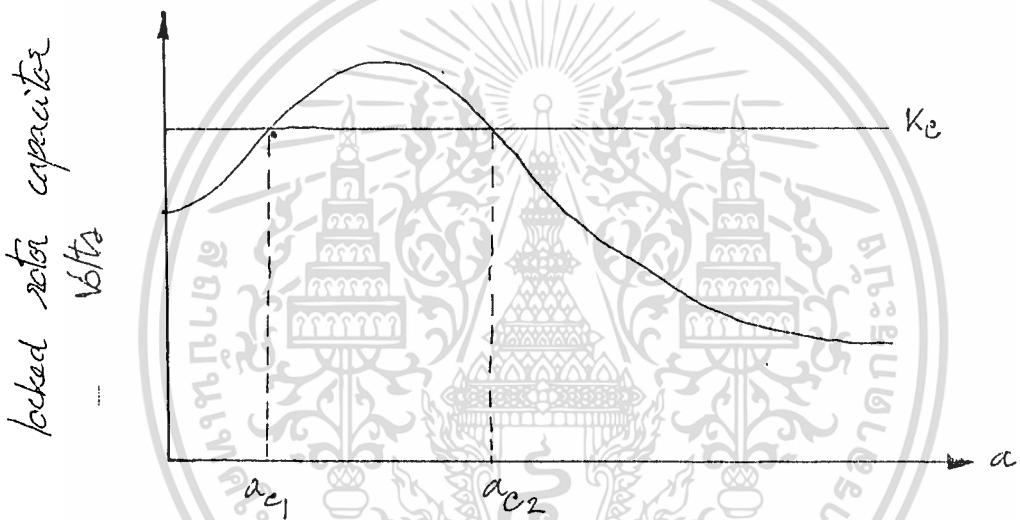
1. กรณีที่โวลต์เตจที่ตัวเก็บประจุทนได้ (limiting capacitor volt) >

โวลต์เตจที่ออกแบบ (line volts)

ซึ่งรากของ a ที่ได้จะมี 2 แบบคือ

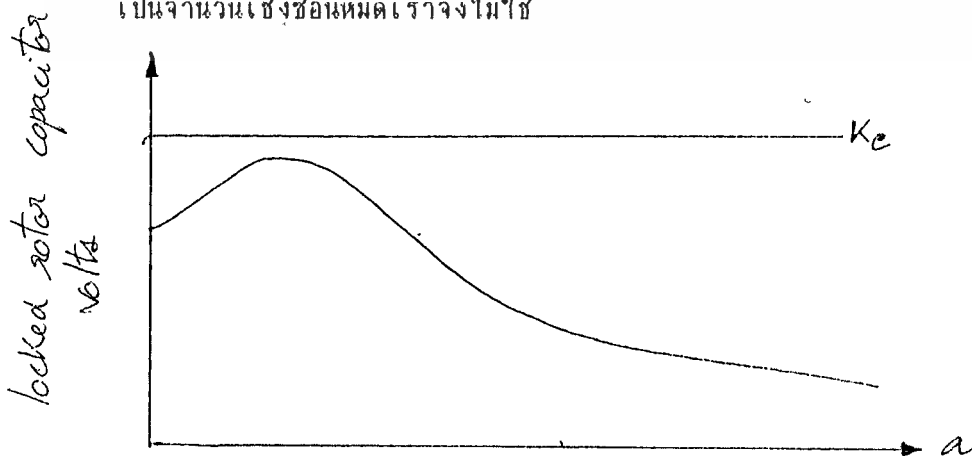
- รากที่ได้เป็นจำนวนจริงบวก 2 จำนวนที่ต่างกัน (คือผลของการแก้สมการกำลังสี่

ได้รากออกมาเป็นจำนวนจริงบวกที่ค่าต่างกัน 2 ค่ากับค่าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนอีก 2 ค่าแต่ค่าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนเราไม่ใช้)



จากข้อจำกัดที่กำหนดไว้ ช่วงของ a ที่ใช้ได้คือ $0 < a \leq a_{c1}$ หรือ $a_{c2} \leq a < \alpha$

- รากที่ได้ไม่เป็นจำนวนจริงบวก (no positive real roots) หมายความว่ารากที่ได้ ออกมาทั้งหมดจากการการแก้สมการกำลังสี่ (a^4) ซึ่งจะได้ออกมา 4 ราก ทั้ง 4 รากนี้เป็นจำนวนเชิงซ้อนหมดเราจึงไม่ใช้



2. กรณีที่โวลต์เตจที่ตัวเก็บประจุมาได้ < โวลต์เตจที่ออกแบบ
รากที่ได้จะเป็นไปได้ 2 แบบคือ

เป็นจำนวนจริงบวก 1 ค่าและเป็นจำนวนเชิงซ้อน 3 ค่าซึ่งไม่ใช่

หรือเป็นจำนวนจริงบวก 3 ค่าและเป็นจำนวนเชิงซ้อน 1 ค่าซึ่งไม่ใช่

ช่วงของ a ที่ใช้ได้คือ $a_{c_1} < a < a_{c_2}$ และ $a > a_{c_3}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

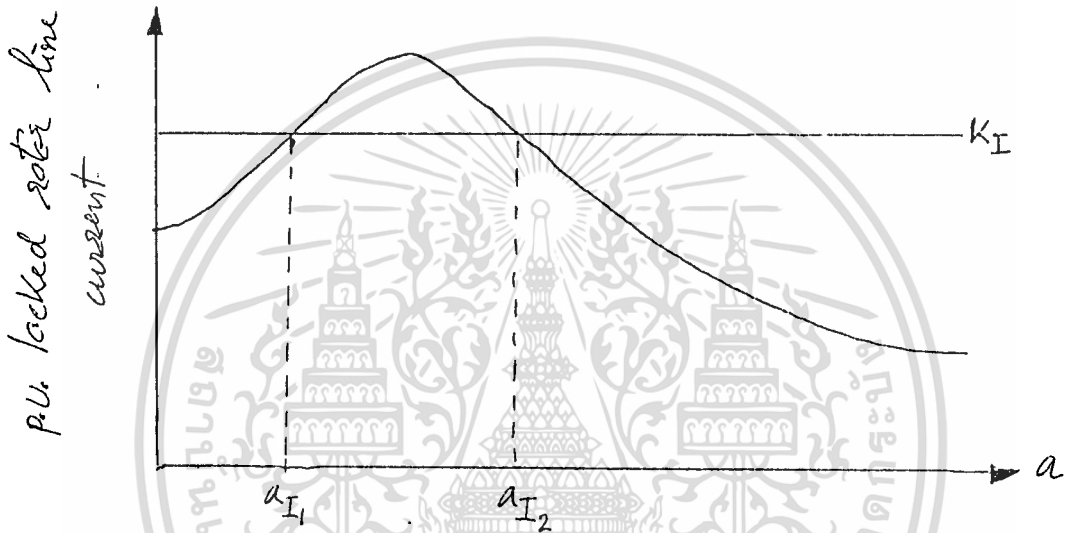
การหาค่า a จากข้อจำกัดเรื่องกระแสและล้อยคโรเตอร์ (locked rotor line current)

ค่า a จากสมการที่ 12 แบ่งพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ

1. กรณีที่กระแสที่เข้ามอเตอร์ (allowable line current) > กระแสในขดลวดหลัก (main winding current)

รากที่ได้จะมี 2 แบบคือ

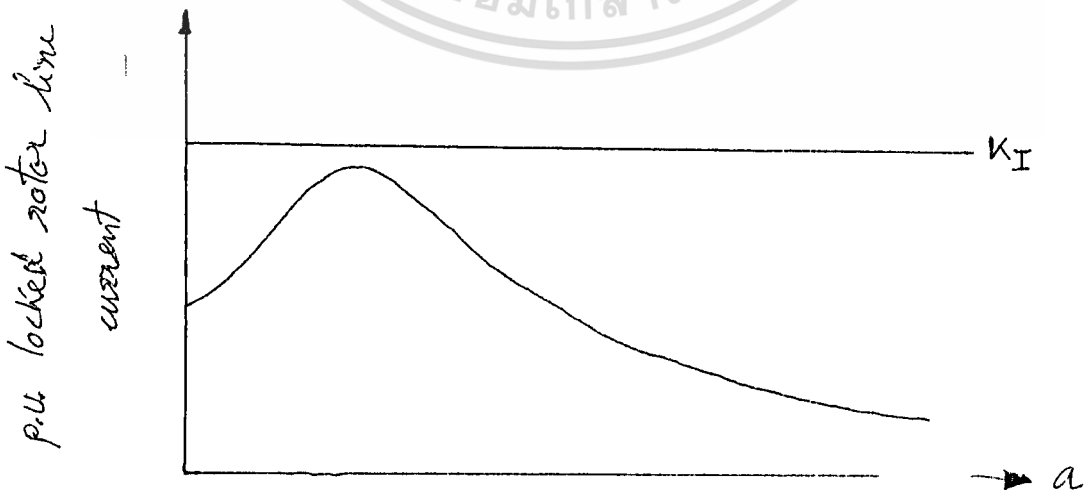
- รากของ a เป็นจำนวนจริงบวก 2 ค่าที่ต่างกัน ส่วนรากที่เหลืออีก 2 ค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งเราไม่ใช้



จากข้อกำหนดในการออกแบบจะได้ว่าช่วงของ a คือ $0 < a \leq a_{I1}$ หรือ

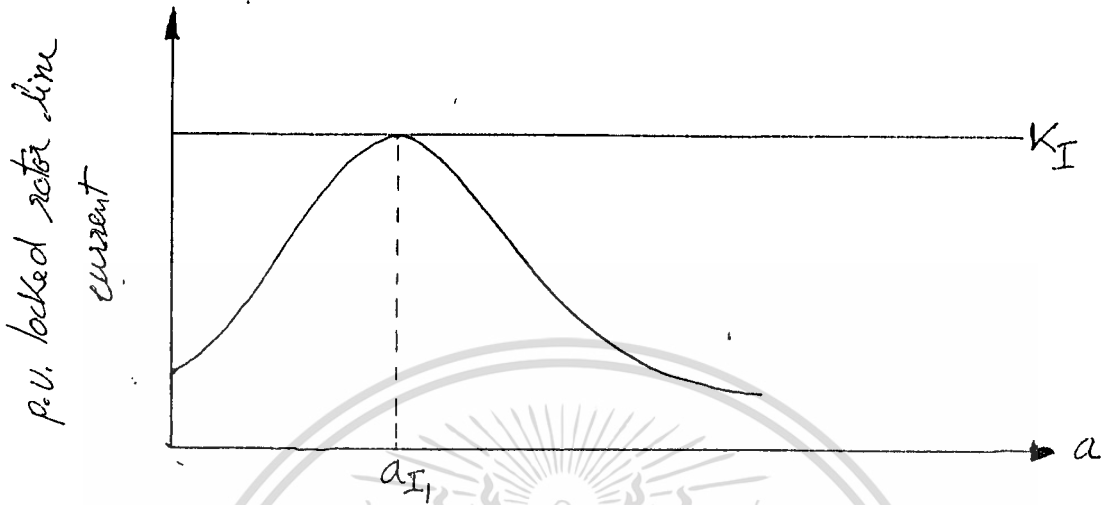
$a_{I2} < a \leq \alpha$

- รากของค่า a ไม่เป็นจำนวนจริงบวก ดังนั้นรากทั้ง 4 ค่าจะออกมาเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งรากที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนจะไม่สามารถให้ค่าได้ตามที่กำหนด



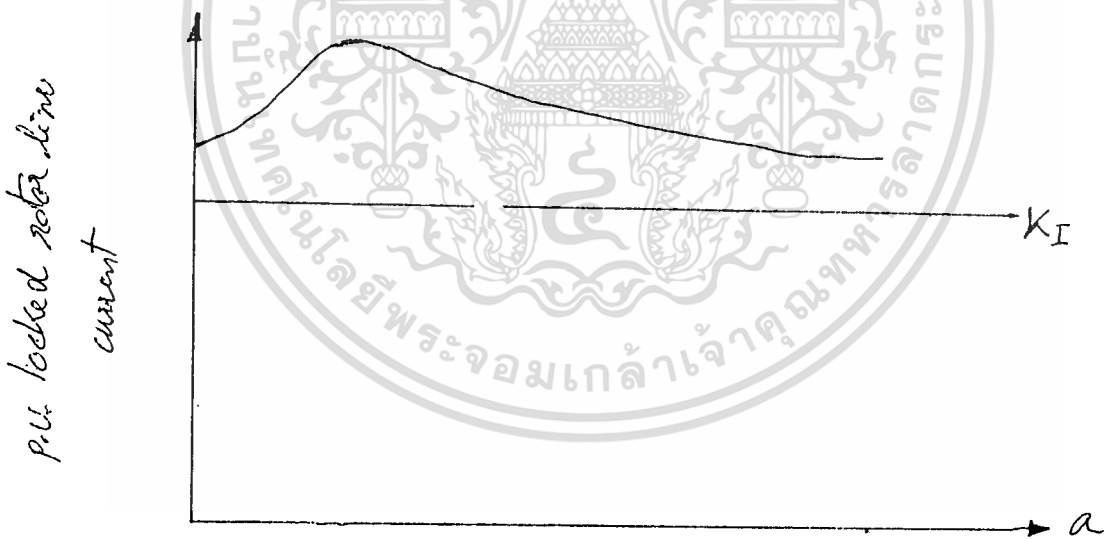
2. กรณีที่ กระแสที่เข้ามอเตอร์ > กระแสในเขตลวดหลัก

