

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เรื่อง มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

Tubular Linear Induction Motor



โดย
นายพงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง
นายพรชัย เงามาย
นายสุวิทย์ ป้องคำสิงห์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ปรากฏ ไพรสุวรรณ

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 34185
วัน, เดือน, ปี- 6 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

Tubular Linear Induction Motor

ผู้จัดทำ

1. นายพงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง
2. นายพรชัย เงามฉาย
3. นายสุวิทย์ ป็องคำสิงห์



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ประกาย ไพรสวรรณา)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

พงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง

พรชัย เภมาฉาย

สุวิทย์ ป็องคำสิงห์

ผศ. ประภาส ไพรสุวรรณนา อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเอาหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก (TLIM) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น มาสร้างเป็นตัวกระตุ้น (Actuator) ซึ่งขดลวดด้านปฐมภูมิจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวยาว (ฟลักซ์ตามแนวการเคลื่อนที่ของทุติยภูมิ) โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ตัวกระตุ้นที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะการทำงานแบบสร้างแรงเป็นหลัก และจุดทำงานอยู่ที่ความเร็วต่ำ ดังนั้นประสิทธิภาพจึงไม่ใช่สิ่งที่สำคัญที่พิจารณา และนอกจากนี้ยังทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ได้สร้างขึ้น

Tubular Linear Induction Motor

Pongsak Markming

Pornchai Ngaochai

Suwit Pongcomsing

Assistant Professor Prapas Prisuwana

Advisor

1998

Abstract

This project is the application of Tubular Linear Induction Motor principle, which is a member of Linear Induction Motor, for building actuator. Primary winding, build longitude magnetic flux, following motion of secondary (rotor), by using three phase voltage source. Because major operation is in order to force product with operating point at low speed, efficiency is not necessary to be considered. In addition, there are property test for each obtained components.

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูปภาพ	IV
สารบัญกราฟ	V
สารบัญตาราง	V
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น	5
2.1 หลักการทำงานและพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น	5
2.2 ผลกระทบที่มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น	8
2.2.1 ผลกระทบจากส่วนปลาย	8
2.2.2 ผลกระทบจากขอบด้านข้าง	9
2.2.3 การรั่วไหลของฟลักซ์ที่ช่องอากาศเนื่องจากช่องอากาศมีค่ามาก	10
2.2.4 ผลกระทบที่ผิวเนื่องมาจากความหนาของแผ่นเพลททางทุติยภูมิ	11
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	21
บทที่ 4 โครงสร้างของชิ้นงาน	28
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	34
บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป	48
กิตติกรรมประกาศ	52
เอกสารอ้างอิง	53

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		
1	เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน	2
2	Flat LEM	3
3	Tubular LEM	3
4	เส้นแรงแม่เหล็กถัฟในช่องอากาศ	5
5	ทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำ	6
6	ทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำ (มองด้านบน)	6
7	ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก (มองด้านข้าง)	7
8	แสดงผลกระทบจากส่วนปลาย	8
9	ทางเดินของกระแสในแผ่นด้านทุติยภูมิ	9
10	ลักษณะเส้นทางของกระแสเหนี่ยวนำ	9
11	ผลลัฟการกระจายสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บในแนวขวาง	10
12	การกระจายเส้นแรงแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิ	10
13	ผลกระทบเชิงฝวของเพลทางด้านทุติยภูมิซึ่งมีแกนเหล็กทางอุดมคติดูด้ด้านหลัง	11
14	วงจรมีอนของ Flat LIM	12
15	โครงสร้างด้านปฐมภูมิ	18
16	โครงสร้างด้านทุติยภูมิ	19
17	วงจรมีอนที่ใช้คำนวณ	25
18	วงจรมแม่เหล็ก	27
19	แสดงชุดแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิที่ให้เป็น 8 แฉก	28
20	แสดงส่วนประกอบของโรเตอร์	29
21	สปริงกันกระแทก	30
22	แสดงการเชื่อมต่อขดลวด	30
23	แบร์ริง	31
24	แผ่นเบกาไลต์ซีดโครงสร้างสเตเตอร์	31
25	ชุดรับแรงกระแทกและลิมิตสวิดช์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26	แสดงภาคตัดขวางของโครงสร้าง	32
27	วงจรควบคุม	33
38	แสดงการประยุกต์ใช้งาน	49
39	แสดงการประยุกต์ใช้งาน	50
40	แสดงการประยุกต์ใช้งาน	50
41	แสดงภาพถ่ายชิ้นงานที่สร้างขึ้น	51

