

ผลของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีต่อสมรรถนะของไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน



นาย อภิชาติ พันธุ์ประจักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2867-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF DESIGN PARAMETERS ON EDDY-CURRENT
DYNAMOMETER PERFORMANCE

Mr. Apichart Phanprajak

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic year 2005

ISBN 974-53-2867-7

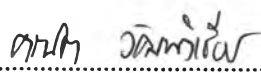
481590

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีต่อสมรรถนะของไดนาโมมิเตอร์
แบบกระแสหมุนวน
โดย นาย อภิชาติ พันธุ์ประจักษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิต วัฒนวิเชียร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร)


.....กรรมการ
(ดร. วิศณุ พงศ์พิพัฒน์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไพบูลย์ ศรีภคการ)

อภิชาติ พันธุ์ประจักษ์ : ผลของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีต่อสมรรถนะของไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน (EFFECTS OF DESIGN PARAMETERS ON EDDY-CURRENT DYNAMOMETER PERFORMANCE) อ.ที่ปรึกษา : รศ. สถาพร สุปรีชากร, 199 หน้า ISBN 974-53-2867-7

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงผลของพารามิเตอร์การออกแบบที่มีผลต่อเครื่องไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวนซึ่งใช้ในการวัดกำลังของเครื่องจักรต้นกำลัง โดยงานวิจัยได้ใช้เครื่องจักรต้นกำลังเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ จำนวนชุดขดลวด, ระยะในแนวรัศมีของการติดตั้งชุดขดลวด, ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดขดลวด, ความเร็วของมอเตอร์ และความหนาของแผ่นจานหมุน

ผลการทดสอบพบว่า แรงบิดหรือกำลังที่วัดได้แปรผัน โดยตรงกับฟลักซ์แม่เหล็ก (ampere-turns) และระยะในแนวรัศมีของการติดตั้งชุดขดลวด ส่วนต่อมาพบถึงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของชุดขดลวดว่าที่ระยะห่างน้อยกว่าค่าหนึ่งซึ่งจะมีผลของเส้นแรงแม่เหล็กของชุดขดลวดที่ใกล้เคียงกันส่งสนามแม่เหล็กถึงกันทำให้แรงบิดที่วัดได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น และพารามิเตอร์ถัดไป คือผลของความเร็วของมอเตอร์ โดยเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นทำให้กระแสหมุนวนในแผ่นจานหมุนเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวไม่ได้ซึมซาบเข้าไปในเนื้อของแผ่นจานหมุนจึงทำให้แรงบิดที่ได้น้อยลงตามไปด้วย และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาถึงผลของความหนาแผ่นจานหมุน โดยความหนาเริ่มต้นคือ 15 มม.และทำการลดขนาดลงทีละ 1 มม. พบว่า ค่าแรงบิดที่วัดได้แปรผันตรงกับความหนาของแผ่นจานหมุนในช่วงหนึ่งคือช่วงความหนา 15 มม. ลดลงจนถึง 11 มม. โดยความหนาที่ลดลงในช่วงนี้จะทำให้วัดแรงบิดได้น้อยลง แต่เมื่อลดความหนาไปจนถึงค่าหนึ่ง คือตั้งแต่ 10 มม. ลงไปแนวโน้มค่าแรงบิดที่วัดได้ค่อยๆเพิ่มขึ้น ซึ่งการทดสอบได้ทำการลดความหนาจนถึง 7 มม. พบว่าแรงบิดที่วัดได้จะมากขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นข้อเสนอแนะ ก็คือ ความหนาที่เหมาะสมสำหรับใช้สร้างโพลเพื่อวัดกำลังของมอเตอร์ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ ควรอยู่ในช่วง 7-11 มม. จะทำให้การวัดแรงบิดได้ดี

ภาควิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา..... 2548.....

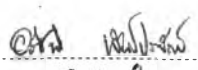
4570632721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING


KEY WORD : EDDY-CURRENT / DYNAMOMETER / DESIGN PARAMETER

APICHART PHANPRAJAK : EFFECTS OF DESIGN PARAMETERS ON EDDY-CURRENT DYNAMOMETER PERFORMANCE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. STAPORN SUPRICHAKORN., 199 pp. ISBN 974-53-2867-7

This thesis is concerned with the effects of design parameters on the performance of an eddy-current dynamometer. A 7.5 kW., 1,450 rpm induction motor was used as a driver for the tests. The number of coils, coil radial distance, current supplied to coils, rotating speed and rotor disk thickness were selected as research parameters.