- รากที่ได้เป็นจำนวนจริงบวกค่าเดียว ส่วนที่เหลือจะเป็นจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน 3 ค่า ซึ่งเราไม่ใช้



จากรูป และข้อกำหนดจะได้ว่าช่วงของ a คือ $a < a_{I_1}$

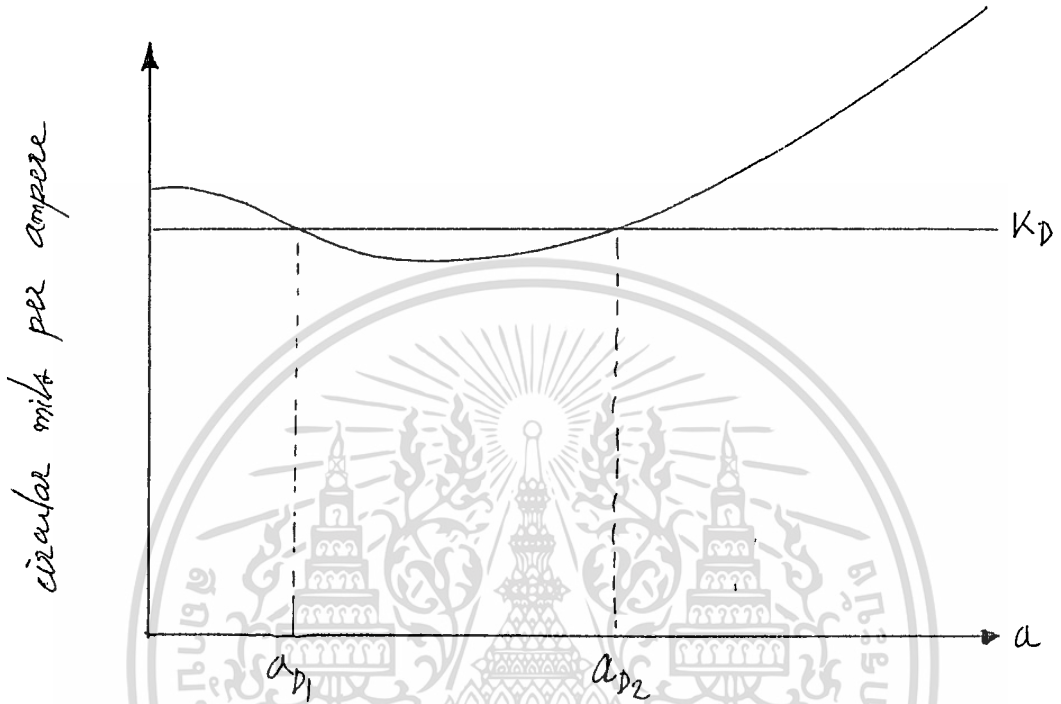
- รากที่ได้ไม่เป็นจำนวนจริงบวก ดังนั้น ค่าตอบจากการแก้สมการกำลังสี่จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน 4 ค่า



จากรูปจะได้ว่าช่วงของ a คือ ไม่มีช่วงของ a ค่าใด ๆ ที่ใช้ได้

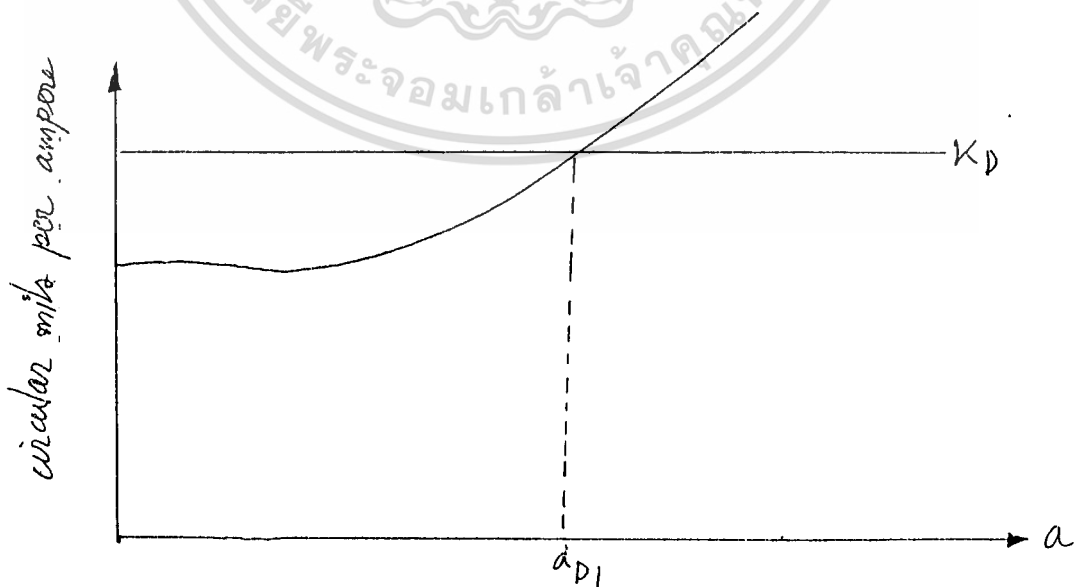
การหาค่า a จากข้อจำกัดในเรื่องเซอร์ติฟิเคตต่อกระแสความหนาแน่น circular mils per auxilliary ampre

ค่า a หาได้จากสมการ 2.79 รากที่ได้ของ a จากสมการจะเป็นได้ 3 แบบคือ
 -รากที่ได้ของ a เป็นจำนวนจริงบวก 2 จำนวนที่ต่างกัน และอีก 2 ค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งเราไม่ใช้

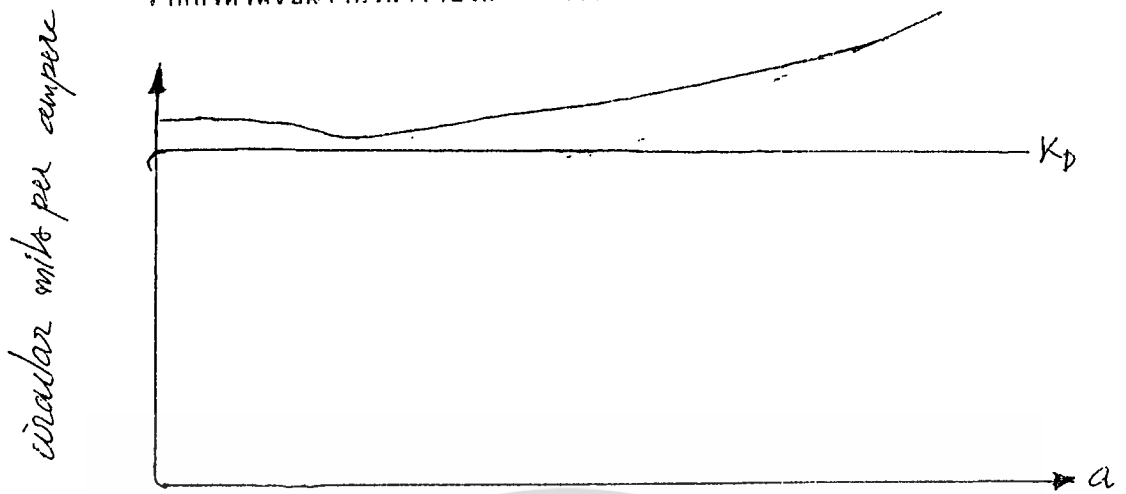


ช่วงของค่า a ที่เป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบคือ $0 < a \leq a_{D1}$ หรือ $a_{D2} \leq a < \alpha$

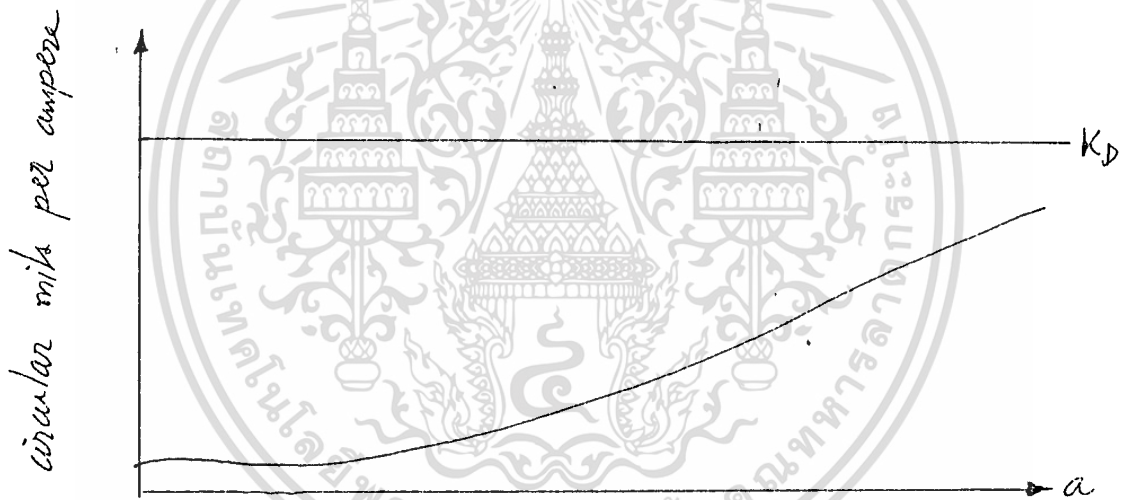
-รากที่ได้เป็นจำนวนจริงบวกเพียงค่าเดียวที่เหลือเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งไม่ใช้



-ราคาที่ได้ไม่เป็นจำนวนจริงบวก เป็นจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด



ช่วงของค่า a คือ $a > 0$
แต่ถ้ากราฟเป็น



กรณีนี้จะหาค่า a ไม่ได้เพราะว่าค่า $\text{cmils/A} \geq K_D$ เสมอ

การเลือกค่า n จากข้อจำกัดเรื่องความหนาแน่นช่องสล็อต (ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางกล)
ตามทฤษฎีแล้วกำหนดให้ใช้ได้ไม่เกิน 65% แต่ในทางปฏิบัติจะใช้ประมาณไม่เกิน 60% เพื่อ
ง่ายในการล่องสล็อตและระบายความร้อน

ข้อจำกัดในการออกแบบโดยวิธีนี้คือ

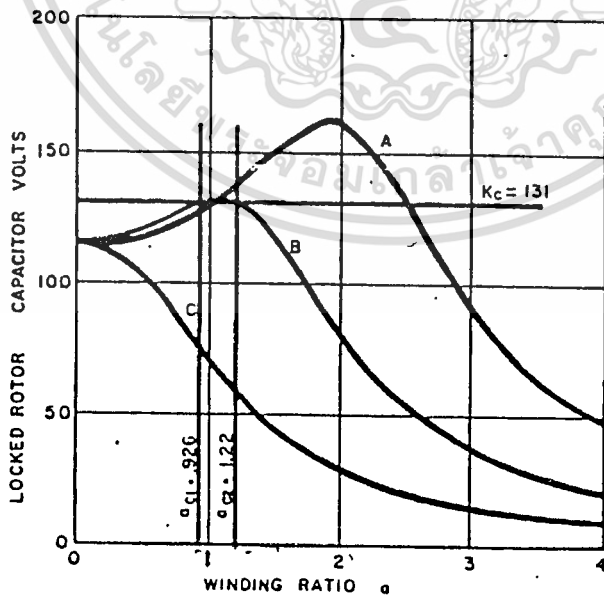
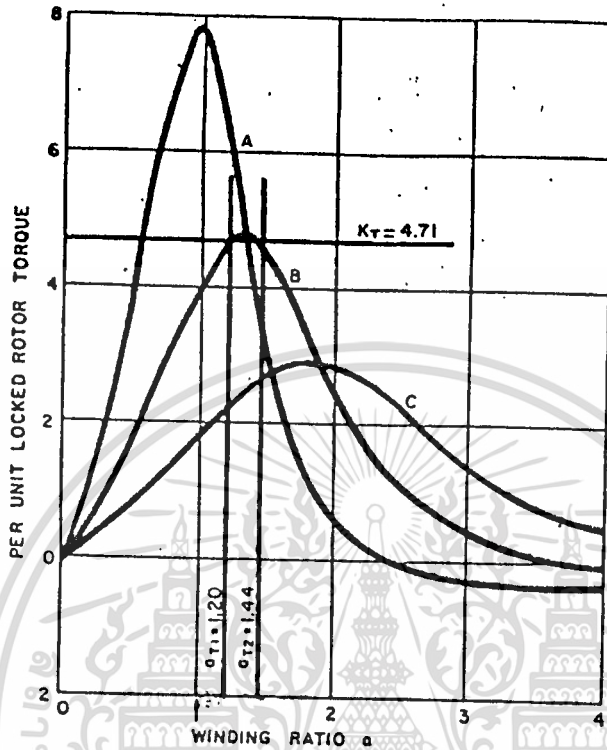
วิธีการและสมการที่ใช้ในการออกแบบนี้ ใช้ได้กับมอเตอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุสตาร์ทที่มี
โวลต์เตจของขดลวดหลักและขดลวดช่วยเท่ากัน และไม่คิดผลจากกระแส ที่ทำให้เกิดความ
สูญเสียในแกน (core loss) ด้วย