สารบัญกราฟ

กราฟรูปที่

28	แสดงผลการทดลองแรงออกตัวเทียบกับแรงดันไฟฟ้า	36
29	แสดงการทดลอง	37
30	แสดงความเร็วของมอเตอร์เทียบกับแรงดันไฟฟ้า	43
31	แสดงกระแสต้านปฏิกิริยาเทียบกับความเร็วของมอเตอร์	44
32	แสดงแรงผลึกเทียบกับความเร็วมอเตอร์	44
33	แสดงกำลังไฟฟ้าขาเข้าเทียบกับความเร็วของมอเตอร์	45
34	แสดงกำลังไฟฟ้าขาออกเทียบกับความเร็วของมอเตอร์	45
35	แสดงประสิทธิภาพเทียบกับความเร็วของมอเตอร์	46
36	แสดงค่าตัวประกอบกำลังเทียบกับความเร็วของมอเตอร์	46
37	แสดงคุณสมบัติโดยรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก	47

สารบัญตาราง

ตารางที่

1	สรุปผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ใช้ออกแบบ	16
2	แสดงผลการทดลองที่ 1	35
3	แสดงผลการทดลองที่ 2	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น (Linear Electrical Machine)

ความหมาย

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น (Linear Electrical Machine; LEM) คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้มีทิศทางการเคลื่อนที่ของส่วนเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรง หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในลักษณะคล้ายคลึงกับการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนรอบ (Rotating Electrical Machine) ซึ่งเป็นที่รู้จักและคุ้นเคยกันเป็นอย่างดีโดยทั่ว ๆ ไป แต่สำหรับการที่จะวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น นั้นค่อนข้างจะมีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนรอบ สาเหตุเนื่องมาจากในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นจะเกิดผลกระทบชั่วคราวขึ้นอันเนื่องมาจากความไม่ต่อเนื่องตามทิศทางการเคลื่อนที่ อีกทั้งยังมีผลกระทบจากส่วนปลาย (End effect) และผลกระทบจากขอบด้านข้าง (Edge effect), ผลกระทบที่ผิว (Skin effect) ซึ่งผลกระทบเหล่านี้ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กรวมภายในช่องอากาศ (Air gap flux) มีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรต่ำลง

เนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นที่มีการเคลื่อนที่อยู่ในแนวเส้นตรง ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของเส้นแรงแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กที่อยู่บนส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) จึงอยู่ในรูปของแรงผลักดัน (Thrust, Propulsion force หรือ Traction force) ลักษณะเด่นประการหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นคือจะมีแรงอีกชุดหนึ่งเกิดขึ้นคือ แรงในแนวตั้งฉาก (Normal force) ซึ่งจะไม่พบในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนรอบ แรงในแนวตั้งฉากนี้มีประโยชน์ทำให้เกิดการยกตัวของส่วนเคลื่อนที่ให้ลอยขึ้นสามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับการทำงานของรถไฟให้สามารถยกตัวรถไฟให้ลอยขึ้นเหนือราง ลดการเสียดทานกับตัวราง และทำให้รถไฟสามารถเคลื่อนที่ไปตามรางได้สะดวกขึ้น

ความแตกต่างของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น และ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน

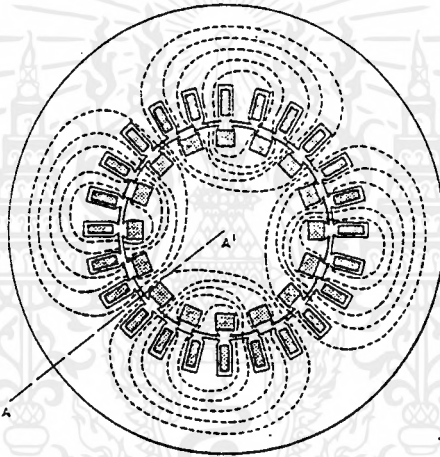
1.) ข้อแตกต่างด้านโครงสร้างภายนอก

เพื่อการศึกษาและเป็นการง่ายต่อการทำความเข้าใจหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น อีกทั้งจะให้เห็นความสัมพันธ์และข้อแตกต่างกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนรอบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น เราจะทำการพิจารณาส่วนอยู่กับที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นเหมือนว่าเกิด