The results of this study indicated that the torque varied linearly with the current (and so the magnetic flux) and the coil radial distance. It was also found that if the distance of center coils is lower than a certain value, magnetic flux would counteract each other in such a way that the measured torque decreased. This was found when 12 and 16 coils were used. In another test, an increase in motor speed would reduce permeability of the eddy current in the rotor disk and consequently lower the torque value. The final parameter which had been studied is the rotor disk thickness. The test was starting from the initial thickness of 15 mm. The disk is then machined down one millimeter per step. It was found that torque absorbed was reduced along with the reduction of the disk thickness, from 15 mm.-11mm., after that, from 11mm.-7mm. torque was increased against the thinning down of the disk. These result indicated that the optimal thickness for the measured torque was between 7-11 mm.

Department..... Mechanical Engineering..... Student's signature..... 

Field of study..... Mechanical Engineering..... Advisor's signature..... 

Academic year..... 2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ก็ด้วยความช่วยเหลือและความเมตตาอย่างดียิ่ง ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็น อย่างสูงที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่าง การทำวิจัย ทำให้สามารถดำเนินงานทุกขั้นตอนจนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณคุณครูสรารุช อาปณกะพันธ์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ รวมไปถึง ถึงอนุเคราะห์เครื่องมือต่างๆ ที่ผู้วิจัยได้ใช้ในระหว่างการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์สถานที่สำหรับดำเนินการวิจัย และบุคคลากรทุกท่านที่ให้ความ ช่วยเหลืออย่างเป็นกันเอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและแบ่งปันความสุขสนุกสนานให้กันตลอด ระยะเวลาการศึกษา

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ อันเป็นรักยิ่งของผู้วิจัย ที่ได้ทุ่มเทให้ ทุกสิ่งทุกอย่าง และเป็นกำลังใจในทุกย่างก้าวของชีวิตของผู้วิจัย ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขออุทิศแด่ท่านผู้ให้กำเนิด ครูบาอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 ประวัติและหลักการทำงานของเครื่องไดนาโมมิเตอร์.....	5
3.1 กล่าวนำ.....	5
3.2 การจัดหมวดหมู่ของไดนาโมมิเตอร์.....	5
3.2.1 ไดนาโมมิเตอร์แบบซึมซับ (Absorption Dynamometer).....	5
3.2.2 ไดนาโมมิเตอร์แบบถ่ายทอด (Transmission Dynamometer).....	5
3.3 ประเภทของไดนาโมมิเตอร์แบบซึมซับ (Absorption Dynamometer Type).....	6
3.3.1 The Prony Brake.....	6
3.3.2 Prony brakeแบบพิเศษ.....	13
3.3.3 Hydraulic and Fluid Friction Brakes.....	16
3.3.4 Fan Brakes.....	20
3.3.5 Eddy-current Dynamometers (Electric and Electromagnetic Brakes).....	23

บทที่ 4 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ	29
4.1 กล่าวนำ	29
4.2 ทฤษฎีทางด้านไฟฟ้า (Electrical Theory).....	31
4.2.1 แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic)	31
4.2.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)	34
4.2.3 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)	34
4.2.4 ความซึมซาบได้ (Permeability)	34
4.2.5 เส้นโค้งของการเกิดอำนาจแม่เหล็ก	35
4.2.6 แรงดันแม่เหล็ก (Magnetomotive Force , m.m.f.)	38
4.2.7 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity)	38
4.2.8 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance or Magnetic Resistance).....	39
4.2.9 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ	40
4.2.10 กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง (Flemming's Right Hand Rule)	40
4.2.11 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law).....	41
4.2.12 การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า (Voltage Induction)	42
4.2.13 ค่าความต้านทานในส่วนที่เกิดกระแสหมุนวนในแผ่นตัวนำ	44
4.2.14 แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Torque)	44
4.2.15 กระแสหมุนวน (Eddy Current)	45
4.3 ทฤษฎีทางด้านเครื่องกล (Mechanical Theory)	45
4.3.1 หลักการออกแบบเพลาส่งกำลัง.....	45
4.3.2 หลักการออกแบบแบร์ริง	47
4.3.3 หลักการออกแบบสายพาน	49
4.3.4 หลักการสำหรับหาค่าความแข็งแรงของแผ่นจานหมุน	51
4.4 การวัดค่าแรงบิด (Torque Measurement)	54
 บทที่ 5 การออกแบบส่วนประกอบ	 55
5.1 กล่าวนำ	55
5.2 หลักการคำนวณของการหาจำนวนรอบในการพันขดลวดทองแดง	55
5.3 การคำนวณหาขนาดของเพลาส่งกำลัง	59
5.4 การออกแบบแบร์ริงสำหรับแผ่นจานหมุน	64

