

การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก
Three-phase squirrel-cage Induction motor design



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 45973
จัน, เดือน, ปี 26 ก.พ. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก
Three-phase squirrel-cage Induction motor design



โดย
นายอนันต์ ธนิสสร รหัส 42015120 ห้อง 3W/1
นายสรารุช วิเศษ รหัส 42015144 ห้อง 3W/2
นายสินธุ์รงค์ ไกรนรา รหัส 42015147 ห้อง 3W/2

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.พิชิต ถ้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก

ผู้จัดทำ

นายอนันต์ ธิษฐ

นายสรารุท วิเศษ

นายสินธุ์รงค์ ไกรนรา



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.พิชิต ถ้ายอง)

การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก

นาย อนันต์ ธนิสสร
 นาย สราวุธ วิเศษ
 นาย สิ้นธุ์รงค์ ไกรนรา
 ผศ. พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการวิจัยเพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบโรเตอร์กรงกระรอกขนาด 1 แรงม้าโดยวัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์นี้เพื่อออกแบบมอเตอร์สามเฟส ซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้จะมีการติดต่อกับผู้ใช้ในรูปแบบกราฟฟิกและทำงานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์จึงทำให้เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ได้ง่ายและมีประสิทธิภาพโดยใช้ โปรแกรมไมโครซอฟท์วิซวลเบสิกในการออกแบบหน้าจอประกอบแต่ละส่วนของมอเตอร์คือ ขนาดของมอเตอร์ โรเตอร์ สเตเตอร์ คุณลักษณะ และสมรรถนะของมอเตอร์ โดยปริญญาานิพนธ์นี้ได้มีการนำเอาค่าจริงที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีเพื่อใช้ในการพิจารณาถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้น

THREE-PHASE SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR DESIGN

Anan Tanisorn

Sarawut Weekesh

Sinnarong Krinara

Asst.Prof.Pichit Lumyong Advisor

2001

ABSTRAC

This project is to develop software package for induction of three-phase motor type squirrel cage motor of 1 h.p in size. The purpose of this the project is to design induction motor. The developed package can interface with the graphical user on personal computer along with Microsoft Windows. There this new package is easy and efficient. It employs Visual basic program to look for parameter in induction motor. The parameter inductions are size of motor, the rotor, the stator, the characteristics and function of motor. This project also the compares the real parameter to the theoretied ones in order to consider the trend

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRAC	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	3
2.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	3
2.2 วงจรสมมูลย์	5
2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์	7
บทที่ 3 สมการที่ใช้คำนวณในส่วนต่างๆ	10
3.1 ข้อมูลในส่วน Input	10
3.2 ข้อมูลในส่วน Main Dimension	10
3.3 ข้อมูลในส่วน Stator Design	12
3.4 ข้อมูลในส่วน Rotor Design	33
3.5 ข้อมูลในส่วน No Load Current	56
3.6 ข้อมูลในส่วน Loss component	65
3.7 ข้อมูลในส่วน Short Circuit Current	68
3.8 ข้อมูลในส่วน Loss and Efficiency	76
3.9 ข้อมูลในส่วน Equivalent Circuit	77
3.10 ข้อมูลในส่วน Torque	79
3.11 ข้อมูลในส่วน Stator Temperature Rise	81
บทที่ 4 การหาวงจรมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	86
4.1 การทดสอบยัดโรเตอร์	86
4.2 การทดสอบสภาวะไร้อะไร	87
4.3 ตารางแสดงการทดสอบหาวงจรมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	88
4.4 รูปภาพประกอบการทดสอบโรเตอร์	96
บทที่ 5 แผนผังและการใช้งาน โปรแกรม	99
5.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในส่วนต่างๆ	99
5.2 วิธีการใช้โปรแกรม IMMD	108
5.3 แสดงตารางที่ใช้ใน โปรแกรม	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากโปรแกรม	151
6.1 ผลในส่วน Main Dimension	151
6.2 ผลในส่วน Stator	152
6.3 ผลในส่วน Stator Slot	152
6.4 ผลในส่วน Rotor	154
6.5 ผลในส่วน Rotor Slot	154
6.6 ผลในส่วน No Load Current	155
6.7 ผลในส่วน Performance	156
6.8 ผลในส่วน Euqivalent Circuit	156
6.9 ผลในส่วน Torque	157
บทที่ 7 สรุปผลและวิจารณ์	158
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
ความหมายของสัญลักษณ์	
หนังสืออ้างอิง	



III

สารบัญภาพ

	หน้า
รูป 2.1 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
รูป 2.2 แสดงวงจรสมมูลย์แบบใกล้เคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	7
รูป 2.3 แสดงวงจรสมมูลย์อย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
รูป 3.1 แสดงรูปร่าง Main Dimension	12
รูป 3.2 แสดงรูปร่าง Stator Slot แบบ Round bottom slot	16
รูป 3.3 แสดงรูปร่าง Stator Slot แบบ Flat bottom slot	24
รูป 3.4 แสดงรูปร่าง Rotor Slot แบบ Round small bottom slot	35
รูป 3.5 แสดงรูปร่าง Rotor Slot แบบ Round slot	39
รูป 3.6 แสดงรูปร่าง Rotor Slot แบบ Trapezoidal slot	43
รูป 3.7 แสดงรูปร่าง End ring	54
รูป 4.1 แสดงวงจรสมมูลย์ 1 เฟส ของการทดสอบยึดโรเตอร์	86
รูป 4.2 แสดงวงจรสมมูลย์ 1 เฟส ของการทดสอบสภาวะไร้ภาระ	88
รูป 4.3 แสดงภาพประกอบการทดสอบสภาวะ ไร้ภาระ	96
รูป 4.4 แสดงภาพประกอบการทดสอบยึด โรเตอร์	96
รูป 4.5 แสดงภาพประกอบการทดสอบภาระ	97
รูป 4.6 แสดงภาพประกอบเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทาน	97
รูป 4.7 แสดงภาพประกอบเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกค่า	98
รูป 5.1 แสดงหน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรม IMMD	109
รูป 5.2 แสดงหน้าจอ Input ของ Main Dimension	111
รูป 5.3 แสดงค่า Specific Loading เมื่อกดปุ่ม “Table”	111
รูป 5.4 แสดงหน้าจอข้อมูล Input ของ Stator	112
รูป 5.5 แสดงหน้าจอข้อมูล Input ของ Rotor	113
รูป 5.6 แสดงหน้าจอข้อมูล Input ของ No Load Current	115
รูป 5.7 แสดงหน้าจอข้อมูล Input ของ Short Circuit and Equivalent Circuit	116
รูป 5.8 แสดงหน้าจอข้อมูล Output ของ Main Dimension	117
รูป 5.9 แสดงหน้าจอข้อมูล Output ของ Stator	118
รูป 5.10 แสดงหน้าจอข้อมูล Output ของ Stator Slot Dimension	120
รูป 5.11 แสดงหน้าจอข้อมูล Output ของ Stator	121
รูป 5.12 แสดงหน้าจอข้อมูล Output ของ Rotor Slot Dimension	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.13 แสดงหน้าจอดีข้อมูล Output ของ No Load Current and Short Circuit Current	123
รูป 5.14 แสดงหน้าจอดีข้อมูล Output ของ Performance & Equivalent Circuit	125
รูป 5.15 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Stator	127
รูป 5.16 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Rotor	127
รูป 5.17 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Stator Slot Dimension โดยการคำนวณจาก Area	128
รูป 5.18 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Rotor slot	129
รูป 5.19 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ End ring	129
รูป 5.20 แสดงข้อผิดพลาดเนื่องจากใส่จุดทศนิยมเกินสองตำแหน่ง	130
รูป 5.21 แสดงข้อผิดพลาดเนื่องจากใส่ข้อมูลที่ไม่ใช่ตัวเลข	130
รูป 5.22 แสดงการเตือนให้ใส่ข้อมูลที่ครบก่อนที่จะเปลี่ยนแท็บต่อไป	131
รูป 6.1 แสดงลักษณะของ Main Dimension	151
รูป 6.2 แสดงลักษณะของ Stator Slot แบบ Round bottom slot	152
รูป 6.3 แสดงลักษณะของ Rotor Slot แบบ Round small bottom slot	154

IV

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 4.1 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง X_1 กับ X_2 ตามชนิดของเครื่องจักรไฟฟ้า	87
ตาราง 4.2 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวด Stator ขณะทดสอบไว้ภาระ	88
ตาราง 4.3 แสดงค่าผลการทดสอบสถานะไว้ภาระ	89
ตาราง 4.4 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวด Stator ขณะทดสอบยึดโรเตอร์ (ที่ 50 Hz)	90
ตาราง 4.5 แสดงค่าผลการทดสอบยึดโรเตอร์ (ที่ 50 Hz)	90
ตาราง 4.6 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวด Stator ขณะทดสอบยึดโรเตอร์ (ที่ 25 Hz)	91
ตาราง 4.7 แสดงค่าผลการทดสอบยึดโรเตอร์ (ที่ 25 Hz)	92
ตาราง 4.8 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวด Stator ขณะทดสอบยึดโรเตอร์ (ที่ 12.5 Hz)	92
ตาราง 4.9 แสดงค่าผลการทดสอบยึดโรเตอร์ (ที่ 12.5 Hz)	93
ตาราง 4.10 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวด Stator ขณะทดสอบภาระของมอเตอร์	94
ตาราง 4.11 แสดงค่าผลการทดสอบภาระของมอเตอร์	94
ตาราง 5.1 แสดงค่า Efficiency and Power factor	132
ตาราง 5.2 แสดงค่า Ampere/Conductor/metre	133
ตาราง 5.3 แสดงค่า Specific Loading	134
ตาราง 5.4 แสดงค่า Round Copper Wire	135
ตาราง 5.5 แสดงค่า Air Gap Length for 4 pole Machine	136
ตาราง 5.6 แสดงค่า Carter's Air Gap co-efficient(Semi closed slot)	137
ตาราง 5.7 แสดงค่า B-H curve for electircal steel(non oriented) Lohy stampings(dynamo grade)	138
ตาราง 5.8 -แสดงค่า Loss curve of electrical sheet steel (non oriented) 0.5 mm thick type 1- 48 quality	139
-แสดงค่า Loss curve of electrical sheet steel (non oriented) 0.5 mm thick type 2- 41 quality	140
-แสดงค่า Loss curve of electrical sheet steel (non oriented) 0.5 mm thick type 3- 42 quality	141
-แสดงค่า Loss curve of electrical sheet steel (non oriented) 0.5 mm thick type 4 medium resistance	142

หน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-แสดงค่า Loss curve of electrical sheet steel (non oriented) 0.5 mm thick type 5-Special Lohys	143
-แสดงค่า Loss curve of electrical sheet steel (non oriented) 0.5 mm thick type 6-Lohys	144
ตาราง 5.9 แสดงค่า Friction and Windage Loss	145
ตาราง 5.10 แสดงค่า No Load Current	146
ตาราง 5.11 แสดงค่า Overhange Leakage	147
ตาราง 5.12 -แสดงค่า Specific Slot Permeances	148
-แสดงค่า Specific Slot Permeances	149
ตาราง 5.13 แสดงค่า Specific Slot Permeances	150
ตาราง 6.1 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Main Dimension	151
ตาราง 6.2 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Stator	152
ตาราง 6.3 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Stator Slot	153
ตาราง 6.4 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Rotor	154
ตาราง 6.5 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Rotor Slot	155
ตาราง 6.6 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน No Load Current	155
ตาราง 6.7 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Performance	156
ตาราง 6.8 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Equivalent Circuit	156
ตาราง 6.9 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Torque	157

บทที่ 1

บทนำ

แนวความคิดของโครงการ

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทมอเตอร์ที่ใช้ในโรงงานส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเนื่องจากมีข้อได้เปรียบอยู่หลายอย่างคือมีโครงสร้างง่ายไม่มีส่วนประกอบที่ยุ่งยาก สะดวกและแข็งแรงทนทานไม่ค่อยมีปัญหาในการใช้งาน การซ่อมแซมบำรุงรักษาทำได้ง่ายได้ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่และที่สำคัญมีราคาถูก มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจึงเป็นมอเตอร์ที่ใช้งานแพร่หลายที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันการผลิตมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในประเทศไทยมี 2 วิธี คือการผลิตโดยลอกเลียนแบบคัดแปลง และการผลิตโดยการซื้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งต้องสูญเสียค่าลิขสิทธิ์และค่าเทคโนโลยีจำนวนมาก ในขณะที่ต่างประเทศจะถ่ายทอดเทคโนโลยีเพียงบางส่วนเท่านั้นซึ่งไม่พอเพียงที่จะทำการวิจัย และพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขึ้นเองได้ ส่วนที่มีการผลิตโดยลอกเลียนแบบคัดแปลงนั้นผู้ผลิตก็จะไปคำนึงถึงต้นทุนการผลิตเป็นหลัก โดยไม่สนใจเรื่องของคุณภาพ ซึ่งจะทำให้มอเตอร์สามเฟสเหล่านั้นไม่มีมาตรฐานเพียงพอ

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีผู้ผลิตมอเตอร์บางรายทำการวิจัยและพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขึ้นมาเอง ก็ยังมีปัญหาต่างๆเช่น ค่าใช้จ่าย ความยุ่งยากในการคำนวณ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เป็นต้น ดังนั้นจึงเห็นว่าถ้าช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นให้น้อยลงจะเป็นการสนับสนุนให้ผู้ผลิตหันมาทำการวิจัยและพัฒนามากขึ้น จนสามารถผลิตมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขึ้นมาโดยเทคโนโลยีของประเทศเราเองได้ จะทำให้ลดการนำเข้าค่าเทคโนโลยีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากต่างประเทศลงได้ และเพิ่มการผลิตภายในประเทศให้มากยิ่งขึ้น ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ผลิตภายในประเทศมีประสิทธิภาพที่ดี ประหยัดพลังงานไฟฟ้า และมีราคาถูกลงเป็นการสนับสนุนนโยบายของรัฐในการประหยัดพลังงาน และช่วยฟื้นฟูเศรษฐกิจได้อีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

ศึกษาทฤษฎีการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยศึกษาจากตำราจากต่างประเทศเรียบเรียงทฤษฎีในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทำการทดลอง ทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า เพื่อหาคุณลักษณะต่างๆของมอเตอร์ ทำการแยกชิ้นส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้าเพื่อวัดขนาดของส่วนต่างๆของมอเตอร์เพื่อสร้างซอฟต์แวร์ ในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตามทฤษฎี แล้วเปรียบเทียบปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดลอง ทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เป็นการริเริ่มที่จะส่งเสริมให้ผู้สนใจในการออกแบบมอเตอร์มีแนวทางในการออกแบบมากยิ่งขึ้นและพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับผู้ที่สนใจจะทำการวิจัยหรือศึกษาในเรื่องนี้อยู่

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

สามารถออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ง่ายและรวดเร็วบนซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ และค่าที่ได้จากการทดสอบต่างๆสามารถนำไปใช้ในการค้นคว้าวิจัยเพื่อการศึกษาได้ ทำให้ผู้ผลิต นักวิจัย นักศึกษาและผู้สนใจหันเหมาให้ความสนใจในการวิจัยและพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสกันมากขึ้นทำให้เทคโนโลยีทางด้านการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสอดคล้องกับทางปฏิบัติมากขึ้น

ขอบเขตของโครงการ

วิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบกรงกระรอกที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์และมีการติดต่อกับผู้ใช้ในรูปแบบกราฟฟิก (Graphical User Interface, GUI) ทำให้เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่ายและมีประสิทธิภาพในตัวโปรแกรมสามารถคำนวณมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกได้หลายขนาดแต่มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบทดลองหาค่าพารามิเตอร์มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีนั้น ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ โรเตอร์กรงกระรอกขนาด 1 แรงม้า โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะยังไม่นำผลกระทบอันเนื่องมาจากความสั่นสะเทือนและความร้อนที่เกิดขึ้นมาเป็นองค์ประกอบในการออกแบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor)

- ส่วนที่อยู่กับที่มีหน้าที่ยึดขดลวดอะมเจอร์ (Armature) ที่อยู่ในสล๊อท
- โรเตอร์แบ่งออกเป็นสองแบบคือ

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage rotor) แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนตเซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่า สล๊อท (Slot) ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นเหล็กนี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกน โรเตอร์ นำแกน โรเตอร์ไปวางในพิมพ์เพื่อฉีดอลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้อลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสล๊อท และมีครีบออกไปสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากกรงกระรอกคือมีขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลิปริง (Slip ring) ซึ่งมีแปลงถ่านอยู่ มีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์

2.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ โดยส่วนโรเตอร์จะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟโดยผ่านส่วนสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนอยู่ในแอร์แกป (Air Gap) ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ตามสมการ

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.1)$$

โดยที่ N_s = ความเร็วซิงโครนัสของแม่เหล็ก (rpm)

f = ความถี่ที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์ (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

โดยขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟ แต่ในขณะที่โรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กจะไม่มี การเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจะไม่มีแรงบิด (Torque) เกิดขึ้นและขณะที่โรเตอร์มีความเร็ว N_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใดๆที่มีความแตกต่างจากความเร็ว N_s จะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นบนโรเตอร์และทำให้เกิดแรงบิด ความแตกต่างสัมพัทธ์ของความเร็วทั้งสองนี้เรียกว่า สลิป (Slip)

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.2)$$

โดย ω_s คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (Stator Angular Frequency)

ω_r คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (Rotor Angular Frequency)

S คือ Slip

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดความถี่ของโรเตอร์อยู่ที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะหมุนกวาดผ่านขดลวดของโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (ความเร็วซิงโครนัส) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำจะมีค่าสูงสุด และขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ($N_r = 0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์จะเท่ากับ ความถี่ของสาย กรณีนี้สลิปเท่ากับ 1 และเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยอัตราที่ฟลักซ์แม่เหล็กกวาดผ่านตัวนำจะช้าลง ค่าสลิปจึงลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะลดลงเป็นอัตราส่วนกับสลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = SE_2 \quad (2.3)$$

$$X_r = SE_2 \quad (2.4)$$

ในทำนองเดียวกัน ความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิปดังนี้

$$f_r = Sf \quad (2.5)$$

เมื่อ

E_r = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของ โรเตอร์ขณะทำงานปกติ

E_2 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของ โรเตอร์ขณะอยู่กับที่

X_r = ค่ารีแอคแตนซ์ต่อเฟส ขณะ โรเตอร์อยู่กับที่

f_r = ความถี่ของ โรเตอร์

f = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์จะเกิดขึ้นที่มอเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำกำลังอินพุทของมอเตอร์ไม่ได้เกิดจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดกำลังผ่านช่องว่างอากาศ (Air gap) ด้วยการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสก็คือ $E_r = SE_2$ ถ้าเอาแรงเคลื่อนจำนวนนี้หารด้วยค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟสที่โรเตอร์ (Z_2) ก็จะได้กระแสโรเตอร์ต่อเฟส (I_2) ไหลอยู่ในโรเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ค่าสลิปใดก็ได้ดังนี้

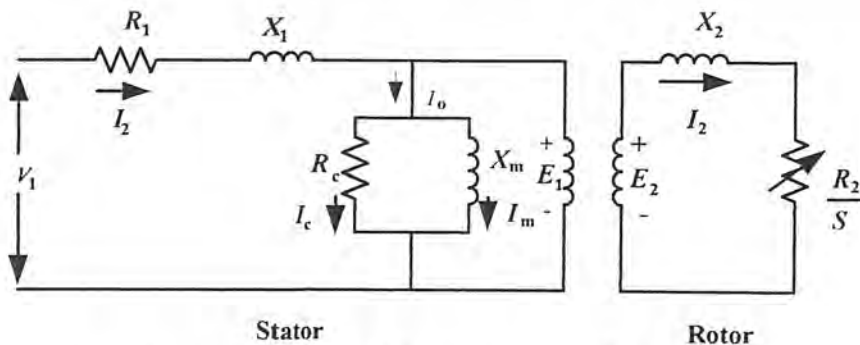
$$I_2 = \frac{SE_2}{Z_2} = \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2}} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 6 ใช้คำนวณหาค่ากระแสโรเตอร์ได้ทั้งขณะมอเตอร์เริ่มหมุน (Start) และเมื่อหมุนอยู่ที่ค่าสลิปใดๆ ก็ได้ โดยขณะเริ่มหมุนให้แทนค่าสลิป $S = 1$ ลงในสมการที่ 6 กระแสโรเตอร์ขณะเริ่มหมุนได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + jX_2^2}} \quad (2.7)$$

2.2 วงจรสมมูล

เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำนี้อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลง จะต่างกันก็ตรงที่มอเตอร์มีส่วนที่ 2 (Secondary) เคลื่อนที่หรือหมุนได้ ดังนั้นจึงเขียนวงจรสมมูลได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงธรรมดา ดังรูปซึ่งเป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูป 2.1 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1 เป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

X_1 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์

X_2 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์

R_1 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

R_2 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

R_c คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก

I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

I_m คือ กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 1 กระแส I_0 ไหลในขดลวดสเตเตอร์เป็นกระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และ การสูญเสียในขดลวด (Copper loss) การเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมากไม่ว่าโหลดของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้นถ้าย้ายวงจรขนานที่ I_0 ไหลผ่านมาไว้ที่ด้านของวงจรสมมูลจะทำให้วิเคราะห์ทฤษฎีที่เกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำง่ายขึ้น โดยมีเหตุผลดังนี้คือ

1. การย้ายวงจรขนานที่กระแส I_0 ไหลผ่านนี้จะทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเพราะว่าค่า R_1 และ X_1 มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ X_m แต่จะได้วงจรสมมูลที่พิจารณาง่ายขึ้น

2. วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะไม่คิดค่า I_0 ซึ่งเป็นส่วนประกอบเล็กๆเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่พิกัด แต่ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำเช่นนั้นไม่ได้ เพราะค่า I_0 มีค่า 30-50 % ของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม X_m เป็นจำนวนมากจึงต้องคงค่า X_m ไว้ในวงจรสมมูล

วงจรสมมูลไฟฟ้าสามารถย้ายข้างรวมกันได้ ถ้าทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ ในทำนองเดียวกันถ้าทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับ โรเตอร์ (Turn ratio : a) ก็จะย้ายค่าในวงจรสมมูลของขดลวดทั้งสองมารวมกันได้เช่นกัน

ในที่นี้ต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียง โรเตอร์มายังวงจรเทียบเคียงสเตเตอร์ซึ่งหาค่าต่างๆของวงจรสมมูลได้ดังนี้คือ

$$E'_2 = aE_2 = E_1 \quad (2.8)$$

เมื่อ $E'_2 =$ แรงดันไฟฟ้าขณะ โรเตอร์อยู่กับที่ที่ย้ายมายังด้านสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_2' = \frac{I_2}{a} \quad (2.9)$$

เมื่อ I_2' = กระแสของ โรเตอร์ที่ย้ายมายังด้านสเตเตอร์

$$R_2' = a^2 R_2 \quad (2.10)$$

$$X_2' = a^2 X_2 \quad (2.11)$$

เมื่อ R_2' = ความต้านทานของ โรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

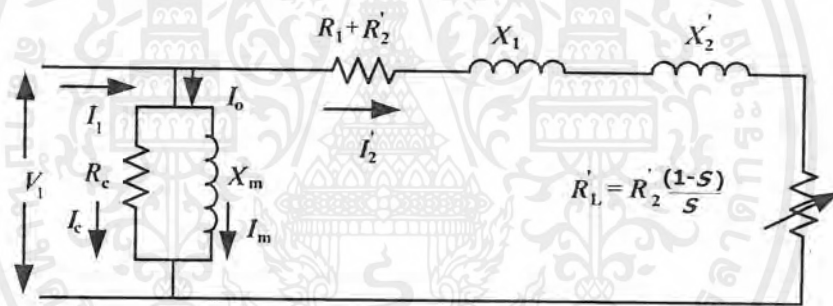
X_2' = รีแอกแตนซ์ของ โรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

จากรูปที่ 1 ค่าของ $\frac{R_2}{S}$ สามารถแยกเทอมออกได้เป็น

$$\frac{R_2}{S} = R_2 + R_2 \frac{(1-S)}{S} \quad (2.12)$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 2.8-2.12 มาเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะได้

ดังรูป



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลแบบไกล์เคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2 ส่วนโหลดความต้านทาน R_L' มีค่าเท่ากับ

$$R_L' = R_2 \frac{(1-S)}{S} \quad (2.13)$$

2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล

กำลังขาเข้าของมอเตอร์ $P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta$ (2.14)

กำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ $P_{ls} = 3I_1^2 R_1$ (2.15)

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) $P_g = 3I_2'^2 R_2'$ (2.16)

กำลังสูญเสียที่ขดลวด โรเตอร์ $P_{lr} = 3I_2'^2 R_2'$ (2.17)

กำลังไฟฟ้าขาออก $P_o = P_g - P_{lr}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{3I_2^2 R_2 (1-S)}{S} \quad (2.18)$$

กำลังที่เพลา $P_{sh} = P_o - P_{fw}$ (2.19)

P_{fw} คือ กำลังที่สูญเสียเนื่องจากแรงต้านทานและกำลังลมต้าน

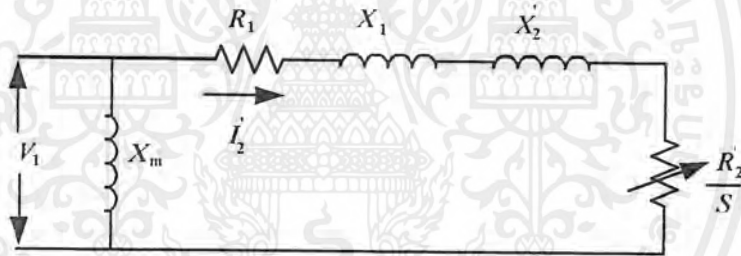
แรงบิดของมอเตอร์ $T_c = \frac{P_o}{\omega_r} = \frac{3I_2^2 R_2 (1-S)}{S(1-S)\omega_s} = \frac{3I_2^2 R_2}{S\omega_s}$ (2.20)

ซึ่ง $\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{2\pi}{60} \left[\frac{120f}{P} \right] = \frac{4\pi}{P}$ (2.21)

โดย P คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

แทนสมการที่ 2.21 ในสมการที่ 2.20 จะ ได้

แรงบิดของมอเตอร์ $T_c = \frac{3I_2^2 R_2 P}{4\pi S}$ (2.22)



รูปที่ 2.3 วงจรอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลที่อยู่ในรูปที่ 1 สามารถทำให้ง่ายขึ้นดังในรูปที่ 3 ซึ่งกระแส I_2 สามารถหา

ได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.23)$$

สามารถหาค่าสลิปสูงสุดจากสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้

$$S_m = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.24)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงผลของพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์คือ R_1 และ X_1 ซึ่งไม่มีผลต่อผลรวมของกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์ จะ ได้สมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_2' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}} = \frac{SV_s}{\sqrt{(R_2')^2 + s^2 X_2'^2}} \quad (2.25)$$

$$S_m = \frac{R_2'}{X_2'} \quad (2.26)$$

นำสมการที่ (2.25) และ (2.26) แทนในสมการที่ 2.22 จะได้แรงบิดสูงสุดดังสมการ

$$T_m = \frac{3PV_s^2}{8\pi X_2'} \quad (2.27)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi$

$$X_2' = 2\pi L_2$$

ทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการ 27 จะได้

$$T_m = \frac{3P\left(\frac{V_s}{f}\right)^2}{16\pi^2 L_2} \quad (2.28)$$

จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ที่คือเมื่อ (V_s/f) หรือ Φ คงที่ เนื่องจากความสัมพันธ์

$$V_s \approx E$$

และจาก $E = k\Phi f$ หรือ $E/f = k\Phi$ นั้นเอง ทำให้ได้ว่าในการควบคุมความเร็วโดยการให้แรงบิดคงที่สามารถทำได้โดยรักษาให้ E/f มีค่าคงที่นั่นเอง

บทที่ 3

สมการที่ใช้คำนวณในส่วนต่างๆ

3.1. ข้อมูลในส่วน Input (Data Part Input)

- รับค่า Power Output (P_{out})
- รับค่า Voltage line to line (V_L)
- รับค่า Number of phase (m)
- รับค่า Number of poles (P)
- รับค่า Efficiency (η)
- รับค่า Power factor (pF)
- รับค่า Frequency (f)
- รับค่า L/τ
- รับค่า Slot per Poles per Phase (g)

3.2. ส่วน Main Dimention

3.2.1 ข้อมูล Input ในส่วน Main Dimention

- รับค่า average flux density (B_{av})
- รับค่า ampere conductor per metre (ac)
- รับค่า winding factor (K_w)
- รับค่า lohy-stamping
- รับค่า stacking factor (K_s)

3.2.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณส่วน Main Dimention

คำนวณหาค่า Kva input (Q)

$$Q = \frac{kW}{\eta \cdot \cos\phi} \quad (3.1)$$

โดย

Q = kVA input

kW = Full load output

η = Efficiency (%)

$\cos\phi$ = Power factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่า Output co-efficient (C_o)

$$C_o = 11 \cdot kW \cdot B_{av} \cdot ac \cdot 10^{-3} \quad (3.2)$$

โดย

C_o = Output co-efficient

kW = Full load output

B_{av} = average flux density (Wb/ m²)

ac = ampere conductor per metre

คำนวณหาค่า D^2L

$$D^2L = \frac{Q}{C_o n_s} \quad (3.3)$$

โดย

Q = kVA input

C_o = Output co-efficient

n_s = Synchronous speed (r.p.s)

D = Stator bore diameter (m)

L = Gross core length (m)

โดยค่า L/τ มีค่าที่เลือกใช้ในการตัดสินใจดังนี้

1. Minimum coast 1.5 to 2
2. Good power factor 1.0 to 1.25
3. Good efficiency 1.5
4. Good overall design 1 ...
5. For best power factor $\tau = \sqrt{18 \cdot L}$

โดย

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{P} \quad (\text{m})$$

คำนวณหาค่า Net iron length (L_i)

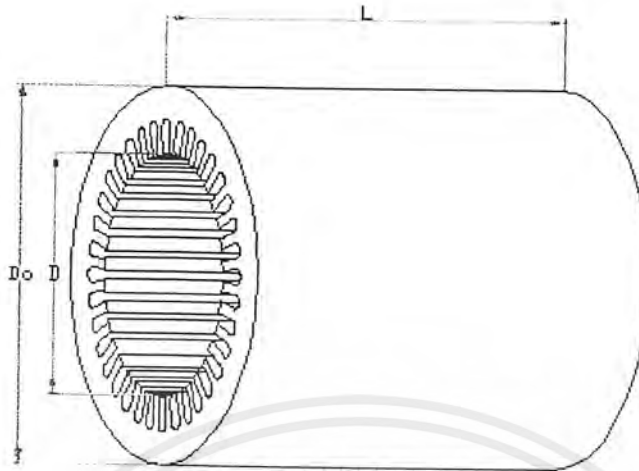
$$L_i = K_s \cdot L \quad (3.4)$$

โดย

K_s = Stacking factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L = Gross core length (m)



รูป 3.1 รูปร่าง Main Dimention

3.3 Stator Design

3.3.1 Winding

1) ข้อมูลในส่วน Input

- รับค่าการต่อขดลวดว่าเป็น Star หรือ Delta
- รับค่าความกว้างของขดลวด
- รับค่าการเลือกการพัน

2) สมการที่ใช้ในการคำนวณในส่วน Winding

คำนวณหาค่า Stator voltage per phase (V_{ph})

คำนวณหาค่า Flux per pole (Φ_m)

$$\Phi_m = B_{av} \cdot \tau \cdot L_i \quad (3.5)$$

โดย

Φ_m = Flux per pole (Wb)

B_{av} = average flux density (Wb/m²)

τ = pole pitch (m)

L = Gross iron length (m)

คำนวณหาค่า Stator turn per phase (N_{ph})

$$N_{ph} = \frac{V_{ph}}{4.44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot K_w} \quad (3.6)$$

โดย

V_{ph} = Stator voltage per phase (v)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f = Frequency (Hz)

Φ_m = Flux per pole (Wb)

K_w = Winding factor

กำหนดค่า Slot per Pole per Phase (g)

คำนวณหาค่า Total stator slot (S_{ss})

$$S_{ss} = m \cdot P \cdot g \quad (3.7)$$

โดย

S_{ss} = Total stator slot

m = Number of phase

P = Number of pole

g = Slot per pole per phase

คำนวณหาค่า Stator slot pitch (y_{ss})

$$y_{ss} = \frac{\pi \cdot D}{S_s} \quad (3.8)$$

โดย

y_{ss} = Stator slot pitch (m)

D = Stator bore diameter (m)

S_s = Number of stator slot

คำนวณหาค่า Total stator conductor (T_{sc})

$$T_{sc} = 2 \cdot m \cdot N_{ph} \quad (3.9)$$

โดย

T_{sc} = Total stator conductor

m = Slot per pole per phase

N_{ph} = Stator turn per phase

คำนวณหาค่า Stator conductor perslot (Z_{ss})

$$Z_{ss} = \frac{T_{sc}}{S_s} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

T_{sc} = Total stator conductor

S_s = Number of stator slot

คำนวณหาค่า Pitch factor (K_p)

$$K_p = \text{SIN} \frac{\rho}{2} \quad (3.11)$$

โดย

K_p = Pitch factor

ρ = Coil pitch

คำนวณหาค่า Distribution factor (K_d)

$$K_d = \frac{\text{SIN} \frac{\sigma}{2}}{\gamma \text{SIN} \frac{\gamma}{2}} \quad (3.12)$$