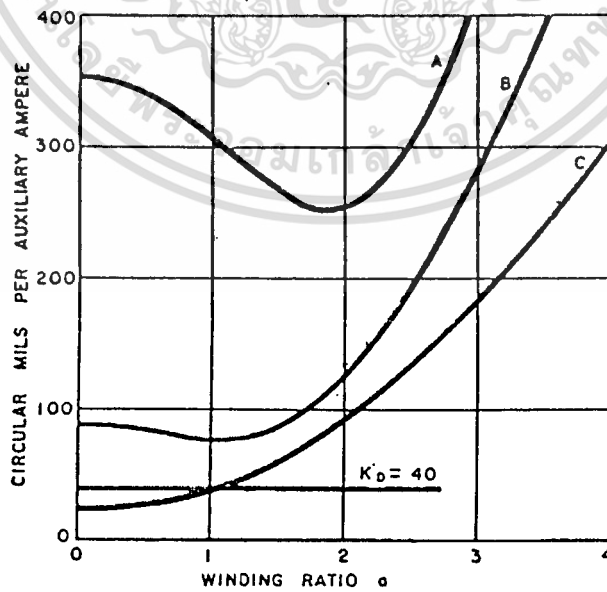
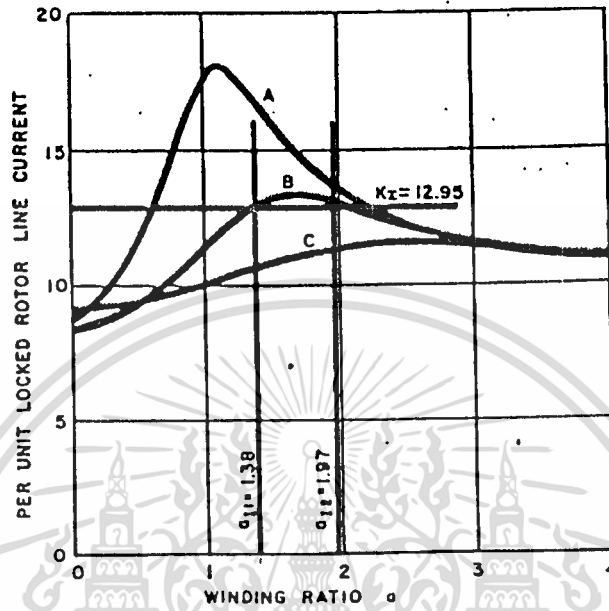
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการออกแบบ

จากรูปทั้ง 4 รูป คือตัวอย่างขดลวด 3 ขดคือ A , B , C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ $K_T \geq 4.71 \text{ p.u.}$
 $K_C \leq 131 \text{ volt}$
 $K_I \leq 12.95 \text{ p.u.}$
 $K_D \geq 40 \text{ cmil/A}$
slot fullness : $K_F \leq 62\%$

จะได้ค่าต่าง ๆ ตามตาราง

ตารางแสดงช่วงของค่า a ที่ได้ในแต่ละข้อจำกัด

ข้อจำกัดเรื่อง ขดลวด	Torque (p.u.)	Cap-volt (volt)	Line current (p.u.)	cmil/A	Slot fullness
A	$0.6 \leq a \leq 1.0$	$0 \leq a \leq 1.0$ or $2.5 \leq a \leq \alpha$	$0 \leq a \leq 0.6$ or $2.22 \leq a \leq \alpha$	$a > 0$	$a \leq 1.5$
B	$1.2 \leq a \leq 1.44$	$0 \leq a \leq .93$ or $1.2 \leq a \leq \alpha$	$0 \leq a \leq 1.38$ or $1.97 \leq a \leq \alpha$	$a > 0$	$a \leq 1.5$
C	no any of a	$a > 0$	$a > 0$	$a \geq 1.1$	$a \leq 1.5$

จากค่า a ทั้งหมดจากข้อจำกัดในการออกแบบทั้ง 5 ข้อนำมาหาช่วงของค่า a ที่ได้
ได้เป็นไปตามข้อจำกัดทั้ง 5 ข้อในแต่ละขดลวดช่วย A , B , C ได้ผลออกมาดังนี้คือ

ขดลวด A

หาค่า a ที่เป็นไปตามข้อจำกัดในการออกแบบทุกข้อไม่ได้
ดังนั้น ขดลวดช่วยขด A ใช้ไม่ได้

ขดลวด B

ช่วงของ a ที่เป็นไปตามข้อจำกัดทั้ง 5 ข้อคือ

$$1.22 \leq a \leq 1.38$$

ดังนั้น ขดลวด B สามารถใช้ออกแบบเป็นขดลวดช่วยตามที่กำหนดได้โดยค่าอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
การพนัน (winding ratio) ของ a จะต้องอยู่ในช่วงดังกล่าวด้วย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวด C

ขดลวด C สามารถหาค่า a ให้เป็นไปตามข้อจำกัดได้เพียง 4 อย่างเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้เป็นไปตามข้อจำกัดทั้ง 5 อย่างได้ เพราะไม่สามารถให้ค่าแรงบิดได้ถึง 4.71 p.u. ตามที่ต้องการได้ไม่ว่าค่า a จะเป็นเท่าไรก็ตาม ดังนั้น ขดลวดช่วยขด c จึงใช้ไม่ได้

สรุป ขดลวดทั้งสามที่นำมาเป็นตัวอย่างวิเคราะห์ มีขด B เท่านั้นที่ใช้เป็นขดลวดช่วยตามที่ต้องการได้



บทที่ 4

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและโปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบขดลวดช่วย โดยที่การทดสอบต่าง ๆ ของตัวมอเตอร์ จะทำให้ได้มาซึ่งตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรเทียบเท่าของมอเตอร์ โดยเมื่อทำการทดสอบมอเตอร์แล้วจึงทำการป้อนค่าที่วัดได้จากการทดสอบมอเตอร์ เข้าไปในโปรแกรมที่เขียนขึ้น จากนั้นโปรแกรมก็จะนำค่าที่ได้เหล่านี้ไปทำการคำนวณหาตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์จนครบ แล้วจึงนำพารามิเตอร์ทั้งหมดไปคำนวณหาสมการทั้ง 4 คือ สมการของแรงบิด โวลต์เตจตกคร่อมตัวเก็บประจุ กระแสที่เข้ามอเตอร์ เซอร์คิวลาร์มีลเปอร์แอมแปร์ ซึ่งสมการทั้ง 4 นี้เป็นสมการที่ติดขณะลัดโรเตอร์ คือสลิปเท่ากับ 1 เพื่อต้องการทราบลักษณะของมอเตอร์ขณะลัดรอร์ท จากนั้นจึงนำสมการทั้ง 4 มาพล็อตกราฟกับค่าอัตราส่วนการผัน (ϵ) ซึ่งกำหนดให้มีค่าตั้งแต่ 0-4 แล้วนำกราฟทั้งหมดมาเลือกช่วงที่เป็นไปได้ของแต่ละกราฟ แล้วนำช่วงทั้งหมดมาหาค่าของ ϵ ที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุด โดยในการออกแบบนี้จะกำหนดให้แรงบิดสูงสุดเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการออกแบบ

การทดลอง โดยการทดสอบมอเตอร์แบบลัดโรเตอร์และทดสอบแบบไร้โหลด รวมทั้งการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยวิธีอื่น ๆ อีก เพื่อนำค่าไปป้อนเข้าไปในโปรแกรมที่กำหนดที่คำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ออกมาอีกทีหนึ่ง โดยจากการทดสอบต่าง ๆ นี้ เราจะได้ค่ากำลังงาน โวลต์เตจ กระแส ออกมาแล้วนำปริมาตรทั้ง 3 นี้ไปป้อนในโปรแกรมซึ่งจะมีช่วงที่เป็น อินพุตที่ได้จากการทดสอบไว้ให้ใส่ค่าต่าง ๆ เข้าไป จากนั้นโปรแกรมก็จะทำการคำนวณออกมาให้ทั้งหมด

การทำงานของโปรแกรม โปรแกรมที่ใช้เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปโลตัส 123 เขียนอีกทีหนึ่ง วิธีการใช้โปรแกรมก็เพียงแต่ป้อนค่า P, V, I ที่ได้จากการทดสอบและค่าตัวแปรอินพุตอื่น ๆ ที่ได้จากการวัดใส่เข้าไปในโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมก็จะทำการคำนวณค่าต่าง ๆ ออกมาทั้งหมด จากนั้นจึงทำการเอาข้อมูลจากโปรแกรมมาพล็อตกราฟ 4 กราฟ โดยกราฟทุกกราฟจะพล็อตให้แกน x เป็นค่าอัตราส่วนการผัน ϵ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0-4 เพิ่มขึ้นทีละ 0.1 โดยแกน y ของแต่ละกราฟจะเป็น $T_L(p.u.), E_b(p.u.), I_L(p.u.), cmil/A$ จากนั้นก็ทำการพิมพ์กราฟออกมาทางเครื่องพิมพ์โดยใช้แผ่นดิสก์ที่ชื่อ (PRINT GRAPH LOTUS 123) เมื่อได้กราฟแล้วก็เอามาทำการเลือกช่วงของค่า ϵ จากกราฟทั้ง 4 และ ความหนาแน่นช่องลัดที่กำหนดไว้ ในที่นี้ใช้ 0.2% ซึ่งจะได้ช่วงของค่า ϵ คือ $\epsilon \leq 1.5$ เลมอ โดยการเลือกช่วงของค่า ϵ ใช้วิธีตามที่กล่าวในบทที่ 3 เรื่องการออกแบบขดลวดช่วยและจากช่วงของค่า ϵ ที่ได้อันสุดท้ายก็นำมาเลือกค่า ϵ ที่จะให้แรงบิดได้สูงสุด ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟ $T_L(p.u.)-\epsilon$ ก็จะสามารถหาค่า ϵ ที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดได้

ตัวอย่างการออกแบบขดลวดช่วย แสดงในหน้าถัดไป

จากกราฟ แรงบิดขณะลัดโรเตอร์ จะได้ช่วงที่ต้องการคือ $0.75 \leq \epsilon \leq 1.05$

จากกราฟ โวลต์เตจคร่อมตัวเก็บประจุขณะลัดโรเตอร์จะได้ช่วงที่ต้องการคือ $\epsilon \geq 1.05$

จากกราฟ กระแสที่เข้ามอเตอร์จะได้ช่วงที่ต้องการคือ $\epsilon \geq 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ ค่าเซอร์คิวลาร์มีลเปอร์นอมแปร จะได้ช่วงที่ต้องการคือ $a \geq 0$
 และจากความหนาแน่นของช่องสลีท จะได้ช่วงที่ต้องการคือ $a \leq 1.5$
 ดังนั้นช่วงที่เหมาะสมที่สุดของค่าอัตราส่วนการผันคือ $a = 1.05$
 และจากช่วงที่ได้นี้พบว่าที่ค่า $a = 1.05$ ให้ค่าแรงบีคฆณะลตาร์ทสูงสุด ดังนั้น ค่าอัตราส่วน
 การผันที่เหมาะสมที่สุดคือ $a = 1.05$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROJECT

AUXILIARY PHASE DESIGN OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTORS

CAPACITOR START INDUCTION MOTORS

INPUT DATA FROM TEST

	NO LOAD TEST (Column C)	LOCKED ROTER TEST (Column E)
POWER (W)	190	418
VOLTAGES (V)	220	88
CURRENT (A)	3.8	9.5

INPUT MEASURED PARAMETERS
(Column C)

R1m (ohm)	1.6
R1a (ohm)	2.01
X1a (Ohm)	2

INPUT SPECIFICATION DESIRED
(Column D)

FREQUENCY (Hz)	50
POWER FACTER	0.75
CAPACITOR (Microfarads)	500
RATED VOLTAGES (V)	220
RATED HORSEPOWER	1
DIAMETER AUX.WIND.(Inch)	0.0403

CALCULATED PARAMETERS OF EQUIVALENT CIRCUIT

Parameters from locked rotor test

R2 (Ohm)	3.031578
ZL (Ohm)	9.263157
X1M (Ohm)	4.011065
X2 (Ohm)	4.011065

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Parameters from no load test

ROTATIONAL LOSSES (W) 155.952
 RNL (Ohm) 13.15789
 ZNL (Ohm) 57.89473
 XM (Ohm) 100.7262

R1M(OHM) 1.6
 X1M(OHM) 4.011065
 R1A(OHM) 2.01
 X1A(OHM) 2
 XM(OHM) 100.7262
 R2(OHM) 3.031578
 X2(OHM) 4.011065
 RC(OHM) 0.063661
 XC(OHM) -6.36619