5.5 การพิสูจน์ความแข็งแรงของแผ่นจานหมุน.....	66
บทที่ 6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	68
6.1 กล่าวนำ.....	68
6.2 แบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง ไคนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน.....	68
6.3 ขั้นตอนการผลิตส่วนประกอบของเครื่องไคนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน	69
6.3.1 แผ่นจานหมุน (Rotor Disk)	70
6.3.2 แกนเหล็ก (Coil Core).....	70
6.3.3 แผ่นเปลี่ยคชูดขดลวดและบุชสวมเพลลา (Cradle and Bush).....	71
6.3.4 ฐานที่ใช้ติดตั้งแผ่นเพลกับเพลลาส่งกำลัง (Cradle Base)	73
6.3.5 เพลลาส่งกำลัง (Rotor Shaft).....	76
6.3.6 หน้าแปลนยึดแผ่นจานหมุน (Rotor Flange).....	77
6.3.7 แกนยึดแผ่นเพล (Cradle Rod)	78
6.3.8 แท่นสำหรับติดตั้งเครื่อง ไคนา โมมิเตอร์กับมอเตอร์ (Base).....	78
6.3.9 แป้นยึดสปริงสำหรับวัดค่าแรงบิด (Torque Measurement)	79
6.4 การประกอบเครื่องไคนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน	80
6.5 ขั้นตอนการทดสอบ	84
6.6 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	90
6.6.1 เครื่องมือวัดความต้านทาน.....	90
6.6.2 เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า.....	91
6.6.3 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ	91
บทที่ 7 ผลการทดสอบ	92
7.1 กล่าวนำ.....	92
7.2 ชุดข้อมูลเปรียบเทียบแรงบิดของชุดขดลวดที่มีการเปลี่ยนระยะ	93
ในแนวรัศมี 3 ตำแหน่ง	
7.2.1 ความเร็ว 600 รอบต่อนาที.....	93
7.2.2 ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที.....	94
7.2.3 ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที.....	94

7.3	ชุดข้อมูลเปรียบเทียบแรงเบรกของจำนวนชุดขดลวดต่างๆ ที่ความเร็วใดๆ.....	95
	ณ ตำแหน่งระยะรัศมี 104, 144 และ 184 มม.	
7.3.1	แผ่นจานหมุนหมุนที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	96
7.3.2	แผ่นจานหมุนหมุนที่ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	98
7.3.3	แผ่นจานหมุนหมุนที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	100
7.4	ชุดข้อมูลเปรียบเทียบแรงเบรกที่เกิดขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเร็ว.....	102
7.5	ชุดข้อมูลเปรียบเทียบแรงบิดที่ความหนาของแผ่นจานหมุนขนาดต่างๆ	103
บทที่ 8	วิเคราะห์ผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	104
8.1	วิเคราะห์ผลการทดสอบ	104
8.2	บทสรุป	111
8.3	ข้อเสนอแนะ	112
	รายการอ้างอิง.....	114
	ภาคผนวก.....	115
	ภาคผนวก ก ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ, ข้อมูลโคนา โนมอเตอร์ต้นแบบ,.....	116
	ข้อมูลชุดขดลวด, Resistance Bank และข้อมูลทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบ	
	ภาคผนวก ข.1 การคำนวณกระแสไฟฟ้า.....	125
	ภาคผนวก ข.2 การคำนวณแรงบิด.....	126
	ภาคผนวก ค Assembly and Detail Drawings	131
	ภาคผนวก ง ชุดข้อมูลเปรียบเทียบแรงบิดของชุดขดลวดที่มีการเปลี่ยนระยะ.....	154
	ในแนวรัศมี 3 ตำแหน่งและข้อมูลเปรียบเทียบแรงบิดที่ขนาดความหนา	
	ต่างๆของแผ่นจานหมุน	
	ภาคผนวก จ การคำนวณหาขนาดของสายพานที่ใช้ในการปรับความเร็ว	186
	ภาคผนวก ฉ ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating Thoery).....	197
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	199