โดย

K_d = Distribution factor

σ = Spred of phase group

γ = มุมคอร่อง slot

คำนวณหาค่า Stator winding factor (K_{ws})

$$K_{ws} = K_p \cdot K_d \quad (3.13)$$

โดย

K_{ws} = Stator winding factor

K_p = Pitch factor

K_d = Distribution factor

3.3.2 Conductor Size

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Current density

-รับค่า Diameter จากตารางที่ 4

-รับค่า Diameter enamel จากตารางที่ 4

2) สมการที่ใช้ในการคำนวณในส่วน Conductor Size

-คำนวณหาค่า Stator current per phase (I)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_s = \frac{Q}{3 \cdot V_{ph}} \quad (3.14)$$

โดย

I_s = Stator current per phase (A)

Q = Kva input

V_{ph} = Stator voltage per phase (V)

-คำนวณหาค่า Stator line current (I_{sl})

-คำนวณหาค่า Area of conductor required (A_{cr})

$$A_{cr} = \frac{I_s}{\delta} \quad (3.15)$$

โดย

A_{cr} = Area of conductor required (mm^2)

I_s = Stator current per phase (A)

δ = Current density (A/mm^2)

-กำหนดค่า Diameter of conductor (bare) required โดยเทียบค่าจากตารางที่ 4

-คำนวณหาค่า Area of stator conductor used (A_{scu})

$$A_{scu} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.16)$$

โดย

A_{scu} = Area of stator conductor used (mm^2)

d = The nearest standard conductor has a diameter, from table 4

3.3.3 Stator slot dimention

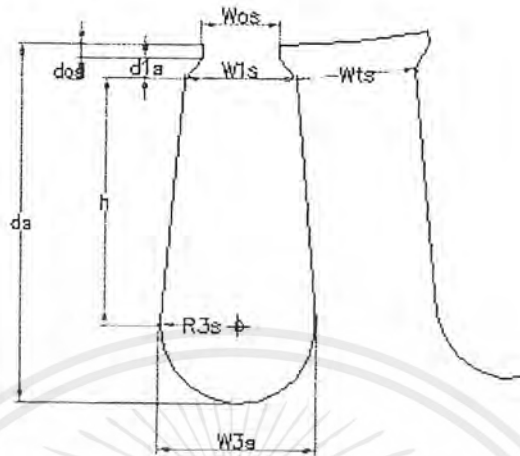
1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Space factor

-รับค่า depth of tip (d_{os})

-รับค่า depth of mounth (d_{1s})

2) สมการที่ใช้ในการคำนวณในส่วน Stator slot dimention



รูป 3.2 รูปร่าง Stator Slot แบบ Round bottom slot

2.1) แบบ Round bottom slot

โดยสามารถแยกวิธีการคำนวณได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1 คำนวณจากขนาด Dimention

-คำนวณหาค่า Stator slot opening (W_{os})

โดย

$$\text{ถ้า } S_s = 24, W_{os} = 0.0685 + 0.0175.D \quad (3.17)$$

$$\text{ถ้า } S_s = 36, W_{os} = 0.0381 + 0.0175.D \quad (3.18)$$

$$\text{ถ้า } S_s = 48, W_{os} = 0.0175.D \quad (3.19)$$

โดย

S_s = Number of stator slot

W_{os} = Stator slot opening (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

-กำหนดค่า depth of tip (d_{os})

-คำนวณหาค่า depth of mounth (d_{1s})

$$d_{1s} = (1.0 \text{ to } 1.5).d_{os} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

d_{1s} = depth of mounth (cm)

d_{od} = depth of tip (cm)

-คำนวณหาค่า Width of stator tooth (W_{ts})

สำหรับ 2 pole , $W_{ts} = (1.10 + 0.032 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s}$ (3.21)

สำหรับ 4 pole , $W_{ts} = (1.27 + 0.035 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s}$ (3.22)

โดย

W_{ts} = Width of stator tooth (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

S_s = Number of stator slot

-คำนวณหาค่า Stator core depth (d_{cs})

$$d_{cs} = \left(\frac{B_{ts}}{B_{cs}} \right) \cdot \left(\frac{S_s \cdot W_{ts}}{\pi \cdot P} \right) \quad (3.23)$$

โดยค่า $B_{ts}/B_{cs} = 1.15$ เป็นค่าที่แนะนำ

โดย

B_{ts} = Flux density in stator teeth (Wb/m^2)

B_{cs} = Flux density in stator core (Wb/m^2)

S_s = Number of stator slot

P = Number of pole

W_{ts} = Width of stator teeth (cm)

d_{cs} = Stator core depth (cm)

-คำนวณหาค่า half slot angle (α)

$$\alpha = \frac{180}{S_s} \quad (3.24)$$

โดย

S_s = Number of stator slot

-คำนวณหาค่าคงที่ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารดังกล่าวอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{(D \cdot \sin \alpha - W_{ts})}{2} \quad (3.25)$$

โดย

D = Stator bore diameter (cm)

α = half slot angle

W_{ts} = Width of stator teeth (cm)

-คำนวณหาค่าคงที่ B

$$B = 0.5 \cdot (D_o - D) - d_{cs} \quad (3.26)$$

โดย

D_o = Outer diameter (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_{cs} = Stator core depth (cm)

-คำนวณหาค่า total depth of stator slot (d_s)

$$d_s = \frac{B \cdot (1 + \sin \alpha) + 0.2A}{1 + 0.8 \cdot \sin \alpha} \quad (3.27)$$

โดย

d_s = total depth of stator slot (cm)

A = ค่าคงที่

B = ค่าคงที่

α = half slot angle

-คำนวณหาค่า Radial of bottom (r_{3s})

$$r_{3s} = \frac{A + B \cdot \sin \alpha}{1 + 0.8 \cdot \sin \alpha} \quad (3.28)$$

โดย

r_{3s} = Radial of bottom slot (cm)

A = ค่าคงที่

B = ค่าคงที่

α = half slot angle

-คำนวณหาค่า depth of stator slot (d_{4s})

$$d_{4s} = d_s - (r_{3s} + d_{os} + d_{1s}) \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

d_{4s} = depth of stator slot (cm)

d_s = total depth of stator slot (cm)

r_{3s} = radial of bottom slot (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

-คำนวณหาค่า Width of stator slot (W_{1s})

$$W_{1s} = \frac{2(r_{3s} - d_{4s} \cdot \sin \alpha)}{\cos \alpha} \quad (3.30)$$

โดย

W_{1s} = Width of stator slot (cm)

r_{3s} = radial of bottom slot (cm)

α = half slot angle

-คำนวณหาค่า Width of bottom stator slot (W_{3s})

$$W_{3s} = 2 \cdot r_{3s} \quad (3.31)$$

โดย

W_{3s} = Width of bottom stator slot (cm)

r_{3s} = radial of bottom slot (cm)

วิธีที่ 2 คำนวณจากพื้นที่หน้าตัด

-กำหนดค่า Space factor

-คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดตัวนำต่อ slot (A_{s1})

$$A_{s1} = Z_{ss} \cdot A_{scu} \quad (3.32)$$

โดย

A_{s1} = พื้นที่หน้าตัดตัวนำต่อ slot (mm^2)

Z_{ss} = Stator conductor per slot

A_{scu} = Area of stator conductor used (mm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาพื้นที่ใช้งานทั้งหมดของแต่ละร่อง Slot (a_{s2})

$$A_{s2} = \frac{A_{s1}}{k_{sp}} \quad (3.33)$$

โดย

A_{s2} = พื้นที่ใช้งานทั้งหมดของแต่ละร่อง Slot (mm^2)

A_{s1} = พื้นที่หน้าตัดตัวนำต่อ slot (mm^2)

k_{sp} = Space factor

-กำหนดค่า depth of tip (d_{os})

-คำนวณหาค่า depth of mounth (d_{1s})

$$d_{1s} = (1.0 \text{ to } 1.5) \cdot d_{os} \quad (3.34)$$

โดย

d_{1s} = depth of mounth (cm)

d_{od} = depth of tip (cm)

-คำนวณหาค่า Minimum width of stator teeth (cm)

$$(W_{ts})_{\min} = \frac{\Phi_m}{1.7 \cdot \frac{S_s}{P} \cdot L_i} \quad (3.35)$$

โดย

$(W_{ts})_{\min}$ = Minimum width of stator teeth (m)

Φ_m = Flux per pole (Wb)

S_s = Number of stator slot

P = Number of pole

L_i = Net iron length (m)

-คำนวณหาค่า Width of stator tooth (W_{ts})

$$\text{สำหรับ 2 pole, } W_{ts} = (1.10 + 0.032 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s} \quad (3.36)$$

$$\text{สำหรับ 4 pole, } W_{ts} = (1.27 + 0.035 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s} \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

W_{1s} = Width of stator tooth (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

S_s = Number of stator slot

-คำนวณหาค่า Width of stator slot (W_{1s})

$$W_{1s} = \frac{\pi \cdot (D + 2(d_{os} + d_{1s}))}{S_s} - W_{ts} \quad (3.38)$$

โดย

W_{1s} = Width of stator slot (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator slot (cm)

-คำนวณหาค่า h จากรูปที่ 2

โดยพื้นที่ทั้งหมดคือ

$$\frac{1}{2} \cdot h \cdot (W_{1s} + W_{3s}) + \frac{\pi}{8} \cdot (W_{3s})^2 = A_{s2} \quad (1)$$

โดย

$$W_{3s} = \frac{\pi(D + 2(d_{os} + d_{1s} + h))}{S_s} - W_{ts} \quad (2)$$

แทนค่า (2) ใน (1)

$$\frac{1}{2} \cdot h \cdot \left(W_{1s} + \frac{\pi(D + 2 \cdot d_{os} + 2 \cdot d_{1s} + 2 \cdot h)}{S_s} - W_{ts} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot \left(\frac{\pi(D + 2(d_{os} + d_{1s} + h))}{S_s} - W_{ts} \right)^2 = A_{s2}$$

คำนวณหาค่า h โดยกำหนดให้

$$a = \frac{\pi}{S_s} + \frac{\pi^3}{2 \cdot S_s^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_1 = \frac{W_{1s}}{2}$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot S_s}$$

$$b_3 = \frac{\pi \cdot d_{os}}{S_s}$$

$$b_4 = \frac{\pi \cdot d_{1s}}{S_s}$$

$$b_5 = \frac{-W_{ts}}{2}$$

$$b_6 = \frac{\pi^3 \cdot D}{2 \cdot S_s^2}$$

$$b_7 = \frac{2 \cdot \pi^3 \cdot d_{os}}{2 \cdot S_s^2}$$

$$b_8 = \frac{2 \cdot \pi^3 \cdot d_{1s}}{2 \cdot S_s^2}$$

$$b_9 = \frac{-2 \cdot \pi^3 \cdot W_{ts}}{4 \cdot S_s}$$

$$b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9$$

$$c_1 = \frac{\pi}{8 \cdot S_s^2} (\pi \cdot D + 2 \cdot \pi \cdot d_{os} + 2 \cdot \pi \cdot d_{1s})^2$$

$$c_2 = \frac{-\pi^2 \cdot D \cdot W_{ts}}{4 \cdot S_s}$$

$$c_3 = \frac{-2 \cdot \pi^2 \cdot D_{os} \cdot W_{ts}}{4 \cdot S_s}$$

$$c_4 = \frac{-2 \cdot \pi^2 \cdot d_{1s} \cdot W_{ts}}{4 \cdot S_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_5 = \frac{\pi}{8} \cdot W_{ts}^2$$

$$c_6 = -A_{s2}$$

$$c = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6$$

$$h = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (\text{mm})$$

โดย

W_{1s} = Width of stator slot (mm)

W_{3s} = Width of bottom stator slot (mm)

A_{s2} = พื้นที่ใช้งานทั้งหมดของแต่ละร่อง slot (mm^2)

D = Stator bore diameter (mm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator slot (cm)

a = ค่าคงที่

$b, b_1 - b_9$ = ค่าคงที่

$c, c_1 - c_6$ = ค่าคงที่

-คำนวณหาค่า Width of bottom stator slot (W_{3s})

$$W_{3s} = \frac{\pi \cdot (D + 2(d_{os} + d_{1s} + h))}{S_s} - W_{ts} \quad (3.39)$$

โดย

W_{3s} = Width of bottom stator slot (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator slot (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่า Radial of bottom slot (r_{3s})

$$r_{3s} = \frac{W_{3s}}{2} \quad (3.40)$$

โดย r_{3s} = Radial of bottom slot (cm)

W_{3s} = Width of bottom stator slot (cm)

-คำนวณหาค่า Total depth of stator slot (d_s)

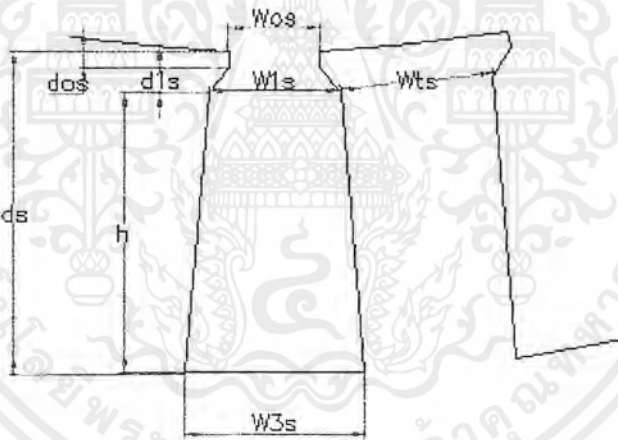
$$d_s = d_{os} + d_{1s} + h + r_{3s} \quad (3.41)$$

โดย d_s = Total depth of stator slot (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

r_{3s} = Radial of bottom slot (cm)



รูป 3.3 รูปร่าง Stator Slot แบบ Flat bottom slot

2.2) แบบ Flat bottom slots

โดยสามารถแยกวิธีการคำนวณได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1 คำนวณจากขนาด **Dimension**

-คำนวณหาค่า Stator slot opening (W_{os})

โดย

$$\text{ถ้า } S_s = 24, W_{os} = 0.0685 + 0.0175.D \quad (3.42)$$

$$\text{ถ้า } S_s = 36, W_{os} = 0.0381 + 0.0175.D \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ถ้า } S_s = 48, w_{os} = 0.0175 \cdot D \quad (3.44)$$

โดย

S_s = Number of stator slot

w_{os} = Stator slot opening (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

-กำหนดค่า depth of tip (d_{os})

-คำนวณหาค่า depth of mounth (d_{1s})

$$d_{1s} = (1.0 \text{ to } 1.5) \cdot d_{os} \quad (3.45)$$

โดย

d_{1s} = depth of mounth (cm)

d_{od} = depth of tip (cm)

-คำนวณหาค่า Width of stator tooth (W_{ts})

$$\text{สำหรับ 2 pole, } W_{ts} = (1.10 + 0.032 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s} \quad (3.46)$$

$$\text{สำหรับ 4 pole, } W_{ts} = (1.27 + 0.035 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s} \quad (3.47)$$

โดย

W_{ts} = Width of stator tooth (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

S_s = Number of stator slot

-คำนวณหาค่า Stator core depth (d_{cs})

$$d_{cs} = \left(\frac{B_{ts}}{B_{cs}} \right) \cdot \left(\frac{S_s \cdot W_{ts}}{\pi \cdot P} \right) \quad (3.49)$$

โดยค่า $B_{ts}/B_{cs} = 1.15$ เป็นค่าที่แนะนำ

โดย

B_{ts} = Flux density in stator teeth (Wb/m^2)

B_{cs} = Flux density in stator core (Wb/m^2)

S_s = Number of stator teeth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P = Number of pole

W_{1s} = Width of stator teeth (cm)

d_{cs} = Stator core depth (cm)

-คำนวณหาค่า half slot angle (α)

$$\alpha = \frac{180}{S_s} \quad (3.50)$$

โดย

S_s = Number of stator slot

-คำนวณหาค่า Width of stator slot (W_{1s})

$$W_{1s} = \frac{\pi \cdot (D + 2(d_{os} + d_{1s}))}{S_s} - W_{ts} \quad (3.51)$$

โดย

W_{1s} = Width of stator slot (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator slot (cm)

-คำนวณหาค่า depth of stator slot (d_{4s})

$$d_{4s} = 0.5 \cdot (D_o - D - (d_s + d_s + d_{cs})) \quad (3.52)$$

โดย

D_o = Outer diameter (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

d_{cs} = Stator core depth (cm)

d_{4s} = depth of stator slot (cm)

-คำนวณหาค่า Width of bottom stator slot (W_{3s})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{3s} = W_{1s} + 2 \cdot d_{4s} \cdot \tan \alpha \quad (3.53)$$

โดย

W_{3s} = Width of bottom stator slot (cm)

W_{1s} = Width of stator slot (cm)

α = half slot angle

วิธีที่ 2 คำนวณจากพื้นที่หน้าตัด

-กำหนดค่า Space factor

-คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดตัวนำต่อ slot (A_{s1})

$$A_{s1} = Z_{ss} \cdot A_{scu} \quad (3.54)$$

โดย

A_{s1} = พื้นที่หน้าตัดตัวนำต่อ slot (mm^2)

Z_{ss} = Stator conductor per slot

A_{scu} = Area of stator conductor used (mm^2)

-คำนวณหาพื้นที่ใช้งานทั้งหมดของแต่ละร่อง Slot (A_{s2})

$$A_{s2} = \frac{A_{s1}}{k_{sp}} \quad (3.55)$$

โดย

A_{s2} = พื้นที่ใช้งานทั้งหมดของแต่ละร่อง Slot (mm^2)

A_{s1} = พื้นที่หน้าตัดตัวนำต่อ slot (mm^2)

k_{sp} = Space factor

-กำหนดค่า depth of tip (d_{os})

-คำนวณหาค่า depth of mounth (d_{1s})

$$d_{1s} = (1.0 \text{ to } 1.5) \cdot d_{os} \quad (3.56)$$

โดย

d_{1s} = depth of mounth (cm)

d_{od} = depth of tip (cm)

-คำนวณหาค่า Minimum width of stator teeth (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(W_{ts})_{\min} = \frac{\Phi_m}{1.7 \cdot \frac{S_s}{P} \cdot L_i} \quad (3.57)$$

โดย

$(W_{ts})_{\min}$ = Minimum width of stator teeth (m)

Φ_m = Flux per pole

S_s = Number of stator slot

P = Number of pole

L_i = Net iron length (m)

-คำนวณหาค่า Width of stator tooth (W_{ts})

$$\text{สำหรับ 2 pole, } W_{ts} = (1.10 + 0.032 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s} \quad (3.58)$$

$$\text{สำหรับ 4 pole, } W_{ts} = (1.27 + 0.035 \cdot D) \cdot \frac{D}{S_s} \quad (3.59)$$

โดย

W_{ts} = Width of stator tooth (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

S_s = Number of stator slot

-คำนวณหาค่า Width of stator slot (W_{1s})

$$W_{1s} = \frac{\pi \cdot (D + 2(d_{os} + d_{1s}))}{S_s} - W_{ts} \quad (3.60)$$

โดย

W_{1s} = Width of stator slot (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator slot (cm)

-คำนวณหาค่า h จากรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพื้นที่ทั้งหมดคือ

$$\frac{1}{2} \cdot h \cdot (W_{1s} + W_{3s}) = A_{s2} \quad (1)$$

โดย

$$W_{3s} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot (d_{os} + d_{1s} + h))}{S_s} - W_{1s} \quad (2)$$

นำ (2) แทน (1)

$$\frac{1}{2} \cdot h \cdot \left(W_{1s} + \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot (d_{os} + d_{1s} + h))}{S_s} - W_{1s} \right) = A_{s2}$$

คำนวณหาค่า h โดยกำหนดให้

$$a = \frac{\pi}{S_s}$$

$$b_1 = \frac{W_{1s}}{2}$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot S_s}$$

$$b_3 = \frac{\pi \cdot d_{os}}{S_s}$$

$$b_4 = \frac{\pi \cdot d_{1s}}{S_s}$$

$$b_5 = \frac{-W_{1s}}{S_s}$$

$$b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5$$

$$c = -A_{s2}$$

$$h = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

โดย

W_{1s} = Width of stator slot (mm)

w_{3s} = Width of bottom stator slot (mm)

A_{s2} = พื้นที่ใช้งานทั้งหมดของแต่ละร่อง slot (mm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = Stator bore diameter (mm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator slot (cm)

a = ค่าคงที่

b, $b_1 - b_s$ = ค่าคงที่

c = ค่าคงที่

-คำนวณหาค่า Width of bottom stator slot (W_{3s})

$$W_{3s} = \frac{\pi \cdot (D + 2(d_{os} + d_{1s} + h))}{S_s} - W_{ts} \quad (3.61)$$

โดย

W_{3s} = Width of bottom stator slot (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator slot (cm)

-คำนวณหาค่า Total depth of stator slot (d_s)

$$d_s = d_{os} + d_{1s} + h \quad (3.62)$$

โดย

d_s = Total depth of stator slot (cm)

d_{os} = depth of tip (cm)

d_{1s} = depth of mounth (cm)

-คำนวณหาค่า length of mean turn (lmt_s)

$$lmt_s = 2(L + 4.325) + 2(\tau + 1.84) \quad (3.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

l_{mt_s} = length of mean turn (m)

L = Gross core length (m)

τ = pole pitch (m)

3.3.4 Stator teeth

-คำนวณหาค่า Flux density instator teeth (B_{ts})

$$B_{ts} = \frac{\Phi_m}{\frac{S_s \cdot W_{ts} \cdot L_i}{P}} \quad (3.64)$$

โดย

B_{ts} = Flux density instator teeth (Wb/m^2)

Φ_m = Flux per pole (Wb)

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator teeth (m)

L_i = Net iron length (m)

ข้อแนะนำ

-ค่า Flux density ที่คำนวณ ได้ต้องไม่เกิน 1.7 Wb/m^2

-ค่า height of stator teeth = total depth of stator slot (d_s)

3.3.5 Stator core

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Flux density in stator core (Wb/m^2)

2) สมการที่ใช้ในการคำนวณในส่วน Stator core

ข้อเสนอแนะ

ในส่วนนี้การกำหนดค่า Flux density จะไม่เกิน 1.5 Wb/m^2 แต่โดยทั่วไปจะอยู่

ในช่วงระหว่าง $1.2-1.4 \text{ Wb/m}^2$

-คำนวณหาค่า Flux in stator core (Φ_{mcs})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Phi_{mcs} = \frac{\Phi_m}{2} \quad (3.65)$$

โดย

Φ_{mcs} = Flux in stator core (Wb)

Φ_m = Flux per pole (Wb)

-กำหนดค่า Flux density in stator core (B_{cs})

-คำนวณหาค่า Area of stator core (A_{cs})

$$A_{cs} = \frac{\Phi_{mcs}}{B_{cs}} \quad (3.66)$$

โดย

A_{cs} = area of stator core (m^2)

Φ_{mcs} = Flux in stator core (Wb)

B_{cs} = Flux density in stator core (Wb/m^2)

-คำนวณหาค่า depth of stator core (d_{cs})

$$d_{cs} = \frac{A_{cs}}{L_i} \quad (3.67)$$

โดย

d_{cs} = depth of stator core (m)

A_{cs} = area of stator core (m^2)

L_i = Net iron length (m)

-คำนวณหาค่า Outside diameter of stator lamination (D_o)

$$D_o = D + 2d_s + 2d_{cs} \quad (3.68)$$

โดย

D_o = Outside diameter of stator lamination (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

d_s = Total depth of stator slot (cm)

d_{cs} = depth of stator core (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 Rotor design

3.4.1 Airgap

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Airgap length (mm)

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Air gap length

มีสมการที่ใช้ในการคำนวณ 4 สมการคือ

$$1) l_g = 0.2 + 2 \cdot \sqrt{D \cdot L} \quad (3.69)$$

โดย

l_g = Air gap length (mm)

D = Stator bore diameter (m)

L = Gross iron length (m)

$$2) l_g = 0.125 + 0.35D + L + 0.015V_a \quad (3.70)$$

โดย

l_g = Air gap length (mm)

D = Stator bore diameter (m)

L = Gross iron length (m)

V_a = Peripheral speed (metre per second)

โดย

$$V_a = \pi \cdot D \cdot N_s$$

โดย

$$N_s = \frac{2 \cdot f}{P}$$

โดย

f = frequency (Hz)

P = Number of pole

D = Stator bore diameter (m)

N_s = Synchronous speed (r.p.s)

$$3) l_g = 0.2 + D \quad (3.71)$$

โดย

l_g = Air gap length (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = Stator bore diameter (m)

$$4) \quad l_g = 1.6\sqrt{D} - 0.25 \quad (3.72)$$

โดย

l_g = Air gap length (mm)

D = Stator bore diameter (m)

-คำนวณหาค่า Diameter of rotor (D_r)

$$D_r = D - 2l_g \quad (3.73)$$

โดย

D_r = Diameter of rotor (cm)

D = Stator bore diameter (m)

l_g = Air gap length (cm)

3.4.2 Rotor slots

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Number of rotor slot (S_r)

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Rotor slots

-กำหนดค่า Number of rotor slot (S_r)

-คำนวณหาค่า Rotor slot pitch (y_{sr})

$$y_{sr} = \frac{\pi \cdot D_r}{S_r} \quad (3.74)$$

โดย

y_{sr} = Rotor slot pitch (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

S_r = Number of rotor slot

3.4.3 Rotor bar

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Current density in rotor bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

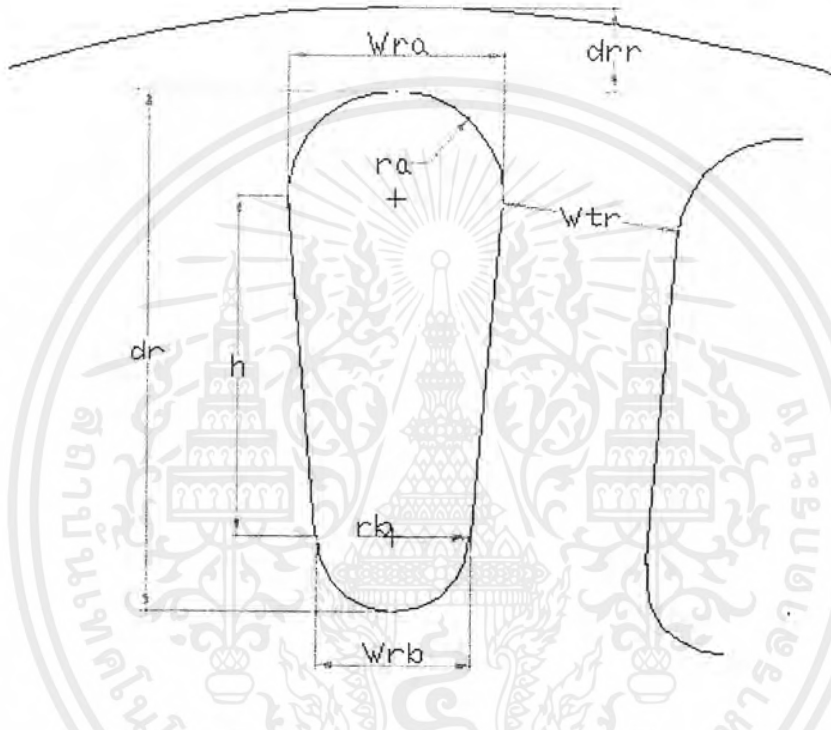
-รับค่า depth of tip in rotor (d_{or})

-รับค่า depth of mounth in rotor (d_{1r})

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Rotor bar

สามารถแบ่งรูปร่างร่อง Slot ได้ 3 ประเภทคือ

1.1) แบบ Round small bottom slot



รูป 3.4 แสดงรูปร่าง Rotor Slot แบบ Round small bottom slots

คำนวณจากพื้นที่หน้าตัด

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{0.95 \cdot W_{ts} \cdot S_s}{S_r} \quad (3.75)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

W_{ts} = Width of stator teeth (cm)

S_r = Number of rotor slot

S_s = Number of stator slot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่า Width of above slot (W_{ra})

$$W_{ra} = \frac{\pi [D_r - 2 \cdot (d_{or})]}{S_r} - W_{tr} \quad (3.76)$$

โดย

W_{ra} = Width of above slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{or} = depth of tip in slot (cm)

S_r = Number of rotor slot

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

-คำนวณหาค่า h จากรูปที่ 3.4

โดยพื้นที่ทั้งหมดคือ

$$\frac{1}{2} \cdot h \cdot (W_{ra} + W_{rb}) + \frac{\pi}{8} (W_{rb})^2 = A_{rb} - \frac{\pi \cdot W_{ra}^2}{8} \quad (1)$$

โดย

$$W_{rb} = \frac{\pi \left[D_r - 2 \cdot \left(d_{or} + \frac{W_{ra}}{2} + h \right) \right]}{S_r} - W_{tr} \quad (2)$$

แทนค่า(2) ใน (1)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot h \cdot \left[W_{ra} + \pi \left(D_r - 2 \cdot \left(\frac{d_{or} + \frac{W_{ra}}{2} + h}{S_r} \right) - W_{tr} \right) \right] + \frac{\pi}{8} \cdot \left[\frac{\pi - 2 \left(d_{or} + \frac{W_{ra}}{2} + h \right)}{S_r} - W_{tr} \right]^2 \\ = A_{rb} - \frac{\pi \cdot W_{ra}^2}{8} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่า h โดยกำหนดให้

$$a = \left(\frac{-\pi}{S_s} + \frac{\pi^3}{2 \cdot S_r^2} \right)$$

$$b_1 = \frac{W_{ra}}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_2 = \frac{\pi \cdot D_r}{2 \cdot S_r}$$

$$b_3 = \frac{-\pi \cdot d_{or}}{S_r}$$

$$b_4 = \frac{-\pi \cdot W_{ra}}{2 \cdot S_r}$$

$$b_5 = \frac{-W_{tr}}{2}$$

$$b_6 = \frac{-\pi^3 \cdot D_r}{2 \cdot S_r^2}$$

$$b_7 = \frac{\pi^3 \cdot d_{or}}{S_r^2}$$

$$b_8 = \frac{\pi^3 \cdot W_{ra}}{2 \cdot S_r^2}$$

$$b_9 = \frac{\pi^2 \cdot W_{tr}}{2 \cdot S_r}$$

$$b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9$$

$$c_1 = \frac{\pi}{8 \cdot S_r^2} (\pi D_r - 2 \cdot \pi \cdot d_{or} - \pi \cdot W_{ra})^2$$

$$c_2 = \frac{-\pi \cdot W_{tr} \cdot D_r}{4 \cdot S_r}$$

$$c_3 = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot W_{tr} \cdot d_{or}}{4 \cdot S_r}$$

$$c_4 = \frac{\pi^2 \cdot W_{tr} \cdot W_{ra}}{4 \cdot S_r}$$

$$c_5 = \frac{\pi}{8} \cdot W_{tr}^2$$

$$c_6 = -\left(A_{rb} - \frac{\pi \cdot W_{ra}^2}{8}\right)$$

$$c = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

โดย

W_{ra} = Width of above slot (mm)

W_{rb} = Width of bottom slot (mm)

A_{rb} = Area of rotor bar (mm)

D_r = Diameter of rotor (mm)

d_{or} = depth of tip in rotor (mm)

S_r = Number of rotor slot

W_{tr} = Width of rotor teeth (mm)

a = ค่าคงที่

b, b₁-b₉ = ค่าคงที่

c, c₁-c₆ = ค่าคงที่

-คำนวณหาค่า Width of bottom slot (W_{rb})

$$W_{rb} = \frac{\pi \cdot \left[D_r - 2 \cdot \left(d_{or} + \frac{W_{ra}}{2} + h \right) \right]}{S_r} - W_{tr} \quad (3.77)$$

โดย

W_{rb} = Width of bottom slot (cm)

W_{ra} = Width of above slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

S_r = Number of rotor slot

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

-คำนวณหาค่า Radial of bottom slot (r_a)

$$r_a = \frac{W_{ra}}{2} \quad (3.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

r_a = Radial of above slot (cm)

W_{ra} = Width of above slot (cm)

-คำนวณหาค่า Radial of bottom slot (r_b)

$$r_b = \frac{W_{rb}}{2} \quad (3.79)$$

โดย

r_b = Radial of bottom slot (cm)

W_{rb} = Width of bottom slot (cm)

-คำนวณหาค่า Total depth of slot (d_r)

$$d_r = r_a + h + r_b \quad (3.80)$$

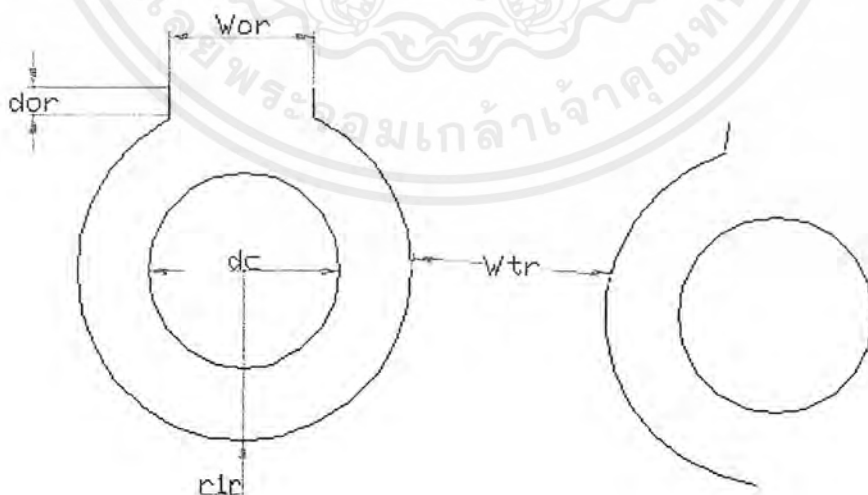
โดย

d_r = Total depth of rotor slot (cm)

r_a = Radial of above slot (cm)

r_b = Radial of bottom slot (cm)

1.2) แบบ Round slots



รูป 3.5 แสดงรูปร่าง Rotor Slot แบบ Round Slots

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถแยกการวิธีการคำนวณได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1 คำนวณจากขนาด **Dimension**