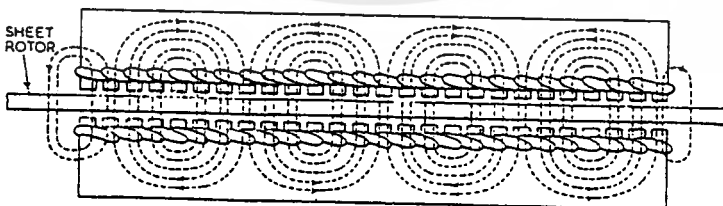
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นจากการผ่าส่วนที่อยู่กับที่ของเครื่องจักรกลแบบหมุนจากนั้นก็ทำการคลี่ออกวางไปตามแนวพื้นราบโดยถ้าผ่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนออกเป็น 2 ส่วน แล้วคลี่ออกดังรูป 2a ก็จะได้ส่วนที่อยู่กับที่เป็นแบบราบ 2 ด้าน (Double side flat linear electrical machine : DSLEM) แต่ถ้านำส่วนที่อยู่กับที่ด้านหนึ่งออกไปเราก็จะได้ดังรูปที่ 2b ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่แบบราบด้านเดียว (Single side flat linear electrical machine : SLEM)

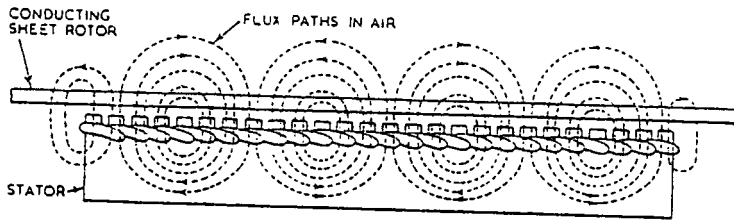
นอกจากนี้เมื่อทำการผ่าแล้วคลี่ส่วนที่อยู่กับที่ออกแล้วเรายังสามารถดัดแปลงลักษณะการต่อวงจรไฟฟ้า และ วงจรแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากการผ่าส่วนที่อยู่กับที่ของเครื่องจักรแบบหมุนแล้วคลี่ออก จากนั้นก็ทำการม้วนกลับในอีกทิศทางหนึ่ง เราก็จะได้รูปแบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น อีกชนิดหนึ่งที่เรียกกันว่า เทอรับูลาร์ (Tubular)



รูปที่ 1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน

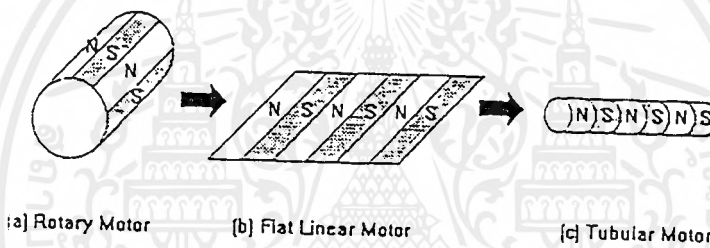


(2a)



(2b)

รูปที่ 2 Flat LEM (a) DSLEM (b) SLEM



รูปที่ 3 TUBULAR LEM

2.) ข้อแตกต่างเรื่องขนาดของช่องว่างอากาศ

ข้อแตกต่างประการที่สองระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนรอบคือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นจะมีช่องว่างอากาศค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวที่เกิดจากการสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นนั่นเอง และยิ่งช่องว่างอากาศมากก็ยิ่งทำให้เกิดผลอันไม่พึงประสงค์กับคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น เช่น ทำให้กระแสตอนเริ่มต้นสตาร์ทมีค่าสูง, ทำให้แรงที่เกิดจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดต่ำลง, เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) มากขึ้น, ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่ำ เป็นต้น

3.) ข้อแตกต่างเรื่องด้านทุติยภูมิ

คุณสมบัติของด้านทุติยภูมิ(Secondary) หรือส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลเชิงเส้นมีความแตกต่างจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนโดยสิ้นเชิง เพราะส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนนั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีควมกว้างหรือมากกว่าแกนเหล็กด้านปฐมภูมิ (Primary) ได้ แต่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นนี้สามารถทำได้และเนื่องจากคุณสมบัติข้อนี้ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ผลกระทบจากขอบแนวขวาง (transverse edge effect)” ซึ่งเป็นผลกระทบที่สำคัญและมีผลต่อพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน