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 2.1 ค่าคงที่สำหรับสูตร Poppe.....	22
ตาราง 4.1 ค่าตัวประกอบความล้าตามลักษณะการใช้งาน.....	46
ตาราง ก.1 ชนิดของเหล็กที่ใช้ทำเพลาส่งกำลัง.....	122
ตาราง ก.2 Application Factors (K_a) สำหรับการเลือกเบร้ง.....	123
ตาราง ก.3 Bearing Rated Capacities (C) สำหรับการเลือกเบร้ง.....	123
ตาราง ก.4 Design life สำหรับการเลือกเบร้ง.....	124
ตาราง ข.1 ผลการเปรียบเทียบค่าที่บันทึกจากสเกลกับระยะยี่คของสปริง.....	126
ตาราง จ.1 ตัวประกอบใช้งาน N_u สำหรับสายพานลุ่ม.....	187
ตาราง จ.2 ขนาดของสายพานลุ่มและล้อสายพานลุ่ม ตามมาตรฐาน ISO/R 52-1957(E)..... และ ISO/R 256-1962(E)	188
ตาราง จ.3 สมรรถนะในการส่งกำลังของสายพานลุ่มหน้าตัด B ต่อเส้น P_r (kW).....	189
ตาราง จ.4 ตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้งสัมผัส N_u สำหรับสายพานลุ่ม.....	190

สารบัญรูปภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
3.1 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ Prony brake.....	6
3.2 รูปแบบต่างๆของ Prony Brake.....	7
3.3 ลักษณะโครงสร้างของ Rope Brake.....	9
3.4 รายละเอียดลักษณะการติดตั้งระบบระบายความร้อนในล้อของระบบเบรก.....	13
3.5 โครงสร้างของ Self-regulating Brake.....	14
3.6 โครงสร้างของ Balk Self-adjusting Brake.....	14
3.7 โครงสร้างของ Strap Self-adjusting Brake.....	15
3.8 ลักษณะของ Alden Brake.....	16
3.9 ลักษณะของ Stumpf Friction Brake.....	17
3.10 ภาพตัดขวางของ Froude Dynamometer.....	19
3.11 โครงสร้างของ Froude Dynamometer.....	19
3.12 รายละเอียดของ Fan Brake Arm และ Blades (แผ่นใบพัด).....	20
3.13 หลักการทำงานพื้นฐานของ Electromagnetic Brake.....	23
3.14 ลักษณะของ Electromagnetic Brake ในรูปแบบที่ใช้กันทั่วไป.....	24
3.15 ลักษณะของ Electromagnetic Brake ในรูปแบบที่ใช้กันทั่วไป.....	24
3.16 โครงสร้างของ Cradle Dynamometer.....	25
3.17 ลักษณะของ Electric Dynamometer หรือ Eddy-Current Dynamometer.....	26
3.18 ลักษณะของ Sprague Electric Dynamometer.....	27
3.19 การติดตั้งเพื่อใช้งานของ Electric Dynamometer.....	28
4.1 โครงสร้างของไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน.....	29
4.2 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	32
4.3 ความสัมพันธ์ของทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ากับทิศทาง ของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ	32
4.4 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด.....	33
4.5 (A) ทิศทางการไหลของกระแสในทิศทางตรงกันข้ามกันในตัวนำที่วางขนานกัน.....	33
(B) ทิศทางการไหลของกระแสในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน.....	33
4.6 ลักษณะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดที่ขดลวดเมื่อมีกระแสไหลผ่าน.....	34
4.7 ลักษณะของวงจรมแม่เหล็กทอรอยด์.....	35