-คำนวณหาค่า Diameter of rotor (D_r)

$$D_r = D - 2l_g \quad (3.81)$$

โดย

D_r = Diameter of rotor (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

l_g = Air gap length (cm)

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{0.95 \cdot W_{ts} \cdot S_s}{S_r} \quad (3.82)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

W_{ts} = Width of stator teeth (cm)

S_s = Number of stator slot

S_r = Number of rotor slot

-กำหนดค่า Slot opening (W_{or})

โดย

$$W_{or} \geq \text{lamination thickness to } 0.075 \quad (\text{cm}) \quad (3.83)$$

-กำหนดค่า depth of tip in rotor (d_{or})

โดย

$$d_{or} \geq W_{or}$$

โดย

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

W_{or} = rotor slot opening (cm)

-คำนวณหาค่า Radial of round slot (r_{1r})

$$r_{1r} = \frac{\pi(D_r - 2 \cdot d_{or}) - S_r \cdot W_{tr}}{2 \cdot (S_r + \pi)} \quad (3.84)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

r_{1r} = Radial of round slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

S_r = Number of rotor slot

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

-คำนวณหาค่า Diameter of conductor in round slot (d_c)

$$d_c = 2 \cdot r_{1r} - 0.04 \quad (3.85)$$

ข้อแนะนำ Adjust d_c to the nearest standard size and compute r_{1r}

โดย

d_c = Diameter of conductor in round slot (cm)

r_{1r} = Radial of round slot (cm)

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{\pi \cdot (D_r - 2 \cdot d_{or} - 2 \cdot r_{1r})}{S_s} - 2 \cdot r_{1r} \quad (3.86)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

r_{1r} = Radial of round slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

S_s = Number of stator slot

วิธีที่ 2 คำนวณจากพื้นที่หน้าตัด

-คำนวณหาค่า Diameter of rotor (D_r)

$$D_r = D - 2l_g \quad (3.87)$$

โดย

D_r = Diameter of rotor (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l_g = Air gap length (cm)

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{0.95 \cdot W_{ts} \cdot S_s}{S_r} \quad (3.88)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

W_{ts} = Width of stator teeth (cm)

S_s = Number of stator slot

S_r = Number of rotor slot

-กำหนดค่า Slot opening (W_{or})

โดย

$$W_{or} \geq \text{lamination thickness to } 0.075 \quad (\text{cm})$$

-กำหนดค่า depth of tip in rotor (d_{or})

โดย

$$d_{or} \geq W_{or}$$

โดย

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

W_{or} = rotor slot opening (cm)

-คำนวณหาค่า Radial of round slot (r_{1r})

$$r_{1r} = \sqrt{\frac{A_{rb}}{\pi}} \quad (3.89)$$

โดย

r_{1r} = Radial of round slot (mm)

A_{rb} = Area of rotor bar (mm^2)

-คำนวณหาค่า Diameter of conductor in round slot (d_c)

$$d_c = 2 \cdot r_{1r} - 0.04 \quad (3.90)$$

ข้อแนะนำ Adjust d_c to the nearest standard size and compute r_{1r}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

d_c = Diameter of conductor in round slot (cm)

r_{1r} = Radial of round slot (cm)

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{\pi \cdot (D_r - 2 \cdot d_{or} - 2 \cdot r_{1r})}{S_r} - 2 \cdot r_{1r} \quad (3.91)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

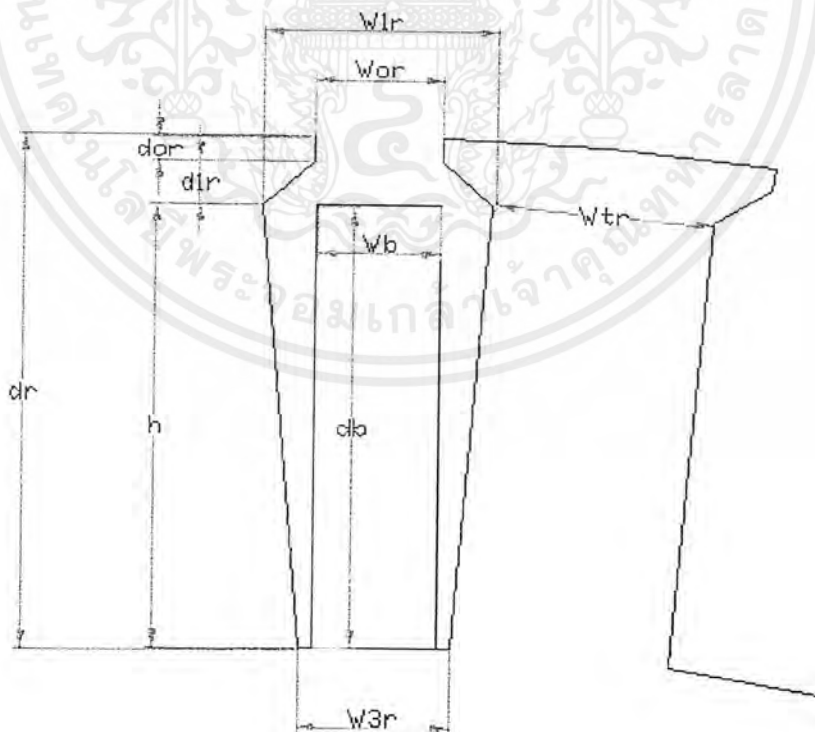
r_{1r} = Radial of round slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

S_r = Number of rotor slot

1.3) แบบ Trapezoidal slots



รูป 3.6 แสดงรูปร่าง Rotor Slot แบบ Trapezoidal Slots

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถแยกวิธีการคำนวณได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1 คำนวณจากขนาด Dimension

-คำนวณหาค่า Diameter of rotor (D_r)

$$D_r = D - 2l_g \quad (3.92)$$

โดย

D_r = Diameter of rotor (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

l_g = Air gap length (cm)

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{0.95 \cdot W_{ts} \cdot S_s}{S_r} \quad (3.93)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

W_{ts} = Width of stator teeth (cm)

S_s = Number of stator slot

S_r = Number of rotor slot

-กำหนดค่า Slot opening (W_{or})

โดย

$$W_{or} \geq \text{lamination thickness to } 0.075 \text{ (cm)}$$

-กำหนดค่า depth of tip in rotor (d_{or})

โดย

$$d_{or} \geq W_{or}$$

โดย

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

W_{or} = rotor slot opening (cm)

-กำหนดค่า Radial clearance (c_r)

$$c_r = d_{4r} - d_b = 0.015$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$c_r = \text{Radial clearance} = 0.015$$

$$d_{4r} = \text{depth of slot (cm)}$$

$$d_b = \text{depth of bar (cm)}$$

-กำหนดค่า Tangential clearance (c_t)

$$c_t = W_{3r} - W_b = 0.025$$

โดย

$$c_t = \text{Tangential clearance}$$

$$W_{3r} = \text{Width of bottom slot (cm)}$$

$$W_b = \text{Width of bar (cm)}$$

-คำนวณหาค่า depth of mounth (d_{1r})

$$d_{1r} = (1.0 \text{ to } 1.5) \cdot d_{or} \quad (3.94)$$

โดย

$$d_{1r} = \text{depth of mounth (cm)}$$

$$d_{or} = \text{depth of tip (cm)}$$

-คำนวณหาค่า depth of slot (d_{4r})

$$d_{4r} = 0.25 + 0.03 \cdot D \quad (3.95)$$

โดย

$$d_{4r} = \text{depth of slot (cm)}$$

$$D = \text{Stator bore diameter (cm)}$$

-คำนวณหาค่า depth of bar (d_b)

$$d_b = d_{4r} - c_r \quad (3.96)$$

โดย

$$d_b = \text{depth of bar (cm)}$$

$$d_{4r} = \text{depth of slot (cm)}$$

$$c_r = \text{radial clearacne} = 0.015$$

-Adjust d_b to nearest standard size

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่า depth of slot (d_{4r})

$$d_{4r} = d_b + c_r \quad (3.97)$$

โดย

d_{4r} = depth of slot (cm)

d_b = depth of bar (cm)

c_r = radial clearacne = 0.015

-คำนวณหาค่า Total depth of slot (d_r)

$$d_r = d_{4r} + d_{1r} + d_{or} \quad (3.98)$$

โดย

d_r = Total depth of slot (cm)

d_{4r} = depth of slot (cm)

d_{1r} = depth of mounth (cm)

d_{or} = depth of tip (cm)

-คำนวณหาค่า Width of bottom slot (W_{3r})

$$W_{3r} = \frac{\pi \cdot (D_r - 2 \cdot d_r)}{S_r} - W_{tr} \quad (3.99)$$

โดย

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_r = Total depth of slot (cm)

S_r = Number of rotor slot

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

-คำนวณหาค่า Width of bar (W_b)

$$W_b = W_{3r} - c_t \quad (3.100)$$

โดย

W_b = Width of bar (cm)

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_t = \text{tangeantial clearance} = 0.025$$

-Adjust W_b to nearest standard size

-คำนวณหาค่า Width of bottom slot (W_{3r})

$$W_{3r} = W_b + c_t \quad (3.101)$$

โดย

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

W_b = Width of bar (cm)

$$C_t = \text{tangeantial clearance} = 0.025$$

-คำนวณหาค่า Width of slot (W_{1r})

$$W_{1r} = W_{3r} + 2 \cdot d_{4r} \cdot \tan\left(\frac{180}{S_r}\right) \quad (3.102)$$

โดย

W_{1r} = Width of slot (cm)

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

S_r = Number of rotor slot

d_{4r} = depth of slot (cm)

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{\pi \cdot (D_r - 2 \cdot d_r)}{S_r} - W_{3r} \quad (3.103)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_r = Total depth of slot (cm)

S_r = Number of rotor slot

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

วิธีที่ 2 คำนวณจากพื้นที่หน้าตัด

-คำนวณหาค่า Diameter of rotor (D_r)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_r = D - 2l_g \quad (3.104)$$

โดย

D_r = Diameter of rotor (cm)

D = Stator bore diameter (cm)

l_g = Air gap length (cm)

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth (W_{tr})

$$W_{tr} = \frac{0.95 \cdot W_{ts} \cdot S_s}{S_r} \quad (3.105)$$

โดย

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

W_{ts} = Width of stator teeth (cm)

S_s = Number of stator slot

S_r = Number of rotor slot

-กำหนดค่า Slot opening (W_{or})

โดย

$$W_{or} \geq \text{lamination thickness to } 0.075 \quad (\text{cm})$$

-กำหนดค่า depth of tip in rotor (d_{or})

โดย

$$d_{or} \geq W_{or}$$

โดย

d_{or} = depth of tip in rotor (cm)

-คำนวณหาค่า depth of mounth (d_{1r})

$$d_{1r} = (1.0 \text{ to } 1.5) \cdot d_{or} \quad (3.106)$$

โดย

d_{1r} = depth of mounth (cm)

d_{or} = depth of tip (cm)

-คำนวณหาค่า Width of slot (W_{1r})

$$W_{1r} = \frac{\pi(D_r - 2 \cdot d_{or} - 2 \cdot d_{1r})}{S_r} - W_{tr} \quad (3.107)$$

โดย

W_{1r} = Width of slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{1r} = depth of mounth (cm)

d_{or} = depth of tip (cm)

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

S_r = Number of rotor slot

-คำนวณหาค่า h จากรูปที่ 6

โดยพื้นที่ทั้งหมดคือ

$$\frac{1}{2} \cdot h \cdot (W_{1r} + W_{3r}) = A_{rb} \quad (1)$$

โดย

$$W_{3r} = \frac{\pi(D_r - 2 \cdot (d_{or} + d_{1r} + h))}{S_r} - W_{tr} \quad (2)$$

แทน (2) ใน (1)

$$\frac{1}{2} \cdot h \cdot \left[W_{1r} + \frac{\pi(D_r - 2 \cdot d_{or} - 2 \cdot d_{1r} - 2 \cdot h)}{S_r} - W_{tr} \right] = A_{rb}$$

คำนวณหาค่า h โดยกำหนดให้

$$a = \frac{-\pi}{S_r}$$

$$b_1 = \frac{W_{1r}}{2}$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot D_r}{2 \cdot S_r}$$

$$b_3 = \frac{-\pi \cdot d_{or}}{S_r}$$

$$b_4 = \frac{-\pi \cdot d_{1r}}{S_r}$$

$$b_5 = \frac{-W_{tr}}{2}$$

$$b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5$$

$$c = -A_{rb}$$

$$h = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

โดย

W_{1r} = Width of slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{1r} = depth of mounth (cm)

d_{or} = depth of tip (cm)

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

A_{rb} = Area of rotor bar (mm^2)

-คำนวณหาค่า Width of bottom slot (W_{3r})

$$W_{3r} = \frac{\pi(D_r - 2 \cdot (d_{or} + d_{1r} + h))}{S_r} - W_{tr} \quad (3.108)$$

โดย

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_{1r} = depth of mounth (cm)

d_{or} = depth of tip (cm)

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

S_r = Number of rotor slot

-คำนวณหาค่า Width of bar (W_b)

$$W_b = W_{3r} - c_t \quad (3.109)$$

โดย

W_b = Width of bar (cm)

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

c_t = Tangential clearance = 0.025

-คำนวณหาค่า depth of bar (d_b)

$$d_b = d_{4r} - c_r \quad (3.110)$$

โดย

d_b = depth of bar (cm)

d_{4r} = depth of slot (cm)

c_r = radial clearacne = 0.015

-คำนวณหาค่า Total depth of slot (d_r)

$$d_r = d_{4r} + d_{1r} + d_{or} \quad (3.111)$$

โดย

d_r = Total depth of slot (cm)

d_{4r} = depth of slot (cm)

d_{1r} = depth of mounth (cm)

d_{or} = depth of tip (cm)

-คำนวณหาค่า rotor slot pitch at the bottom of slot (y_{sb})

$$y_{sb} = \frac{\pi \cdot (d_r - 2 \cdot d_r)}{S_r} \quad (3.112)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

y_{sb} = rotor slot pitch at the bottom of slot (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_r = Total depth of slot (cm)

S_r = Number of rotor slot

-คำนวณหาค่า Tooth width at the root (W_{tr})

$$W_{tr} = y_{sb} - W_{3r} \quad (3.113)$$

โดย

W_{tr} = Tooth width at the root (cm)

y_{sb} = rotor slot pitch at the bottom of slot (cm)

W_{3r} = Width of bottom slot (cm)

-คำนวณหาค่า Flux density at the root of rotor teeth (B_{tr})

$$B_{tr} = \frac{\Phi_m}{\frac{S_r}{P} \cdot L_i \cdot W_{tr}} \quad (3.114)$$

ข้อแนะนำ ค่า Flux density ที่คำนวณได้ในส่วนนี้ ไม่ควรเกิน 1.7 Wb/m^2

โดย

B_{tr} = Flux density at the root of rotor teeth (Wb/m^2)

Φ_m = Flux per pole (Wb)

S_r = Number of rotor slot

P = Number of pole

W_{tr} = Tooth width at the root (m)

L_i = Net iron length (m)

-คำนวณหาค่า Length of each bar (l_b)

สำหรับ rotor bar ที่เป็น Skew

1) คำนวณหา Angle of skew (θ_s)

$$\theta_s = \frac{720}{n \cdot P} \quad (3.115)$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ_s = Angle of skew (degree mechanical)

P = Number of pole

n = order of harmonics

การคำนวณหาค่า n

$$n = \frac{2 \cdot S_s}{P} \pm 1 \quad (3.116)$$

โดย

n = order of harmonics

S_s = Number of stator slot

P = Number of pole

ความยาวของ rotor bar (l_b)

$$l_b = \frac{L}{\cos \theta_s} \quad (3.117)$$

โดย

l_b = Length of each bar (cm)

L = Gross iron length (cm)

θ_s = Angle of skew (degree mechanical)

-คำนวณหาค่า Resistance of each bar (r_b)

$$r_b = \frac{\rho_r \cdot L}{A_{rb}} \quad (3.118)$$

โดย

r_b = Resistance of each bar (Ω)

ρ_r = Resistivity of material ($\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$)

L = Gross iron length (m)

A_{rb} = Area of each rotor bar (m^2)

-คำนวณหาค่า Copper loss in each bar (P_{cub})

$$P_{\text{cub}} = I_b^2 \cdot r_b \quad (3.119)$$

โดย

P_{cub} = Copper loss in stator bar (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_b = Current in each bar (A)

r_b = Resistance of each bar (Ω)

-คำนวณหาค่า Total copper loss in bars (P_{tcub})

$$P_{tcub} = S_r \cdot I_b^2 \cdot r_b \quad (3.120)$$

โดย

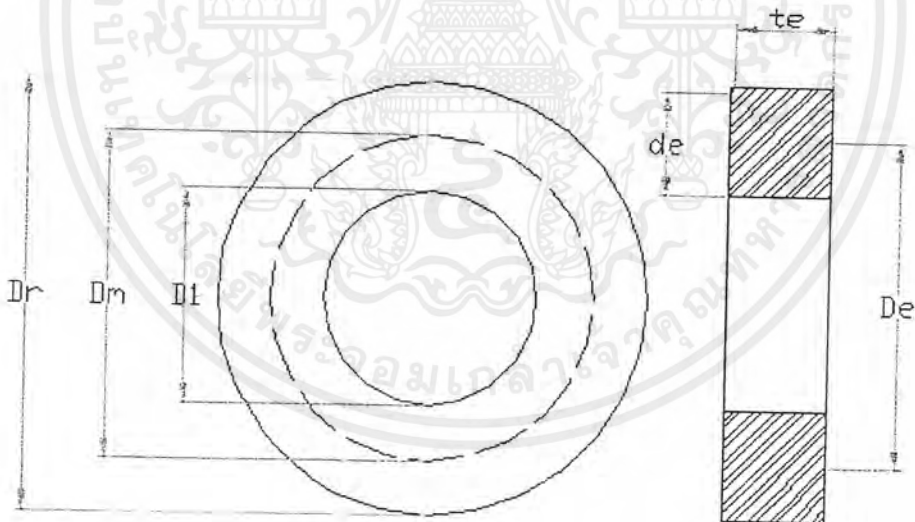
P_{tcub} = Total copper loss in bars (W)

S_r = Number of rotor slot

I_b = Current in each bar (A)

r_b = Resistance of each bar (Ω)

3.4.4 End ring



รูป 3.7 แสดงรูปร่าง End ring

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Current density in end ring

-รับค่า ความหนา, ความลึก ของ End ring

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน End ring

-คำนวณหาค่า End ring current (I_e)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_e = \frac{S_r \cdot I_b}{\pi \cdot P} \quad (3.121)$$

โดย

I_e = End ring current (A)

S_r = Number of rotor slot

I_b = Current in each bar (A)

P = Number of pole

-กำหนดค่า Current density in end ring (δ_e)

-คำนวณหาค่า Area of end ring (A_e)

$$A_e = \frac{I_e}{\delta_e} \quad (3.122)$$

โดย

A_e = Area of end ring (mm^2)

I_e = End ring current (A)

δ_e = Current density in end ring (A/mm^2)

-คำนวณหาค่า Inner diameter of end ring (l_i)

$$l_i = D_r - 2 \cdot d_e \quad (3.123)$$

โดย

l_i = Inner of end ring (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_e = depth of end ring (cm)

-คำนวณหาค่า Mean diameter of end ring (D_e)

$$D_e = \frac{D_r + l_i}{2} \quad (3.124)$$

โดย

D_e = Mean diameter of end ring (cm)

l_i = Inner of end ring (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่า Resistance of end ring (r_e)

$$r_e = \frac{\rho_r \cdot \pi \cdot D_e}{A_e} \quad (3.125)$$

โดย

r_e = Resistance of end ring (Ω)

D_e = Mean diameter of end ring (cm)

A_e = Area of end ring (mm^2)

ρ_r = Resistivity of material ($\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$)

-คำนวณหาค่า Copper loss in two end ring (P_{cue})

$$P_{cue} = 2 \cdot I_e^2 \cdot r_e \quad (3.126)$$

โดย

P_{cue} = Copper loss in two end ring (Watt)

r_e = Resistance of end ring (Ω)

I_e = End ring current (A)

-คำนวณหาค่า Total rotor copper loss (P_{trcu})

$$P_{trcu} = P_{tcub} + P_{cue} \quad (3.127)$$

โดย

P_{trcu} = Total rotor copper loss (W)

P_{tcub} = Total copper loss in bar (W)

P_{cue} = Copper loss in two end ring (W)

-คำนวณหาค่า Slip

$$\frac{\text{rotor copper loss}}{\text{rotor output}} = \frac{S}{1 - S} \quad (3.128)$$

โดย

S = Slip

4.4.5 Rotor core

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Rotor core

- กำหนดให้ depth of rotor core มีค่าเท่ากับ depth of stator core
- กำหนดให้ Flux density in rotor core มีค่าเท่ากับ Flux density in stator core
- คำนวณหาค่า Inner diameter of rotor stamping (D_i)

$$D_i = D_r - 2 \cdot d_r - 2 \cdot d_{cr} \quad (3.129)$$

โดย

D_i = Inner diameter of rotor stamping (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_r = Total depth of slot (cm)

d_{cr} = depth of rotor core (cm)

3.5 No Load Current

3.5.1 Airgap

1) ข้อมูลในส่วน Input

- รับค่า Carter air gap co-efficient จากตารางที่ 6

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Air gap

- For stator slot

-คำนวณหาค่าอัตราส่วนของ $\frac{\text{Slot opening}}{\text{gap length}}$

นำค่าอัตราส่วนที่ได้ไปหาค่า Carter co-efficient (k_{cs}) จากตารางที่ 6

- คำนวณหาค่า Gap contraction factor for stator slot (K_{gss})

$$K_{gss} = \frac{y_{ss}}{y_{ss} - k_{cs} \cdot W_{os}} \quad (3.130)$$

โดย

K_{gss} = Gap contraction factor for stator slot

y_{ss} = Stator slot pitch (cm)

k_{cs} = Carter co-efficient

W_{os} = Stator slot opening (cm)

- For rotor slot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่าอัตราส่วนของ $\frac{\text{Slot opening}}{\text{gap length}}$

นำค่าอัตราส่วนที่ได้ไปหาค่า Carter co-efficient (k_{cs}) จากตารางที่ 6

-คำนวณหาค่า Gap contraction factor for rotor slot (K_{gsr})

$$K_{gsr} = \frac{y_{sr}}{y_{sr} - k_{cs} \cdot W_{os}} \quad (3.131)$$

โดย

K_{gsr} = Gap contraction factor for rotor slot

y_{sr} = Rotor slot pitch (cm)

k_{cs} = Carter co-efficient

W_{os} = Stator slot opening (cm)

-คำนวณหาค่า Gap contraction factor for slot (K_{gs})

$$K_{gs} = K_{gss} \cdot K_{gsr} \quad (3.132)$$

โดย

K_{gs} = Gap contraction factor for slot

K_{gss} = Gap contraction factor for stator slot

K_{gsr} = Gap contraction factor for rotor slot

-For ventilating duct

-คำนวณหาค่าของ $\frac{\text{Duct width}}{1 - \frac{\text{Gap length}}{2}}$

นำค่าอัตราส่วนที่ได้ไปหาค่า Carter co-efficient (k_{cs}) จากตารางที่ 6

-คำนวณหาค่า Gap contraction factor for duct (K_{gd})

$$K_{gd} = \frac{L}{L - n_d \cdot W_d \cdot k_{cs}} \quad (3.133)$$

โดย

K_{gd} = Gap contraction factor for duct

L = Gross iron length (cm)

n_d = Number of duct

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W_d = Width of duct (cm)

k_{cs} = Carter co-efficient

-คำนวณหาค่า Total gap contraction factor (K_g)

$$K_g = K_{gs} \cdot K_{gd} \quad (3.134)$$

โดย

K_g = Total gap contraction factor

K_{gs} = Gap contraction factor for slot

K_{gd} = Gap contraction factor for duct

-คำนวณหาค่า Area of air gap (A_g)

$$A_g = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{P} \quad (3.135)$$

โดย

A_g = Area of air gap (m^2)

D = Stator bore diameter (cm)

P = Number of pole

L = Gross iron length (m)

-คำนวณหาค่า B_{g60}

$$B_{g60} = 1.36 \cdot B_{av} \quad (3.136)$$

โดย

B_{av} = average flux density (Wb/m^2)

-คำนวณหาค่า Effective length of air gap (l_{gs})

$$l_{gs} = K_g \cdot l_g \quad (3.137)$$

โดย

l_{gs} = Effective length of air gap (mm)

K_g = Total gap contraction factor

l_g = Length of air gap (mm)

-คำนวณหาค่า Mmf required for air gap (AT_g)

$$AT_g = 800000 \cdot B_{g60} \cdot K_g \cdot l_g \quad (3.138)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$AT_g =$ Mmf required for air gap (A)

$K_g =$ Total gap contraction factor

$l_g =$ Length of air gap (m)

3.5.2 Stator teeth

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า mmf per metre จากตารางที่ 7

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Stator teeth

-คำนวณหาค่า Area of teeth per pole (A_t)

$$A_t = \frac{S_s}{P} \cdot W_{ts} \cdot L_i \quad (3.139)$$

โดย

$A_t =$ Area of teeth per pole (m^2)

$S_s =$ Number of stator slot

$P =$ Number of pole

$W_{ts} =$ Width of stator teeth (m)

$L_i =$ Net iron length (m)

-คำนวณหาค่า Flux density in stator teeth (B_{ts})

$$B_{ts} = \frac{\Phi_m}{A_t} \quad (3.140)$$

โดย

$B_{ts} =$ Flux density in stator teeth (Wb/m^2)

$\Phi_m =$ Flux per pole (Wb)

$A_t =$ Area of teeth per pole (m^2)

-คำนวณหาค่า B_{ts60}

$$B_{ts60} = 1.36 \cdot B_{ts} \quad (3.141)$$

โดย

$B_{ts} =$ Flux density in stator teeth (Wb/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า B_{ts60} ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 7 เพื่อหาค่า at_{ts}

-คำนวณหาค่า Mmf required for stator teeth (AT_{ts})

$$AT_{ts} = at_{ts} \cdot d_s \quad (3.142)$$

โดย

AT_{ts} = Mmf required for stator teeth (A)

at_{ts} = Mmf per metre จากตารางที่ 7

d_s = Total depth of stator slot (m)

3.5.3 Stator core

1) ข้อมูลในส่วน Input

-เลือกค่า Mmf per metre จากตารางที่ 7

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Stator core

-คำนวณหาค่า Area of stator core (A_{cs})

$$A_{cs} = L_i \cdot d_{cs} \quad (3.143)$$

โดย

A_{cs} = Area of stator core (m^2)

L_i = Net iron length (m)

d_{cs} = depth of stator core (m)

-คำนวณหาค่า Flux density in stator core (B_{sc})

$$B_{sc} = \frac{\Phi_m}{2 \cdot A_{cs}} \quad (3.144)$$

โดย

B_{sc} = Flux density in stator core (Wb/m^2)

Φ_m = Flux per pole (Wb)

A_{cs} = Area of stator core (m^2)

-คำนวณหาค่า Length of magnetic path through stator core (l_{cs})

$$l_{cs} = \frac{\pi(D + 2 \cdot d_s + d_{cs})}{3 \cdot P} \quad (3.145)$$

โดย

l_{cs} = Length of magnetic path through stator core (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = Stator bore diameter (m)

d_s = Total depth of stator slot (m)

d_{cs} = depth of stator core (m)

P = Number of pole

-นำค่า Flux density stator core ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 7 เพื่อหาค่า at_{cs}

-คำนวณหาค่า Mmf required for stator core (AT_{cs})

$$AT_{cs} = at_{cs} \cdot l_{cs} \quad (3.146)$$

โดย

AT_{cs} = Mmf required for stator core (A)

at_{cs} = Mmf per metre จากตารางที่ 7

l_{cs} = Length of magnetic path through stator core (m)

3.5.4 Rotor teeth

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Mmf per metre จากตารางที่ 7

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Rotor teeth

-คำนวณหาค่า Width of rotor teeth at 1/3 heigh from narrow end ($W_{tr \frac{1}{3}}$)

$$W_{tr \frac{1}{3}} = \frac{\pi \left(D_r - \frac{4 \cdot d_r}{3} \right)}{S_r} - W_{tr} \quad (3.147)$$

โดย

$W_{tr \frac{1}{3}}$ = Width of rotor teeth at 1/3 heigh from narrow end (cm)

D_r = Diameter of rotor (cm)

d_r = Tatal depth of stator slot (cm)

S_r = Number of stator slot

W_{tr} = Width of rotor teeth (cm)

-คำนวณหาค่า Area of teeth per pole at 1/3 height from narrow end (A_{tr})

$$A_{tr} = \frac{S_r}{P} \cdot L_i \cdot W_{tr \frac{1}{3}} \quad (3.148)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$A_{tr} =$ Area of teeth per pole at 1/3 height from narrow end (m^2)

$S_r =$ Number of stator slot

$P =$ Number of pole

$L_i =$ Net iron length (m)

$W_{tr\ 1/3} =$ Width of rotor teeth at 1/3 height from narrow end (m)

-คำนวณหาค่า Flux density in rotor teeth at 1/3 height ($B_{tr\ 1/3}$)

$$B_{tr\ 1/3} = \frac{\Phi_m}{A_{tr}} \quad (3.149)$$

โดย

$B_{tr\ 1/3} =$ Flux density in rotor teeth at 1/3 height (Wb/m^2)

$\Phi_m =$ Flux per pole (Wb)

$A_{tr} =$ Area of teeth per pole at 1/3 height from narrow end (m^2)

-คำนวณหาค่า B_{tr60}

$$B_{tr60} = 1.36 \cdot B_{tr\ 1/3} \quad (3.150)$$

โดย

$B_{tr\ 1/3} =$ Flux density in rotor teeth at 1/3 height (Wb/m^2)

-นำค่า B_{tr60} ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 7 เพื่อหาค่า at_{tr}

-คำนวณหาค่า Mmf required for rotor teeth (AT_{tr})

$$AT_{tr} = at_{tr} \cdot d_r \quad (3.151)$$

โดย

$AT_{tr} =$ Mmf required for rotor teeth (A)

$at_{tr} =$ Mmf per metre จากตารางที่ 7

$d_r =$ Total depth of rotor slot (m)

3.5.5 Rotor core

1) ข้อมูลในส่วน Input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-รับค่า Mmf per metre จากตารางที่ 7

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Rotor core

-คำนวณหาค่า Rotor core area (A_{cr})

$$A_{cr} = L_i \cdot d_{cr} \quad (3.152)$$

โดย

A_{cr} = Rotor core area (m^2)

L_i = Net iron length (m)

d_{cr} = depth of rotor core (m)

-คำนวณหาค่า Flux density in rotor teeth (B_{rc})

$$B_{rc} = \frac{\Phi_m}{2 \cdot A_{cr}} \quad (3.153)$$

โดย

B_{rc} = Flux density in rotor teeth (Wb/m^2)

A_{cr} = Rotor core area (m^2)

Φ_m = Flux per pole (Wb)

-นำค่า Flux density in rotor core ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 7 เพื่อหาค่า at_{trc}

-คำนวณหาค่า Length of flux path in rotor core (l_{cr})

$$l_{cr} = \frac{\pi \cdot (D_r - 2 \cdot d_r - d_{cr})}{3 \cdot P} \quad (3.154)$$

โดย

l_{cr} = Length of flux path in rotor core (m)

D_r = Diameter of rotor (m)

d_r = Total depth of rotor slot (m)

d_{cr} = depth of rotor core (m)

P = Number of pole

-คำนวณหาค่า Mmf for rotor core (AT_{cr})

$$AT_{cr} = at_{trc} \cdot l_{cr} \quad (3.155)$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AT_{cr} = Mmf for rotor core (A)

at_{trc} = Mmf per metre จากตารางที่ 7

l_{cr} = Length of flux path in rotor core (m)

-คำนวณหาค่า AT_{60}

$$AT_{60} = AT_{lc} + AT_{tr} + AT_{cs} + AT_{ts} \quad (3.156)$$

โดย

AT_{cr} = Mmf required for rotor core (A)

AT_{tr} = Mmf required for rotor teeth (A)

AT_{cs} = Mmf required for stator core (A)

AT_{ts} = Mmf required for stator teeth (A)

-คำนวณหาค่า Magnetizing current per phase (I_m)

$$I_m = \frac{0.427 \cdot P \cdot AT_{60}}{K_{ws} \cdot N_{ph}} \quad (3.157)$$

โดย

I_m = Magnetizing current per phase (A)

P = Number of pole

K_{ws} = Stator winding factor

N_{ph} = Stator turn per phase

3.6 Loss component

3.6.1 Iron loss in stator teeth

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Watt per Kg in stator teeth จากตารางที่ 8

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Iron loss in stator teeth

-คำนวณหาค่า Volume of stator teeth (V_{st})

$$V_{st} = S_s \cdot W_{ts} \cdot L_1 \cdot d_s \quad (3.158)$$

-โดย

V_{st} = Volume of stator teeth (m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_s = Number of stator slot

W_{ts} = Width of stator teeth (m)

L_i = Net iron length (m)

d_s = Total depth of stator slot (m)

-คำนวณหาค่า Weigth of stator teeth (W_{st})

$$W_{st} = V_{st} \cdot 7.6 \cdot 10^3 \quad (3.159)$$

โดย

W_{st} = Weigth of stator teeth (Kg)

V_{st} = Volume of stator teeth (m^3)

-คำนวณหาค่า Maximum flux density in stator teeth (B_{mst})

$$B_{mst} = \frac{\pi}{2} \cdot B_{st} \quad (3.160)$$

โดย

B_{mst} = Maximum flux density in stator teeth (Wb/m^2)

B_{st} = Flux density in stator teeth (Wb/m^2)

-นำค่า Maximum flux density in stator teeth ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 8 จะได้

ค่า Loss per Kg (I_{pk})