VRATED 220
 DW(INCH) 0.0403
 V(PU) 1
 HP(RATED) 1

IU 3.390909
 PFMOTOR 0.75
 PFCAP 0.009999
 Pbase 746
 VAbase 994.6666
 Ibase 4.521212
 Zbase 48.65951
 R1A(PU) 0.041307
 R1M(PU) 0.032881
 X1A(PU) 0.041101
 X1M(PU) 0.082431
 RC(PU) 0.001308
 XC(PU) -0.13083
 RF(PU) 0.028786
 XF(PU) 0.040470
 Imr(PU) 0.573710
 Imi(PU) -1.03619

A(RATIO)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Rta(PIU)	0.042615	0.043191	0.044918	0.047797	0.051017	0.0547009	0.05875
Xta(PIU)	-0.08972	-0.08892	-0.08649	-0.08244	-0.0768	-0.06949	-0.06117
Cr		0.000670	0.000335	0.000223	0.00017	0.000136	0.000111
Cx		+8.89201	-2.16229	-0.91605	-0.4796	-0.2797	-0.1930
Iar(PIU)	4.318799	4.419726	4.729007	5.263011	6.059717	7.051013	8.24791
Iai(PIU)	9.093446	9.099205	9.105811	9.078088	8.967452	8.801323	7.885870
Ia(PIU)	10.06691	10.11583	10.26057	10.49337	10.79514	11.17110	11.61130
TI(PIU)	0	0.117844	0.233154	0.368295	0.52467	0.70043	0.900730
Ec(PIU)	1.320911	1.327329	1.346321	1.376868	1.418463	1.469771	1.499919
Il(PIU)	9.426347	9.484050	9.655960	9.936772	10.31143	10.74448	11.16553
cmil/A	47.57704	47.34698	46.67909	45.64346	44.3673	42.80192	41.91992

A(RATIO)	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
Rta(PIU)	0.070326	0.079462	0.089249	0.100188	0.111279	0.123511	0.136911
Xta(PIU)	-0.05006	-0.03792	-0.02416	-0.00878	0.008208	0.026825	0.047000
Cr	0.000095	0.000083	0.000074	0.000067	0.000060	0.000055	0.000051
Cx	-0.10218	-0.05926	-0.02983	-0.00878	0.006784	0.018028	0.03130
Iar(PIU)	9.414341	10.24954	10.43905	9.904928	8.859012	6.18820	6.47024
Iai(PIU)	6.655162	4.892101	2.826728	0.868874	-0.64169	1.62922	-2.1111
Ia(PIU)	11.52913	11.35719	10.81499	9.942964	8.88277	7.900862	6.7741
TI(PIU)	1.094032	1.236868	1.289030	1.239190	1.115614	0.961760	0.81007
Ec(PIU)	1.512773	1.490212	1.419069	1.304647	1.165510	1.007263	0.85917
Il(PIU)	11.46010	11.48960	11.15737	10.47997	9.581844	8.614911	7.610057
cmil/A	41.54293	42.17187	44.28610	48.17015	53.92014	61.47639	70.1166

A(RATIO)	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Rta(PIU)	0.155459	0.172155	0.190002	0.209002	0.229152	0.250454	0.27290
Xta(PIU)	0.068914	0.092387	0.117479	0.144189	0.172518	0.202466	0.234033
Cr	0.000047	0.000044	0.000041	0.000039	0.000037	0.000035	0.000033
Cx	0.035160	0.041061	0.045890	0.049892	0.053346	0.056085	0.058003
Iar(PIU)	5.376093	4.509886	3.807487	3.241725	2.7814	2.414709	1.111
Iai(PIU)	-2.38320	-2.42023	-2.35417	-2.23645	-2.0918	1.95504	1.81066
Ia(PIU)	5.880650	5.118262	4.476504	3.938336	3.456355	3.05044	2.71157
TI(PIU)	0.677606	0.567312	0.478026	0.406368	0.348812	0.302393	0.264620
Ec(PIU)	0.771618	0.671583	0.587375	0.516761	0.45745	0.40721	0.36127
Il(PIU)	6.862393	6.147344	5.539808	5.026702	4.59181	4.226154	3.91149
cmil/A	81.44578	93.57748	106.9928	121.6133	137.8702	154.7503	172.1910

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

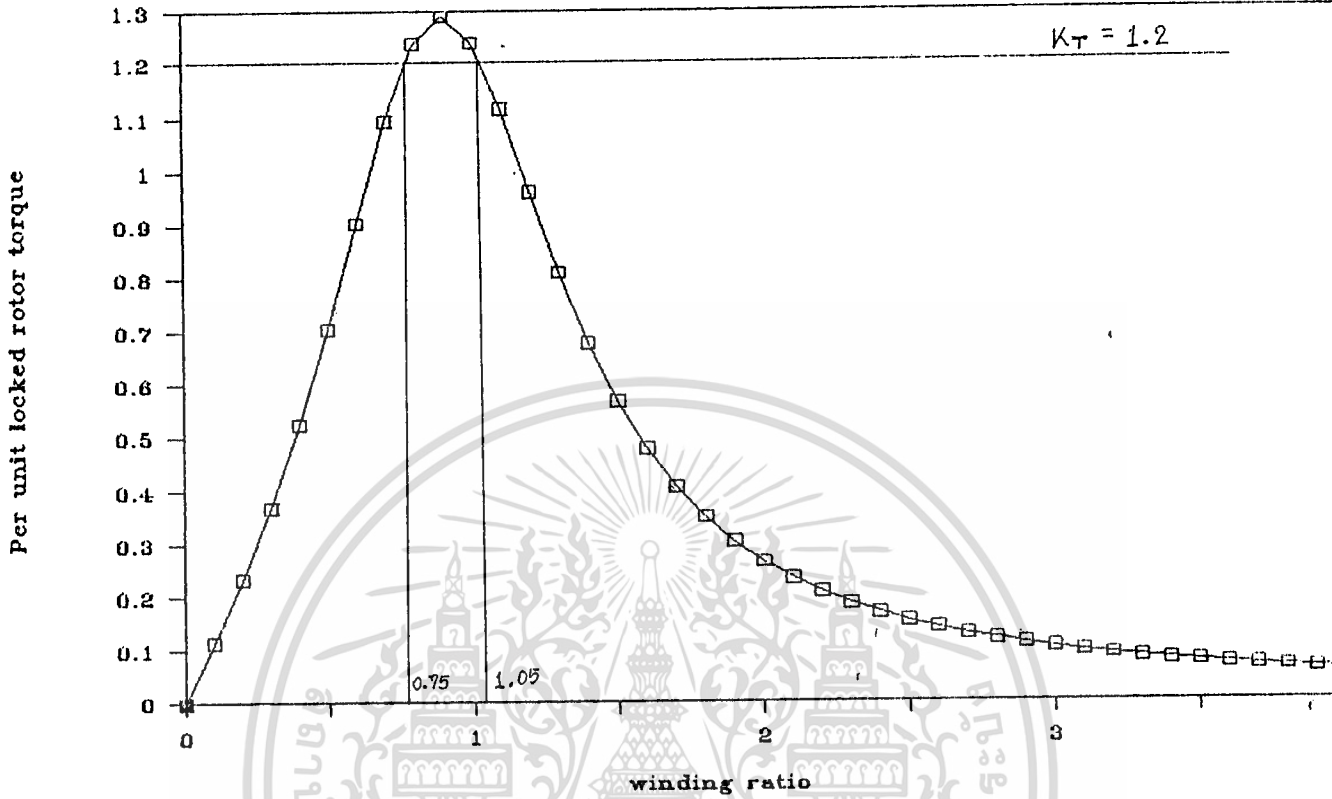
A(RATIO)	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
Rta(PI)	0.296513	0.321269	0.347177	0.374236	0.402447	0.431810	0.461373
Xta(PI)	0.267219	0.302024	0.338447	0.376489	0.416150	0.457430	0.50035
Cr	0.000031	0.000030	0.000029	0.000027	0.000026	0.000025	0.000024
Cx	0.060594	0.062401	0.063978	0.065382	0.066550	0.067487	0.068132
Iar(PI)	1.861042	1.652342	1.476854	1.328033	1.200814	1.091488	0.99701
Iai(PI)	-1.67718	-1.55336	-1.43971	-1.33602	-1.24100	-1.15597	-1.0791
Ia(PI)	2.505278	2.267854	2.062495	1.883784	1.727311	1.589701	1.46793
Tl(PI)	0.233628	0.207968	0.186530	0.168464	0.153114	0.139770	0.12763
Ec(PI)	0.328725	0.297572	0.270626	0.247177	0.226651	0.208589	0.192617
Il(PI)	3.645603	3.414834	3.214801	3.040403	2.887513	2.75275	2.636801
cmil/A	191.1779	211.1926	232.2206	254.2510	277.2750	301.356	326.377

A(RATIO)	2.8	2.9	3	3.1	3	3.3
Rta(PI)	0.493989	0.526805	0.560773	0.595893	0.632164	0.669587
Xta(PI)	0.544846	0.590983	0.638738	0.688112	0.739106	0.791716
Cr	0.000023	0.000023	0.000022	0.000021	0.000020	0.000020
Cx	0.069495	0.070271	0.070970	0.071603	0.072178	0.072701
Iar(PI)	0.913300	0.840488	0.776207	0.719168	0.668315	0.622778
Iai(PI)	-1.00732	-0.94287	-0.88412	-0.83046	-0.78137	-0.73636
Ia(PI)	1.359716	1.263108	1.176508	1.098577	1.028195	0.964413
Tl(PI)	0.118788	0.110183	0.102618	0.095931	0.089927	0.08480
Ec(PI)	0.178412	0.165736	0.154373	0.144147	0.134912	0.126543
Il(PI)	2.527286	2.432423	2.347314	2.270669	2.201100	2.13847
cmil/A	352.2457	379.1869	407.0980	435.9765	465.3209	495.1576

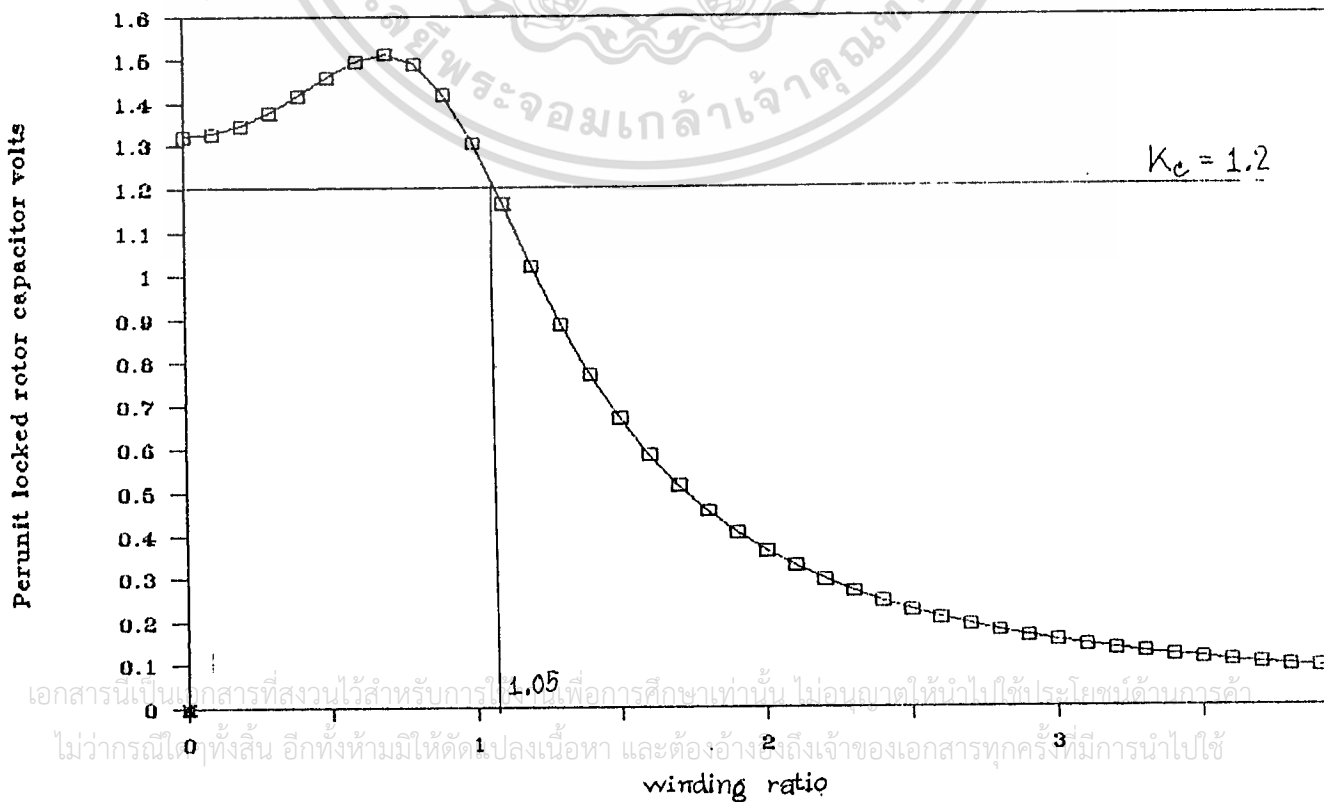
A(RATIO)	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4
Rta(PI)	0.747886	0.788763	0.830791	0.873971	0.918304	0.963785
Xta(PI)	0.901795	0.959263	1.018350	1.079056	1.141380	1.205324
Cr	0.000019	0.000018	0.000018	0.000017	0.000017	0.000016
Cx	0.073615	0.074017	0.074386	0.074726	0.075041	0.07532
Iar(PI)	0.544880	0.511408	0.480990	0.453260	0.427907	0.404664
Iai(PI)	-0.65701	-0.62195	-0.58957	-0.55962	-0.53185	-0.50607
Ia(PI)	0.853557	0.805212	0.760890	0.720153	0.68284	0.647973
Tl(PI)	0.075631	0.071752	0.068230	0.065022	0.062099	0.059400
Ec(PI)	0.111997	0.105654	0.099838	0.094493	0.089569	0.085022
Il(PI)	1.029331	1.081649	1.137916	1.197706	1.260649	1.326422
cmil/A	561.1271	594.8169	629.4655	665.0722	701.6301	739.1567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Locked rotor torque