4.) ข้อแตกต่างในเรื่องแรงในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

แรงในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่จะปรากฏขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้น แรงในแนวตั้งฉากนี้อาจจะเป็นได้ทั้งแรงดูดและแรงผลัก ส่วนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนแรงในแนวตั้งฉากนี้จะมีสถานะสมดุลย์เสมอดังนั้นจึงมีการหักล้างกันจนหมดสิ้นตลอดเวลา

วัตถุประสงค์การดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น
2. ออกแบบมอเตอร์ต้นแบบเพื่อที่จะทำการสร้างให้เหมาะสม
3. สร้างมอเตอร์ต้นแบบเพื่อทำการทดลอง
4. ทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติมอเตอร์ต้นแบบ

เนื้อหาของปริญาานิพนธ์ประกอบไปด้วย

1. ทฤษฎีเบื้องต้นของลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ที่ทำการศึกษาประกอบ โครงการงาน
2. การคำนวณออกแบบมอเตอร์ต้นแบบที่จะสร้าง
3. ส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ต้นแบบ
4. การทดลองและผลการทดลอง
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมด้วยแนวทางการพัฒนา

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 หลักการทำงานและพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

2.1.1 หลักการเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นนั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีเดียวกันกับมอเตอร์แบบหมุนคือเมื่อจ่ายไฟให้แก่ขดลวดที่ด้านปฐมภูมิจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก (Magnetomotive Force : mmf) ขึ้น ซึ่งแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$U_s = 2\tau f \quad (1)$$

เมื่อ U_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed)

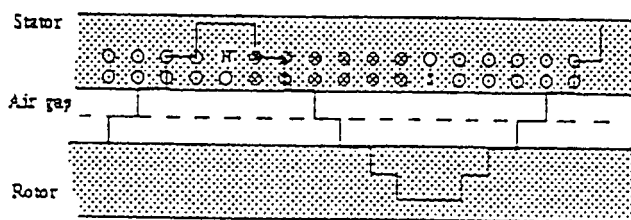
τ คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (pole pitch)

f คือ ความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนเข้า (input frequency)

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วซิงโครนัสนี้จะเคลื่อนที่ตัดตัวนำที่ด้านทุติยภูมิซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induce emf) และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ด้านทุติยภูมิ เมื่อรวมแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากปฐมภูมิ (F_1) และแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากทุติยภูมิ (F_2) ก็จะได้แรงเคลื่อนทางแม่เหล็กลัพธ์ (resultant mmf : R) ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการ

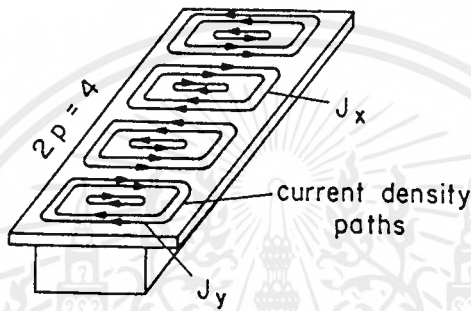
$$R = F_1 + F_2 \quad (2)$$

โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ (R) นี้จะก่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศดังรูปที่ 4