-คำนวณหาค่า Iron loss in stator teeth (P_{ilst})

$$P_{ilst} = W_{st} \cdot I_{pk} \quad (3.161)$$

โดย

P_{ilst} = Iron loss in stator teeth (W)

W_{st} = Weigth of stator teeth (kg)

I_{pk} = Loss per kg (W/kg)

3.6.2 Iron loss in stator core

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Watt per kg in stator core จากตารางที่ 8

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Iron loss in stator core

-คำนวณหาค่า Volume of stator core (V_{sc})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{sc} = \pi \cdot (D + 2 \cdot d_s + d_{cs}) \cdot d_{cs} \cdot L_1 \quad (3.162)$$

โดย

V_{sc} = Volume of stator core (m^3)

D = Stator bore diameter (m)

d_s = Total depth of stator slot (m)

d_{cs} = depth of stator core (m)

L_1 = Net iron length (m)

-คำนวณหาค่า Weigth of stator core (W_{sc})

$$W_{sc} = V_{sc} \cdot 7.6 \cdot 10^3 \quad (3.163)$$

โดย

W_{sc} = Weigth of stator core (kg)

V_{sc} = Volume of stator core (m^3)

-นำค่า flux density in stator core ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 8 จะได้ค่า Loss per kg (l_{pk})

-คำนวณหาค่า Iron loss in stator core (P_{ilsc})

$$P_{ilsc} = W_{sc} \cdot l_{pk} \quad (3.164)$$

โดย

P_{ilsc} = Iron loss in stator core (W)

W_{sc} = Weigth of stator core (kg)

l_{pk} = Loss per kg (W/kg)

-คำนวณหาค่า Total iron loss (P_{til})

$$P_{til} = P_{ilst} + P_{ilsc} \quad (3.165)$$

โดย

P_{til} = Total iron loss (W)

P_{ilst} = Iron loss in stator teeth (W)

P_{ilsc} = Iron loss in stator core (W)

-คำนวณหาค่า Actual iron loss (P_{ail})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{ail} = (1.8 \text{ to } 2.2) \cdot P_{til} \quad (3.166)$$

โดย

$$P_{ail} = \text{Actual iron loss (W)}$$

$$P_{til} = \text{Total iron loss (W)}$$

3.6.3 Friction and Windage loss

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า percent of friction and windage loss

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Friction and Windage loss

-คำนวณหาค่า Friction and Windage loss (P_{fwl})

$$P_{fwl} = \frac{(pc \cdot P_{out})}{100} \quad (3.167)$$

โดย

$$P_{fwl} = \text{Friction and Windage loss (W)}$$

pc = percent of friction and windage loss

$$P_{out} = \text{Full load out put (W)}$$

-คำนวณหาค่า Total no load loss (P_{tnll})

$$P_{tnll} = P_{fwl} + P_{ail} \quad (3.168)$$

โดย

$$P_{tnll} = \text{Total no load loss (W)}$$

$$P_{fwl} = \text{Friction and Windage loss (W)}$$

$$P_{ail} = \text{Actual iron loss (W)}$$

-คำนวณหาค่า Loss component of no load current per phase (I_1)

$$I_1 = \frac{P_{tnll}}{3 \cdot V_{ph}} \quad (3.169)$$

โดย

$$I_1 = \text{Loss component of no load current per phase (A)}$$

$$P_{tnll} = \text{Total no load loss (W)}$$

$$V_{ph} = \text{Volt per phase (V)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่า No load current (I_o)

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_1^2} \quad (3.170)$$

โดย

I_o = No load current (A)

I_1 = Loss component of no load current per phase (A)

I_m = Magnetizing current per phase (A)

-คำนวณหาค่า No load power factor ($\text{COS } \phi_o$)

$$\text{COS } \phi_o = \frac{I_1}{I_o} \quad (3.171)$$

โดย

$\text{COS } \phi_o$ = No load power factor

I_1 = Loss component of no load current per phase (A)

I_o = No load current (A)

3.7. Short Circuit Current

3.7.1 Leakage Reactance

3.7.1.1 Stator slot leakage

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า f จากตารางที่ 12 (แบบ Round bottom slot)

2) สมการการคำนวณในส่วน Stator slot leakage

แบ่งออกเป็น 2 กรณี

2.1) กรณีที่ Stator slot เป็นแบบ Round bottom slot

-คำนวณหาค่า Stator slot leakage (λ_{ss})

$$\lambda_{ss} = \mu_0 \cdot \left(f + \frac{d_{os}}{W_{os}} + \frac{2 \cdot d_{1s}}{W_{os} + W_{1s}} \right) \quad (3.172)$$

การหาค่า f สามารถดูได้จากตารางที่ 12 โดยคิดจากอัตราส่วนระหว่าง $\frac{d_{4r}}{W_{3s}}$ และอัตราส่วน

ระหว่าง $\frac{W_{1s}}{W_{3s}}$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

λ_{ss} = Stator slot leakage

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

d_{os} = depth of tip

W_{os} = Stator slot opening

d_{1s} = depth of mounth

W_{1s} = Width of stator slot

W_{3s} = Width of bottom stator slot

2.2) กรณีที่ Stator slot เป็นแบบ Flat bottom slot

-คำนวณหาค่า Stator slot leskage (λ_{ss})

$$\lambda_{ss} = \mu_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot h_1}{3 \cdot (W_s + W_2)} + \frac{2 \cdot h_2}{W_1 + W_2} + \frac{2 \cdot h_3}{W_1 + W_o} + \frac{h_4}{W_o} \right) \quad (3.173)$$

โดย

λ_{ss} = Stator slot leskage

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

W_s = Width of bottom stator slot

W_2 = Width of conductor

W_1 = Width of stator slot

W_o = Slot opening

3.7.1.2 Rotor Slot leakage

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า f จากตารางที่ 12 (แบบ Round small bottom slot)

2) สมการการคำนวณในส่วน Rotor slot leakage

แบ่งออกเป็น 3 กรณี

2.1) กรณีที่ Rotor slot เป็นแบบ Round small bottom slot

-คำนวณหาค่า Rotor slot leakage (λ_{sr})

$$\lambda_{sr} = \mu_0 \left(f + \frac{d_{or}}{W_{or}} + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\cos\left(\frac{W_{or}}{2 \cdot R}\right)}{90} \right) \quad (3.174)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า f สามารถดูได้จากตารางที่ 12 โดยคิดจากอัตราส่วนระหว่าง $\frac{h}{W_{rb}}$ และอัตราส่วน

ระหว่าง $\frac{W_{ra}}{W_{rb}}$

โดย

λ_{sr} = Rotor slot leakage

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

d_{or} = depth of tip in rotor slot

W_{or} = Slot opening of rotor

2.2) กรณีที่ Rotor slot เป็นแบบ Round slot

-คำนวณหาค่า Rotor slot leakage (λ_{sr})

$$\lambda_{sr} = \mu_0 \left(0.623 + \frac{h}{W_{or}} \right) \quad (3.175)$$

โดย

λ_{sr} = Rotor slot leakage

W_{or} = Slot opening of rotor

2.3) กรณีที่ Rotor slot เป็นแบบ Trapezoidal slot

-คำนวณหาค่า Rotor slot leakage (λ_{sr})

$$\lambda_{sr} = \mu_0 \left(\phi \cdot \frac{d_{4r}}{W_{3r}} + \frac{d_{or}}{W_{or}} + \frac{2 \cdot d_{1r}}{W_{or} + W_{1r}} \right) \quad (3.176)$$

การหาค่า ϕ สามารถหาได้จากตารางที่ 13 โดยคิดจากอัตราส่วนระหว่าง $\frac{W_{1r}}{W_{3r}}$

โดย

λ_{sr} = Rotor slot leakage

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

d_{4r} = depth of rotor slot

W_{3r} = Width of bottom rotor slot

d_{or} = depth of tip in rotor

W_{or} = rotor slot opening

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_{1r} = depth of mounth in rotor

W_{1r} = Width of stator slot

-คำนวณหาค่าการ Referred to stator (λ'_{sr})

$$\lambda'_{sr} = \lambda_{sr} \left(\frac{K_{ws}^2 \cdot S_s}{K_{wr}^2 \cdot S_r} \right) \quad (3.177)$$

โดย

λ'_{sr} = Rotor slot leakage referred to stator

λ_{sr} = Rotor slot leakage

K_{ws} = Stator winding factor

K_{wr} = Rotor winding factor

S_s = Number of stator slot

S_r = Number of rotor slot

-คำนวณหาค่า Total specific slot permeance (λ_s)

$$\lambda_s = \lambda_{ss} + \lambda'_{sr} \quad (3.178)$$

โดย

λ_s = Total specific slot permeance

λ_{ss} = Stator slot leskage

λ'_{sr} = Rotor slot leakage referred to stator

-คำนวณหาค่า Slot leakage reactance (X_s)

$$X_s = 8\pi \cdot f \cdot N_{ph}^2 \cdot L \cdot \left(\frac{\lambda_s}{P \cdot g} \right) \quad (3.179)$$

โดย

X_s = Slot leakage reactance (Ω)

f = frequency (Hz)

N_{ph} = Stator turn per phase

L = Gross iron length (m)

λ_s = Total specific slot permeance

P = Number of pole

3.7.1.3 Overhange leakage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Coil span

-รับค่า K_s จากตารางที่ 11

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Overhange leakage

-คำนวณหาค่า $L_o X_o$

$$L_o X_o = \mu_o \cdot \frac{K_s \tau^2}{\pi \cdot y_{ss}} \quad (3.180)$$

โดยค่า K_s สามารถรู้ได้จากอัตราส่วนระหว่าง $\frac{\text{Coil span}}{\text{Pole pitch}}$ แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ

ตารางที่ 11

โดย

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

τ = pole pitch (m)

y_{ss} = Stator slot pitch (m)

-คำนวณหาค่า Overhange leakage reactance (X_o)

$$X_o = 8\pi \cdot f \cdot N_{ph}^2 \cdot \left(\frac{L_o X_o}{P \cdot g} \right) \quad (3.181)$$

โดย

X_o = Overhange leakage reactance (Ω)

f = frequency (Hz)

N_{ph} = Stator turn per phase

P = Number of pole

g = slot per pole per phase

3.7.1.4 Zigzag Leakage

1) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Zigzag Leakage

-คำนวณหาค่า Magnetizing reactance (X_m)

$$X_m = \frac{V_{ph}}{I_m} \quad (3.182)$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X_m = Magnetizing reactance (Ω)

V_{ph} = Volt per phase (V)

I_m = Magnetizing current (A)

-คำนวณหาค่า Zigzag leakage reactance per phase (X_z)

$$X_z = \frac{5}{6} \cdot \frac{X_m}{m^2} \cdot \left(\frac{1}{g_s} + \frac{1}{g_r} \right) \quad (3.183)$$

โดย

X_z = Zigzag leakage reactance per phase (Ω)

X_m = Magnetizing reactance (Ω)

m = Number of phase

g_s = Stator slot per pole per phase

g_r = Rotor slot per pole per phase

3.7.1.5 Skew Leakage

1) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Skew Leakage

-คำนวณหาค่า Skew leakage reactance (X_{sk})

$$X_{sk} = X_m \left[1 - \frac{4 \sin^2(\alpha/2)}{\alpha^2} \right] \quad (3.184)$$

โดย

$$\alpha = \frac{\pi \cdot P}{S_s}$$

โดย

X_{sk} = Skew leakage reactance (Ω)

X_m = Magnetizing reactance (Ω)

α = Angle of skew (electrical radial)

P = Number of pole

S_s = Number of stator

-คำนวณหาค่า Total leakage reactance per phase referred to stator (X_l)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_1 = X_z + X_o + X_s + X_{sk} \quad (3.185)$$

โดย

X_1 = Total leakage reactance per phase referred to stator(Ω)

X_z = Zigzag leakage reactance per phase(Ω)

X_o = Overhang leakage reactance(Ω)

X_s = Slot leakage reactance(Ω)

X_{sk} = Skew leakage reactance(Ω)

3.7.2 Resistance

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า resistivity of material (ρ_r)

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Resistance

-คำนวณหาค่า Resistance of stator (r_s)

$$r_s = \frac{\rho_r \cdot N_{ph} \cdot Lmt_s}{A_s} \quad (3.186)$$

โดย

r_s = Resistance of stator (Ω)

ρ_r = resistivity of material ($\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$)

N_{ph} = Stator turn per phase

Lmt_s = Length of mean turn (m)

A_s = Area of conductor in stator (mm^2)

-คำนวณหาค่า Total stator copper loss (P_{tscu})

$$P_{tscu} = 3 \cdot I_s^2 \cdot r_s \quad (3.187)$$

โดย

P_{tscu} = Total stator copper loss (W)

I_s = Stator current per phase (A)

r_s = Resistance of stator (Ω)

-คำนวณหาค่า Rotor copper loss per phase (P_{rcup})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{\text{rcup}} = \frac{P_{\text{trcu}}}{3} \quad (3.188)$$

โดย

P_{rcup} = Rotor copper loss per phase (W)

P_{trcu} = Total rotor copper loss (W)

-คำนวณหาค่า Rotor resistance referred to stator (r_r')

$$r_r' = \frac{P_{\text{trcu}}}{m \cdot I_s^2 \cdot \text{COS}\phi^2} \quad (3.189)$$

โดย

r_r' = Rotor resistance referred to stator (Ω)

P_{trcu} = Total rotor copper loss (W)

m = Number of phase

I_s = Stator current per phase (A)

$\text{COS}\phi$ = power factor at full load

-คำนวณหาค่า Total resistance referred to stator (R_s)

$$R_s = r_s + r_r' \quad (3.190)$$

โดย

R_s = Total resistance referred to stator (Ω)

r_r' = Rotor resistance referred to stator (Ω)

r_s = Resistance of stator (Ω)

3.7.3 Impedance

1) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Impedance

-คำนวณหาค่า Total impedance of rotor at standstill (Z_s)

$$Z_s = \sqrt{X_t^2 + R_s^2} \quad (3.191)$$

โดย

Z_s = Total impedance of rotor at standstill (Ω)

R_s = Total to resistance referred stator (Ω)

X_t = Total leakage reactance per phase referred to stator (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่า Short circuit current per phase (I_{sc})

$$I_{sc} = \frac{V_{ph}}{Z_s} \quad (3.192)$$

โดย

I_{sc} = Short circuit current per phase (A)

V_{ph} = Volt per phase (V)

Z_s = Total impedance of rotor at standstill (Ω)

-คำนวณหาค่า Short circuit power factor ($\text{COS}\phi_{sc}$)

$$\text{COS}\phi_{sc} = \frac{R_s}{Z_s} \quad (3.193)$$

โดย

$\text{COS}\phi_{sc}$ = Short circuit power factor

Z_s = Total impedance of rotor at standstill (Ω)

R_s = Total to resistance refered stator (Ω)

3.8. Loss and Efficiency

1) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Loss and Efficiency

-คำนวณหา Total loss at full load (P_{fl})

$$P_{fl} = P_{tscu} + P_{trcu} + P_{ail} + P_{fivl} \quad (3.194)$$

โดย

P_{fl} = Total loss at full load (W)

P_{tscu} = Total stator copper loss (W)

P_{trcu} = Total rotor copper loss (W)

P_{ail} = Total iron loss (W)

P_{fivl} = Total friction and widge loss (W)

-คำนวณหาค่า Input at fullload (P_{in})

$$P_{in} = P_{out} + P_{fl} \quad (3.195)$$

โดย

P_{in} = Input at ful load (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{out} = Out put at full load (W)

P_{in} = Total loss at full load (W)

-คำนวณหาค่า Efficiency at full load (η)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (3.196)$$

โดย

η = Efficiency at full load (%)

P_{in} = Input at fullload (W)

P_{out} = Out put at full load (W)

3.9 Equipvalent Circuit

1) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Equipvalent Circuit

-คำนวณหาค่า R_c

$$R_c = \frac{V_{ph}}{I_o \cdot \cos \phi_{no}} \quad (3.197)$$

โดย

V_{ph} = Volt per phase (V)

I_o = phase no load current (A)

$\cos \phi_{no}$ = No load power factor

-คำนวณหาค่า X_1

$$X_1 = X_{s1} + X_o + X_{z1} \quad (3.198)$$

- คำนวณหาค่า X_{s1}

$$X_{s1} = \frac{8\pi \cdot f \cdot N_{ph}^2 \cdot L \cdot \lambda_{ss}}{P \cdot g} \quad (3.199)$$

โดย

λ_{ss} = Stator slot leakage

L = Gross iron length (m)

N_{ph} = Stator turn per phase

f = frequency (Hz)

P = Number of pole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g = Slot per pole per phase

-คำนวณหาค่า X_{z1}

$$X_{z1} = \frac{5}{6} \cdot \frac{X_m}{m^2} \cdot \frac{1}{g_s} \quad (3.200)$$

โดย

X_m = Magnetizing reactance (Ω)

m = Number of phase

g_s = Stator slot per pole per phase

โดย

X_0 = Overhang leakage reactance (Ω)

-คำนวณหาค่า X_2

$$X_2 = X_{s2} + X_{z2} + X_{sk} \quad (3.201)$$

-คำนวณหาค่า X_{s2}

$$X_{s2} = \frac{8\pi \cdot f \cdot N_{ph}^2 \cdot L \cdot \lambda_{sr}}{P \cdot g} \quad (3.202)$$

โดย

λ_{sr} = Rotor slot leakage referred to stator

L = Gross iron length (m)

N_{ph} = Stator turn per phase

f = frequency (Hz)

P = Number of pole

g = slot per pole per phase

-คำนวณหาค่า X_{z2}

$$X_{z2} = \frac{5}{6} \cdot \frac{X_m}{m^2} \cdot \frac{1}{g_r} \quad (3.203)$$

โดย

X_m = Magnetizing reactance (Ω)

m = Number of phase

g_r = Rotor slot per pole per phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

X_{sk} = Skew leakage reactance (Ω)

3.10 Torque

1) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Torque

-คำนวณหาค่า V_{la}

$$V_{la} = V_1 \cdot \frac{jX_\phi}{R_1 + jX_{1l}} \quad (3.204)$$

โดย

$$X_{1l} = X_1 + X_\phi$$

-คำนวณหาค่า $R_{e1} + jX_{e1}$

โดยหาจาก

$$(R_1 + jX_1) // jX_\phi \quad (3.205)$$

-คำนวณหาค่า Slip at full load output

$$\text{Slip} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3.206)$$

โดย

N_s = Synchronous speed (r.p.m)

N_r = Rotor speed (r.p.m)

-คำนวณหาค่ากระแส I_2 ที่ Full load slip

$$I_2 = \frac{V_{la}}{(R_{e1} + \frac{R_2}{S})^2 + (X_{e1} + X_2)^2} \quad (3.207)$$

-คำนวณหาค่า Torque ที่ Full load slip

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot m \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{S} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (3.208)$$

โดย

$$\omega_s = \frac{4\pi \cdot f}{P} \quad (\text{rad/sec})$$

โดย

f = frequency (Hz)

P = number of pole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m = number of phase

-คำนวณหาค่า Slip maximum (S_{\max})

$$S_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{e1}^2 + (X_{e1} + X_2)^2}} \quad (3.209)$$

-คำนวณหาค่า Speed at torque maximum ($Speed_m$)

$$Speed_m = (1 - S_{\max})N_s \quad (\text{r.p.m}) \quad (3.210)$$

-คำนวณหาค่า Torque maximum (T_{\max})

$$T_{\max} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \left[\frac{0.5 \cdot m \cdot V_{1a}^2}{R_{e1} + \sqrt{R_{e1}^2 + (X_{e1} + X_2)^2}} \right] \quad (\text{N - m})$$

-คำนวณหาค่า I_2 ขณะที่ Slip = 1 (ขณะเริ่ม Start)

$$I_2 = \frac{V_{1a}}{\left[(R_{e1} + \frac{R_2}{S})^2 + (X_{e1} + X_2)^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{A}) \quad (3.211)$$

-คำนวณหาค่า Torque start (T_{st})

$$T_{st} = \frac{1}{\omega_s} \cdot m \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (\text{N - m}) \quad (3.212)$$

3.11 Stator Temperature Rise

1) ข้อมูลในส่วน Input

-รับค่า Cooling co-efficient

2) สมการการคำนวณที่ใช้ในส่วน Stator Temperature Rise 1

-คำนวณหาค่า Copper loss in slot portion (P_{cusp})

$$P_{\text{cusp}} = \frac{2 \cdot L \cdot P_{\text{tscu}}}{Lmt_s} \quad (3.213)$$

โดย

P_{cusp} = Copper loss in slot portion (W)

L = Gross iron length (m)

P_{tscu} = Total stator copper loss (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lmt_s = Length of mean turn (m)

-คำนวณหาค่า Total loss to be dissipated by stator core surface (P_{tld})

$$P_{tld} = P_{ail} + P_{cusp} \quad (3.214)$$

โดย

P_{tld} = Total loss to be dissipated by stator core surface (W)

P_{ail} = Actual iron in stator (W)

P_{cusp} = Copper loss in slot portion (W)

-คำนวณหาค่า Outside cylindrical surface of stator (O_{cs})

$$O_{cs} = \pi \cdot D_o \cdot L \quad (3.215)$$

โดย

O_{cs} = Outside cylindrical surface of stator (m^2)

D_o = Outside diameter of stator (m)

L = Gross iron length (m)

-กำหนดค่า Cooling co-efficient (C_{ce})

-คำนวณหาค่า Loss dissipated per c from back of core (P_{ldc})

$$P_{ldc} = \frac{O_{cs}}{C_{ce}} \quad (3.216)$$

โดย

P_{ldc} = Loss dissipated per c from back of core (W)

O_{cs} = Outside cylindrical surface of stator (m^2)

C_{ce} = Cooling co-efficient

-คำนวณหาค่า Inside cylindrical surface of stator (I_{cs})

$$I_{cs} = \pi \cdot D \cdot L \quad (3.217)$$

โดย

I_{cs} = Inside cylindrical surface of stator (m^2)

D = Stator bore diameter (m)

L = Gross iron length (m)

-คำนวณหาค่า Peripheral speed (V_a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_a = \pi \cdot D \cdot n_s \quad (3.218)$$

โดย

V_a = Peripheral speed (m/s)

D = Stator bore diameter (m)

n_s = Synchronous speed (r.p.s)

-คำนวณหาค่า Cooling co-efficient (C_{ce1})

-คำนวณหาค่า Loss dissipated per c from inside surface of stator (P_{lcs})

$$P_{lcs} = \frac{I_{cs}}{C_{ce1}} \quad (3.219)$$

โดย

P_{lcs} = Loss dissipated per c from inside surface of stator (W)

I_{cs} = Inside cylindrical surface of stator (m^2)

C_{ce1} = Cooling co-efficient

-คำนวณหาค่า Cooling surface of two ends (C_{se})

$$C_{se} = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D^2) \quad (3.220)$$

โดย

C_{se} = Cooling surface of two ends (m^2)

D_o = Outside diameter of stator (m)

D = Stator bore diameter (m)

-คำนวณหาค่า Velocity of air at end surface (V_e)

$$V_e = 0.1 \cdot V_a \quad (3.221)$$

โดย

V_e = Velocity of air at end surface (m/s)

V_a = Peripheral speed (m/s)

-คำนวณหาค่า Cooling co-efficient (C_{ce2})

-คำนวณหาค่า Loss dissipated per c from end surface (P_{lde})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{ldes} = \frac{C_{se}}{C_{ce2}} \quad (3.222)$$

โดย

P_{ldes} = Loss dissipated per c from end surface (W)

C_{se} = Cooling surface of two ends (m^2)

C_{ce2} = Cooling co-efficient

-คำนวณหาค่า Total loss dissipated per c (P_{tlde})

$$P_{tlde} = P_{ldes} + P_{lde} + P_{lcs} \quad (3.223)$$

โดย

P_{tlde} = Total loss dissipated per c (W)

P_{ldes} = Loss dissipated per c from end surface (W)

P_{lde} = Loss dissipated per c from back of core (W)

P_{lcs} = Loss dissipated per c from inside surface of stator (W)

-คำนวณหาค่า Temperature Rise (θ_m)

$$\theta_m = \frac{P_{tld}}{P_{tlde}} \quad (3.224)$$

โดย

θ_m = Temperature Rise (c)

P_{tlde} = Total loss dissipated per c (W)

P_{tld} = Total loss to be dissipated by stator core surface (W)

3.13 สมการที่ใช้ในการคำนวณในส่วน Stator Temperature Rise 2

1. Air Coolants type

-คำนวณหาค่า Volume of air under actual working condition (V_{ao})

$$V_{ao} = 0.78 \cdot \frac{Q_a}{\theta_a} \cdot \frac{\theta_i + 273}{273} \cdot \frac{760}{H} \quad (3.225)$$

โดย

V_{ao} = Volume of air under actual working condition (m^3 /second)

Q_a = Loss to be dissipated (kW)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ_a = Temperature rise of cooling medium (C)

θ_i = Inlet temperature rise of cooling medium (C)

H = Barometric height (mm of mercury)

-คำนวณหาค่า Power required by fan blowing air (P_f)

$$P_f = P_a \cdot \frac{V_{ao}}{\eta_f} \cdot 10^{-3} \quad (3.226)$$

โดย

P_f = Power required by fan blowing air (kW)

P_a = Pressure 1000 to 2000 N/m² or higher for closed circuit ventilation

V_{ao} = Volume of air under actual working condition (m³/second)

η_f = Fan efficiency (0.2 to 0.4)

2. Water Coolants type

-คำนวณหาค่า Volume of water required for absorb loss at temperature rise (V_w)

$$V_w = \frac{0.24 \cdot Q_a}{\theta_a} \quad (3.227)$$

โดย

V_w = Volume of water required for absorb loss at temperature rise (litre / second)

Q_a = Loss to be dissipated (kW)

θ_a = Temperature rise of cooling medium (C)

3. Oil Coolants type

-คำนวณหาค่า The amount of oil required for absorb loss at temperature rise (V_o)

$$V_o = \frac{0.24 \cdot Q_a}{(0.35 \text{ to } 0.5) \cdot \theta_a} \quad (3.228)$$

โดย

V_o = The amount of oil required for absorb loss at temperature rise (litre / second)

Q_a = Loss to be dissipated (kW)

θ_a = Temperature rise of cooling medium (C)

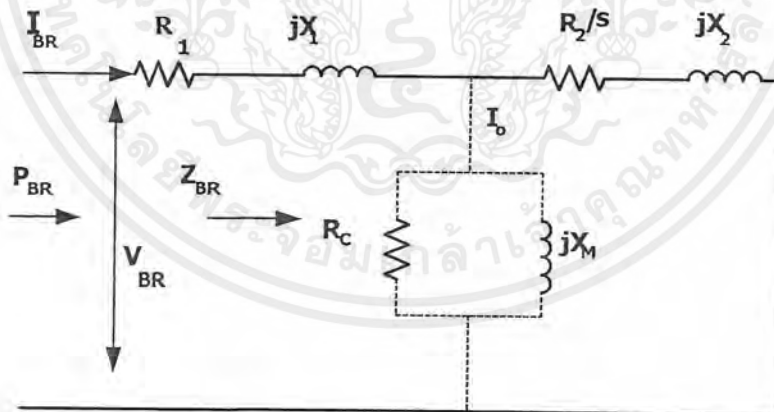
บทที่ 4

การหาจรรยาสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาจรรยาสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโครงการนี้ได้ทำการทดสอบ 4 ส่วนคือ การใช้วิธีโวลต์แอมป์, ทดสอบยึดโรเตอร์, การทดสอบไร้ภาระ และการทดสอบภาระของมอเตอร์

4.1 การทดสอบยึดโรเตอร์

การทำการทดสอบยึดโรเตอร์เพื่อหาค่า X_1 และ X_2 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้รวมกับข้อมูลจากการทดสอบโดยวิธีโวลต์แอมป์หาความต้านทานที่สเตเตอร์จะสามารถหาค่าความต้านทานที่โรเตอร์ (R_2) ได้ การทดสอบทำโดยการจับยึดโรเตอร์เอาไว้ไม่ให้หมุนได้และทำการวัดค่า กระแสในสายและกำลังงานที่เข้าทางด้านสเตเตอร์ในโครงการนี้เราใช้การต่อแบบสตาร์เพราะฉะนั้นทำการวัดกระแสแต่ละเฟส แรงดันแต่ละเฟสและกำลังงานที่เข้าทางด้านสเตเตอร์ 1 เฟส ในการทำการทดสอบจะปรับแรงดันทางเข้าให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนทำให้กระแสมีค่าที่พิกัดกระแส ทำการบันทึกผล การทดสอบ โดยกระแสกระตุ้นในการทำการยึดโรเตอร์พิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก เพราะฉะนั้นจรรยาสมมูลย์ในการทำการยึดโรเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยในส่วนที่เป็นเส้นประไม่ต้องนำมาคิด



รูปที่ 4.1 แสดงจรรยาสมมูลย์ 1 เฟส ของการทดสอบยึดโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาค่าต่างๆต่อเฟสได้ดังนี้

$$R_1 + R_2 = R_{BR} \quad (4.1)$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} \quad (4.2)$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{I_{BR}^2}$$

เราทราบค่า R_1 จากการทดลองหาค่าความต้านทานทางค้ำสเตเตอร์ เพราะฉะนั้นสามารถหาค่า R_2 ได้จาก

$$R_2 = R_{BR} - R_1 \quad (4.3)$$

$$Z_{BR} = \sqrt{R_{BR}^2 - X_{BR}^2} \quad (4.4)$$

$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \quad (4.5)$$

$$\text{เมื่อ } X_{BR} = X_1 + X_2 \quad (4.6)$$

ถ้าเราทราบ NEMA design letter ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็จะสามารถแยกค่า X_1 และ X_2 โดยดูจากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง X_1 กับ X_2 ตามชนิดของเครื่องจักรไฟฟ้าแต่ละชนิด

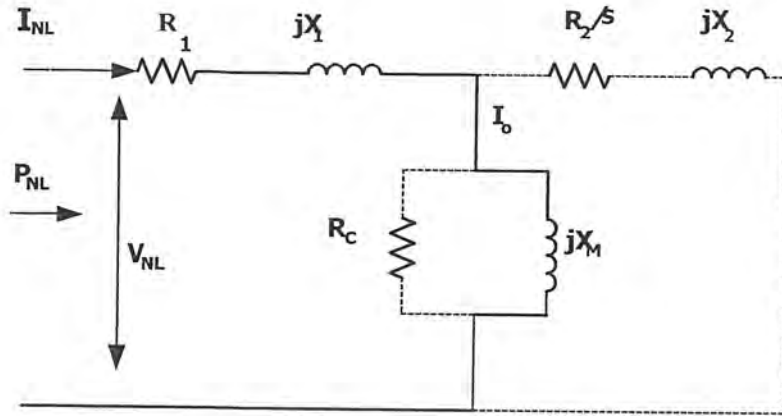
Type of IMC	A,D	B	C	Wound Rotor
X_1	$0.5X_{BR}$	$0.4X_{BR}$	$0.3X_{BR}$	$0.5X_{BR}$
X_2	$0.5X_{BR}$	$0.6X_{BR}$	$0.7X_{BR}$	$0.5X_{BR}$

4.2 การทดสอบสถานะไร้ภาระ

การทำทดสอบสถานะไร้ภาระ เพื่อหาค่า X_m และหาค่าองค์ประกอบของแกนเหล็ก , ความฝืด (Friction) และความสูญเสียแรงต้านจากลม (Windage losses) ค่าความสูญเสียทุกอย่างในที่นี่จะต้องมีค่าคงที่ทุกสถานะโหลด

การทำทดสอบสถานะไร้ภาระ ทำได้เหมือนกับการทดลองยึดโรเตอร์เพียงแต่ปล่อยให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนโดยไร้ภาระที่พิกัดแรงดันและพิกัดความถี่ โดยที่สถานะไร้โหลดความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสค่าสลิปมีค่าเกือบเป็นศูนย์เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านส่วนของ R_2/S มีค่าน้อยมากค้วนเหตุผลนี้ส่วน R_2/S นี้จึงถูกเขียนด้วยเส้นประไม่นำมาคิดตั้งแสดงในรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรสมมูลย์ 1 เฟส ของการทดสอบสภาวะไร้ภาระ จากวงจรสมมูลย์โดยประมาณคังรูปที่ 2 สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$S_{NL} = V_{NL} I_{NL} \quad (4.7)$$

$$S_{NL} = \sqrt{P_{NL}^2 - Q_{NL}^2} \quad (4.8)$$

$$Q_{NL} = \sqrt{S_{NL}^2 - P_{NL}^2} \quad (4.9)$$

สามารถหาค่า X_{NL} ได้โดย

$$X_{NL} = \frac{Q_{NL}}{I_{NL}^2} \quad (4.10)$$

$$\text{เมื่อ } X_{NL} = X_1 + X_m \quad (4.11)$$

เมื่อแทนค่า X_1 ที่ได้จากการทำการทดสอบขี้ดโรเตอร์เราก็จะสามารถหาค่า X_m ได้

4.3 ตารางแสดงการทดสอบหาวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.3.1 NO LOAD TEST

ตารางที่ 4.2 การหาค่าความต้านทานที่สเตเตอร์

ตารางที่ 1 (ขณะที่อุณหภูมิโดยรอบมอเตอร์อยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.2	8.45	12.8	17.2	21.75	26.5
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 8.52 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (หลังจากทดสอบ no load test ได้ข้อมูลหภูมิที่สแตเตอร์ 47 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.6	9.2	13.8	18.4	23.2	28.2
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สแตเตอร์ 9.25 โอห์ม