Locked rotor capacitor volts

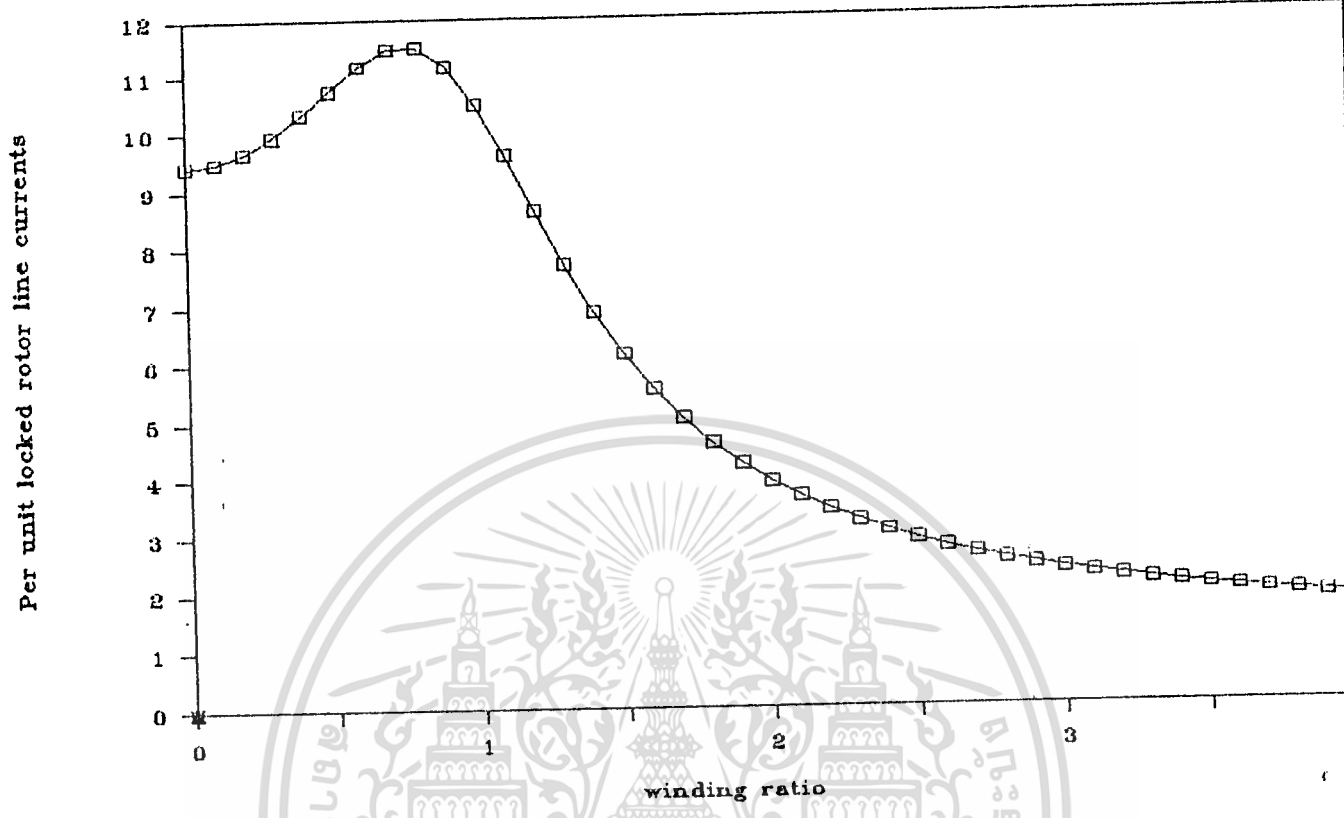


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ

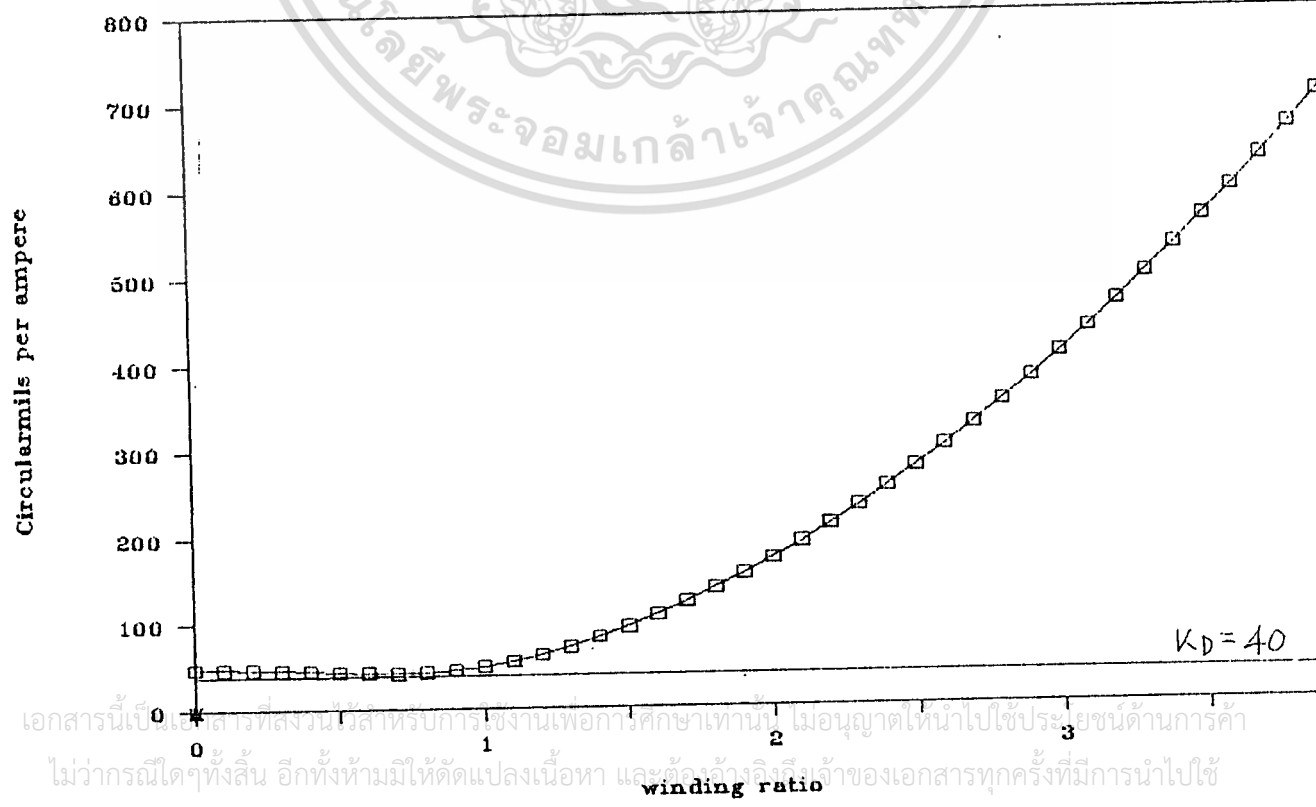
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Locked rotor line currents

$K_I = 12$



Circular mils per ampere



$K_D = 40$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งวงเล็บเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมออกแบบขวดขวดช่วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A1: '-----
 A2: '-----
 A3: ' PROJECT
 A5: ' AUXILIARY PHASE DESIGN OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTORS
 A7: ' CAPACITOR START INDUCTION MOTORS
 A9: '-----
 B9: '-----
 A10: '-----
 B10: ' INPUT DATA FROM TEST
 A11: '-----
 B11: '-----
 A12: ' NO LOAD TEST LOCKED ROTER TEST
 C12: ' NO LOAD TEST
 E12: ' LOCKED ROTER TEST
 A13: ' (Column C) (Column D)
 A14: '-----
 A15: ' POWER
 B15: ' (W)
 C15: 190
 E15: 418
 A16: ' VOLTAGES
 B16: ' (V)
 C16: 220
 E16: 88

A17: ' CURRENT
 B17: ' (A)
 C17: 3
 E17: 4.5
 A18: '-----
 A19: ' INPUT MEASURED PARAMETERS
 A20: ' (Column C)

A22: ' R_{1m} (ohm)
 C22: 1.6
 D22: '-----
 A23: ' R_{1a} (ohm)
 C23: 2.01
 D23: '-----
 A24: ' X_{1a} (Ohm)
 C24: 2
 D24: '-----

A25: '-----
 A26: ' INPUT SPECIFICATION DESIRED
 D27: ' (Column D)
 E27: ')