ภาพประกอบ	หน้า
4.8 (A) B-H curve เมื่อ $H < 400$ แอมแปร์ต่อเมตร.....	36
(B) B-H curve เมื่อ $H > 400$ แอมแปร์ต่อเมตร.....	36
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	37
4.10 เส้นโค้งฮิสเทอรีซิส.....	38
4.11 วงจรแม่เหล็กของขดลวดที่มีกระแสไหลผ่าน.....	39
4.12 การใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง.....	40
4.13 การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าโดยใช้กฎของเลนซ์.....	41
4.14 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วเหนือเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ.....	41
4.15 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วใต้เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ.....	42
4.16 ทิศทางการเกิดกระแสหมุนวนในแผ่นจานหมุน.....	42
4.17 การเคลื่อนที่ของตัวนำแบบตั้งฉากและทำมุมกับสนามแม่เหล็ก.....	42
4.18 ชั้นส่วนตัดของแผ่นจานหมุน.....	51
4.19 แผ่นจานหมุนมีรูตรงกลาง.....	52
5.1 รายละเอียดของเพลาส่งกำลัง.....	59
5.2 แผนภูมิแสดงแรงกระทำและโมเมนต์ตัดในแนวตั้งและแนวระดับ.....	63
6.1 แผ่นจานหมุน (Rotor Disk).....	70
6.2 แกนเหล็ก (Coil Core).....	71
6.3 (A) แผ่นเพลที่เชื่อมติดบุชสวมเพลเบอร์ 1 (Cradle with Bush No.1)	73
(B) แผ่นเพลที่เชื่อมติดบุชสวมเพลเบอร์ 2 (Cradle with Bush No.2)	73
6.4 ฐานที่ใช้ติดตั้งแผ่นเพลกับเพลาส่งกำลัง (Cradle Base)	75
6.5 เพลาส่งกำลัง (Rotor Shaft)	76
6.6 หน้าแปลนยึดแผ่นจานหมุน (Rotor Flange)	77
6.7 แกนยึดแผ่นเพล (Cradle Rod)	78
6.8 แท่นสำหรับติดตั้งเครื่องไคนาโมมิเตอร์กับมอเตอร์ (Base).....	79
6.9 การติดตั้งฐานของแผ่นเพลบนแท่นเครื่อง.....	80
6.10 การติดตั้งแผ่นเพลเข้ากับฐาน.....	81
6.11 การประกอบหน้าแปลนยึดแผ่นจานหมุนเข้ากับเพล.....	81
6.12 การติดตั้งแผ่นจานหมุนเข้ากับเพลาส่งกำลัง.....	81
6.13 การติดตั้งเพลาส่งกำลังเข้ากับแผ่นเพล.....	82
6.14 เครื่องไคนาโมมิเตอร์ที่ประกอบสมบูรณ์.....	82
6.15 เครื่องไคนาโมมิเตอร์ที่มีติดตั้งชุดขดลวดทองแดง 2 คู่.....	83

ภาพประกอบ	หน้า
6.16 เครื่องไคนาโมมิเตอร์ที่มีการติดตั้งสปริงสำหรับวัดแรงบิดเรียบร้อย.....	83
6.17 Resistance Bank.....	85
6.18 การติดตั้งชุดขดลวดทองแดงที่ระยะรัศมี 104 มม.....	86
6.19 การวัดความต้านทานที่ Resistance Bank.....	86
6.20 การต่อสายไฟของชุดขดลวดเข้าแหล่งจ่ายไฟ.....	87
6.21 การวัดความเร็วรอบแผ่นจานหมุน.....	87
6.22 การปรับแรงดันไฟที่จ่ายเข้าสู่ชุดขดลวด.....	87
6.23 วงจรของการปรับแรงดัน ไฟฟ้า.....	88
6.24 การวัดแรงดัน ไฟฟ้าที่ Resistance Bank.....	88
6.25 การอ่านค่าระยะยี่ของสปริง.....	89
6.26 การปรับระยะในแนวรัศมีของชุดขดลวด.....	89
6.27 เครื่องมือวัดความต้านทาน.....	90
6.28 เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้า.....	91
6.29 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ.....	91
7.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงบิดของชุดขดลวด 8 ชุด ที่ระยะรัศมีต่างๆ (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	94
7.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงบิดของชุดขดลวด 8 ชุด ที่ระยะรัศมีต่างๆ (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	94
7.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงบิดของชุดขดลวด 8 ชุด ที่ระยะรัศมีต่างๆ (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	94
7.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ.....	96
ที่ระยะรัศมี 104 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
7.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ.....	97
ที่ระยะรัศมี 144 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
7.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ.....	97
ที่ระยะรัศมี 184 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
7.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ.....	98
ที่ระยะรัศมี 104 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	
7.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ.....	99
ที่ระยะรัศมี 144 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	