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ NO LOAD TEST

$V_{(A)}$ (V)	$V_{(B)}$ (V)	$V_{(C)}$ (V)	$I_{(A)}$ (A)	$I_{(B)}$ (A)	$I_{(C)}$ (A)	$P_{(A)}$ (W)	$P_{(B)}$ (W)	$P_{(C)}$ (W)	$P_{(t)}$ (W)	Sp	pf
274.2	274.4	274.4	1.93	1.7	1.94	58.27	51.32	58.56	168.1	1500	0.11
268.9	269.7	269.3	1.66	1.42	1.67	53.83	46.25	54.14	154.2	1500	0.12
246.4	247.9	244.8	1.24	1.13	1.27	45.78	41.56	46.49	133.8	1500	0.15
221.2	221.8	221.5	0.95	0.89	0.96	33.62	31.55	34.10	99.23	1500	0.16
201.8	205.2	201.8	0.82	0.77	0.80	29.64	28.54	29.15	87.33	1500	0.18
177.7	180.6	177.8	0.69	0.65	0.65	24.48	23.48	23.26	71.22	1500	0.20
155.2	157.0	155.2	0.59	0.56	0.55	20.19	19.27	18.72	58.18	1500	0.22
131.8	135.9	132.2	0.50	0.47	0.45	16.60	16.10	15.00	47.72	1500	0.25
110.5	114.8	109.9	0.42	0.40	0.37	12.63	12.54	11.12	36.29	1500	0.27
88.20	92.52	87.83	0.35	0.33	0.31	8.55	8.56	7.52	24.63	1499	0.28
64.90	70.43	64.60	0.27	0.26	0.23	6.24	6.6	5.36	18.2	1499	0.36
43.36	49.98	42.74	0.24	0.23	0.25	4.57	5.10	4.60	14.22	1493	0.44
26.80	32.10	27.00	0.23	0.22	0.23	3.88	4.4	3.9	12.18	1455	0.63

หมายเหตุ

$V_{(A)}$ = Voltage per phaseA

$V_{(B)}$ = Voltage per phaseB

$V_{(C)}$ = Voltage per phaseC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{(A)}$ = Current per phase A $I_{(B)}$ = Current per phase B

$I_{(C)}$ = Current per phase C

$P_{(A)}$ = Power per phase A

$P_{(B)}$ = Power per phase B

$P_{(C)}$ = Power per phase C

$P_{(t)}$ = Total power

Sp = Speed (r.p.m)

4.3.2 BLOCK ROTOR TEST

กรณี 50 Hz

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานที่สเตเตอร์

ตารางที่ 1 (ขณะที่อุณหภูมิโดยรอบของมอเตอร์อยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.2	8.45	12.8	17.2	21.75	26.5
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 8.59 โอห์ม

ตารางที่ 2 (หลังจากที่ Block rotor แล้ว ได้อุณหภูมิที่สเตเตอร์ 49 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.7	9.3	13.9	18.5	23.3	28.3
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบ Block rotor test

$V_{(A)}$	$V_{(B)}$	$V_{(C)}$	$I_{(A)}$	$I_{(B)}$	$I_{(C)}$	$P_{(A)}$	$P_{(B)}$	$P_{(C)}$	P_t	pf
(V)	(V)	(V)	(A)	(A)	(A)	(W)	(W)	(W)	(W)	
51.67	52.10	50.47	1.96	2.00	1.99	75.23	87.46	75.6	238.3	0.75

หมายเหตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{(A)}$ = Voltage per phaseA

$V_{(B)}$ = Voltage per phaseB

$V_{(C)}$ = Voltage per phaseC

$I_{(A)}$ = Current per phaseA

$I_{(B)}$ = Current per phaseB

$I_{(C)}$ = Current per phaseC

$P_{(A)}$ = Power per phaseA

$P_{(B)}$ = Power per phaseB

$P_{(C)}$ = Power per phaseC

$P_{(t)}$ = Total power

กรณี 25 Hz

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์

ตารางที่ 1 (ขณะที่อุณหภูมิโดยรอบมอเตอร์อยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.2	8.45	12.8	17.2	21.75	26.5
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 8.60 โอห์ม

ตารางที่ 2 (หลังจากที่ Block Rotor แล้ว ได้อุณหภูมิที่สเตเตอร์ 48 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.6	9.2	13.9	18.4	23.2	28.2
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 8.26 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบ Block rotor test

$V_{(A)}$ (V)	$V_{(B)}$ (V)	$V_{(C)}$ (V)	$I_{(A)}$ (A)	$I_{(B)}$ (A)	$I_{(C)}$ (A)	$P_{(A)}$ (W)	$P_{(B)}$ (W)	$P_{(C)}$ (W)	$P_{(t)}$ (W)	pf
41.44	41.61	42.14	1.97	2.00	2.00	69.97	70.66	71.66	212.3	0.85

หมายเหตุ

$V_{(A)}$ = Voltage per phaseA

$V_{(B)}$ = Voltage per phaseB

$V_{(C)}$ = Voltage per phaseC

$I_{(A)}$ = Current per phaseA

$I_{(B)}$ = Current per phaseB

$I_{(C)}$ = Current per phaseC

$P_{(A)}$ = Power per phaseA

$P_{(B)}$ = Power per phaseB

$P_{(C)}$ = Power per phaseC

$P_{(t)}$ = Total power

กรณี 12.5 Hz

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์

ตารางที่ 1 (ขณะที่อุณหภูมิโดยรอบมอเตอร์อยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.2	8.45	12.8	17.2	21.75	26.5
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 8.60 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (หลังจากที่ Block Rotor แล้ว ได้อุณหภูมิที่สเตเตอร์ 46 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.55	9.1	13.8	18.3	23.1	28.2
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 9.20 โอห์ม

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบ Block rotor test

$V_{(A)}$ (V)	$V_{(B)}$ (V)	$V_{(C)}$ (V)	$I_{(A)}$ (A)	$I_{(B)}$ (A)	$I_{(C)}$ (A)	$P_{(A)}$ (W)	$P_{(B)}$ (W)	$P_{(C)}$ (W)	$P_{(t)}$ (W)	pf
28.60	32.77	31.32	1.98	1.94	1.99	52.58	62.85	58.14	173.5	0.93

หมายเหตุ

$V_{(A)}$ = Voltage per phaseA

$V_{(B)}$ = Voltage per phaseB

$V_{(C)}$ = Voltage per phaseC

$I_{(A)}$ = Current per phaseA

$I_{(B)}$ = Current per phaseB

$I_{(C)}$ = Current per phaseC

$P_{(A)}$ = Power per phaseA

$P_{(B)}$ = Power per phaseB

$P_{(C)}$ = Power per phaseC

$P_{(t)}$ = Total power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดสอบภาระของมอเตอร์

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์

ตารางที่ 1 (ขณะที่อุณหภูมิโดยรอบมอเตอร์อยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส)

V (V)	4.2	8.45	12.8	17.2	21.75	26.5
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 8.60 โอห์ม

ตารางที่ 2 (หลังจากที่ Block Rotor แล้ว ได้อุณหภูมิที่สเตเตอร์ 48 องศาเซลเซียส)

V (V)	5.2	10.2	15.15	20.5	25.6	30.0
I (A)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

ได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 10.24 โอห์ม

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบภาระของมอเตอร์

W_2 (kg)	W_1 (kg)	$W_1 - W_2$ (kg)	$V_{(A)}$ (V)	$V_{(B)}$ (V)	$V_{(C)}$ (V)	$I_{(A)}$ (A)	$I_{(B)}$ (A)	$I_{(C)}$ (A)	pf	Speed (r.p.m)
0.1	0.2	0.1	221.3	222.2	223.3	1.00	0.98	0.96	0.21	1497
0.4	1.2	0.8	221.1	222.5	221.7	1.07	1.04	1.03	0.44	1487
0.6	2.2	1.6	221.5	221.8	222.0	1.11	1.09	1.07	0.54	1477
0.9	3.2	2.3	221.8	222.0	222.9	1.19	1.18	1.17	0.63	1467
1.2	4.2	3	222.0	222.1	222.4	1.28	1.27	1.26	0.70	1457
1.4	5.2	3.8	223.0	221.8	222.5	1.40	1.38	1.39	0.74	1448
1.7	6.2	4.5	222.9	221.7	222.3	1.52	1.51	1.50	0.78	1437
2	7.2	5.2	221.8	221.5	221.9	1.64	1.63	1.62	0.82	1427
2.25	8.2	5.95	222.0	221.8	222.3	1.79	1.77	1.76	0.84	1411
2.5	9.2	6.7	221.9	222.0	222.2	1.93	1.92	1.91	0.86	1392
3.1	10.2	7.1	222.0	221.8	222.3	2.04	1.99	1.97	0.88	1379

หมายเหตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{(A)}$ = Voltage per phaseA

$V_{(B)}$ = Voltage per phaseB

$V_{(C)}$ = Voltage per phaseC

$I_{(A)}$ = Current per phaseA

$I_{(B)}$ = Current per phaseB

$I_{(C)}$ = Current per phaseC

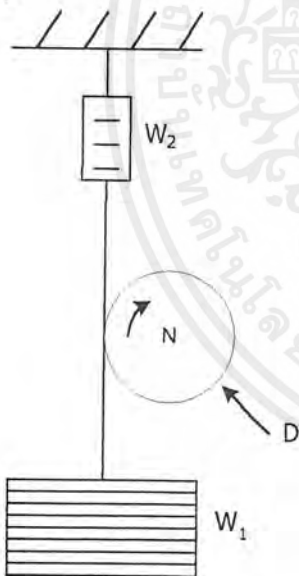
$P_{(A)}$ = Power per phaseA

$P_{(B)}$ = Power per phaseB

$P_{(C)}$ = Power per phaseC

$P_{(t)}$ = Total power

จากรูป

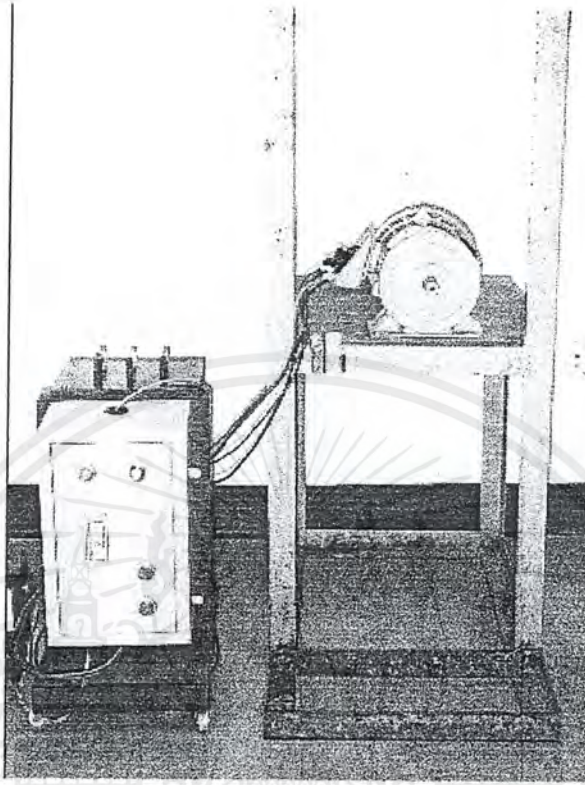


W_1 : เป็นน้ำหนักของลูกตาชั่ง (kg) , D : เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของ Pulley (m)

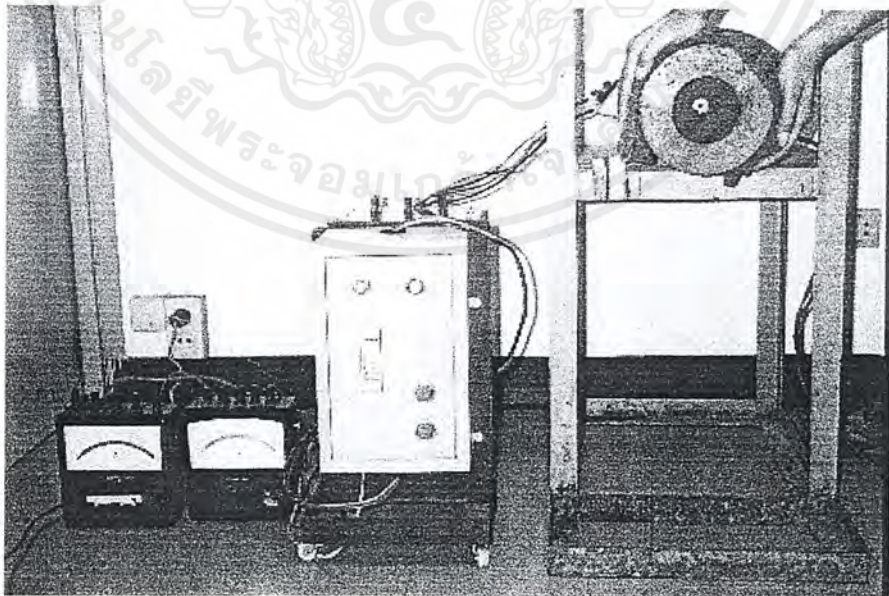
W_2 : เป็นน้ำหนักที่อ่านจากตาชั่ง (kg) , N : เป็น Pulley Speed (r.p.m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 รูปภาพประกอบการทดสอบมอเตอร์

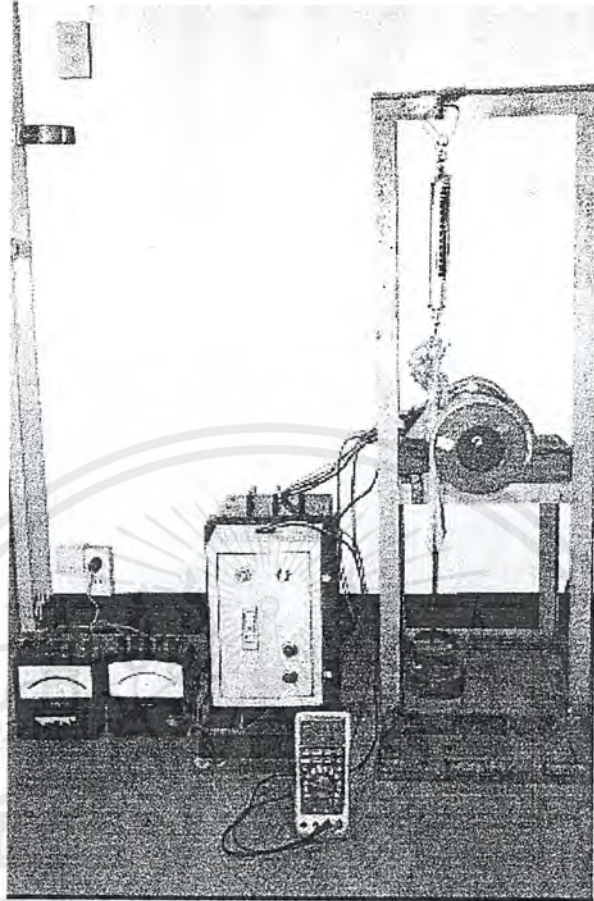


รูป 4.3 ภาพประกอบการทดสอบสถานะไร้ภาระ (No Load Test)

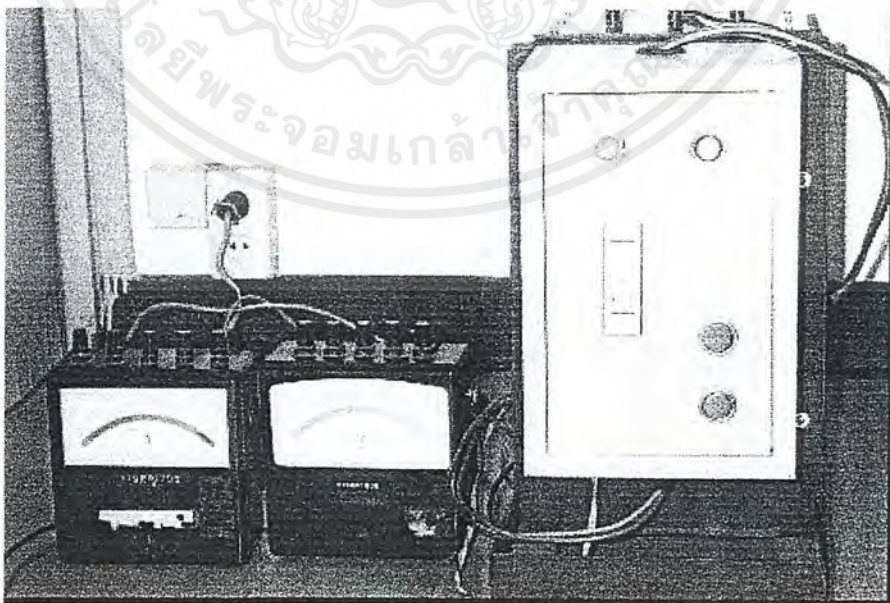


รูป 4.4 ภาพประกอบการทดสอบยึดโรเตอร์ (Block Rotor Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

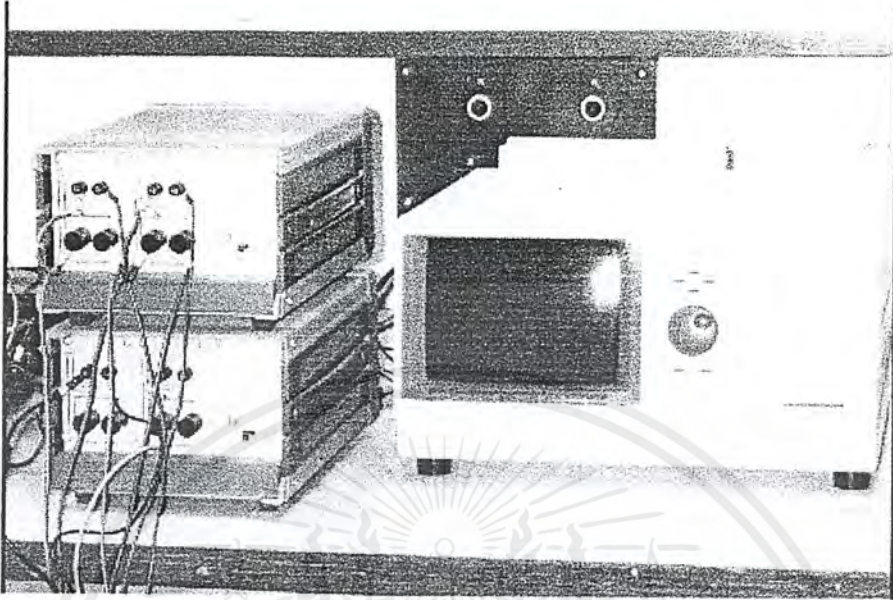


รูป 4.5 ภาพประกอบการทดสอบภาระ(Take Load)



รูป 4.6 ภาพประกอบเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.7 ภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกค่า

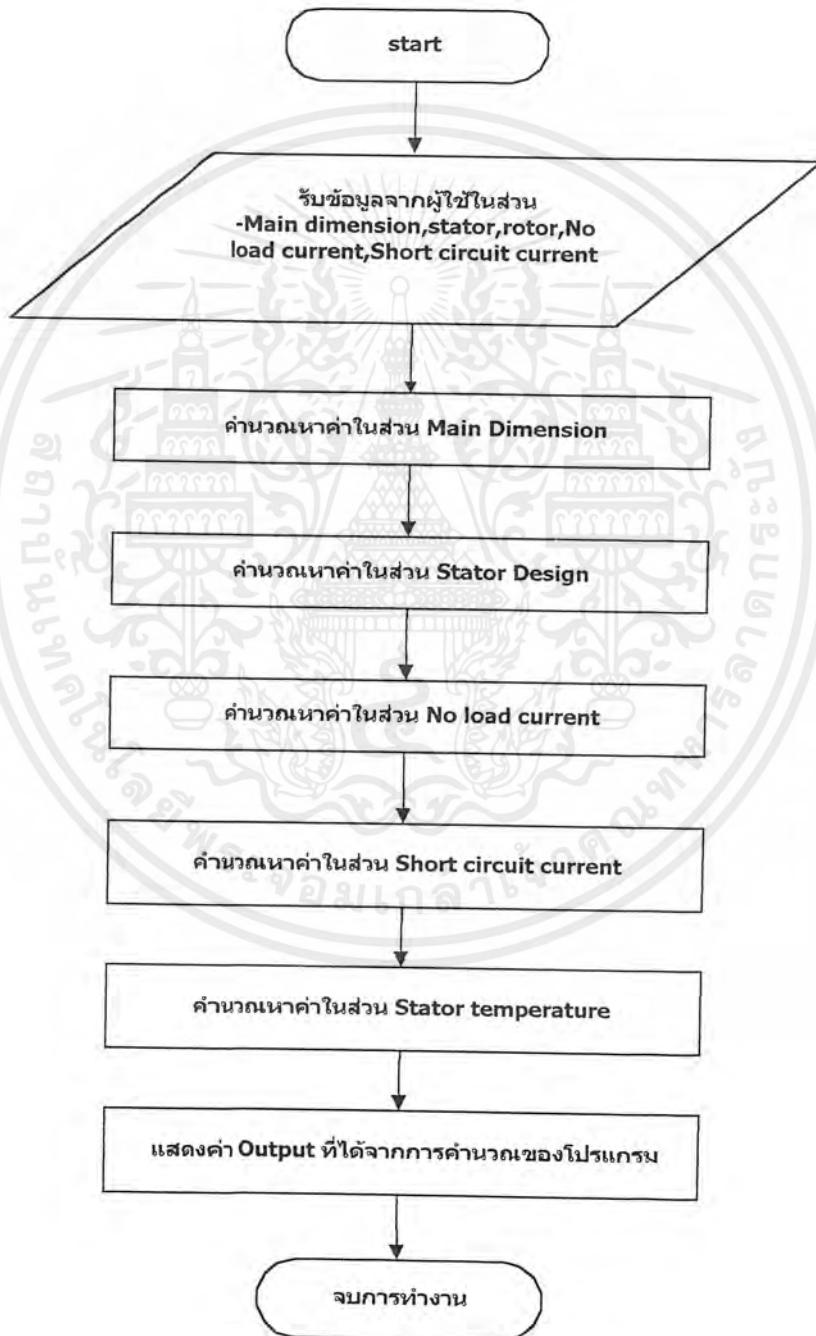
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

แผนผังและการทำงานของโปรแกรม

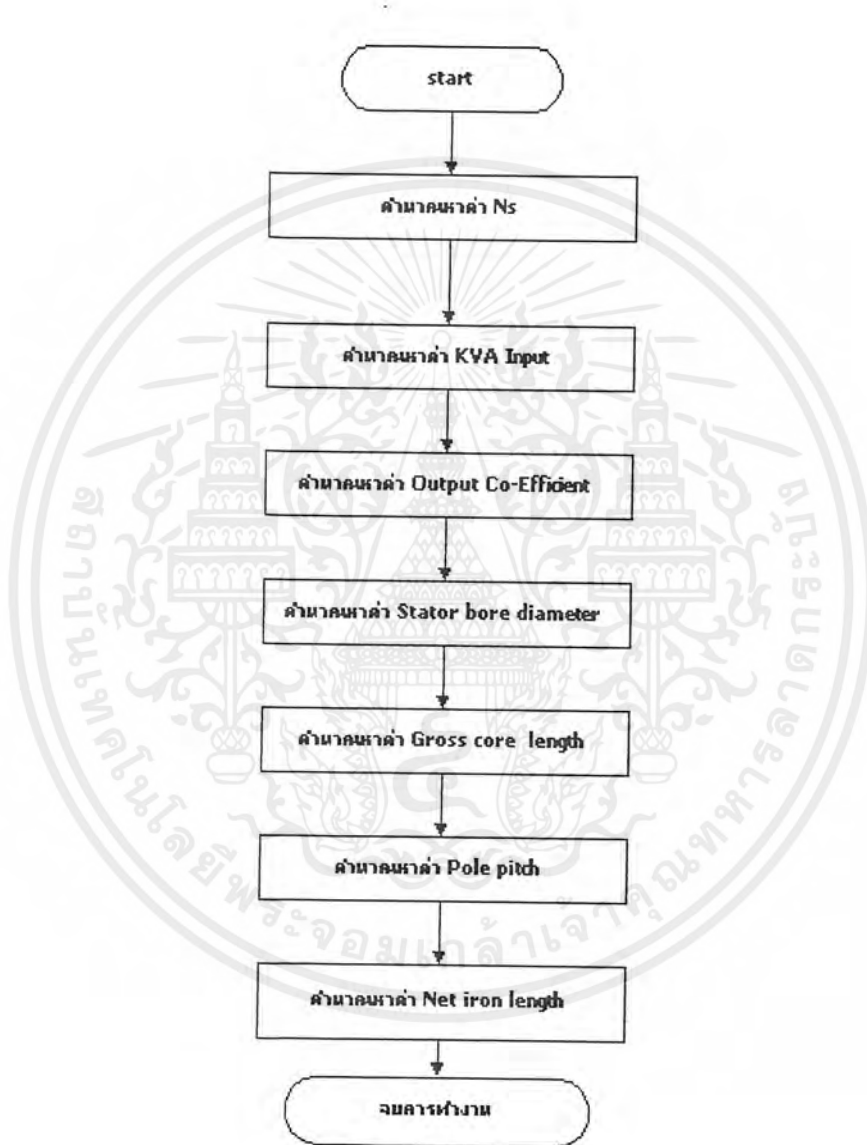
5.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในส่วนต่างๆ

5.1.1) แผนผังการทำงานของโดยรวมของโปรแกรม



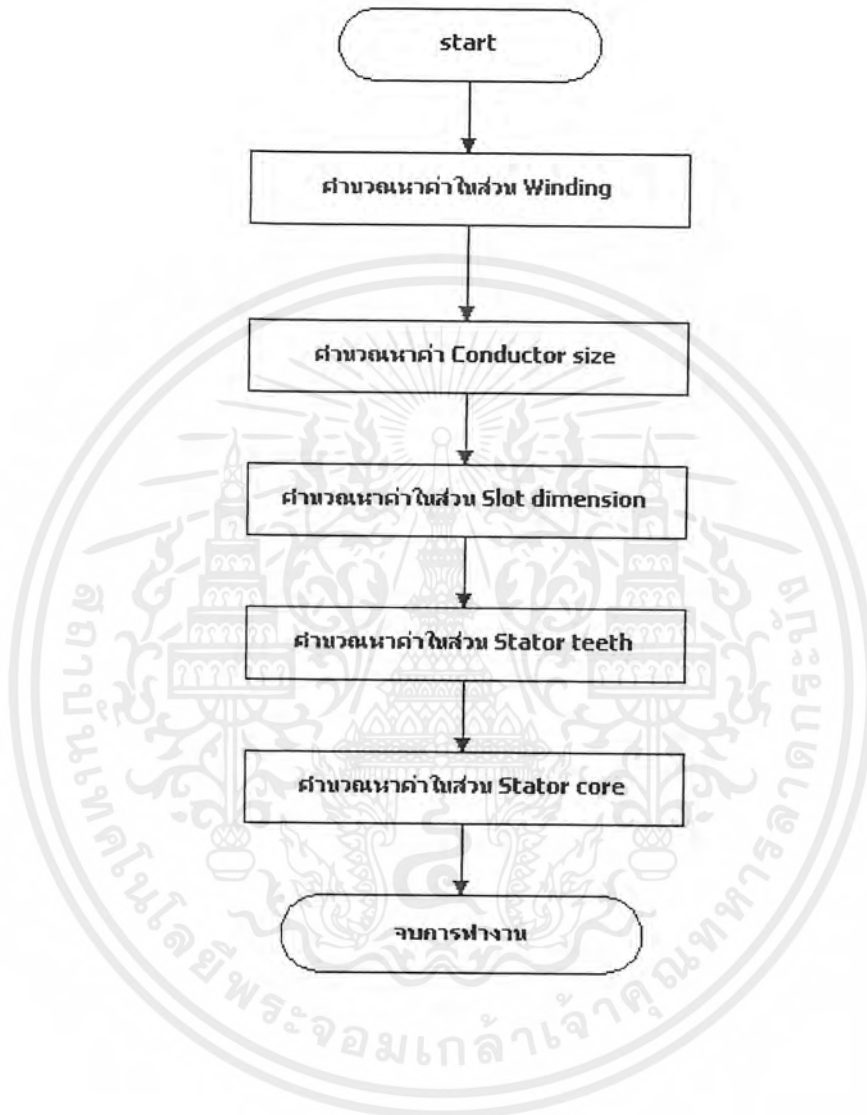
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2) แผนผังการออกแบบหาค่า Main dimension



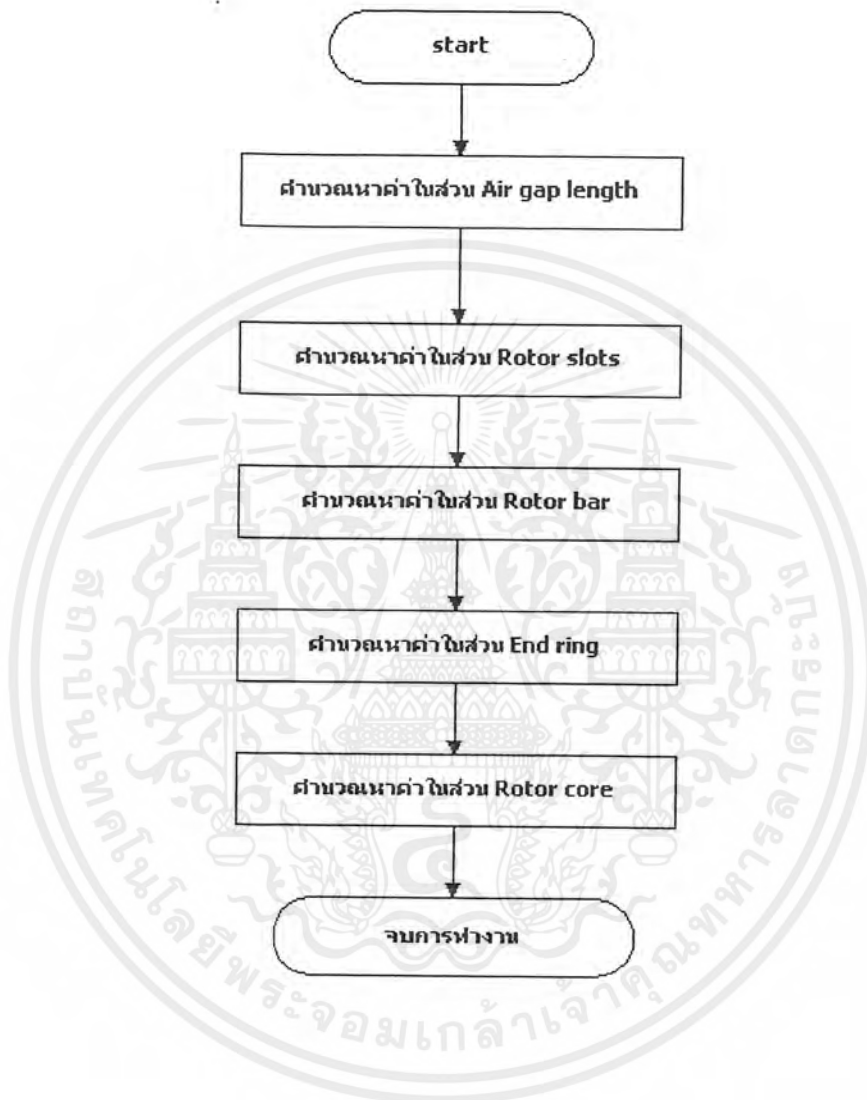
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3) แผนผังการออกแบบในส่วน Stator Design



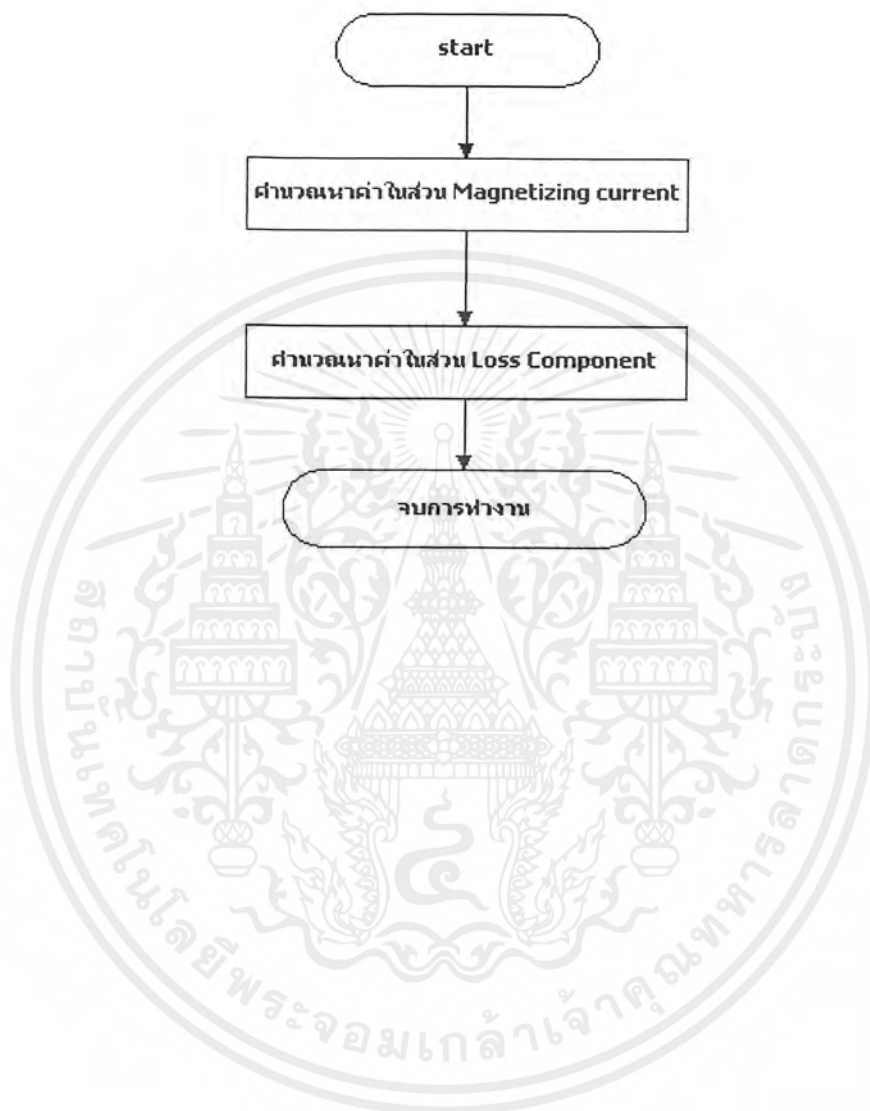
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4) แผนผังการออกแบบในส่วน Rotor design