A28: '-----
 A29: ' FREQUENCY
 C29: ' (Hz)
 D29: 50
 A30: ' POWER FACTOR
 D30: 0.75

A31: ' CAPACITOR
 B31: ' (Microfarads)
 C31: 1 (farads)
 D31: 500
 A32: ' RATED VOLTAGES
 C32: ' (V)
 D32: 220

```

A33: 'RATED HORSEPOWER
D33: 1
A34: 'DIAMETER OF AUX. WIND. (Inch.)
B34: 'AUX. WIND. (Inch)
D34: 0.000
A35: '
A36: '
A37: '
A38: '
A39: '
A40: 'R2 (Ohm)
C40: '+$E$15/$E$17^2-$C$22
D40: '
A41: 'L (Ohm)
C41: '+$E$16/$E$17
A42: 'X1M (Ohm)
C42: '@SQRT(($C$41^2-($C$22+$C$40)^2)/2
A43: 'X (Ohm)
C43: '+$C$42
A44: '
A45: '
A46: '
A47: 'ROTATIONAL LOSSES (W)
D47: '+$C$15-$C$17^2*(1+$C$22+$C$40)^2
A48: 'PNL (Ohm)
D48: '+$C$15/$C$17^2
A49: 'ZM (Ohm)
D49: '+$C$15/$C$17
A50: 'XM (Ohm)
D50: ' (IMPLICIT($D$49^2-$D$48^2)-1.5*$C$43)
A51: '
A52: 'R1M(OHM)
B52: '+$C$22
C51: '
A53: 'X1M(OHM)
B53: '+$C$72
A54: 'R1A(OHM)
B54: '+$C$23
A55: 'X1A(OHM)
B55: '+$C$24
A56: 'XM(OHM)
B56: '+$D$50
A57: 'R2(OHM)
B57: '+$C$40
A58: 'X2(OHM)
B58: '+$C$43
A59: 'RC(OHM)
B59: '@ABS($B$60*0.01)
A60: 'Y (OHM)
B60: '1/($E$14*$D$29*$D$31*0.000001)
A61: 'VR/TED
B61: '
A62: 'DN(T INCH)
B62: '
A63: 'V(PL)
B63: 'L
A64: 'H (RAT IO)
B64: '

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A65: ?
 A66: ?IU
 B66: ?46/B\$61
 C66: ?
 D66: ?
 E66: ?
 F66: ?
 G66: ?
 H66: ?
 A67: ?FF MOTOR
 B67: ?H00830
 A68: ?TFC F
 B68: ?E\$59/0\$0PT(B\$59^2+B\$60^2)
 C68: ?
 D68: ?
 E68: ?
 F68: ?
 G68: ?
 H68: ?
 I68: ?
 J68: ?
 A69: ?Fbase
 B69: ?46/B\$64
 C69: ?
 D69: ?
 E69: ?
 F69: ?
 G69: ?



H69: ?
 A70: ?V
 B70: ?+E\$ /B\$67
 C70: ?
 D70: ?
 E70: ?
 F70: ?
 G70: ?
 H70: ?
 A71: ?1ba
 B71: ?E\$70/B\$61
 C71: ?
 D71: ?
 E71: ?
 F71: ?
 G71: ?
 H71: ?
 A72: ?2ba
 B72: ?E\$6 /B\$61
 C72: ?
 D72: ?
 E72: ?
 F72: ?
 G72: ?
 H72: ?
 A73: ?P1A(FU)
 B73: ?
 C73: ?
 D73: ?

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ให้เผยแพร่ในวงกว้าง อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F73: *
 G73: *
 H73: *
 A74: *E1M(PLU)
 B74: +B\$15/B\$72
 C74: *
 D74: *
 E74: *
 F74: *
 G74: *
 H74: *
 A75: *X1A(PLU)
 B75: +B\$15/B\$72
 C75: *
 D75: *
 E75: *
 F75: *
 G75: *
 H75: *
 A76: *Y1M(PLU)
 B76: +B\$15/B\$72
 C76: *
 D76: *
 F76: *
 G76: *
 H76: *
 A77: *PLU(PLU)
 B77: +B\$15/B\$72
 C77: *



D77: *
 E77: *
 F77: *
 G77: *
 H77: *
 A78: *X1M(PLU)
 B78: +B\$15/B\$72
 C78: *
 D78: *
 E78: *
 F78: *
 G78: *
 H78: *
 A79: *XF(PLU)
 B79: (B\$57*B\$56^2)/(2*B\$72*(B\$57^2+(B\$58+B\$59)))
 C79: *
 D79: *
 E79: *
 F79: *
 G79: *
 H79: *
 A80: *XF(PLU)
 B80: +B\$56*(B\$58^2+B\$58*B\$56+B\$57^2)/(2*B\$72*(B\$57^2+(B\$58+B\$59)))
 C80: *
 D80: *
 E80: *
 F80: *
 G80: *

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการตีพิมพ์หรือจำหน่ายในรูปแบบอื่นใด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HX0: 0
 A81: 1m (FU)
 B81: $(B\$63*(B\$74+2*B\$79))/(((B\$74+2*B\$79)^2+(B\$76+1*(B\$70)^2)*B\$71)$
 C81: 0
 D81: 0
 E81: 0
 F81: 0
 G81: 0
 H81: 0
 A82: 1m (FU)
 B82: $(B\$63*(B\$76+2*B\$80))/(((B\$74+2*B\$79)^2+(B\$76+1*(B\$70)^2)*B\$71)$
 C82: 0
 D82: 0
 E82: 0
 F82: 0
 G82: 0
 H82: 0
 A83: A(ATTU)
 B83: 0
 C83: 0.1
 D83: 0
 E83: 0.3
 F83: 0.4
 G83: 0.5
 H83: 0.6
 I83: 0.7
 J83: 0.8
 K83: 0.9
 L83: 1
 M83: 1.1
 N83: 1.2
 O83: 1.3

 P83: 1.4
 Q83: 1.5
 R83: 1.6
 S83: 1.7
 T83: 1.8
 U83: 1.9
 V83: 2
 W83: 2.1
 X83: 2.2
 Y83: 2.3
 Z83: 2.4
 AA83: 2.5
 AB83: 2.6
 AC83: 2.7
 AD83: 2.8
 AE83: 2.9
 AF83: 3
 AG83: 3.1
 AH83: 3.2
 AI83: 3.3
 AJ83: 3.4
 AK83: 3.5
 AL83: 3.6
 AM83: 3.7
 AN83: 3.8



ข้อความนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าวิธีการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AF93: 4

A84: *PL (PU)

- B84: *B\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- C84: *C\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- D84: *D\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- E84: *E\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- F84: *F\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- G84: *G\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- H84: *H\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- I84: *I\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- J84: *J\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- K84: *K\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- L84: *L\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- M84: *M\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- N84: *N\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- O84: *O\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- P84: *P\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- Q84: *Q\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- R84: *R\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- S84: *S\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- T84: *T\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- U84: *U\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- V84: *V\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- W84: *W\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- X84: *X\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- Y84: *Y\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- Z84: *Z\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AA84: *AA\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AB84: *AB\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AC84: *AC\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AD84: *AD\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AE84: *AE\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AF84: *AF\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AG84: *AG\$83^2*\$B\$79+\$B\$77

AH94

- AI94: *AI\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AT94: *AT\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AK94: *AK\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AL94: *AL\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AM94: *AM\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AN94: *AN\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AO94: *AO\$83^2*\$B\$79+\$B\$77
- AP94: *AP\$83^2*\$B\$79+\$B\$77

A85: *XTa (PU)

- B85: *B\$80+\$B\$78
- C85: *C\$80+\$B\$78
- D85: *D\$80+\$B\$78
- E85: *E\$80+\$B\$78
- F85: *F\$80+\$B\$78
- G85: *G\$80+\$B\$78
- H85: *H\$80+\$B\$78
- I85: *I\$80+\$B\$78
- J85: *J\$80+\$B\$78
- K85: *K\$80+\$B\$78
- L85: *L\$80+\$B\$78
- M85: *M\$80+\$B\$78
- N85: *N\$80+\$B\$78



การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P85: +\$B\$75+2*\$P\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 Q85: +\$B\$75+2*\$Q\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 R85: +\$B\$75+2*\$R\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 S85: +\$B\$75+2*\$S\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 T85: +\$B\$75+2*\$T\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 U85: +\$B\$75+2*\$U\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 V85: +\$B\$75+2*\$V\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 W85: +\$B\$75+2*\$W\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 X85: +\$B\$75+2*\$X\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 Y85: +\$B\$75+2*\$Y\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 Z85: +\$B\$75+2*\$Z\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AA85: +\$B\$75+2*\$AA\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AB85: +\$B\$75+2*\$AB\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AC85: +\$B\$75+2*\$AC\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AD85: +\$B\$75+2*\$AD\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AE85: +\$B\$75+2*\$AE\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AF85: +\$B\$75+2*\$AF\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AG85: +\$B\$75+2*\$AG\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AH85: +\$B\$75+2*\$AH\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AI85: +\$B\$75+2*\$AI\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AJ85: +\$B\$75+2*\$AJ\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AK85: +\$B\$75+2*\$AK\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AL85: +\$B\$75+2*\$AL\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AM85: +\$B\$75+2*\$AM\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AN85: +\$B\$75+2*\$AN\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AO85: +\$B\$75+2*\$AO\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 AP85: +\$B\$75+2*\$AP\$83^2*\$B\$80+\$B\$78
 A85: Cr
 B85: Cr
 C86: +\$B\$73*\$B\$62^2/C\$83
 D86: +\$B\$73*\$B\$62^2/D\$83
 E86: +\$B\$73*\$B\$62^2/E\$83
 F86: +\$B\$73*\$B\$62^2/F\$83
 G86: +\$B\$73*\$B\$62^2/G\$83
 H86: +\$B\$73*\$B\$62^2/H\$83
 I86: +\$B\$73*\$B\$62^2/I\$83



J86: +\$B\$73*\$B\$62^2/J\$83
 K86: +\$B\$73*\$B\$62^2/K\$83
 L86: +\$B\$73*\$B\$62^2/L\$83
 M86: +\$B\$73*\$B\$62^2/M\$83
 N86: +\$B\$73*\$B\$62^2/N\$83
 O86: +\$B\$73*\$B\$62^2/O\$83
 P86: +\$B\$73*\$B\$62^2/P\$83
 Q86: +\$B\$73*\$B\$62^2/Q\$83