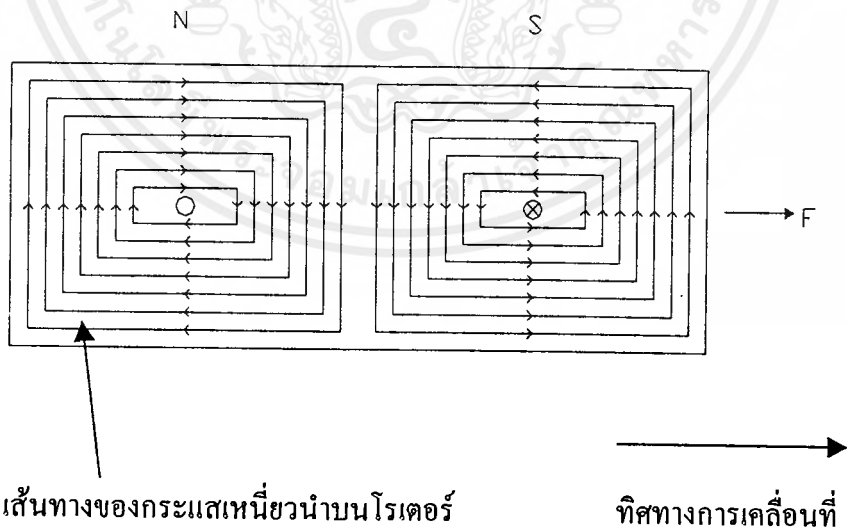


รูปที่ 4 เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ในช่องอากาศ

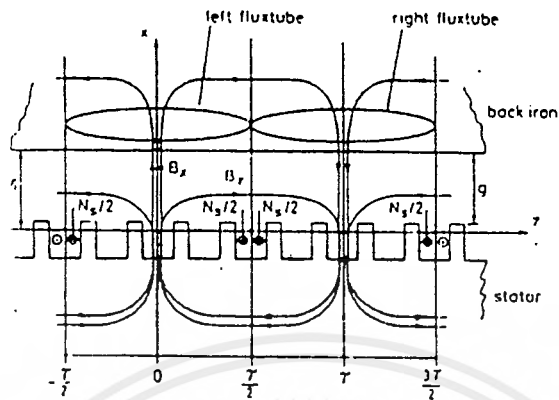
การที่ส่วนที่เคลื่อนที่ซึ่งเป็นทุดิขภูมิสามารถเคลื่อนที่ได้ นั้นเกิดจากการเคลื่อนที่ของ
 เส้นแรงแม่เหล็กจากด้านปฐมภูมิตัดผ่านแผ่นทุดิขภูมิทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ด้านทุดิขภูมิ
 ทำให้เกิดกระแสไหลวนซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนส์ซึ่งกล่าวว่าเมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัด
 กับแผ่นโลหะตัวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลเป็นวงปิดอยู่บนแผ่นโลหะตัวนำ โดยจะมีทิศทางของ
 กระแสในทิศที่จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีทิศตรงกันข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้ามาตัดกับแผ่น
 โลหะตัวนำนั้น



รูปที่ 5 ทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำ



รูปที่ 6 ทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำ (มองด้านบน)



รูปที่ 7 ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก (มองด้านข้าง)

เมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กจากด้านปฐมภูมิ (F1) ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางขวา เมื่อมองจากรูปด้านข้างจะเห็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้า-ออกจากด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำ ไหลวนอยู่บนด้านทุติยภูมิ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังที่แสดงในรูปที่ 6 (มองด้านบน) จากรูปมองด้านบนพิจารณากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นซึ่งมีทิศทางพุ่งขึ้น(กระแสเหนี่ยวนำที่มีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่) และอยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็กเหนือที่มีทิศพุ่งออกจากหน้ากระดาด จะเกิดแรงกระทำต่อด้านทุติยภูมิซึ่งมีขนาด

$$F = I_l \times B \quad (3)$$

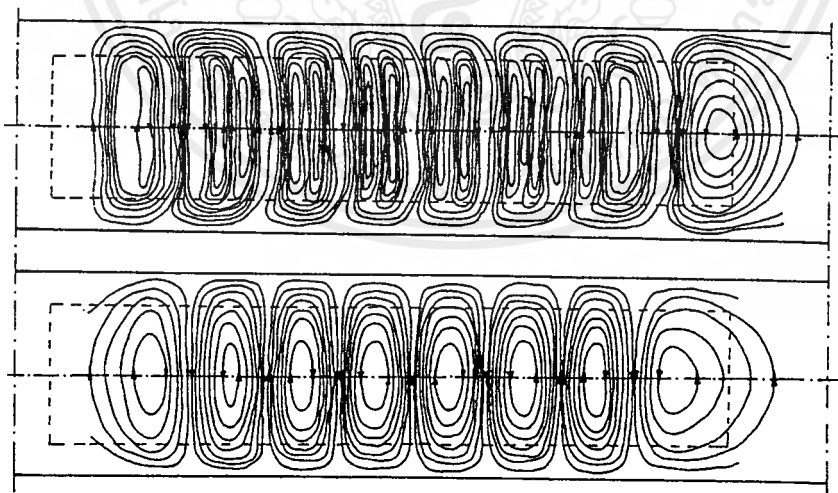
และจะมีทิศทางเป็นไปตามกฎมือขวา ซึ่งจะได้ทิศทางของแรงจุดให้แผ่นทุติยภูมิสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางขวามือ ถ้าพิจารณากระแสไหลวนชุดถัดไปซึ่งมีทิศทางพุ่งลง และพบว่าอยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็กขั้วใต้ที่มีทิศพุ่งเข้ากระดาด จะเกิดแรงกระทำต่อด้านทุติยภูมิซึ่งมีขนาดเป็นไปตามสมการ (3) เช่นกัน ส่วนทิศทางก็เป็นไปตามกฎขวามือ จะพบว่าเกิดแรงกระทำในทิศทางด้านขวามือเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นทิศที่เสริมกับทิศทางการเคลื่อนที่ และเป็นทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์ของด้านปฐมภูมิ (F1) ด้วย