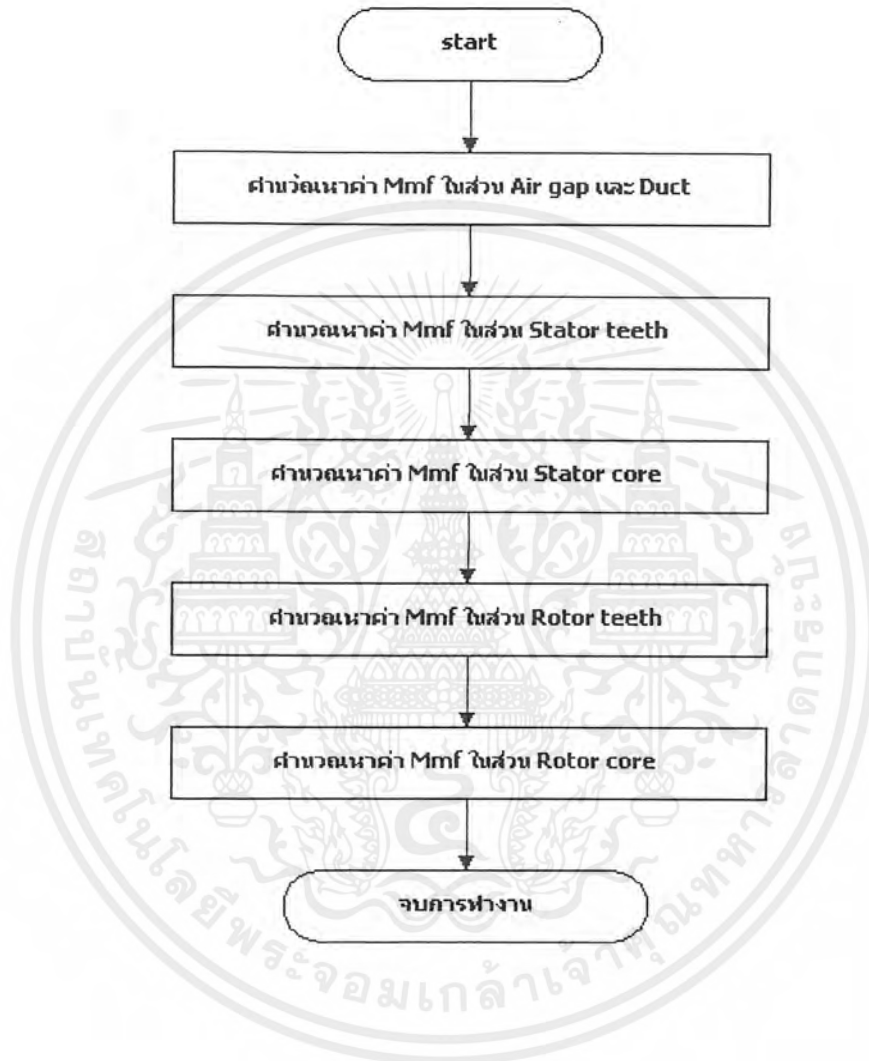
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5) แผนผังการออกแบบในส่วน No load current



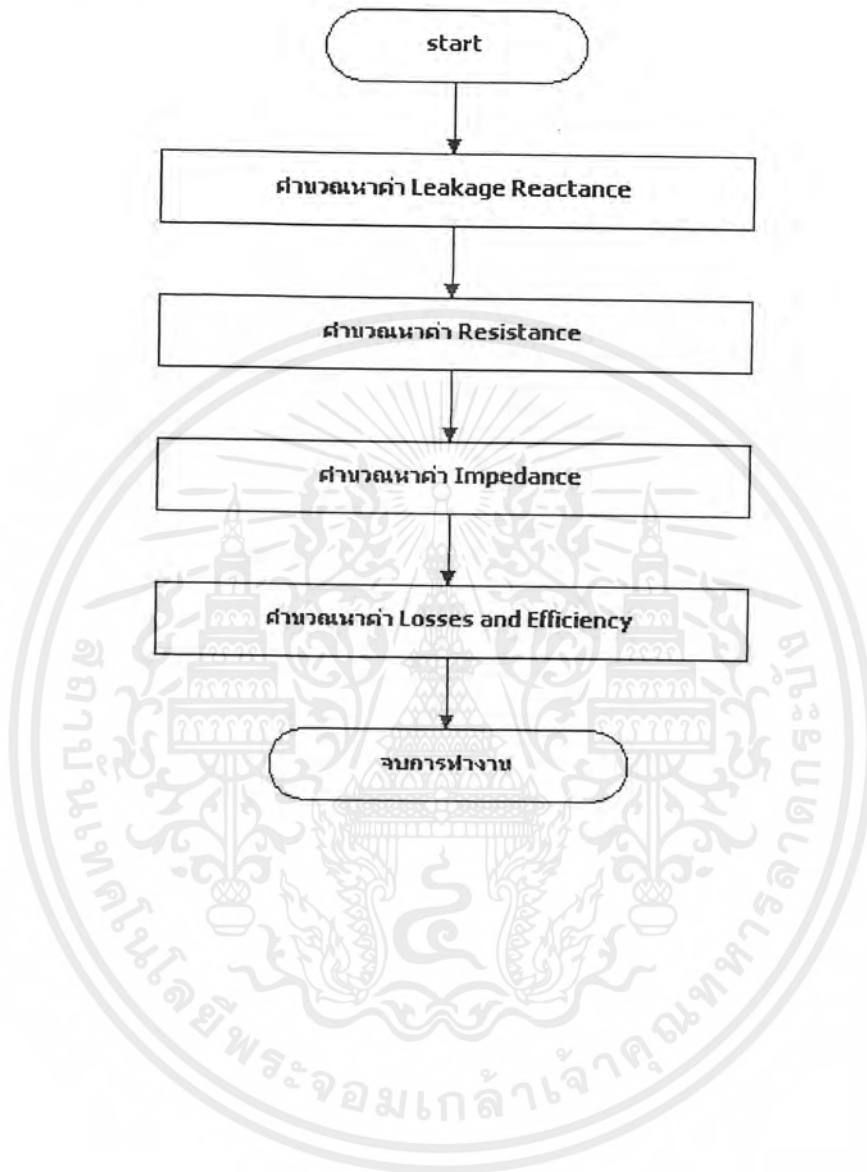
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5.1) แผนผังการคำนวณในส่วน Magnetizing current



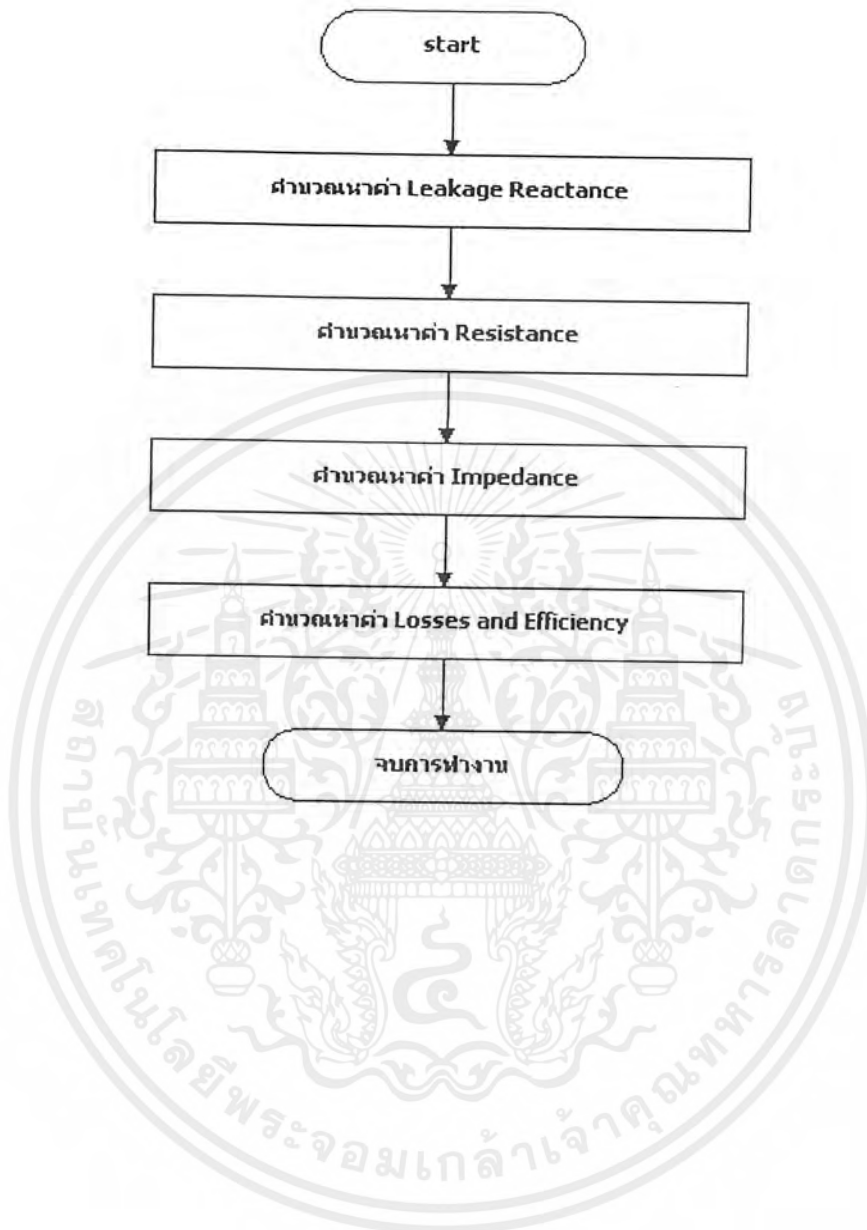
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5.2) แผนผังการคำนวณในส่วน Loss component



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6) แผนผังการคำนวณในส่วน Short Circuit Current



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6.1) การคำนวณในส่วน Leakage Reactance



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วิธีการใช้โปรแกรม IMMD

โปรแกรมสำหรับออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ(Induction Motors Machine Design)

โปรแกรมสำหรับออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ(Induction Motors Machine Design) เป็นชื่อของโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual Basic 6 และมีคุณสมบัติของโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows

คอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน Microsoft Visual Basic 6

สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน VB6 จะต้องเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ต้องมีระบบปฏิบัติการ Windows 95 หรือสูงกว่า หรือระบบปฏิบัติการ Windows NT Version 4.0 หรือสูงกว่า
- หน่วยประมวลผลกลางรุ่น Pentium 90 MHz หรือสูงกว่า
- เนื้อที่ในฮาร์ดดิสก์อย่างน้อย 50 เมกกะไบต์
- ต้องการ CD-ROM ไดรฟ์
- การ์ดจอ VGA 640x480 หรือสูงกว่าที่ Windows สนับสนุน
- RAM 24 MB สำหรับ Windows 95, 32 MB สำหรับ Windows NT Version 4.0

การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ใช้เมาส์ดับเบิลคลิก(คลิกสองครั้งติดกัน)ที่ไอคอน “IMMD” ดังรูปที่



รูป ไอคอนของโปรแกรม IMMD

เมื่อโปรแกรม IMMD เริ่มทำงานแล้ว ปรากฏจอภาพดังรูปที่

Welcome to IMMD Program

Advisor Asst. Prof. Pichit Lumyong

Product by
MACHINE DESIGN GROUP

Next

Close

King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang

รูป 5.1 หน้าจอเริ่มต้นของ โปรแกรม IMMD

5.2.1 ขั้นตอนการออกแบบมอเตอร์

ในการใช้โปรแกรม IMMD เพื่อทำการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นการออกแบบมอเตอร์สามารถทำได้ดังนี้

ดับเบิ้ลคลิกที่ไอคอน IMMD ซึ่งวินโดว์จะแสดง “ข้อมูลอินพุท” จะแบ่งกลุ่มของข้อมูลอินพุทโดยใช้แท็บทั้งหมด 5 แท็บ ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Main dimensions
- Stator
- Rotor
- No load
- Short cct & Equivalent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบในส่วนของ Main dimensions สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. พิกัดกำลังไฟฟ้า(Power) ซึ่งสามารถเลือกหน่วยเป็น วัตต์ หรือ แรงม้า ได้จากปุ่มตัวเลือก ส่วนขนาดนั้นสามารถกำหนดค่าได้ในกล่องรับข้อมูล
2. พิกัดแรงดัน(Voltage L-L) เลือกแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ปุ่มตัวเลือกหรือจะกำหนดค่าเองโดยใช้กล่องรับข้อมูลก็ได้
3. จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Number of pole) เป็นการกำหนดจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ที่ต้องการจะออกแบบ สามารถเลือกโดยใช้ปุ่มตัวเลือกหรือจะกำหนดค่าเองโดยใช้กล่องรับข้อมูลก็ได้
4. ค่าประสิทธิภาพ(Efficiency) ซึ่งจะแสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ สามารถเลือกโดยใช้ปุ่มตัวเลือกหรือจะกำหนดค่าเองโดยใช้กล่องรับข้อมูลก็ได้
5. ค่าปรับปรุงกำลังไฟฟ้า (Power factor at full load) สามารถเลือกโดยใช้ปุ่มตัวเลือกหรือจะกำหนดค่าเองโดยใช้กล่องรับข้อมูลก็ได้
6. พิกัดความถี่ไฟฟ้า(Frequency) สามารถเลือกความถี่โดยใช้ปุ่มตัวเลือกหรือจะกำหนดค่าเองโดยใช้กล่องรับข้อมูลก็ได้
7. จำนวนร่องสลิต/ขั้วแม่เหล็ก/เฟส(slot/pole/phase) สามารถเลือกโดยใช้ปุ่มตัวเลือก
8. คุณลักษณะของมอเตอร์ที่ออกแบบ(The ratio of core length per pole pitch) แบ่งได้ดังนี้
 - คุณลักษณะทางไฟฟ้าดีมาก ($L/t=1$)
 - ค่าปรับปรุงกำลังไฟฟ้าค่อนข้างดี ($L/t=1.0$ ถึง 1.25)
 - ประสิทธิภาพค่อนข้างดี ($L/t=1.5$)
 - ประหยัด ($L/t=1.5$ ถึง 2.0)
 - เลือกเอง ($L/t=1$ ถึง 2)
9. ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก(Average flux density) สามารถกรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความโดยค่านี้นี้จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.6 เทสลา หรือดูได้จากตารางโดยคลิกดูได้ที่ปุ่มกด “Table” ซึ่งจะเชื่อมโยงกับตารางแสดงค่า ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กต่างๆ ให้เลือก
10. ค่า Ampere conductor per meter(ac) สามารถกรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความโดยค่านี้นี้จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 5000 ถึง 45000 หรือดูได้จากตาราง โดยคลิกดูได้ที่ปุ่มกด “Table” ซึ่งจะเชื่อมโยงกับตารางแสดงค่า Ampere conductor per meter(ac)
11. ค่า Winding factor โดยมากจะใช้ค่าเท่ากับ 0.955 แต่สามารถกรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main dimension	Stator	Rotor	No-load	Short cct & Equivalen
Input of Main dimension				
Power <input type="checkbox"/> watt <input checked="" type="checkbox"/> hp		The ratio of core length per pole pitch <input type="checkbox"/> Good overall design (L/t =1) <input checked="" type="checkbox"/> Good power factor (L/t =1.0 to 1.25) <input type="checkbox"/> Good efficiency (L/t =1.5) <input type="checkbox"/> Minimum cost (L/t =1.5 to 2.0) <input type="checkbox"/> User Select (L/t =1-2)	Ampere conductor per metre (ac) Table = <input type="text"/> <i>between 5000 to 45000</i>	
Voltage L-L <input type="checkbox"/> 220V <input checked="" type="checkbox"/> 380V <input type="checkbox"/> <input type="text"/> V			Winding factor (kw) <input checked="" type="checkbox"/> 0.955 <input type="checkbox"/> <input type="text"/>	
Number of Pole <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> <input type="text"/>			Stacking factor <input checked="" type="checkbox"/> 0.90 <input type="checkbox"/> <input type="text"/> <i>between 0.9 to 1</i>	
Efficiency <input type="checkbox"/> 0.5 <input checked="" type="checkbox"/> 0.6 <input type="checkbox"/> 0.7 <input type="checkbox"/> <input type="text"/>			Lohys stamping <input checked="" type="checkbox"/> 0.5 mm <input type="checkbox"/> <input type="text"/> mm. <i>Normal thickness is 0.5 mm.</i>	
Power factor at full load <input type="checkbox"/> 0.8 <input checked="" type="checkbox"/> 0.85 <input type="checkbox"/> 0.9 <input type="checkbox"/> <input type="text"/>		Average flux density (Bav) Table = <input type="text"/> Tesla <i>Average flux density is 0.3 to 0.6 Tesla</i>		
Frequency <input checked="" type="checkbox"/> 50 Hz <input type="checkbox"/> 60 Hz <input type="checkbox"/> <input type="text"/> Hz				
Slot/Pole/Phase <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3				

รูป 5.2 หน้าจออินพุตของ Main dimension

- ค่า Stacking factor โดยมากจะใช้ค่าเท่ากับ 0.9 แต่สามารถรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความโดยค่านี้อาจมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1
- ค่า Lohys stamping โดยมากจะใช้ค่าเท่ากับ 0.5 แต่สามารถรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความ

Table 3. Specific Loading

D	L/D(maximum)	Bav	ac	current density
0.10	0.80	0.30	11000	4.00
0.15	0.75	0.35	15000	3.70
0.20	0.70	0.40	18000	3.60
0.30	0.65	0.43	22500	3.50
0.40	0.62	0.45	26000	3.50
0.50	0.60	0.46	29000	3.50
0.75	0.50	0.47	33000	3.50
1.00	0.42	0.48	35000	3.50
1.50	0.33			
2.00	0.30			
2.50	0.30			
3.00	0.30			

รูป 5.3 ตารางแสดงค่า Specific Loading เมื่อกดปุ่ม "Table"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบในส่วนของ Stator สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ร่องตัวนำต่อจำนวนขั้วแม่เหล็ก(Slot/Pole)สามารถรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความ
2. เลือกความกว้างขั้วแม่เหล็ก สามารถรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความ
3. ลักษณะการพันขดลวด(Type of winding) สามารถเลือกได้ว่า พันแบบ Chain winding หรือ Lap winding
4. ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า(Current density in stator conductor) สามารถรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อความ โดยค่านี้จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 แอมป์/ตารางมิลลิเมตร
5. การต่อสาย(Connection) สามารถเลือกได้ว่าจะต่อสายแบบ Star หรือ Delta

main dimension	Stator	Rotor	No-load	Short cct & Equiv
put of stator				
Slot/Pole	= <input type="text" value="8"/> slot/pole	Dimeter = <input type="text" value="0.75"/> mm. Table	Depth of mounth = <input type="text" value="0.1"/> cm. <input type="text" value="0.15"/> cm. <i>Usually 0.1 to 0.15 cm.</i>	
Select coil span	= <input type="text" value="8"/> slot/pole	Select Dimeter enamel from table = <input type="text" value="0.8"/> mm. Table	Flux density in stater core = <input type="text" value="1.4"/> Tesla <i>Usually 1.2 to 1.4 Tesla</i>	
Type of winding	<input checked="" type="radio"/> Chain winding <input type="radio"/> Lap winding	Select Space factor = <input type="text" value="0.3"/> <i>Usually 0.25 to 0.4</i>		
Current density in stator conductor	= <input type="text" value="4.53"/> A/sq.mm <i>Usually between 3 to 5 A/sq.mm</i>	Depth of Tip = <input type="text" value="0.075"/> cm. <input type="text" value="0.075"/> cm.		
Connection	<input checked="" type="radio"/> Star <input type="radio"/> Delta			

รูป 5.4 หน้าจอข้อมูลอินพุตของสเตรเตอร์

6. เส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter)
7. เลือก เส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) จากตาราง
8. เลือก Diameter Enamel จากตาราง
9. เลือก Space factor
10. Depth of Tip เลือกจากค่ามาตรฐานคือค่า 0.075 ซม. หรือกรอกเองในช่องรับข้อมูล
11. Depth of mounth เลือกจากค่ามาตรฐานคือค่า 0.1 หรือกรอกเองในช่องรับข้อมูล โดยค่าที่กรอกมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.15 ซม.
12. Flux density in stator core กรอกเองในช่องรับข้อมูล โดยค่าที่กรอกมีค่าอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.4 แอมป์/ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบในส่วนของ Rotor สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ความยาวช่องว่างอากาศ (Air gap) จะมีค่าที่ได้จากการคำนวณปรากฏขึ้น ให้เราเลือกใช้ค่าที่เราต้องการ หรือเลือกใช้ค่าจากตาราง โดยกดดูที่ปุ่มกด "Table" แล้วจึงกรอกที่ช่องรับข้อมูล
2. จำนวนร่องค้ำนำของ โรเตอร์ (Number conductor of rotor slot) โดยสามารถกรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อมูล
3. ค่า Current density in rotor bar โดยสามารถกรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อมูล โดยค่าที่กรอกจะมีค่าระหว่าง 4 ถึง 7 แอมป์/ตร.ม.
4. ค่า depth of tip in rotor เลือกจากค่ามาตรฐานคือค่า 0.05 ซม หรือกรอกเองในช่องรับข้อมูล
5. เลือกชนิดของค้ำนำใน โรเตอร์ โดยเลือกจาก อะลูมิเนียม หรือ ทองแดง
6. ค่า Current density in end ring โดยสามารถกรอกค่าที่ต้องการได้ในช่องรับข้อมูล โดยค่าที่กรอกมีค่าอยู่ระหว่าง 4 ถึง 7 แอมป์ 1ตร.มม
7. ค่าความหนาของ End ring สามารถเลือกกรอกค่า Area of end ring required หรือค่าที่เลือกจากตาราง

Main dimension	Stator	Rotor	No load	Short cct & Equiv
Output of rotor				
Air gap length	Value from calculate <input type="text"/> mm. Select from table <input type="text"/> 0.2 mm.	Table	Current density in rotor bar = <input type="text"/> 4.98 A/sq.mm <i>Usually 4 to 7 A/sq.mm</i>	
Number conductor of rotor slot	= <input type="text"/> 44 slot		Depth of tip in rotor <input checked="" type="radio"/> 0.05 cm. <input type="radio"/> <input type="text"/> cm.	
Rule for select rotor slot			Select material of rotor <input checked="" type="radio"/> Aluminium <input type="radio"/> Copper	
1. The number of rotor slot should never be equal stator slots but must either be large of smaller			Current density in end ring = <input type="text"/> 3.97 A/sq.mm <i>Usually 4 to 7 A/sq.mm</i>	
2. The difference between stator slots and rotor should not be equal to P, 2P or 5P to avoid synchronous cusps			Select thickness of end ring Area of end ring required <input type="text"/> sq.mm	
3. The difference between the number of stator and rotor slots should not be equal to 3P for 3 phase machine in order to avoid magnetic locking			Select thickness of end ring <input type="text"/> 5.5 mm.	
4. the difference between number of stator slots and rotor slots should not be equal to 1, 2, (P+1), (P-1) or (P+2), (P-2) to avoid noise and vibrations				

รูป 5.5 หน้าจอข้อมูลอินพุตของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบในส่วนของ No load สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ค่า Carter air gap co-efficient ของ Ratio slot opening per gap length สามารถหาได้โดยนำค่า Ratio slot opening per gap length ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
2. ค่า Width of duct เลือกจากค่ามาตรฐานคือค่า 10 มม. หรือกรอกเองในช่องรับข้อมูล โดยค่าที่กรอกมีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 10 มม.
3. จำนวนช่องระบายความร้อน
4. ค่า Carter air gap co-efficient ของ Ratio slot duct width per gap length สามารถหาได้โดยนำค่า Ratio slot duct width per gap length ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
5. ค่า Magnetomotive force/metre in stator teeth สามารถหาได้โดยนำค่า Bts60 in stator teeth ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
6. ค่า Magnetomotive force/metre in stator core สามารถหาได้โดยนำ Flux density in Stator core ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
7. ค่า Magnetomotive force/metre in rotor teeth สามารถหาได้โดยนำค่า Bts60 in rotor teeth ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
8. ค่า Magnetomotive force/metre in rotor core สามารถหาได้โดยนำ Flux density in rotor core ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
9. ค่า Iron loss in stator teeth สามารถหาได้โดยนำ Maximum Flux density in stator teeth ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
10. ค่า Iron loss in stator core สามารถหาได้โดยนำ Maximum Flux density in stator core ที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมไป คูณค่าที่เหมาะสมจากตารางที่ป้อนค่า "Table" แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมใส่ในช่องรับข้อความ
11. ค่า Friction and windage loss เลือกจากค่ามาตรฐานคือค่า 1.5 % หรือคูณค่าที่เหมาะสมจากตาราง ที่กคป้อนค่าที่ "Table" แล้วจึงกรอกค่าในช่องรับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main dimension	Stator	Rotor	No-load	Short cct & Ec
Input of No Load Current				
Carter air gap co-efficient	Ratio slot opening per gap length		Magnetomotive force/metre in rotor teeth	
	0.8	Table	Bts60 in Rotor teeth	Tesla
Select Carter airgap co-efficient from table			900	A
			Select mmf/metre from table	Table
Width of duct	Number of duct		Magnetomotive force/metre in rotor core	
10 mm. <input type="radio"/> mm. <input type="radio"/>	= 4		Flux density in Rotor core	Tesla
Usually 8 to 10 mm.			720	A
			Select mmf/metre from table	Table
Carter air gap co-efficient	Ratio slot duct width per gap length		Iron loss in stator teeth	
	0.9	Table	Maximum Flux density in Stator teeth	Tesla
Select Carter airgap co-efficient from table			11.5	Watt/Kg
			Select Watt/Kg from table	Table
Magnetomotive force/metre in stator teeth	Bts60 in Stator teeth	Tesla	Iron loss in stator core	
	1600	A	Maximum Flux density in Stator core	Tesla
Select mmf/metre from table		Table	7.6	Watt/Kg
			Select Watt/Kg from table	Table
Magnetomotive force/metre in stator core	Flux density in Stator core	Tesla	Friction and windage loss	
	720	A	1.5 %	%
Select mmf/metre from table		Table		Table

รูป 5.6 หน้าจอข้อมูลอินพุตของ No-load current

การออกแบบในส่วนของ Short cct & Equivalent สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. Stator slot leakage สามารถหาได้โดย นำค่า Ratio b/a_2 และ Ratio a_1/a_2 ที่โปรแกรมคำนวณมาให้ ไปหาค่าที่เหมาะสมจากตารางโดยกกดดูตารางจากปุ่มกด "Table" จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ใส่ในช่องใส่ข้อความที่ช่องของ Select f from table
2. Rotor slot leakage สามารถหาได้โดย นำค่า Ratio b/a_2 และ Ratio a_1/a_2 ที่โปรแกรมคำนวณมาให้ ไปหาค่าที่เหมาะสมจากตารางโดยกกดดูตารางจากปุ่มกด "Table" จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ใส่ในช่องใส่ข้อความที่ช่องของ Select f from table
3. ค่า Overhang leakage สามารถหาได้โดย นำค่า Ratio coil span per pole pitch ที่โปรแกรมคำนวณมาให้ ไปหาค่าที่เหมาะสมจากตารางโดยกกดดูตารางจากปุ่มกด "Table" จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ใส่ในช่องใส่ข้อความที่ช่องของ Select Ks from table
4. เลือกรชนิดของตัวนำในสเตเตอร์โดยเลือกรชนิดของโลหะคือ อะลูมิเนียม หรือ ทองแดงปกติจะเป็นทองแดง
5. การ Cooling สามารถเลือกปรับค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้
 - Value of cooling ค่ามาตรฐานคือ 25 C'
 - Value barometric height
 - Value pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Fan efficiency
- Constant of Oil cooling
- 6. ค่า Temperature Rise สามารถเลือกปรับค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้
 - Co-efficient
 - Maximum temperature rise คือค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ค่ามาตรฐานคือ 50 C'
- 7. Torque ในส่วนนี้ให้กรอก ความเร็วของโรเตอร์

Stator	Rotor	No-load	Short circuit & Equivalent
Short circuit, Temperature rise and Torque			
Stator leakage Stator b/a^2 is <input type="text"/> Stator a^1/a^2 is <input type="text"/> <input type="button" value="Table"/> <input type="text" value="0.9"/>	Cooling Air type Value of cooling <input checked="" type="radio"/> 25 C' <input type="radio"/> C' Value barometric height <input checked="" type="radio"/> 760 mm per mercury <input type="text"/> mm per mercury Value pressure <input type="radio"/> 1000 <input checked="" type="radio"/> 2000 <input type="radio"/> <i>1000 to 2000 N/sq.m</i> Fan efficiency <input type="radio"/> 0.3 <input checked="" type="radio"/> 0.4 <input type="radio"/> <i>Usually 0.2 to 0.4</i> Oil type Constant of Oil cooling <input checked="" type="radio"/> 0.4 <input type="radio"/> <i>Usually 0.35 to 0.5</i>	Temperature Rise Select Co-efficient from table <input checked="" type="radio"/> 0.03 <input type="radio"/> 0.04 <input type="radio"/> 0.05 <input type="radio"/> <i>Usually 0.03 to 0.05</i> Maximum temperature rise <input type="radio"/> 40 <input checked="" type="radio"/> 50 <input type="radio"/> 60 <input type="radio"/> <i>Usually 50 c'</i> Torque Rotor Speed <input type="text" value="1400"/> r.p.m. <input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Cancel"/>	Material of stator Aluminium <input type="radio"/> Copper <input checked="" type="radio"/>

รูป 5.7 หน้าจอข้อมูลอินพุตของ Short circuit current and Equivalent

จากการออกแบบโดยการป้อนค่าอินพุตแต่ละแท็บ ทั้งหมดแล้ว จากนั้นทำการคลิกปุ่ม “Calculate” จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณ และแสดงค่าเอาต์พุต โดยจะแสดงเป็นลักษณะแท็บ แบ่งเป็น 8 แท็บ ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Main & Rating
- Stator
- Stator Slot Dimensions
- Rotor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rotor Slot Dimension
- No load & Short circuit
- Performance & Equivalent
- Picture of Motor

การแสดงค่าจากการคำนวณในส่วนของ Main & Rating สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่างๆ ได้ดังนี้

Performance & Equivalent	Stator Slot Dimension	Rotor Slot Dimension	Picture of Motor																																
Main & Rating	Stator	Rotor	Noload & Short circuit																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Rating</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Full load output</td> <td>746 Watt</td> </tr> <tr> <td>Line voltage</td> <td>380 Volt</td> </tr> <tr> <td>Frequency</td> <td>50 Hz</td> </tr> <tr> <td>Phase</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Efficiency</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>Power factor</td> <td>0.85</td> </tr> <tr> <td>Number of pole</td> <td>4 pole</td> </tr> <tr> <td>Synchronous speed</td> <td>25 r.p.s</td> </tr> <tr> <td>KVA input</td> <td>1.35 Kva</td> </tr> <tr> <td>Full load line current</td> <td>2.05 A</td> </tr> </tbody> </table>	Rating		Full load output	746 Watt	Line voltage	380 Volt	Frequency	50 Hz	Phase	3	Efficiency	0.65	Power factor	0.85	Number of pole	4 pole	Synchronous speed	25 r.p.s	KVA input	1.35 Kva	Full load line current	2.05 A		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Loading</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Specific magnetic loading</td> <td>0.507 Tesla</td> </tr> <tr> <td>Specific electric loading</td> <td>20565 Ampere/conductor/metre</td> </tr> <tr> <td>Output co-efficient</td> <td>109.53</td> </tr> <tr> <td>D^2L</td> <td>493.1 cubic-cm</td> </tr> </tbody> </table>	Loading		Specific magnetic loading	0.507 Tesla	Specific electric loading	20565 Ampere/conductor/metre	Output co-efficient	109.53	D^2L	493.1 cubic-cm	
Rating																																			
Full load output	746 Watt																																		
Line voltage	380 Volt																																		
Frequency	50 Hz																																		
Phase	3																																		
Efficiency	0.65																																		
Power factor	0.85																																		
Number of pole	4 pole																																		
Synchronous speed	25 r.p.s																																		
KVA input	1.35 Kva																																		
Full load line current	2.05 A																																		
Loading																																			
Specific magnetic loading	0.507 Tesla																																		
Specific electric loading	20565 Ampere/conductor/metre																																		
Output co-efficient	109.53																																		
D^2L	493.1 cubic-cm																																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Main dimension</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stator bore</td> <td>8.19 cm</td> </tr> <tr> <td>Gross core length</td> <td>7.35 cm</td> </tr> <tr> <td>Gross iron length</td> <td>7.35 cm</td> </tr> <tr> <td>Net iron length</td> <td>6.62 cm</td> </tr> <tr> <td>Pole pitch</td> <td>6.43 cm</td> </tr> </tbody> </table>			Main dimension		Stator bore	8.19 cm	Gross core length	7.35 cm	Gross iron length	7.35 cm	Net iron length	6.62 cm	Pole pitch	6.43 cm																				
Main dimension																																			
Stator bore	8.19 cm																																		
Gross core length	7.35 cm																																		
Gross iron length	7.35 cm																																		
Net iron length	6.62 cm																																		
Pole pitch	6.43 cm																																		