 R86: +\$B\$73*\$B\$62^2/R\$83
 S86: +\$B\$73*\$B\$62^2/S\$83
 T86: +\$B\$73*\$B\$62^2/T\$83
 U86: +\$B\$73*\$B\$62^2/U\$83
 V86: +\$B\$73*\$B\$62^2/V\$83
 W86: +\$B\$73*\$B\$62^2/W\$83
 X86: +\$B\$73*\$B\$62^2/X\$83
 Y86: +\$B\$73*\$B\$62^2/Y\$83
 Z86: +\$B\$73*\$B\$62^2/Z\$83
 AA86: +\$B\$73*\$B\$62^2/AA\$83
 AB86: +\$B\$73*\$B\$62^2/AB\$83
 AC86: +\$B\$73*\$B\$62^2/AC\$83
 AD86: +\$B\$73*\$B\$62^2/AD\$83

วิทยาลัยราชภัฏบรียมได้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AF87: +AF#87/AF#83^2
 AG86: +AG#86/AG#83
 AH86: +AH#86/AH#83
 AI86: +AI#86/AI#83
 AJ86: +AJ#86/AJ#83
 AK86: +AK#86/AK#83
 AL86: +AL#86/AL#83
 AM86: +AM#86/AM#83
 AN86: +AN#86/AN#83
 AO86: +AO#86/AO#83
 AP86: +AP#86/AP#83
 AQ87: +AQ#87/AQ#83
 AR87: +AR#87/AR#83
 AS87: +AS#87/AS#83
 AT87: +AT#87/AT#83
 AU87: +AU#87/AU#83
 AV87: +AV#87/AV#83
 AW87: +AW#87/AW#83
 AX87: +AX#87/AX#83
 AY87: +AY#87/AY#83
 AZ87: +AZ#87/AZ#83
 AA87: +AA#87/AA#83^2



AB87: +AB#87/AB#83^2
 AC87: +AC#87/AC#83^2
 AD87: +AD#87/AD#83^2
 AE87: +AE#87/AE#83^2
 AF87: +AF#87/AF#83^2
 AG87: +AG#87/AG#83^2
 AH87: +AH#87/AH#83^2
 AI87: +AI#87/AI#83^2
 AJ87: +AJ#87/AJ#83^2
 AK87: +AK#87/AK#83^2
 AL87: +AL#87/AL#83^2
 AM87: +AM#87/AM#83^2
 AN87: +AN#87/AN#83^2
 AO87: +AO#87/AO#83^2
 AP87: +AP#87/AP#83^2

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 A85: ? Iar (PU)

B88: +B#88/B#84/(B#84^2+B#85^2) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C88: +C#88/C#84/(C#84^2+C#85^2)
 D88: +D#88/D#84/(D#84^2+D#85^2)
 E88: +E#88/E#84/(E#84^2+E#85^2)

FB8: +FB63*F84/(F84^2+F85^2)
 GB: +GB63*G84/(G84^2+G85^2)
 HB: +HB63*H84/(H84^2+H85^2)
 IB: +IB63*I84/(I84^2+I85^2)
 JB: +JB63*J84/(J84^2+J85^2)
 KB: +KB63*K84/(K84^2+K85^2)
 LB: +LB63*L84/(L84^2+L85^2)
 MB: +MB63*M84/(M84^2+M85^2)
 NB: +NB63*N84/(N84^2+N85^2)
 OB: +OB63*O84/(O84^2+O85^2)
 PB: +PB63*P84/(P84^2+P85^2)
 QB: +QB63*Q84/(Q84^2+Q85^2)
 RB: +RB63*R84/(R84^2+R85^2)
 SB: +SB63*S84/(S84^2+S85^2)
 TB: +TB63*T84/(T84^2+T85^2)
 UB: +UB63*U84/(U84^2+U85^2)
 VB: +VB63*V84/(V84^2+V85^2)
 WB: +WB63*W84/(W84^2+W85^2)
 XB: +XB63*X84/(X84^2+X85^2)
 YB: +YB63*Y84/(Y84^2+Y85^2)
 ZB: +ZB63*Z84/(Z84^2+Z85^2)
 AAB: +AAB63*AA84/(AA84^2+AA85^2)
 AB: +AB63*AB84/(AB84^2+AB85^2)
 ACB: +ACB63*AC84/(AC84^2+AC85^2)
 ADB: +ADB63*AD84/(AD84^2+AD85^2)
 AEB: +AEB63*AE84/(AE84^2+AE85^2)
 AFB: +AFB63*AF84/(AF84^2+AF85^2)
 AGB: +AGB63*AG84/(AG84^2+AG85^2)
 AHB: +AHB63*AH84/(AH84^2+AH85^2)
 AIB: +AIB63*AI84/(AI84^2+AI85^2)
 AJB: +AJB63*AJ84/(AJ84^2+AJ85^2)
 AKB: +AKB63*AK84/(AK84^2+AK85^2)
 ALB: +ALB63*AL84/(AL84^2+AL85^2)
 AMB: +AMB63*AM84/(AM84^2+AM85^2)
 ANB: +ANB63*AN84/(AN84^2+AN85^2)
 AOB: +AOB63*AO84/(AO84^2+AO85^2)
 APB: +APB63*AP84/(AP84^2+AP85^2)
 AQB: +AQB63*AQ84/(AQ84^2+AQ85^2)
 ARB: +ARB63*AR84/(AR84^2+AR85^2)
 ASB: +ASB63*AS84/(AS84^2+AS85^2)
 ATB: +ATB63*AT84/(AT84^2+AT85^2)
 AUB: +AUB63*AUB84/(AUB84^2+AUB85^2)
 AVB: +AVB63*AV84/(AV84^2+AV85^2)
 AWB: +AWB63*AW84/(AW84^2+AW85^2)
 AXB: +AXB63*AX84/(AX84^2+AX85^2)
 AYB: +AYB63*AY84/(AY84^2+AY85^2)
 AZB: +AZB63*AZ84/(AZ84^2+AZ85^2)



DB9: +DB63*D85/(D84^2+D85^2)
 EB9: +EB63*E85/(E84^2+E85^2)
 FB9: +FB63*F85/(F84^2+F85^2)
 GB9: +GB63*G85/(G84^2+G85^2)
 HB9: +HB63*H85/(H84^2+H85^2)
 IB9: +IB63*I85/(I84^2+I85^2)
 JB9: +JB63*J85/(J84^2+J85^2)
 KB9: +KB63*K85/(K84^2+K85^2)
 LB9: +LB63*L85/(L84^2+L85^2)
 MB9: +MB63*M85/(M84^2+M85^2)
 NB9: +NB63*N85/(N84^2+N85^2)
 OB9: +OB63*O85/(O84^2+O85^2)
 PB9: +PB63*P85/(P84^2+P85^2)
 QB9: +QB63*Q85/(Q84^2+Q85^2)
 RB9: +RB63*R85/(R84^2+R85^2)
 SB9: +SB63*S85/(S84^2+S85^2)
 TB9: +TB63*T85/(T84^2+T85^2)
 UB9: +UB63*U85/(U84^2+U85^2)

ข้อควรระวังในการใช้โปรแกรม (Please be careful when using the program) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V89: $\$V\$67^*V\$85/(V\$84^2+V\$85^2)$
 W89: $\$W\$65^*W\$85/(W\$84^2+W\$85^2)$
 X89: $\$X\$63^*X\$85/(X\$84^2+X\$85^2)$
 Y89: $\$Y\$63^*Y\$85/(Y\$84^2+Y\$85^2)$
 Z89: $\$Z\$65^*Z\$85/(Z\$84^2+Z\$85^2)$
 AA89: $\$A\$65^*AA\$85/(AA\$84^2+AA\$85^2)$
 AB89: $\$B\$65^*AB\$85/(AB\$84^2+AB\$85^2)$
 AC89: $\$C\$65^*AC\$85/(AC\$84^2+AC\$85^2)$
 AD89: $\$D\$65^*AD\$85/(AD\$84^2+AD\$85^2)$
 AE89: $\$E\$63^*AE\$85/(AE\$84^2+AE\$85^2)$
 AF89: $\$F\$67^*AF\$85/(AF\$84^2+AF\$85^2)$
 AG89: $\$G\$65^*AG\$85/(AG\$84^2+AG\$85^2)$
 AH89: $\$H\$67^*AH\$85/(AH\$84^2+AH\$85^2)$
 AI89: $\$I\$63^*AI\$85/(AI\$84^2+AI\$85^2)$
 AJ89: $\$J\$63^*AJ\$85/(AJ\$84^2+AJ\$85^2)$
 AK89: $\$K\$65^*AK\$85/(AK\$84^2+AK\$85^2)$
 AL89: $\$L\$65^*AL\$85/(AL\$84^2+AL\$85^2)$
 AM89: $\$M\$63^*AM\$85/(AM\$84^2+AM\$85^2)$
 AN89: $\$N\$63^*AN\$85/(AN\$84^2+AN\$85^2)$
 AO89: $\$O\$65^*AO\$85/(AO\$84^2+AO\$85^2)$
 AP89: $\$P\$65^*AP\$85/(AP\$84^2+AP\$85^2)$

AQC: $\sqrt{T} \cdot (PI)$
 B90: $\text{SQRT}(B\$88^2+B\$89^2)$
 C90: $\text{SQRT}(C\$88^2+C\$89^2)$
 D90: $\text{SQRT}(D\$88^2+D\$89^2)$
 E90: $\text{SQRT}(E\$88^2+E\$89^2)$
 F90: $\text{SQRT}(F\$88^2+F\$89^2)$
 G90: $\text{SQRT}(G\$88^2+G\$89^2)$
 H90: $\text{SQRT}(H\$88^2+H\$89^2)$
 I90: $\text{SQRT}(I\$88^2+I\$89^2)$
 J90: $\text{SQRT}(J\$88^2+J\$89^2)$
 K90: $\text{SQRT}(K\$88^2+K\$89^2)$
 L90: $\text{SQRT}(L\$88^2+L\$89^2)$
 M90: $\text{SQRT}(M\$88^2+M\$89^2)$
 N90: $\text{SQRT}(N\$88^2+N\$89^2)$
 O90: $\text{SQRT}(O\$88^2+O\$89^2)$
 P90: $\text{SQRT}(P\$88^2+P\$89^2)$
 Q90: $\text{SQRT}(Q\$88^2+Q\$89^2)$
 R90: $\text{SQRT}(R\$88^2+R\$89^2)$
 S90: $\text{SQRT}(S\$88^2+S\$89^2)$
 T90: $\text{SQRT}(T\$88^2+T\$89^2)$
 U90: $\text{SQRT}(U\$88^2+U\$89^2)$

V90: $\text{SQRT}(V\$88^2+V\$89^2)$
 W90: $\text{SQRT}(W\$88^2+W\$89^2)$
 X90: $\text{SQRT}(X\$88^2+X\$89^2)$
 Y90: $\text{SQRT}(Y\$88^2+Y\$89^2)$
 Z90: $\text{SQRT}(Z\$88^2+Z\$89^2)$
 AA90: $\text{SQRT}(AA\$88^2+AA\$89^2)$
 AB90: $\text{SQRT}(AB\$88^2+AB\$89^2)$
 AC90: $\text{SQRT}(AC\$88^2+AC\$89^2)$
 AD90: $\text{SQRT}(AD\$88^2+AD\$89^2)$
 AE90: $\text{SQRT}(AE\$88^2+AE\$89^2)$
 AF90: $\text{SQRT}(AF\$88^2+AF\$89^2)$
 AG90: $\text{SQRT}(AG\$88^2+AG\$89^2)$
 AH90: $\text{SQRT}(AH\$88^2+AH\$89^2)$
 AI90: $\text{SQRT}(AI\$88^2+AI\$89^2)$
 AJ90: $\text{SQRT}(AJ\$88^2+AJ\$89^2)$
 AK90: $\text{SQRT}(AK\$88^2+AK\$89^2)$



เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AL90: @SQRT(AL\$88^2+AL\$89^2)
 AM90: @SQRT(AM\$88^2+AM\$89^2)
 AN90: @SQRT(AN\$88^2+AN\$89^2)
 AO90: @SQRT(AO\$88^2+AO\$89^2)
 AP90: @SQRT(AP\$88^2+AP\$89^2)

A91: '11(PU)
 B91: 4* \$B\$79*\$B\$83*(\$B\$81*\$B\$89-\$B\$82*\$B\$88)
 C91: 4* \$B\$79*\$C\$83*(\$B\$81*\$C\$89-\$B\$82*\$C\$88)
 D91: 4* \$B\$79*\$D\$83*(\$B\$81*\$D\$89-\$B\$82*\$D\$88)
 E91: 4* \$B\$79*\$E\$83*(\$B\$81*\$E\$89-\$B\$82*\$E\$88)
 F91: 4* \$B\$79*\$F\$83*(\$B\$81*\$F\$89-\$B\$82*\$F\$88)
 G91: 4* \$B\$79*\$G\$83*(\$B\$81*\$G\$89-\$B\$82*\$G\$88)
 H91: 4* \$B\$79*\$H\$83*(\$B\$81*\$H\$89-\$B\$82*\$H\$88)
 I91: 4* \$B\$79*\$I\$83*(\$B\$81*\$I\$89-\$B\$82*\$I\$88)
 J91: 4* \$B\$79*\$J\$83*(\$B\$81*\$J\$89-\$B\$82*\$J\$88)
 K91: 4* \$B\$79*\$K\$83*(\$B\$81*\$K\$89-\$B\$82*\$K\$88)
 L91: 4* \$B\$79*\$L\$83*(\$B\$81*\$L\$89-\$B\$82*\$L\$88)
 M91: 4* \$B\$79*\$M\$83*(\$B\$81*\$M\$89-\$B\$82*\$M\$88)
 N91: 4* \$B\$79*\$N\$83*(\$B\$81*\$N\$89-\$B\$82*\$N\$88)
 O91: 4* \$B\$79*\$O\$83*(\$B\$81*\$O\$89-\$B\$82*\$O\$88)
 P91: 4* \$B\$79*\$P\$83*(\$B\$81*\$P\$89-\$B\$82*\$P\$88)
 Q91: 4* \$B\$79*\$Q\$83*(\$B\$81*\$Q\$89-\$B\$82*\$Q\$88)
 R91: 4* \$B\$79*\$R\$83*(\$B\$81*\$R\$89-\$B\$82*\$R\$88)
 S91: 4* \$B\$79*\$S\$83*(\$B\$81*\$S\$89-\$B\$82*\$S\$88)
 T91: 4* \$B\$79*\$T\$83*(\$B\$81*\$T\$89-\$B\$82*\$T\$88)
 U91: 4* \$B\$79*\$U\$83*(\$B\$81*\$U\$89-\$B\$82*\$U\$88)
 V91: 4* \$B\$79*\$V\$83*(\$B\$81*\$V\$89-\$B\$82*\$V\$88)
 W91: 4* \$B\$79*\$W\$83*(\$B\$81*\$W\$89-\$B\$82*\$W\$88)
 X91: 4* \$B\$79*\$X\$83*(\$B\$81*\$X\$89-\$B\$82*\$X\$88)
 Y91: 4* \$B\$79*\$Y\$83*(\$B\$81*\$Y\$89-\$B\$82*\$Y\$88)
 Z91: 4* \$B\$79*\$Z\$83*(\$B\$81*\$Z\$89-\$B\$82*\$Z\$88)
 AA91: 4* \$B\$79*\$AA\$83*(\$B\$81*\$AA\$89-\$B\$82*\$AA\$88)
 AB91: 4* \$B\$79*\$AB\$83*(\$B\$81*\$AB\$89-\$B\$82*\$AB\$88)
 AC91: 4* \$B\$79*\$AC\$83*(\$B\$81*\$AC\$89-\$B\$82*\$AC\$88)
 AD91: 4* \$B\$79*\$AD\$83*(\$B\$81*\$AD\$89-\$B\$82*\$AD\$88)
 AE91: 4* \$B\$79*\$AE\$83*(\$B\$81*\$AE\$89-\$B\$82*\$AE\$88)
 AF91: 4* \$B\$79*\$AF\$83*(\$B\$81*\$AF\$89-\$B\$82*\$AF\$88)
 AG91: 4* \$B\$79*\$AG\$83*(\$B\$81*\$AG\$89-\$B\$82*\$AG\$88)
 AH91: 4* \$B\$79*\$AH\$83*(\$B\$81*\$AH\$89-\$B\$82*\$AH\$88)
 AI91: 4* \$B\$79*\$AI\$83*(\$B\$81*\$AI\$89-\$B\$82*\$AI\$88)
 AJ91: 4* \$B\$79*\$AJ\$83*(\$B\$81*\$AJ\$89-\$B\$82*\$AJ\$88)
 AK91: 4* \$B\$79*\$AK\$83*(\$B\$81*\$AK\$89-\$B\$82*\$AK\$88)
 AL91: 4* \$B\$79*\$AL\$83*(\$B\$81*\$AL\$89-\$B\$82*\$AL\$88)
 AM91: 4* \$B\$79*\$AM\$83*(\$B\$81*\$AM\$89-\$B\$82*\$AM\$88)

AN91: 4* \$B\$79*\$AN\$83*(\$B\$81*\$AN\$89-\$B\$82*\$AN\$88)
 AO91: 4* \$B\$79*\$AO\$83*(\$B\$81*\$AO\$89-\$B\$82*\$AO\$88)
 AP91: 4* \$B\$79*\$AP\$83*(\$B\$81*\$AP\$89-\$B\$82*\$AP\$88)

A92: '11(PU)