ภาพประกอบ	หน้า
7.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ.....	99
ที่ระยะรัศมี 184 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	
7.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ....	100
ที่ระยะรัศมี 104 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	
7.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ....	101
ที่ระยะรัศมี 144 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	
7.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวดจำนวนต่าง ๆ....	101
ที่ระยะรัศมี 184 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	
7.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวด 4 ชุด.....	102
ที่ระยะรัศมี 104 มม. (พิจารณา 1 ชุด) ณ ความเร็วรอบต่างๆ	
7.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ากับค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นของชุดขดลวด 16 ชุด.....	103
ระยะรัศมี 184 มม. ,ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที ที่ความหนาของแผ่นจานหมุนต่างๆ	
8.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวด 4 ชุด.....	104
ที่ระยะรัศมีต่างๆ (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
8.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวด 12 ชุด.....	105
ที่ระยะรัศมีต่างๆ (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
8.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวด 16 ชุด.....	105
ที่ระยะรัศมีต่างๆ (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
8.4 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของชุดขดลวดคู่หนึ่งๆ สำหรับการติดตั้งชุดขดลวด 8 ชุด.....	106
ที่ระยะในแนวรัศมี 104 มม. (พิจารณาที่การติดตั้งบนแผ่นเพลตด้านเดียว)	
8.5 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของชุดขดลวดคู่หนึ่งๆ สำหรับการติดตั้งชุดขดลวด 12 ชุด.....	107
ที่ระยะในแนวรัศมี 144 มม. (พิจารณาที่การติดตั้งบนแผ่นเพลตด้านเดียว)	
8.6 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของชุดขดลวดคู่หนึ่งๆ สำหรับการติดตั้งชุดขดลวด 16 ชุด.....	107
ที่ระยะในแนวรัศมี 184 มม. (พิจารณาที่การติดตั้งบนแผ่นเพลตด้านเดียว)	
8.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวด 8 ชุด.....	108
ที่ระยะรัศมี 184 มม. (พิจารณา 1 ชุด) ณ ความเร็วรอบต่างๆ	
8.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของแรงเคลื่อนแม่เหล็กกับแรงเบรกของชุดขดลวด.....	109
ที่ระยะรัศมี 184 มม. (พิจารณาต่อ 1 ชุด) ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
8.9 กราฟแสดงแนวโน้มของแรงเบรกค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนความหนาของ.....	110
แผ่นจานหมุน โดยทดสอบที่ชุดขดลวด 16 ชุด ,ระยะรัศมีของการติดตั้ง 184 มม. และความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	

ภาพประกอบ	หน้า
ก.1 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องต้นแบบ.....	116
ก.2 ขนาดทางกายภาพของชุดขดลวด.....	118
ก.3 Resistance Bank.....	121
ก.4 วงจรความต้านทานของ Resistance Bank.....	121
ก.5 ค่า Life adjustment reliability factors สำหรับการเลือกเบริง.....	124
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของสเกลกับระยะยัดของสปริง.....	128
ง.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 4 ชุด.....	156
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
ง.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 6 ชุด.....	158
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
ง.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 8 ชุด.....	160
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
ง.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 12 ชุด.....	162
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
ง.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 16 ชุด.....	164
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	
ง.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 4 ชุด.....	166
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	
ง.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 6 ชุด.....	168
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	
ง.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 8 ชุด.....	170
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	
ง.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 12 ชุด.....	172
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	
ง.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 16 ชุด.....	174
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที	
ง.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 4 ชุด.....	176
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	
ง.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 6 ชุด.....	178
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	