รูป 5.8 หน้าจอข้อมูลเอาต์พุตของ Main dimension

Ratingแบ่งออกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- กำลังไฟฟ้าเต็มพิกัด(Full load output)
- พิกัดแรงดัน(Line voltage)
- ความถี่ไฟฟ้า(Frequency)
- จำนวนเฟส(Phase)
- ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency)
- ค่าปรับปรุงกำลังไฟฟ้า (Power factor)
- จำนวนขั้วแม่เหล็ก(Number of pole)
- ความเร็วรอบ(Synchronous speed)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- KVA input
- กระแสเต็มพิกัด(Full load line voltage)

Loadingแบ่งออกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- Specific magnetic loading
- Specific electric loading
- Output co-efficient

ขนาดของตัวมอเตอร์(Main Dimension) แบ่งออกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- เส้นผ่านศูนย์กลางของสเตเตอร์(Stator bore)
- ความยาวรวมของมอเตอร์(Gross core length)
- ความยาวทั้งหมดของสเตเตอร์(Gross iron length)
- ความยาวสุทธิของเหล็กสเตเตอร์(Net iron length)
- ความยาวแต่ละขั้วแม่เหล็ก(Pole pitch)

การแสดงค่าจากการคำนวณ ในส่วนของ Stator สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Performance & Equivalent	Stator Slot Dimension	Rotor Slot Dimension	Picture of Motor
Main & Rating	Stator	Rotor	No-load & Short circuit
Type of stampings	0.5 Thick Lohys	Slot pitch	0.715 cm
Type of winding	Chain winding	Conductor per slot	72
Connection	Star	Conductor bare diameter	0.75 mm
Phase voltage	219.393 Volt	Insulate Conductor	0.8 mm
Flux per pole	0.0024 mWb	Conductor area	0.44 sq.mm
Turn per phase	432	Current density	4.53 A/sq.mm
Number of slots	36	Length of mean turn	39.9 cm
Slots/Pole	9 Slot	Phase resistance	8.191 ohm
Slot/Pole/Phase	3 Slot	Copper loss at full load	103.413 Watt
Distribution factor	1.	Depth of stator core	0.012 m
Pitch factor	0.985	Outer diameter of stator	13.517 cm
Winding factor	0.985		

รูป 5.9 หน้าจอข้อมูลเอาต์พุตของ Stator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะแผ่นของเหล็กสเตเตอร์(Type of stamping)
- ลักษณะการพันขดลวด(Type of winding)
- ลักษณะการต่อ(Connection)
- แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส(Phase voltage)
- สนามแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก(Flux per pole)
- จำนวนรอบขดลวดต่อเฟส(Turn per phase)
- จำนวนร่องขดลวด(Number of slot)
- จำนวนร่องขดลวดต่อขั้วแม่เหล็ก(Slot/pole)
- ร่องขดลวดต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส(Slot/Pole/Phase)
- Distribution factor
- Pitch factor
- Winding factor
- Slot pitch
- จำนวนขดลวดตัวนำแต่ละร่อง(Conductor per slot)
- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด(Conductor Dimeter)
- Insulate Conductor
- พื้นที่ของขดลวดตัวนำ(Conductor Area)
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า(Current density)
- Length of meanturn
- ค่าความต้านต่อเฟส(Phase resitance)
- Copper loss at full load
- Depth of stator core
- Outer diameter of stator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงค่าจากการคำนวณในส่วนของ Stator slot dimensions สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Main & Rating	Stator	Rotor	No-load & Short ci
Performance & Equivalent	Stator Slot Dimension	Rotor Slot Dimension	Picture of Motor

Calculate from Area (1 ROUND BOTTOM SLOT)

Slot opening (Wos)	1.81	mm
Depth of tip (dos)	0.75	mm
Depth of mounth (d1s)	1.	mm
Width of tooth (Wts)	3.54	mm
Total depth of slot (ds)	14.14	mm
Radial of slot(r3s)	2.795	mm
Depth of slot (d4s)	9.59	mm
Width of bottom slot (W3s)	5.59	mm
Width of above slot (W1s)	3.91	mm

Calculate from Dimention (2 ROUND BOTTOM SLOT)

Slot opening (Wos)	1.81	mm
Depth of tip (dos)	0.75	mm
Depth of mounth (d1s)	1.	mm
Width of tooth (Wts)	3.54	mm
Total depth of slot (ds)	14.71	mm
Radial of slot(r3s)	2.835	mm
Depth of slot (d4s)	10.12	mm
Width of bottom slot (W3s)	5.67	mm
Width of above slot (W1s)	3.91	mm

รูป 5.10 หน้าจอข้อมูลเอาท์พุทของ Stator slot dimensions

- Slot opening
- Depth of tip
- Depth of mounth
- Width of tooth
- Total depth of stator
- Radial of stator
- Depth of stator
- Width of bottom slot
- Width of above slot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงค่าจากการคำนวณในส่วนของ Rotor สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Motor Specifications	Stator	Rotor	No-load & Short
Length of air gap	0.2 mm	Resistance of each bar	0.1105 m-ohm
Diameter of rotor	8.15 cm	Copper loss in bar	1.131 Watt
Type pf winding	Squirrel cage	Total Copper loss in bar	49.78 Watt
Number of slots	44	End ring current	354.1 A
Slot/Pole/Phase	3.67 Slot	End ring area	89.194 sq.mm
Conductors per slot	1	End ring mean diameter	6.528 cm
Winding factor	1	End ring current density	3.97 A/sq.mm
Slot pitch	0.58 cm	Resistance of each ring	0.069 m-ohm
Rotor bar current	101.17 A	Copper loss in end ring	17.305 Watt
Rotor bar area	20.3 sq.mm	Total rotor copper loss	67.085 Watt
Rotor bar length	7.48 cm	Resistance of rotor	7.354 ohm
Rotor bar current density	4.98 A/sq.mm	Depth of rotor core	0.125 mm

รูป 5.11 หน้าจอข้อมูลเอาต์พุตของ Rotor

- ความยาวของช่องว่างอากาศ(Length of Air gap)
- เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์(Diameter of rotor)
- Type p.f. winding
- จำนวนร่องตัวนำ(Number of slot)
- ร่องขดลวดต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส(Slot/Pole/Phase)
- จำนวนตัวนำต่อร่องตัวนำ(Conductor per slot)
- ค่าปรับปรุงการพัน(Winding factor)
- Slot pitch
- กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์บาร์(Rotor bar current)
- Rotor bar area
- Rotor bar length
- Rotor bar current density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Resistance of each bar
- Copper loss in bar
- Total copper loss in bar
- End ring current
- End ring area
- End ring mean diameter
- End ring current density
- Resistance of end ring
- Copper loss in end ring
- Total Copper loss
- Resistance of rotor
- Depth of rotor core

การแสดงค่าจากการคำนวณในส่วนของ Rotor Slot Dimensions สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Rating	Stator	Rotor	Noload & Short cir
Equivalent	Stator Slot Dimension	Rotor Slot Dimension	Picture of Motor

Rotor Slot Dimension		
Width of above slot (Wtr)	2.997	mm
Width of bottom slot (Wtb)	1.883	mm
Width of tooth (wtr)	2.752	mm
Depth of tip (drr)	0.5	mm
Radial of above slot (ra)	1.499	mm
Radial of bottom slot (rb)	0.941	mm
Depth of slot (ht)	8.743	mm

รูป 5.12 หน้าจอข้อมูลเอาต์พุตของ Rotor slot dimensions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Width of above slot
- Width of bottom slot
- Width of tooth
- Depth of tip
- Radial of above slot
- Radial of bottom slot
- Depth of slot

การแสดงค่าจากการคำนวณในส่วนของ No load & Short circuit สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Parameter & Equivalent	Stator Slot Dimension		Rotor Slot Dimension		Picture of Motor
Value & Rating	Stator		Rotor		No load & Short circuit
No load current			Short circuit current		
Magnetizing mmf per pole	334.827		Stator slot leakage	3.004	ohm
Phase magnetizing current	1.344	A	Stator slot leakage	3.135	ohm
Magnetizing reactance	163.227	ohm	Slot leakage reactance	6.139	ohm
Core loss	57.683	Watt	Overhang leakage reactance	4.302	ohm
Friction and winding loss	11.19	Watt	Zigzag leakage reactance	2.803	ohm
No load loss	68.873	Watt	Skew leakage reactance	1.652	ohm
Loss component	0.105	A	Total leakage reactance	14.897	ohm
Phase no load current	1.348	A	Total resistance	15.545	ohm
Line no load current	1.348	A	Short circuit impedance	21.531	ohm
No load power factor	0.078		Phase short circuit current	10.19	A
			Line short circuit current	10.19	A
			Short circuit P.F	0.722	

รูป 5.13 หน้าจอข้อมูลเอาต์พุตของ No load current and Short circuit current

- Magnetizing mmf per pole
- Phase magnetizing current
- Core loss
- Friction and winding loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- No load loss
- Loss component
- Phase no load current
- No load power factor
- Stator slot leakage
- Slot leakage reactance
- Overhang leakage reactance
- Zigzag leakage reactance
- Skew leakage reactance
- Total leakage reactance
- Total resistance
- Short circuit impedance
- Phase short circuit current
- Line short circuit current
- short circuit p.f.



การแสดงค่าจากการคำนวณในส่วนของ Performance & Equivalent สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Main & Rating	Stator		Rotor		No-load & Short ci
Performance & Equivalent	Stator Slot Dimension		Rotor Slot Dimension		Picture of Motor
Performance (full load)			Equipvalent circuit		
Loss	239.371	Watt	R1	8.191	ohm
Output	746.	Watt	R2	7.354	ohm
Input	985.371	Watt	Rc	2096.61	ohm
Efficiency	75.708	Percent	X1	8.986	ohm
Slip	8.251	Percent	X2	5.911	ohm
Angle of Skew	0.349	Eletrical Radial	Xm	163.227	ohm
Angle of Skew	10.588	degree mechanical			
Temperature			Torque		
	Temperature rise	50.507 C	Torque load	5.462	N-m
	Volume of air required	0.00163 cubic-metre/s	Torque start	13.946	N-m
	Power required by fan blowing air	0.00816 Kw	Torque maximum	17.273	N-m
	The volume of water required for absorb loss at temperature rising	0.00046 litre/s			
	The amount of oil required for absorb loss at temperature rising	0.00115 litre/s			

รูป 5.14 หน้าจอเอาท์พุทของ Performance & Equivalent

- ค่าความสูญเสีย(Loss)
- เอาท์พุท(Output)
- อินพุท(Input)
- ประสิทธิภาพ(Efficiency)
- สลิป(Slip)
- Angel of skew

Equivalent circuit แบ่งออกได้เป็น

- R1,R2,Rc,X1,X2,Xm

Temperature แบ่งออกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Volume of air required
- Power required by fan blowing air
- The volume of water required for above loss at temperature rising
- The amount of oil required for above loss at temperature rising

Torque แบ่งออกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- Torque load
- Torque start
- Torque maximum

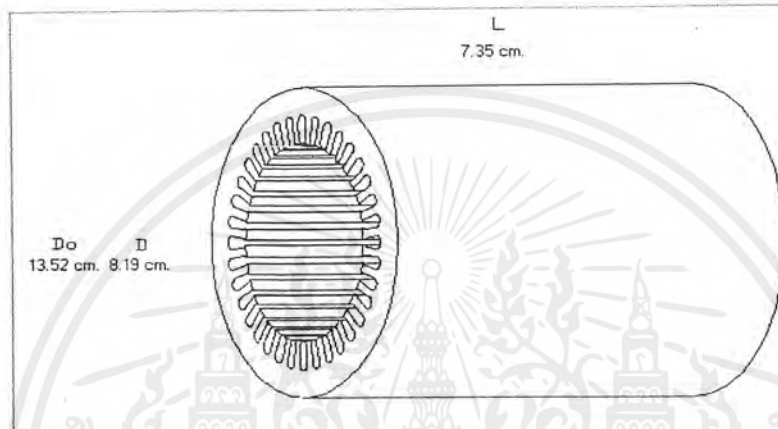


5.2.2 การแสดงค่าเอาต์พุตของโปรแกรม

การแสดงผลจากการคำนวณในส่วนของ Picture of Motor สามารถแบ่งได้เป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Main & Rating	Stator	Rotor	No-load & Short circuit
Performance & Equivalent	Stator Slot Dimension	Rotor Slot Dimension	Picture of Motor

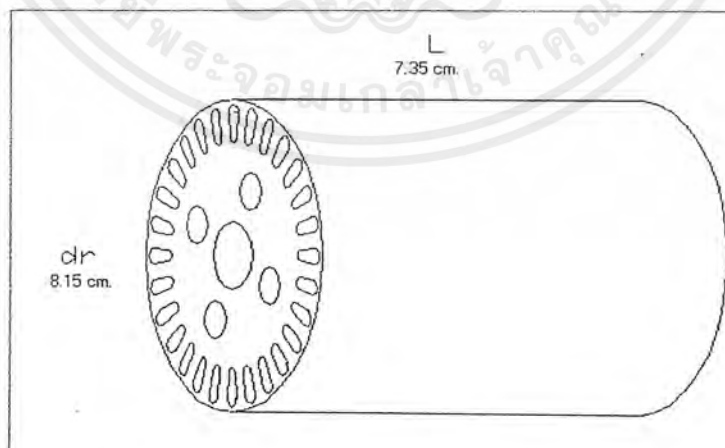
STATOR DIMENSION | ROTOR DIMENSION | STATOR SLOT | ROTOR SLOT | END RING |



รูป 5.15 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Stator

Main & Rating	Stator	Rotor	No-load & Short circuit
Performance & Equivalent	Stator Slot Dimension	Rotor Slot Dimension	Picture of Motor

STATOR DIMENSION | **ROTOR DIMENSION** | STATOR SLOT | ROTOR SLOT | END RING |



รูป 5.16 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Rotor

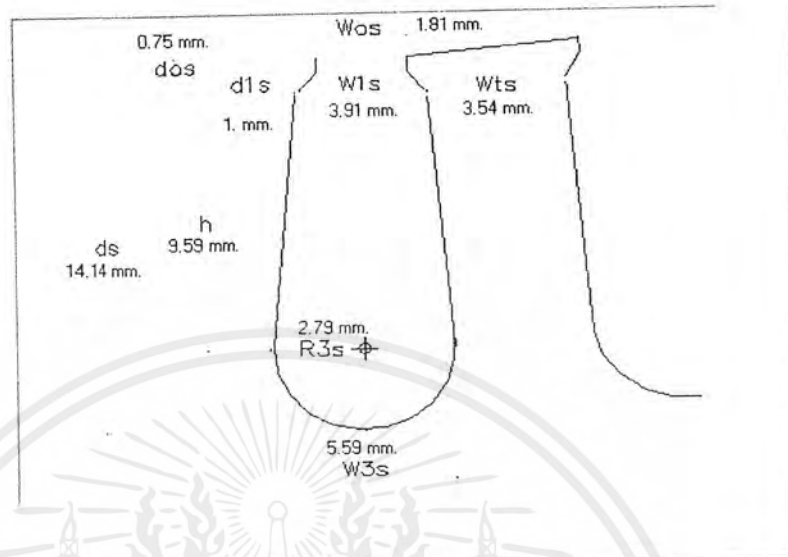
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STATOR DIMENSION | ROTOR DIMENSION | **STATOR SLOT** | ROTOR SLOT | END RING |

Select Calculate

Calculate from
Area

Calculate from
Dimension



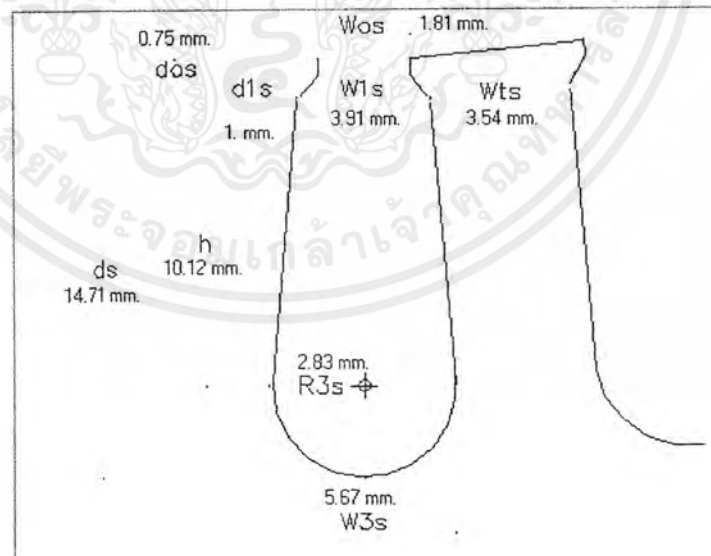
รูป 5.17 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Stator slot โดยการคำนวณจาก Area

STATOR DIMENSION | ROTOR DIMENSION | **STATOR SLOT** | ROTOR SLOT | END RING |

Select Calculate

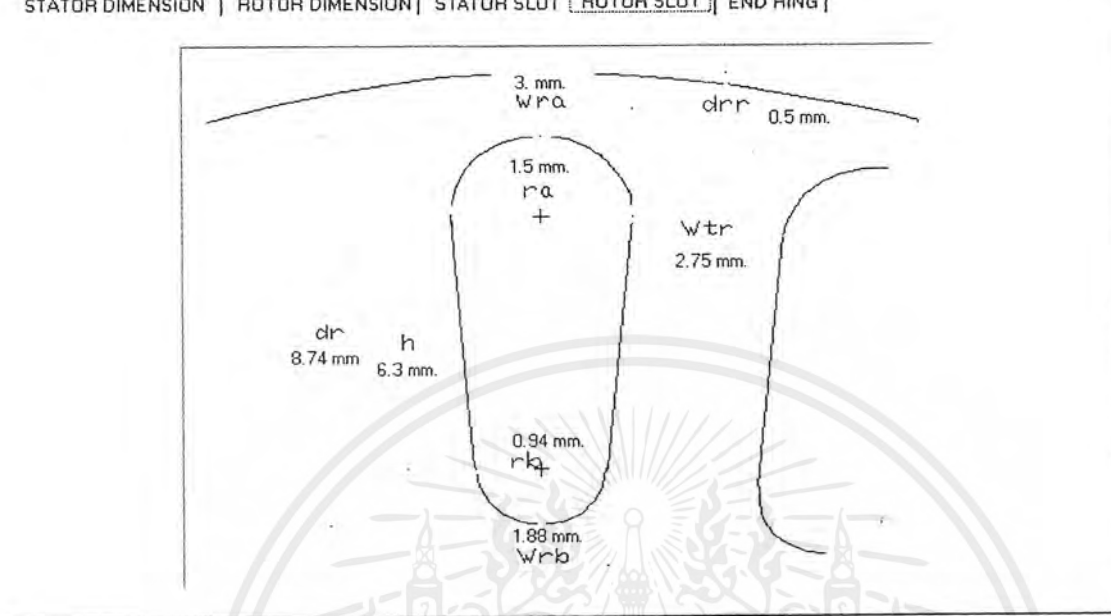
Calculate from
Area

Calculate from
Dimension



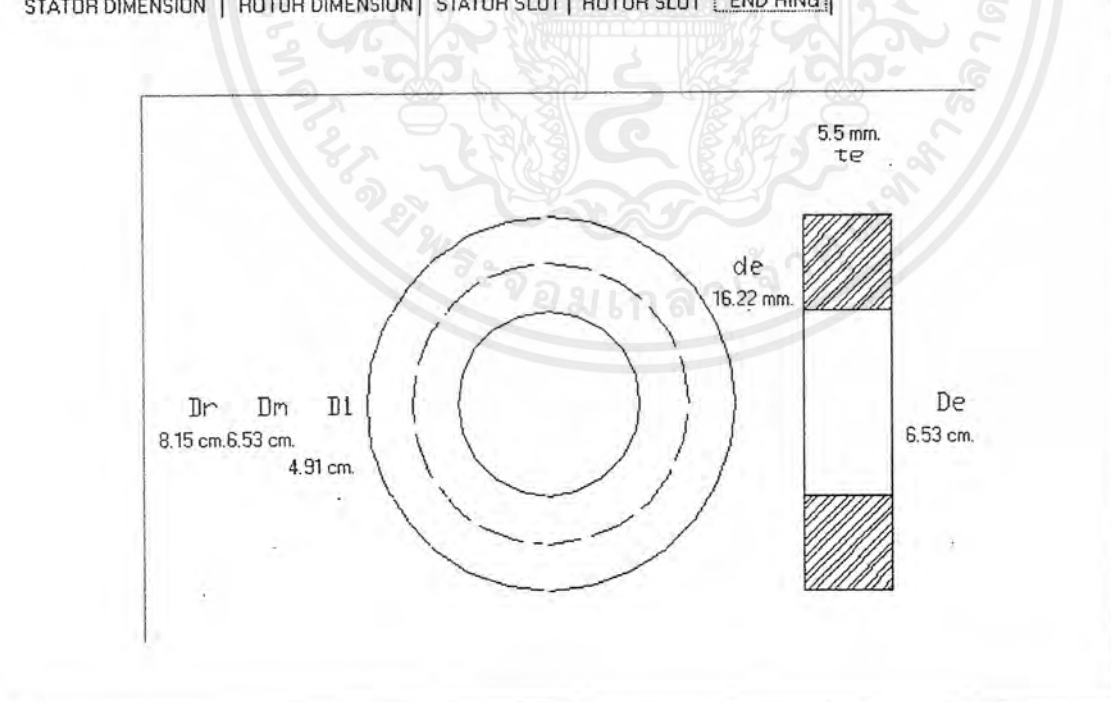
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STATOR DIMENSION | ROTOR DIMENSION | STATOR SLOT | ROTOR SLOT | END RING |



รูป 5.18 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ Rotor slot

STATOR DIMENSION | ROTOR DIMENSION | STATOR SLOT | ROTOR SLOT | END RING |



รูป 5.19 แสดงภาพขนาดต่างๆในส่วนของ End ring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 การแสดงข้อผิดพลาดในโปรแกรม

1. ข้อผิดพลาดเนื่องจากใส่จุดทศนิยมเกินสองตำแหน่ง



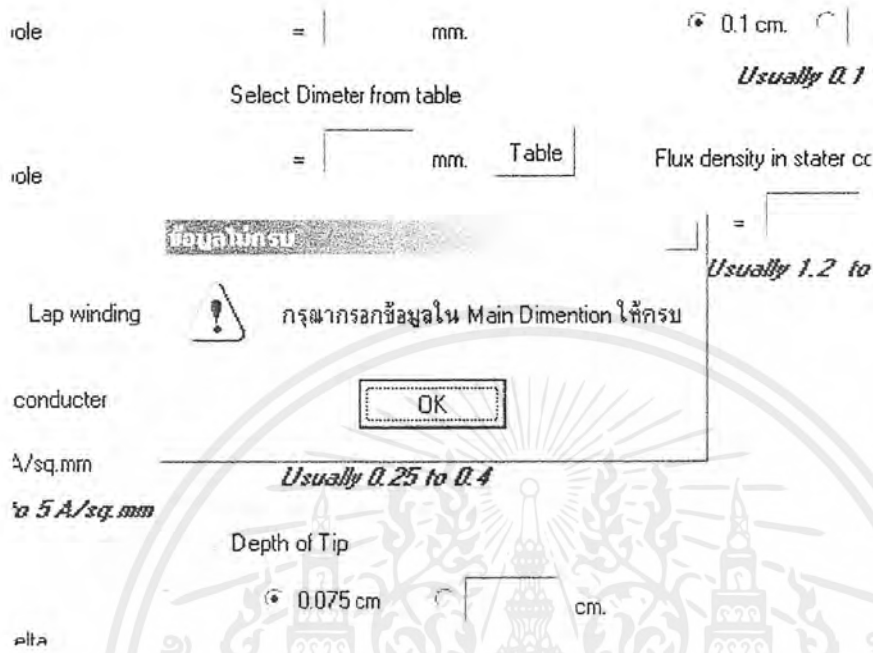
รูป 5.20 แสดงข้อผิดพลาดเนื่องจากใส่จุดทศนิยมเกินสองตำแหน่ง

2. ข้อผิดพลาดเนื่องจากใส่ข้อมูลที่ไม่ใช่ตัวเลข



รูป 5.21 แสดงข้อผิดพลาดเนื่องจากใส่ข้อมูลที่ไม่ใช่ตัวเลข

3. การเตือนให้ใส่ข้อมูลให้ครบก่อนจะเปลี่ยนแท็บต่อไป



รูป 5.22 แสดงการเตือนให้ใส่ข้อมูลให้ครบก่อนจะเปลี่ยนแท็บต่อไป

5.3 แสดงตารางที่ใช้ในโปรแกรม

Table 1(ตาราง 5.1)

Output Kw	Efficiency		Power Factor	
	P=4	P=8	P=4	P=8
Squirrel cage				
0.75	0.72	--	0.75	--
2.20	0.81	0.75	0.82	0.66
3.70	0.83	0.81	0.84	0.69
7.50	0.86	0.82	0.87	0.78
15.00	0.88	0.85	0.89	0.83
37.00	0.90	0.89	0.90	0.85
75.00	0.91	0.90	0.92	0.89
Slip ring				
7.50	0.84	0.83	0.84	0.70
15.00	0.87	0.85	0.89	0.80
37.00	0.89	0.88	0.90	0.83
75.00	0.91	0.89	0.92	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2(ตาราง 5.2)

Values of ac

Kw(X)	ac(Y)	Kw(X)	ac(Y)	Kw(X)	ac(Y)
1-9	21000	51-55	25800	101-103	27800
10-13	22000	56-59	25900	104-106	27900
14-20	23000	60	26000	107-110	28000
21-22	23200	61-62	26200	111-113	28100
23-24	23400	63-69	26400	114-116	28200
25-26	23600	70	26500	117-120	28300
27-28	23800	71-72	26600	121-123	28400
29-30	24000	73-74	26700	124-126	28500
31-32	24200	75-76	26800	127-130	28600
33-34	24400	77-79	26900	131-135	28700
35-36	24600	80	27000	136-140	28800
37-38	24800	81-82	27100	141-145	28900
39-40	25000	83-84	27200	146-150	29000
41-42	25200	85-86	27300	151	29100
43-44	25300	87-88	27400	152-153	29200
45-46	25400	89-90	27500	154-156	29300
47-48	25500	91-95	27600	157-158	29400
49-50	25700	96-100	27700	159-160	29500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3(ตาราง 5.3)**Specific Loading**

3 phase , 50 Hz Machines				
Squirrel cage induction				
D	Li/D(maximum)	B_{av}	ac	δ
0.10	0.80	0.30	11000	4.0
0.15	0.75	0.35	15000	3.7
0.20	0.70	0.40	18000	3.6
0.30	0.65	0.43	22500	3.5
0.40	0.62	0.45	26000	3.5
0.50	0.60	0.46	24000	3.5
0.75	0.50	0.47	33000	3.5
1.00	0.42	0.48	35000	3.5
1.50	0.33			
2.00	0.30			
2.50	0.30			
3.00	0.30			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 4 (ตาราง 5.4)
Round Copper Wire

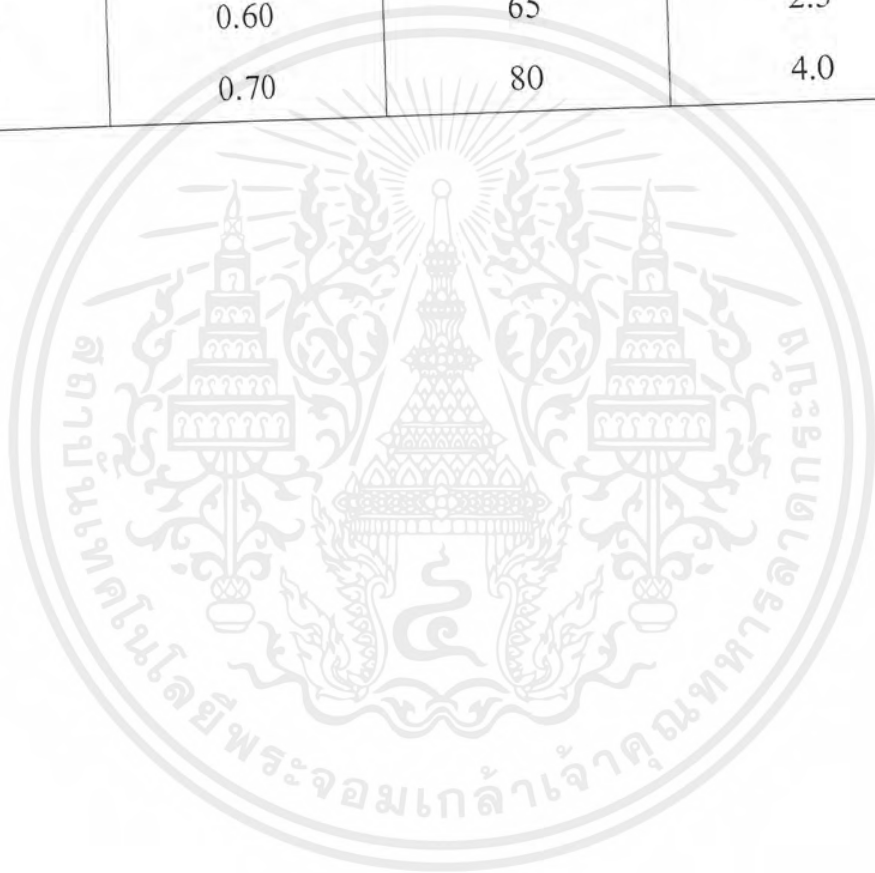
Nominal Conductor diamiter	Overall diameter			
	Fine Covering	Midium Covering	Thick Covering	Extra thick Covering
mm	mm	mm	mm	mm
0.050	0.060	0.065	-	-
0.060	0.073	0.078	-	-
0.071	0.084	0.092	-	-
0.080	0.095	0.105	0.118	-
0.090	0.105	0.115	0.128	-
0.100	0.118	0.128	0.141	-
0.112	0.132	0.143	0.156	-
0.125	0.146	0.159	0.172	-
0.132	0.155	0.168	0.181	-
0.140	0.163	0.176	0.191	-
0.150	0.173	0.186	0.201	-
0.160	0.185	0.198	0.213	-
0.170	0.198	0.211	0.226	-
0.180	0.208	0.223	0.238	-
0.195	0.224	0.239	0.257	-
0.200	0.230	0.246	0.264	-
0.212	0.242	0.258	0.276	-
0.224	0.254	0.272	0.290	-
0.236	0.266	0.284	0.302	-
0.250	0.283	0.301	0.319	0.344
0.258	0.291	0.309	0.327	0.352
0.265	0.299	0.317	0.335	0.362
0.280	0.316	0.334	0.351	0.379
0.300	0.336	0.354	0.372	0.400
0.307	0.345	0.362	0.380	0.408
0.315	0.354	0.372	0.389	0.417
0.335	0.375	0.393	0.410	0.441
0.355	0.397	0.415	0.432	0.465
0.375	0.418	0.438	0.455	0.489
0.400	0.445	0.465	0.483	0.518
0.425	0.472	0.493	0.513	0.549
0.462	0.511	0.531	0.551	0.588
0.475	0.526	0.546	0.566	0.603
0.500	0.511	0.571	0.591	0.630
0.530	0.581	0.602	0.623	0.662
0.560	0.612	0.635	0.655	0.696
0.600	0.654	0.677	0.697	0.738
0.630	0.684	0.707	0.728	0.768
0.670	0.727	0.750	0.771	0.812
0.710	0.768	0.791	0.814	0.852
0.730	0.788	0.811	0.834	0.874
0.750	0.808	0.831	0.854	0.895
0.800	0.861	0.884	0.907	0.950
0.850	0.912	0.935	0.958	1.001
0.925	0.990	1.016	1.039	1.085
0.950	1.015	1.041	1.064	1.110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 5(ตาราง 5.5)

Air Gap Lengths for 4 Pole Machines

D cm	Lg mm	D cm	Lg mm
15	0.35	45	1.3
20	0.50	55	1.8
25	0.60	65	2.5
30	0.70	80	4.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6(ตาราง 5.6)

Carter's Air Gap Co – efficient

Semi closed slots

Ratio $\left(\frac{\text{Slot Opening}}{\text{Gap Length}} \right)$	Carter's Air Gap Co – efficient
X	Y
0.0	0.00
0.5	0.10
1.0	0.20
1.5	0.30
2.0	0.35
2.5	0.40
3.0	0.47
3.5	0.50
4.0	0.54
4.5	0.57
5.0	0.60
5.5	0.63
6.0	0.66
6.5	0.68
7.0	0.71
7.5	0.73
8.0	0.75
8.5	0.78
9.0	0.79
9.5	0.80
10.0	0.83
10.5	0.85
11.0	0.88
11.5	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 7(ตาราง 5.7)
 B-H curve for Electrical Steel (non oriented)
 Loys stampings(dynamo grade)

Y B:wb/m ²	X At:A/m	Y B:wb/m ²	X At:A/m	Y B:wb/m ²	X At:A/m
0.000	0	0.675	115	1.350	450
0.025	20	0.700	120	1.375	500
0.050	33	0.725	130	1.400	575
0.075	43	0.750	140	1.425	600
0.100	47	0.775	145	1.450	700
0.125	54	0.800	150	1.475	825
0.150	58	0.825	155	1.500	970
0.175	63	0.850	165	1.525	1110
0.200	66	0.875	170	1.550	1350
0.225	70	0.900	175	1.575	2250
0.250	73	0.925	180	1.600	2500
0.275	76	0.950	185	1.625	2800
0.300	78	0.975	190	1.650	3400
0.325	80	1.000	200	1.675	4000
0.350	83	1.025	210	1.700	4800
0.375	86	1.050	220	1.725	7000
0.400	88	1.075	230	1.750	7500
0.425	90	1.100	250	1.775	8000
0.450	93	1.125	255	1.800	10000
0.475	95	1.150	270	1.825	12000
0.500	97	1.175	280	1.850	13000
0.525	98	1.200	290	1.875	15000
0.550	100	1.225	325	1.900	17000
0.575	103	1.250	350	1.925	18000
0.600	106	1.275	375	1.950	21000
0.625	108	1.300	400	1.975	23000
0.650	111	1.325	425	2.000	26000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 8.1(ตาราง 5.8)