 B92: +B\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 C92: +C\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 D92: +D\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 E92: +E\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 F92: +F\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 G92: +G\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 H92: +H\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 I92: +I\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 J92: +J\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)
 K92: +K\$90*@SQRT(\$B\$78^2+\$B\$68^2)

กษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L92: $\sqrt{L^2 + 90^2}$
 M92: $\sqrt{M^2 + 90^2}$
 N92: $\sqrt{N^2 + 90^2}$
 O92: $\sqrt{O^2 + 90^2}$
 P92: $\sqrt{P^2 + 90^2}$
 Q92: $\sqrt{Q^2 + 90^2}$
 R92: $\sqrt{R^2 + 90^2}$
 S92: $\sqrt{S^2 + 90^2}$
 T92: $\sqrt{T^2 + 90^2}$
 U92: $\sqrt{U^2 + 90^2}$
 V92: $\sqrt{V^2 + 90^2}$
 W92: $\sqrt{W^2 + 90^2}$
 X92: $\sqrt{X^2 + 90^2}$
 Y92: $\sqrt{Y^2 + 90^2}$
 Z92: $\sqrt{Z^2 + 90^2}$
 AA92: $\sqrt{AA^2 + 90^2}$
 AB92: $\sqrt{AB^2 + 90^2}$
 AC92: $\sqrt{AC^2 + 90^2}$
 AD92: $\sqrt{AD^2 + 90^2}$
 AE92: $\sqrt{AE^2 + 90^2}$
 AF92: $\sqrt{AF^2 + 90^2}$
 AG92: $\sqrt{AG^2 + 90^2}$
 AH92: $\sqrt{AH^2 + 90^2}$
 AI92: $\sqrt{AI^2 + 90^2}$
 AJ92: $\sqrt{AJ^2 + 90^2}$
 AK92: $\sqrt{AK^2 + 90^2}$
 AL92: $\sqrt{AL^2 + 90^2}$
 AM92: $\sqrt{AM^2 + 90^2}$
 AN92: $\sqrt{AN^2 + 90^2}$
 AO92: $\sqrt{AO^2 + 90^2}$
 AP92: $\sqrt{AP^2 + 90^2}$
 AQ92: $\sqrt{AQ^2 + 90^2}$
 AR92: $\sqrt{AR^2 + 90^2}$
 AS92: $\sqrt{AS^2 + 90^2}$
 AT92: $\sqrt{AT^2 + 90^2}$
 AU92: $\sqrt{AU^2 + 90^2}$
 AV92: $\sqrt{AV^2 + 90^2}$
 AW92: $\sqrt{AW^2 + 90^2}$
 AX92: $\sqrt{AX^2 + 90^2}$
 AY92: $\sqrt{AY^2 + 90^2}$
 AZ92: $\sqrt{AZ^2 + 90^2}$
 BA92: $\sqrt{BA^2 + 90^2}$
 BB92: $\sqrt{BB^2 + 90^2}$
 BC92: $\sqrt{BC^2 + 90^2}$
 BD92: $\sqrt{BD^2 + 90^2}$
 BE92: $\sqrt{BE^2 + 90^2}$
 BF92: $\sqrt{BF^2 + 90^2}$
 BG92: $\sqrt{BG^2 + 90^2}$
 BH92: $\sqrt{BH^2 + 90^2}$
 BI92: $\sqrt{BI^2 + 90^2}$
 BJ92: $\sqrt{BJ^2 + 90^2}$
 BK92: $\sqrt{BK^2 + 90^2}$
 BL92: $\sqrt{BL^2 + 90^2}$
 BM92: $\sqrt{BM^2 + 90^2}$
 BN92: $\sqrt{BN^2 + 90^2}$
 BO92: $\sqrt{BO^2 + 90^2}$



คุรุสภา
 สำนักงานเลขาธิการคุรุสภา
 กระทรวงศึกษาธิการ

PA92: $\sqrt{PA^2 + 90^2}$
 PB92: $\sqrt{PB^2 + 90^2}$
 PC92: $\sqrt{PC^2 + 90^2}$
 PD92: $\sqrt{PD^2 + 90^2}$
 PE92: $\sqrt{PE^2 + 90^2}$
 PF92: $\sqrt{PF^2 + 90^2}$
 PG92: $\sqrt{PG^2 + 90^2}$
 PH92: $\sqrt{PH^2 + 90^2}$
 PI92: $\sqrt{PI^2 + 90^2}$
 PJ92: $\sqrt{PJ^2 + 90^2}$
 PK92: $\sqrt{PK^2 + 90^2}$
 PL92: $\sqrt{PL^2 + 90^2}$
 PM92: $\sqrt{PM^2 + 90^2}$
 PN92: $\sqrt{PN^2 + 90^2}$
 PO92: $\sqrt{PO^2 + 90^2}$

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AB93: RESORT(((\$B\$81+AB\$88)^2+(\$B\$82+AB\$89)^2)
 AC93: RESORT(((\$B\$81+AC\$88)^2+(\$B\$82+AC\$89)^2)
 AD93: RESORT(((\$B\$81+AD\$88)^2+(\$B\$82+AD\$89)^2)
 AE93: RESORT(((\$B\$81+AE\$88)^2+(\$B\$82+AE\$89)^2)
 AF93: RESORT(((\$B\$81+AF\$88)^2+(\$B\$82+AF\$89)^2)
 AG93: RESORT(((\$B\$81+AG\$88)^2+(\$B\$82+AG\$89)^2)
 AH93: RESORT(((\$B\$81+AH\$88)^2+(\$B\$82+AH\$89)^2)
 AI93: RESORT(((\$B\$81+AI\$88)^2+(\$B\$82+AI\$89)^2)
 AJ93: RESORT(((\$B\$81+AJ\$88)^2+(\$B\$82+AJ\$89)^2)
 AK93: RESORT(((\$B\$81+AK\$88)^2+(\$B\$82+AK\$89)^2)
 AL93: RESORT(((\$B\$81+AL\$88)^2+(\$B\$82+AL\$89)^2)
 AM93: RESORT(((\$B\$81+AM\$88)^2+(\$B\$82+AM\$89)^2)
 AN93: RESORT(((\$B\$81+AN\$88)^2+(\$B\$82+AN\$89)^2)
 AO93: RESORT(((\$B\$81+AO\$88)^2+(\$B\$82+AO\$89)^2)
 AP93: RESORT(((\$B\$81+AP\$88)^2+(\$B\$82+AP\$89)^2)
 A\$1/A
 B94: \$B\$81^2*10^6/(B\$90*\$B\$66)
 C94: +\$B\$82^2*10^6/(C\$90*\$B\$66)
 D94: +\$B\$83^2*10^6/(D\$90*\$B\$66)
 E94: +\$B\$84^2*10^6/(E\$90*\$B\$66)
 F94: +\$B\$85^2*10^6/(F\$90*\$B\$66)
 G94: +\$B\$86^2*10^6/(G\$90*\$B\$66)
 H94: +\$B\$87^2*10^6/(H\$90*\$B\$66)
 I94: +\$B\$88^2*10^6/(I\$90*\$B\$66)
 J94: +\$B\$89^2*10^6/(J\$90*\$B\$66)
 K94: +\$B\$90^2*10^6/(K\$90*\$B\$66)
 L94: +\$B\$91^2*10^6/(L\$90*\$B\$66)
 M94: +\$B\$92^2*10^6/(M\$90*\$B\$66)
 N94: +\$B\$93^2*10^6/(N\$90*\$B\$66)
 O94: +\$B\$94^2*10^6/(O\$90*\$B\$66)
 P94: +\$B\$95^2*10^6/(P\$90*\$B\$66)
 Q94: +\$B\$96^2*10^6/(Q\$90*\$B\$66)
 R94: +\$B\$97^2*10^6/(R\$90*\$B\$66)
 S94: +\$B\$98^2*10^6/(S\$90*\$B\$66)
 T94: +\$B\$99^2*10^6/(T\$90*\$B\$66)
 U94: +\$B\$100^2*10^6/(U\$90*\$B\$66)
 V94: +\$B\$101^2*10^6/(V\$90*\$B\$66)
 W94: +\$B\$102^2*10^6/(W\$90*\$B\$66)
 X94: +\$B\$103^2*10^6/(X\$90*\$B\$66)
 Y94: +\$B\$104^2*10^6/(Y\$90*\$B\$66)
 Z94: +\$B\$105^2*10^6/(Z\$90*\$B\$66)
 AA94: +\$B\$106^2*10^6/(AA\$90*\$B\$66)
 AB94: +\$B\$107^2*10^6/(AB\$90*\$B\$66)
 AC94: +\$B\$108^2*10^6/(AC\$90*\$B\$66)
 AD94: +\$B\$109^2*10^6/(AD\$90*\$B\$66)
 AE94: +\$B\$110^2*10^6/(AE\$90*\$B\$66)
 AF94: +\$B\$111^2*10^6/(AF\$90*\$B\$66)
 AG94: +\$B\$112^2*10^6/(AG\$90*\$B\$66)



AH94: +\$B\$113^2*10^6/(AH\$90*\$B\$66)
 AI94: +\$B\$114^2*10^6/(AI\$90*\$B\$66)
 AJ94: +\$B\$115^2*10^6/(AJ\$90*\$B\$66)
 AK94: +\$B\$116^2*10^6/(AK\$90*\$B\$66)
 AL94: +\$B\$117^2*10^6/(AL\$90*\$B\$66)
 AM94: +\$B\$118^2*10^6/(AM\$90*\$B\$66)
 AN94: +\$B\$119^2*10^6/(AN\$90*\$B\$66)
 AO94: +\$B\$120^2*10^6/(AO\$90*\$B\$66)
 AP94: +\$B\$121^2*10^6/(AP\$90*\$B\$66)

ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและวิจารณ์

สรุปขั้นตอนในการทำงานในปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ

- ค้นคว้าหาหนังสือหรือบทความต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์แบบสตาร์ทด้วยตัวเก็บประจุ ซึ่งใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนสองสนาม (Two revolving field theory) และทฤษฎีที่อธิบายถึงวิธีการออกแบบขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบสตาร์ทด้วยตัวเก็บประจุ ซึ่งบทความเกี่ยวกับการออกแบบนี้หาได้ยากมากและได้มาเพียงบทความเดียวเท่านั้น ซึ่งขาดรายละเอียดไปมาก และบทความนี้ก็เป็บทความที่เก่าแก่มากมีอายุกว่า 80 ปีแล้ว ในส่วนหนังสือที่เกี่ยวกับการออกแบบซึ่งก็หายากมากเช่นเดียวกัน ซึ่งวิธีการที่ออกแบบก็เป็นคนละวิธีการกับในบทความต่างประเทศที่ค้นมาได้ นั้น รวมทั้งไม่สามารถหาได้ด้วยเนื่องจากเป็นหนังสือที่มีอายุเก่าแก่มาก ไม่สามารถหาพบได้ในหอสมุดหลาย ๆ แห่งที่ได้ไปค้นหา และร้านหนังสือก็ไม่มีขาย อีกทั้งราคาค่อนข้างแพงมากไม่คุ้มค่าที่จะสั่งซื้อโดยตรงจากต่างประเทศ การค้นหาจึงเสียเวลาไปมากพอสมควร

- จากบทความเท่าที่หามาได้นำมาศึกษาถึงวิธีการที่ใช้ในการออกแบบขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบใช้ตัวเก็บประจุสตาร์ท ซึ่งในบทความนั้นก็เพียงแต่พูดถึงหลักการในการออกแบบเท่านั้น แต่ไม่มีรายละเอียดซึ่งก็ต้องเสียเวลาไปกับการค้นหารายละเอียดตามหนังสือต่าง ๆ อีกพอสมควร

- ทำการเขียนโปรแกรม ซึ่งได้เลือกใช้ไลต์ส 128 เนื่องจากง่ายต่อการป้อนสูตรเพื่อคำนวณผลการต่าง ๆ ซึ่งมีมากมายและง่ายต่อการนลือกกราฟ เนื่องจากต้องใช้กราฟช่วยในการออกแบบหลายกราฟ

- ทำการทดสอบมอเตอร์เพื่อนำข้อมูลมาป้อนให้กับโปรแกรมออกแบบที่ได้เขียนขึ้น แต่มีปัญหาเนื่องจากเครื่องทดสอบที่ชื่อ Z-TEST เกิดเสียในช่วงที่กำลังทำปริศยานิพนธ์ชิ้นนี้ ซึ่งเครื่องนี้จำเป็นต่อการทดสอบเพื่อให้ได้นารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการป้อนเข้าไปในโปรแกรมออกแบบ จึงทำให้ไม่สามารถหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบได้ จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากตัวอย่างในหนังสือมาใช้ ซึ่งผลที่ได้ออกมาาก็ให้ลักษณะกราฟเช่นเดียวกับตัวอย่างในบทความต่างประเทศ และช่วงของค่าอัตราส่วนการพันที่หาได้ก็ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในหนังสือเกี่ยวกับการออกแบบมอเตอร์ของ C.G. Vienott (Theory and design of small induction motors) การออกแบบนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบในมอเตอร์แบบแยกเฟสหรือแบบที่ใช้ตัวเก็บประจุถาวรได้ เพียงแต่จะต้องเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์บางตัวตามลักษณะของวงจรเทียบเท่าทั้งสองเท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์และหอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้เอื้อเนื้อตำราและบทความต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้อย่างมาก ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้เอื้อเนื้อคอมพิวเตอร์และมอเตอร์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณบริษัทชั้นโฮชันิเวอร์แซล อิเล็กทริก จำกัดที่ได้เอื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด และที่ขาดเสียมิได้ขอขอบคุณท่านอาจารย์ ผศ.ทองใบ อรรถเศรษฐ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. L.W. Buchanan & T.F. Winter ; Auxillary Phase Design for Capacitor Start Motors, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-84, No.11, November 1965
2. Lawren J.Hollander; Handbook of Electric Power Calculation
3. S.A. Nasar, L.E. Unnewehr; Electromechanics and Electric Machines, John Wiley & Sons.
4. Datsch & Morgan ; Electromagnetics & Electromechanical Machines
5. George Mcpherson ; An Introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons.
6. C.G. Veinott, Theory and Design of Small Induction motors. New York ; McGraw-Hill, ch.24, 1959
7. C.G. Veinott and J.E. Martin, Fractional and Subfractional-Horse-power Electric Motors, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1986
8. Fitzgerald , Kingsley , Umans; Electric Machinery ; SI Metric Fourth edition , McGraw-Hill