ภาพประกอบ	หน้า
ง.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 8 ชุด.....	180
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	
ง.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 12 ชุด.....	182
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	
ง.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดของชุดขดลวด 16 ชุด.....	184
ที่ระยะรัศมีต่างๆ ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	
จ.1 แผนภูมิที่ใช้ในการเลือกขนาดหน้าตัดของสายพานลิ้ม.....	186

สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
A	พื้นที่	m ²
b	ความยาวตามแนวรัศมีของซี่แม่เหล็ก	m
B	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	Wb/m ²
C	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของพูเลย์	m
C _R	Rated capacity	N
C _{req}	ค่า required ของ C สำหรับการประยุกต์ใช้งาน	N
d	ความกว้างของซี่แม่เหล็ก	m
d _p	เส้นผ่านศูนย์กลางของพูเลย์ตัวจับ	m
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
D _p	เส้นผ่านศูนย์กลางของพูเลย์ตัวตาม	m
e.m.f.	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	V
E	Modulus of Elasticity	N/m ²
f	ค่าความถี่ในการหมุน	rpm
F	แรงกระทำ	N
F _c	equivalent load	N
F _m	แรงดันแม่เหล็ก	A-T
F _r	radial load	N
F _t	thrust load	N
F ₁	แรงค้ำที่ค้ำของสายพาน	N
F ₂	แรงค้ำที่หย่อนของสายพาน	N
H	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	A/m
I	กระแสไฟฟ้า	A
k	ค่านิจของสปริง	N/m
K _a	Application factor	
K _b	ค่าตัวประกอบความล้าเนื่องจากโมเมนต์ตัด	
K _r	Life adjustment reliability factors	
K _v	ค่าตัวประกอบความล้าเนื่องจากโมเมนต์บิด	
l	ความยาวของวงจรมแม่เหล็ก	m
L	ระยะเวลาการใช้งานทั้งหมดของแบร์ริง	รอบ

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
L_p	ความยาวพิศซ์ของสายพาน	m
L_R	อายุการใช้งานตาม rated capacity	รอบ
m.m.f.	แรงดันแม่เหล็ก	A-T
m_w	อัตราทดของสายพาน	
M_b	โมเมนต์ค้ด	N-m
M_t	โมเมนต์บิด	N-m
n	จำนวนรอบที่หมุน	rpm
n_1	ความเร็วของพูล่ย์ตัวขับ	rpm
n_2	ความเร็วของพูล่ย์ตัวตาม	rpm
N	จำนวนรอบของขดลวด	
N_s	ตัวประกอบใช้งาน	
N_1	ตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้งใช้งาน	
N_a	ตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้งสัมผัส	
P	กำลัง	W
r	ระยะรัศมี	m
R	ค่าความต้านทาน	Ω
R_m	ความต้านทานแม่เหล็ก	A-T/ Wb
t	ความหนาของแผ่นตัวนำ	m
T	แรงบิด	N-m
v	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ	m/s^2
V	ค่าแรงดันไฟฟ้า	V
W_p	กำลังที่ต้องการถ่ายทอดโดยสายพาน	kW
z	จำนวนเส้นของสายพาน	
β	มุมที่สายพานทำกับแนวระดับ	
θ	มุมที่ตัวนำเคลื่อนที่กระทำกับเส้นแรงแม่เหล็ก	$^{\circ}$
ϕ	เส้นแรงแม่เหล็ก หรือฟลักซ์แม่เหล็ก	Wb
γ	ค่าความหนาแน่นของวัตถุใดๆ	kg/m^3
ρ	สภาพความต้านทานของแผ่นตัวนำ	$\Omega\text{-m}$
σ_u	Ultimate Strength	MN/m^2
σ_y	Tensile Yield Strength	MN/m^2

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
τ	ความเค้นเฉือน	N/m^2
μ	ค่าความซึมซาบได้ของตัวนำใดๆ	
μ_c	Poisson Ratio	
μ_b	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างสายพานกับพูเลย์	
μ_0	ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ	
μ_r	ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์	
ω	ความเร็วเชิงมุมของแผ่นตัวนำ	rad/s