Loss curve of electrical sheet steel (Non oriented) 0.5 mm thick type 1-48 Quality

X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg
0.40	0.275	0.88	1.400	1.36	3.400
0.42	0.300	0.90	1.475	1.38	3.500
0.44	0.350	0.92	1.500	1.40	3.600
0.46	0.400	0.94	1.600	1.42	3.700
0.48	0.425	0.96	1.650	1.44	3.900
0.50	0.500	0.98	1.675	1.46	4.100
0.52	0.550	1.00	1.750	1.48	4.200
0.54	0.575	1.02	1.800	1.50	4.300
0.56	0.600	1.04	1.900	1.52	4.400
0.58	0.650	1.06	1.950	1.54	4.600
0.60	0.700	1.08	2.000	1.56	4.700
0.62	0.750	1.10	2.100	1.58	4.800
0.64	0.775	1.12	2.200	1.60	5.200
0.66	0.800	1.14	2.275	1.62	5.300
0.68	0.850	1.16	2.375	1.64	5.375
0.70	0.900	1.18	2.400	1.66	5.500
0.72	0.950	1.20	2.550	1.68	5.650
0.74	1.000	1.22	2.700	1.70	5.800
0.76	1.050	1.24	2.750	1.72	6.000
0.78	1.100	1.26	2.850	1.74	6.100
0.80	1.150	1.28	3.000	1.76	6.300
0.82	1.200	1.30	3.100	1.78	6.500
0.84	1.300	1.32	3.200	1.80	6.700
0.86	1.350	1.34	3.300		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 8.2 (ตาราง 5.8)

Loss curve of electrical sheet steel (Non oriented) 0.5 mm thick type2-41 Quality

X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg
0.40	0.300	0.88	1.500	1.36	3.700
0.42	0.350	0.90	1.600	1.38	3.850
0.44	0.400	0.92	1.650	1.40	4.000
0.46	0.450	0.94	1.700	1.42	4.100
0.48	0.500	0.96	1.800	1.44	4.250
0.50	0.550	0.98	1.850	1.46	4.400
0.52	0.600	1.00	1.950	1.48	4.550
0.54	0.650	1.02	2.000	1.50	4.650
0.56	0.700	1.04	2.100	1.52	4.800
0.58	0.750	1.06	2.200	1.54	4.950
0.60	0.775	1.08	2.250	1.56	5.100
0.62	0.800	1.10	2.300	1.58	5.300
0.64	0.825	1.12	2.400	1.60	5.400
0.66	0.850	1.14	2.450	1.62	5.600
0.68	0.900	1.16	2.600	1.64	5.700
0.70	0.950	1.18	2.700	1.66	5.900
0.72	1.000	1.20	2.800	1.68	6.000
0.74	1.050	1.22	2.900	1.70	6.200
0.76	1.100	1.24	3.000	1.72	6.400
0.78	1.150	1.26	3.100	1.74	6.500
0.80	1.200	1.28	3.200	1.76	6.700
0.82	1.300	1.30	3.300	1.78	6.900
0.84	1.400	1.32	3.450	1.80	7.100
0.86	1.450	1.34	3.600		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 8.3(ตาราง 5.8)

Loss curve of electrical sheet steel (Non oriented) 0.5 mm thick type3-42Quality

X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg
0.40	0.350	0.88	1.800	1.36	4.200
0.42	0.375	0.90	1.850	1.38	4.300
0.44	0.400	0.92	1.900	1.40	4.500
0.46	0.450	0.94	2.000	1.42	4.650
0.48	0.550	0.96	2.100	1.44	4.800
0.50	0.600	0.98	2.150	1.46	5.000
0.52	0.625	1.00	2.250	1.48	5.100
0.54	0.700	1.02	2.300	1.50	5.250
0.56	0.750	1.04	2.450	1.52	5.450
0.58	0.800	1.06	2.500	1.54	5.600
0.60	0.850	1.08	2.600	1.56	5.800
0.62	0.900	1.10	2.700	1.58	6.000
0.64	0.950	1.12	2.800	1.60	6.200
0.66	1.000	1.14	2.900	1.62	6.350
0.68	1.050	1.16	3.000	1.64	6.600
0.70	1.100	1.18	3.100	1.66	6.800
0.72	1.150	1.20	3.200	1.68	7.000
0.74	1.200	1.22	3.300	1.70	7.200
0.76	1.300	1.24	3.500	1.72	7.400
0.78	1.400	1.26	3.550	1.74	7.600
0.80	1.500	1.28	3.700	1.76	7.900
0.82	1.550	1.30	3.800	1.78	8.100
0.84	1.600	1.32	3.900	1.80	8.500
0.86	1.700	1.34	4.000		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 8.4(ตาราง 5.8)

Loss curve of electrical sheet steel (Non oriented) 0.5 mm thick type4-Medium Resistance

X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg
0.40	0.350	0.88	2.000	1.36	4.700
0.42	0.450	0.90	2.050	1.38	4.850
0.44	0.550	0.92	2.150	1.40	5.050
0.46	0.600	0.94	2.250	1.42	5.200
0.48	0.650	0.96	2.350	1.44	5.400
0.50	0.700	0.98	2.400	1.46	5.600
0.52	0.750	1.00	2.500	1.48	5.800
0.54	0.800	1.02	2.600	1.50	5.900
0.56	0.900	1.04	2.700	1.52	6.100
0.58	0.950	1.06	2.750	1.54	6.300
0.60	1.000	1.08	2.800	1.56	6.500
0.62	1.100	1.10	2.950	1.58	6.700
0.64	1.150	1.12	3.050	1.60	6.950
0.66	1.250	1.14	3.150	1.62	7.150
0.68	1.300	1.16	3.300	1.64	7.400
0.70	1.350	1.18	3.400	1.66	7.750
0.72	1.400	1.20	3.500	1.68	7.800
0.74	1.500	1.22	3.650	1.70	8.100
0.76	1.550	1.24	3.800	1.72	8.400
0.78	1.660	1.26	3.900	1.74	8.600
0.80	1.650	1.28	4.100	1.76	8.900
0.82	1.750	1.30	4.200	1.78	9.200
0.84	1.850	1.32	4.400	1.80	9.400
0.86	1.900	1.34	4.550		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 8.5 (ตาราง 5.8)

Loss curve of electrical sheet steel (Non oriented) 0.5 mm thick type5-Special Lohys

X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg
0.40	0.400	0.88	2.350	1.36	5.500
0.42	0.450	0.90	2.400	1.38	5.700
0.44	0.550	0.92	2.500	1.40	5.900
0.46	0.600	0.94	2.600	1.42	6.100
0.48	0.700	0.96	2.700	1.44	6.400
0.50	0.800	0.98	2.800	1.46	6.600
0.52	0.850	1.00	2.900	1.48	6.800
0.54	0.900	1.02	3.050	1.50	7.000
0.56	1.000	1.04	3.200	1.52	7.300
0.58	1.100	1.06	3.300	1.54	7.500
0.60	1.150	1.08	3.450	1.56	7.800
0.62	1.200	1.10	3.550	1.58	8.000
0.64	1.300	1.12	3.700	1.60	8.300
0.66	1.400	1.14	3.800	1.62	8.600
0.68	1.450	1.16	3.950	1.64	8.900
0.70	1.550	1.18	4.100	1.66	9.300
0.72	1.650	1.20	4.250	1.68	9.500
0.74	1.700	1.22	4.350	1.70	10.00
0.76	1.800	1.24	4.500		
0.78	1.900	1.26	4.650		
0.80	2.000	1.28	4.800		
0.82	2.100	1.30	4.900		
0.84	2.150	1.32	5.100		
0.86	2.250	1.34	5.300		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 8.6 (ตาราง 5.8)

Loss curve of electrical sheet steel (Non oriented) 0.5 mm thick type6-Lohys

X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg	X B:wb/m ²	Y W/Kg
0.40	0.850	0.88	2.900	1.36	6.500
0.42	0.900	0.90	3.000	1.38	6.700
0.44	0.950	0.92	3.100	1.40	6.900
0.46	1.000	0.94	3.200	1.42	7.200
0.48	1.100	0.96	3.300	1.44	7.400
0.50	1.200	0.98	3.400	1.46	7.600
0.52	1.300	1.00	3.500	1.48	7.800
0.54	1.400	1.02	3.650	1.50	8.000
0.56	1.450	1.04	3.800	1.52	8.250
0.58	1.500	1.06	3.900	1.54	8.500
0.60	1.600	1.08	4.100	1.56	8.800
0.62	1.700	1.10	4.200	1.58	9.000
0.64	1.850	1.12	4.400	1.60	9.400
0.66	1.950	1.14	4.500	1.62	9.600
0.68	2.000	1.16	4.700	1.64	1.000
0.70	2.100	1.18	4.850		
0.72	2.200	1.20	5.000		
0.74	2.300	1.22	5.200		
0.76	2.350	1.24	5.350		
0.78	2.400	1.26	5.500		
0.80	2.500	1.28	5.700		
0.82	2.600	1.30	5.900		
0.84	2.700	1.32	6.100		
0.86	2.750	1.34	6.250		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 9(ตาราง 5.9)**Friction and windage Loss**

Output kW	F and W loss Percent of output
0.75	5.5
3.70	3.5
7.50	2.7
37.0	1.5
75.0	1.2
150	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 10(ตาราง 5.10)**No Load Current**

Output kW	No load current Percent of full load current
0.75	50
3.70	40
15.0	33
37.0	30
75 and above	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 11(ตาราง 5.11)

Overhang Leakage

coil span ratio pole pitch	;X	Factor K_s	;Y
0.500		0.500	
0.525		0.525	
0.550		0.575	
0.575		0.600	
0.600		0.650	
0.625		0.675	
0.650		0.725	
0.675		0.750	
0.700		0.775	
0.725		0.800	
0.750		0.815	
0.775		0.825	
0.800		0.850	
0.825		0.875	
0.850		0.890	
0.875		0.915	
0.900		0.925	
0.925		0.950	
0.950		0.965	
0.975		0.975	
1.000		1.000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 12.1(ตาราง 5.12)

Ratio $\frac{b}{a_2}$	ค่าของ F เมื่อเลือกเส้น a_1/a_2						
	$a_1/a_2=0.3$	$a_1/a_2=0.4$	$a_1/a_2=0.5$	$a_1/a_2=0.6$	$a_1/a_2=0.7$	$a_1/a_2=0.8$	$a_1/a_2=0.9$
	F	F	F	F	F	F	F
0.0	-	-	0.20	-	-	-	-
0.2	-	-	0.30	-	-	-	-
0.4	0.60	0.70	0.45	-	-	-	-
0.6	0.80	0.80	0.60	0.50	0.50	0.40	0.40
0.8	1.00	1.00	0.70	0.60	0.55	0.50	0.45
1.0	1.20	1.10	0.80	0.70	0.65	0.60	0.50
1.2	1.40	1.30	0.95	0.80	0.75	0.65	0.60
1.4	1.55	1.45	1.10	0.95	0.85	0.70	0.70
1.6	1.75	1.60	1.20	1.05	0.90	0.80	0.75
1.8	1.95	1.75	1.35	1.20	1.05	0.90	0.80
2.0	2.10	1.90	1.50	1.30	1.10	1.00	0.90
2.2	2.30	2.10	1.60	1.40	1.20	1.10	0.95
2.4	-	2.20	1.70	1.50	1.30	1.15	1.05
2.6	-	-	1.85	1.60	1.40	1.25	1.15
2.8	-	-	2.00	1.70	1.50	1.30	1.20
3.0	-	-	2.10	1.80	1.60	1.40	1.25
3.2	-	-	2.30	1.95	1.70	1.50	1.35
3.4	-	-	-	2.05	1.80	1.60	1.45
3.6	-	-	-	2.15	1.90	1.75	1.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 12.2(ตาราง 5.12)

Ratio $\frac{b}{a_2}$	ค่าของ F เมื่อเลือกเส้น a_1/a_2						
	$a_1/a_2=1.0$	$a_1/a_2=1.1$	$a_1/a_2=1.2$	$a_1/a_2=1.4$	$a_1/a_2=1.6$	$a_1/a_2=1.8$	$a_1/a_2=2.0$
	F	F	F	F	F	F	F
0.0	0.15	-	-	-	-	-	0.15
0.2	0.20	-	-	-	-	-	0.14
0.4	0.25	-	-	-	-	-	0.15
0.6	0.35	0.30	0.30	0.25	0.25	0.25	0.18
0.8	0.40	0.35	0.35	0.30	0.30	0.27	0.20
1.0	0.45	0.40	0.40	0.35	0.35	0.30	0.22
1.2	0.55	0.50	0.45	0.40	0.40	0.35	0.25
1.4	0.60	0.55	0.50	0.45	0.45	0.37	0.30
1.6	0.65	0.60	0.55	0.50	0.47	0.39	0.33
1.8	0.75	0.65	0.60	0.55	0.50	0.40	0.37
2.0	0.80	0.70	0.65	0.60	0.55	0.42	0.40
2.2	0.85	0.80	0.75	0.65	0.57	0.45	0.42
2.4	0.95	0.85	0.80	0.70	0.60	0.50	0.45
2.6	1.00	0.90	0.85	0.75	0.65	0.55	0.47
2.8	1.05	1.00	0.90	0.80	0.68	0.57	0.50
3.0	1.15	1.05	0.95	0.85	0.70	0.60	0.57
3.2	1.20	1.10	1.00	0.90	0.75	0.63	0.60
3.4	1.25	1.15	1.05	0.95	0.78	0.65	0.62
3.6	1.35	1.20	1.10	1.00	0.80	0.70	0.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 13(ตาราง 5.13)

Ratio $\frac{a1}{a2}$; X	ϕ ; Y
0.50	0.625
0.55	0.580
0.60	0.540
0.65	0.500
0.70	0.480
0.75	0.450
0.80	0.430
0.85	0.380
0.90	0.370
0.95	0.350
1.00	0.330
1.05	0.310
1.10	0.300
1.15	0.290
1.20	0.270
1.25	0.260
1.30	0.250
1.35	0.240
1.40	0.230
1.45	0.230
1.50	0.220
1.55	0.210
1.60	0.200
1.65	0.200
1.70	0.190
1.75	0.190
1.80	0.180
1.85	0.170
1.90	0.160
1.95	0.160
2.00	0.160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

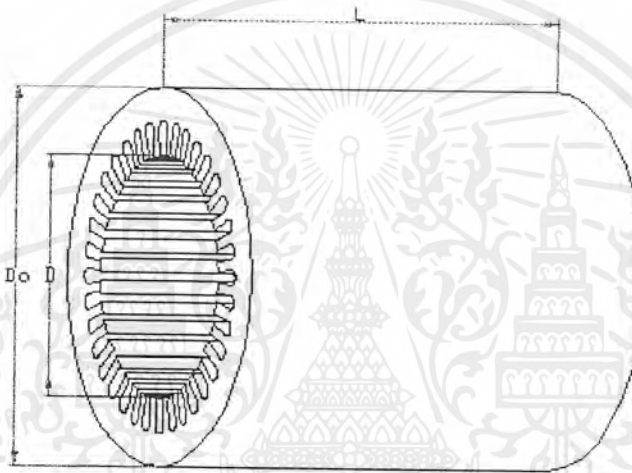
การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากโปรแกรม

ในกรณีที่

Stator Slot เป็นแบบ Round bottom slots

Rotor Slot เป็นแบบ Round small bottom slots

6.1 Main Dimention



รูป 6.1 แสดงลักษณะของ Main Dimention

ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Main Dimention

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
D	8.2 cm	7.56 cm
D_o	13.4 cm	13.33 cm
L	7.3 cm	8.9 cm
τ	6.43 cm	5.94 cm

หมายเหตุ

 D = Stator bore diameter (mm) D_o = Outer diameter (mm) L = Gross core length (mm) τ = Pole pitch (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 Stator

ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Stator

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
N_{ph}	432 Turn/Phase	408 Turn/Phase
S_s	36 Slot	36 Slot
y_{ss}	7.15 mm	6.6 mm
A_s	0.442 mm^2	0.44 mm^2
lmt_s	43 cm	42 cm
r_s	8.52 ohm	8.15 ohm

หมายเหตุ

N_{ph} = Stator turn per phase

S_s = Number of stator slot

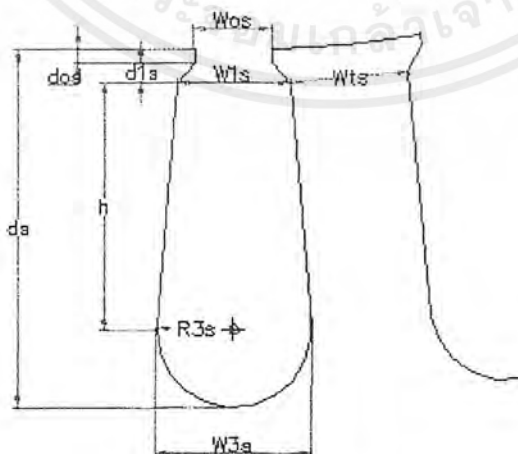
y_{ss} = Stator slot pitch (mm)

A_s = Area of conductor in stator (mm^2)

lmt_s = Length of mean turn (mm)

r_s = Resistance of stator (Ω)

6.3 Stator slot (แบบ Round bottom slot)



รูป 6.2 แสดงลักษณะ Stator slot แบบ Round bottom slots

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Stator Slots

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
d_{os}	0.75 mm	0.75 mm
d_{1s}	1 mm	1 mm
d_s	13.5 mm	18.03 mm
h	8.85 mm	13.29 mm
r_{3s}	2.9 mm	2.996mm
w_{os}	2.0 mm	1.7 mm
w_{1s}	4.0 mm	3.68 mm
w_{3s}	5.8 mm	5.99 mm
w_{1s}	3.5 mm	3.22 mm

หมายเหตุ

d_{os} = Depth of tip in stator (mm)

d_{1s} = Depth of mounth in stator (mm)

d_s = Total depth of stator slot (mm)

h = Depth of stator slot (mm)

r_{3s} = Radial of bottom slot (mm)

w_{os} = Stator slot opening (mm)

w_{1s} = Width of stator slot (mm)

w_{3s} = Width of bottom stator slot (mm)

w_{1s} = Width of stator teeth (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 Rotor

ตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Rotor

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
D_r	81.8 mm	75.2 mm
y_{sr}	5.84 mm	5.4 mm
A_{rb}	18.93 mm ²	19.11 mm ²
A_c	85.25 mm ²	83.61 mm ²

หมายเหตุ

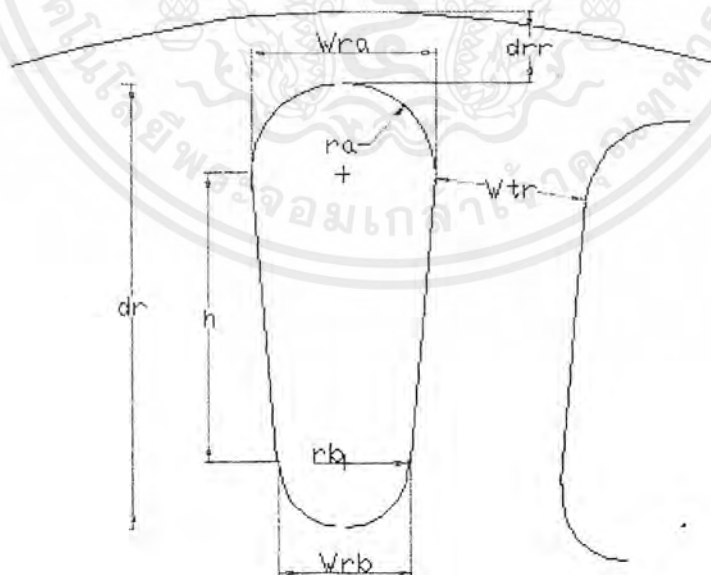
D_r = Diameter of rotor (mm)

y_{sr} = Rotor slot pitch (mm)

A_{rb} = Area of rotor bar (mm²)

A_c = Area of end ring (mm²)

6.5 Rotor slot (แบบ Round small bottom slots)



รูป 6.3 แสดงลักษณะ Rotor slot แบบ Round small bottom slots

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Rotor Slots

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
d_{tr}	0.5 mm	0.5 mm
d_r	8 mm	8.99 mm
h	5.4 mm	6.78 mm
r_a	1.5 mm	1.4 mm
r_{bs}	1.1 mm	0.81 mm
w_{ra}	3.0 mm	2.8 mm
w_{rb}	2.2 mm	1.63 mm
w_{tr}	2.75 mm	2.51 mm

หมายเหตุ

d_{tr} = Depth of mounth in rotor (mm)

d_r = Total depth of rotor slot (mm)

h = Depth of rotor slot (mm)

r_a = Radial of above slot (mm)

r_{bs} = Radial of bottom slot (mm)

w_{ra} = Width of above slot (mm)

w_{rb} = Width of bottom slot (mm)

w_{tr} = Width of rotor teeth (mm)

6.6 No Load Current

ตารางที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน No Load Current

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
I_o	0.93 A	1.137 A
$\cos \phi_{no}$	0.16	0.097

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

I_0 = Line no load current (A)

$\cos \phi_{no}$ = No load power factor

6.7 Performance

ตารางที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Performance

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
P_c	78.5 Watt	61.28 Watt
P_{fw}	11.7 Watt	11.19 Watt
S	0.067	0.088

หมายเหตุ

S = Slip

P_c = Core loss

P_{fw} = Friction and Windage loss

6.8 Equivalent Circuit

ตารางที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Equivalent Circuit

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
R_1	8.52 ohm	8.15 ohm
R_2	10.8 ohm	7.93 ohm
R_c	1529 ohm	1992.65 ohm
X_1	6.98 ohm	7.364 ohm
X_2	10.42 ohm	6.84 ohm
X_m	248 ohm	193.89 ohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.9 Torque

ตารางที่ 6.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในส่วน Torque

สัญลักษณ์	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	ค่าที่ได้จากโปรแกรม
Torque load	5.14 N-m	6.25 N-m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลและวิจารณ์

จากการศึกษาทฤษฎีด้านการออกแบบควบคุมไปกับการทำการทดสอบและทำการแยกชิ้นส่วนเพื่อวัดขนาด มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีกับความเป็นจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งจากการศึกษาและนำผลที่ได้จากการคำนวณของ โปรแกรม มาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงนั้น มีแนวโน้มของข้อมูลบางค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงและมีข้อมูลบางค่าที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ซึ่งจากผลที่ได้นี้ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่าทฤษฎีที่ใช้บางส่วนมีความเป็นไปได้จริงและมีทฤษฎีบางส่วนที่ต้องทำการวิเคราะห์ต่อไปเพื่อที่จะหาข้อผิดพลาดและทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อที่จะนำไปใช้ในงานจริงได้

ในส่วนของปัญหาที่เกิดขึ้นและสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเพื่อที่จะใช้ในการพัฒนาต่อไปคือ

1. ในส่วนของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบนั้นเราไม่สามารถที่จะทราบข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบจากผู้ผลิตได้ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่สามารถจะนำมาวิเคราะห์ถึงทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบได้
2. ในส่วน โปรแกรมที่ทำการออกแบบยังไม่ได้คำนึงถึงความสั่นสะเทือน ความร้อนที่เกิดขึ้นและยังไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบได้

ดังนั้นจึงหวังอย่างยิ่งว่าโครงการนี้จะประ โยชน์แก่ผู้ที่สนใจจะศึกษาถึงทฤษฎีในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกบ้างไม่มากก็น้อย และหวังว่าโครงการนี้จะมี การพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้ทฤษฎีในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชิต ถ้ายอง ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้ทำโครงการมาตลอดเวลา ซึ่งผู้ทำโครงการรู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ของท่าน และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณ นาย วรชาติ แซ่ก๊ก และ นาย เฉลิมชัย มั่นคงประกายกิจ ที่ได้กรุณาแนะนำและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงการครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำโครงการขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของสัญลักษณ์ (List of Symbols)

a	ค่าคงที่
ac	Ampere conductor per metre
at_{cs}	Mmf per metre of stator core
at_{trc}	Mf per metre of rotor core
at_{trt}	Mmf per metre of rotor teeth
at_{ts}	Mmf per metre of stator teeth
A	ค่าคงที่
AT_{cr}	Mmf required for rotor core (A)
AT_{cs}	Mmf required for stator core (A)
AT_g	Mmf required for air gap (A)
AT_{tr}	Mmf required for stator teeth (A)
AT_{ts}	Mmf required for stator teeth (A)
A_c	Area of conductor required (mm^2)
A_{cr}	Area of rotor core (m^2)
A_{cs}	Area of stator core (m^2)
A_e	Area of end ring (mm^2)
A_g	Area of air gap (m^2)
A_{rb}	Area of rotor bar (mm^2)
A_s	Area of conductors in stator (mm^2)
A_{s1}	พื้นที่หน้าตัดต่อตัวนำ (mm^2)
A_{s2}	พื้นที่ใช้งานทั้งหมดของแต่ละร่อง slot (mm^2)
A_{scu}	Area of stator conductor used (mm^2)
A_t	Area of teeth per pole (m^2)
A_{tr}	Area of teeth per pole at 1/3 height from narrow end (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$b, b_1 - b_g$	ค่าคงที่
B	ค่าคงที่
B_{av}	Average flux density (Wb/m ²)
B_{cs}	Flux density in stator core (Wb/m ²)
B_{mts}	Maximum flux density in stator teeth (Wb/m ²)
B_{rc}	Flux density in rotor teeth (Wb/m ²)
$B_{tr1/3}$	Flux density in rotor teeth at 1/3 height (Wb/m ²)
B_{ts}	Flux density in stator teeth (Wb/m ²)
$c, c_1 - c_6$	ค่าคงที่
$\cos \phi$	Power factor
$\cos \phi_{no}$	No load power factor
$\cos \phi_{sc}$	Short circuit power factor
C_{ce}	Cooling co-efficient
C_o	Output co-efficient
C_r	Radial clearance
C_{se}	Cooling surface of two ends (m ²)
C_t	Tangential clearance
d	The nearest standard conductors has a diameter, from table 17.7 (mm)
d_{1r}	Depth of mouth in rotor (cm)
d_{4r}	Dept of slot (cm)
d_{1s}	Depth of mouth (cm)
d_{4s}	Depth of stator slot (cm)
d_b	Depth of bar (cm)
d_c	Diameter of conductors in round slot (cm)
d_{cr}	Depth of rotor core (cm)
d_{cs}	Stator core depth (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_c	Depth of end ring (cm)
d_{or}	Depth of tip in rotor (cm)
d_{os}	Depth of tip in stator (cm)
d_r	Total depth of rotor slot (cm)
d_s	Total depth of stator slot (cm)
D	Stator bore diameter (m)
D_c	Mean diameter of end ring (cm)
D_i	Inner diameter of rotor stamping (cm)
D_o	Outer diameter (cm)
D_r	Diameter of rotor (cm)
f	Frequency (Hz)
g	Slot per pole per phase
g_r	Rotor slot per pole per phase
g_s	Stator slot per pole per phase
H	Barometric height (mm of mercury)
I_b	Current in each bar (A)
I_{cs}	Inside cylindrical surface of stator (m^2)
I_e	End ring current (A)
I_l	Loss component of no load current per phase (A)
I_m	Magnetizing current per phase (A)
I_o	No load current (A)
I_s	Stator current per phase (A)
I_{sc}	Short circuit current per phase (A)
I_{sl}	Stator line current (A)
K_{cs}	ค่า Carter co-efficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K_d	Distribution factor
K_g	Total gap contraction factor
K_{gd}	ค่า Gap contraction factor for duct
K_{gs}	ค่า Gap contraction factor for slot
K_{gsr}	ค่า Gap contraction factor for rotor slot
K_{gss}	ค่า Gap contraction factor for stator slot
K_p	Pitch factor
K_s	Stacking factor
K_{sp}	Space factor
K_w	Winding factor
K_{wr}	Rotor winding factor
K_{ws}	Stator winding factor
l_b	Length of each bar (m)
l_{cr}	Length of flux path in rotor core (m)
l_{cr}	Length of magnetic path through stator core (cm)
l_g	Air gap length (mm)
l_{gs}	Effective length of air gap
l_i	Innear of end ring (cm)
lmt_s	Length of mean turn (m)
L	Gross core length (cm)
L_i	Net iron length (cm)
m	Number of phase
n	Order of harmonices
n_d	Number of duct
N_{ph}	Stator turn per phase
N_r	Rotor speed (r.p.m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N_s	Synchronous speed (r.p.s)
O_{cs}	Outside cylindrical surface of stator (m^2)
p_c	Percent of friction and windage loss (%)
pF	Power factor
P_a	Pressure 1000 to 2000 N/m^2 or higher for closed circuit ventilation
P_{ail}	Actual iron loss (W)
P_{cub}	Copper loss in each bar (W)
P_{cue}	Copper in two end ring (W)
P_{cusp}	Copper loss in slot portion (W)
P_f	Power required by fan blowing air (kW)
P_{fwt}	Friction and Windage loss (W)
P_{ilsc}	Iron loss in stator core (W)
P_{ilst}	Iron loss in stator teeth (W)
P_{in}	Input at full load (W)
P_{les}	Loss dissipate per c from inside surface of stator (W)
P_{ldc}	Loss dissipate per c from back of core (W)
P_{ldes}	Loss dissipate per c from end surface (W)
P_{llf}	Total loss at full load (W)
P_{out}	Full load output (W)
P_{rup}	Rotor copper loss per phase (W)
P_{tcub}	Total copper loss in bar (W)
P_{tl}	Total iron loss (W)
P_{uld}	Total loss to be dissipated by stator core surface (W)
P_{tldc}	Total loss dissipated per c (W)
P_{tllf}	Total no load loss (W)
P_{tru}	Total rotor copper loss (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{tscu}	Total stator copper loss (W)
P	Number of poles
Q	kVA input (VA)
Q_a	Loss to be dissipated (kW)
r_{1r}	Radial of round slot (cm)
r_{3s}	Radial of bottom slot (cm)
r_a	Radial of above slot (cm)
r_b	Resistance of each bar (Ω)
r_{bs}	Radial of bottom slot (cm)
r_e	Resistance of each ring (Ω)
r_s	Resistance of stator (Ω)
r_r	Rotor resistance referred to stator (Ω)
R_s	Total resistance referred to stator (Ω)
S	Slip
S_{max}	Slip maximum
S_r	Number of rotor slot
S_s	Number of stator slot
S_{ss}	Total stator slot
T	Torque at full load (N-m)
T_{max}	Torque maximum (N-m)
T_{sc}	Total stator conductor
T_{st}	Torque start (N-m)
V_a	Peripheral speed (m/s)
V_{ao}	Volume of air under actual working condition (m^3 / second)
V_e	Velocity of air gap at end surface (m/s)
V_L	Voltage line to line (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_o	The amount of oil required for absorb loss at temperature rise (litre / second)
V_{ph}	Stator voltage per phase (V)
V_{sc}	Volume of stator core (m ³)
V_{st}	Volume of stator teeth (m ³)
V_w	Volume of water required for absorb loss at temperature rise (litre / second)
w_{1r}	Width of rotor slot (cm)
w_{3r}	Width of bottom rotor slot (cm)
w_{1s}	Width of stator slot (cm)
w_{3s}	Width of bottom stator slot (cm)
w_b	Width of bar in rotor slot (m)
w_d	Width of duct (cm)
w_{or}	Rotor slot opening (cm)
w_{os}	Stator slot opening (cm)
w_{ra}	Width of above slot (cm)
w_{rb}	Width of bottom slot (cm)
$w_{tr1/3}$	Width of rotor teeth at 1/3 heighth from narrow end (cm)
w_{tr}	Width of rotor teeth (cm)
w_{trr}	Tooth width at the root of rotor slot (cm)
w_{sc}	Weigth of stator core (cm)
w_{st}	Weigth of stator teeth (cm)
w_{ts}	Width of stator teeth (cm)
$(w_{ts})_{min}$	Minimum width of stator teeth (m)
X_m	Magnetizing reactance (Ω)
X_o	Overhang leakage reactance (Ω)
X_{sk}	Skew leakage reactance (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X_l	Total leakage reactance per phase refer to stator (Ω)
X_z	Zigzag leakage reactance per phase (Ω)
y_{sr}	Rotor slot pitch (m)
y_{ss}	Stator slot pitch (m)
Z_s	Total impedance of rotor at stand still (Ω)
Z_{ss}	Stator conductor per slot
η	Efficiency (%)
η_f	Fan efficiency
Φ_m	Flux per pole (Wb)
Φ_{mes}	Flux in stator core (Wb)
τ	Pole pitch (m)
ρ	Coil pitch
σ	Spread of phase group
γ	มุมต่อร่อง slot
δ	Current density (A/mm^2)
α	half slot angle (electrical degree)
α_s	Angle of skew (electrical radial)
θ_a	Temperature rise of cooling medium (C)
θ_i	Inlet temperature rise of cooling medium (C)
θ_s	Angle of skew (degree mechanical)
θ_m	Temperature rise (c)
ρ_r	Resistivity of material ($\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$)
δ_e	Current density in end ring (A/mm^2)
λ_{ss}	Stator slot leakage
λ_{sr}	Rotor slot leakage
λ'_{sr}	Rotor slot leakage refer to stator
λ_s	Total specific slot permeance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- 1.Sawhney A.K," A Course in Electrical Machine Design",3rd Edition,Dhanpat Rai&Sona,New Delhi,1974
- 2.Chapman,Stephep J." Electric Machine Fundamentals".New York:McGraw-Hill,Inc,1991.
- 3.Cochran,Paul L."Polyphase Induction Motor".New York and Basel:Marcel Dekker,Inc.,1989.
- 4.A.E Fitzgerald,Charles Kingsley,Jr.,Umars Stepher D."Electric Machinery",5 Rev. Edition,London:McGraw-Hill,Inc,1990
- 5.IEEE std 112-1996,IEEE Standard test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators(ANSI)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้