2.2 ผลกระทบที่มีผลการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

2.2.1 ผลกระทบจากส่วนปลาย

ในลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์นั้นจะมีปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นและไม่พบในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน คือ ผลกระทบจากส่วนปลาย ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ผลกระทบจากส่วนปลายชนิดอยู่กับที่ (Static end effect) และผลกระทบจากส่วนปลายแบบเคลื่อนที่ (Dynamic end effect) ผลกระทบส่วนปลายแบบอยู่กับที่นั้นเกิดขึ้นเนื่องมาจากคุณสมบัติเป็ดวงจรทางแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ผลที่ตามมาคือจะทำให้ความเหนี่ยวนำตัวเอง (self inductance) และความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ต่อเฟสของทางด้านปฐมภูมิจะเกิดความไม่สมมาตรขึ้น อย่างไรก็ตามผลกระทบในส่วนนี้มีค่าน้อยมากสามารถละทิ้งได้เมื่อทำการออกแบบสร้างให้จำนวนขั้วแม่เหล็กมีจำนวนขั้วแม่เหล็กมากกว่า 6 ขั้วขึ้นไป

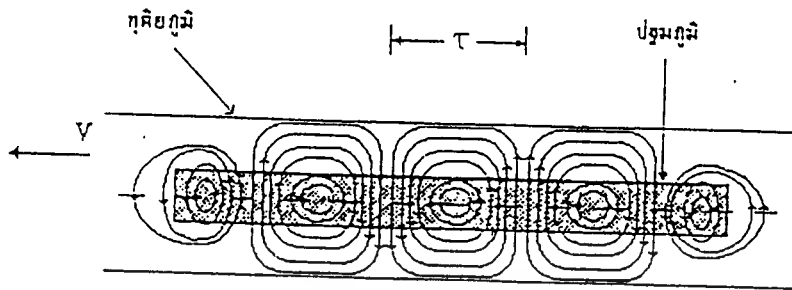
ส่วนผลกระทบจากส่วนปลายแบบเคลื่อนที่นั้นเป็นผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันของด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเคลื่อนที่เข้ามาอย่างต่อเนื่องภายในช่องอากาศและทางด้านออกนั้น ตัวนำของแผ่นทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ออกจากช่องอากาศอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจากกฎของเลนส์กระแสของทุติยภูมิในบริเวณด้านเข้าจะพยายามต้านการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศ ซึ่งส่งผลให้เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องอากาศของขั้วแรกใกล้ทางด้านเข้ามีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับขั้วถัดไปในมอเตอร์



รูปที่ 8 แสดง ผลกระทบจากส่วนปลาย

ในทำนองเดียวกัน จากกฎของเลนส์ทางด้านออกนั้นหลังจากที่ทุติยภูมิเคลื่อนที่ออกจากทางด้านออกกระแสในแผ่นตัวนำทุติยภูมิพยายามที่จะรักษาให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสนี้จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในรูปของความต้านทาน โดยที่ไม่มีผลให้เกิดการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งเราสามารถแสดงลักษณะทางเดินของกระแสในแผ่นทุติยภูมิได้ดังรูป 9

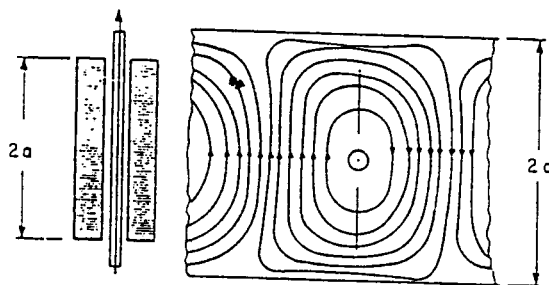


รูปที่ 9 ทางเดินของกระแสแผ่นในด้านทุติยภูมิ

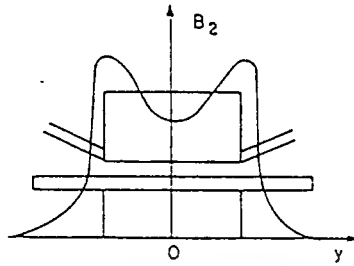
จากผลของผลกระทบจากส่วนปลายดังกล่าวข้างต้นซึ่งทำให้เกิดความต้านทานประสิทธิผลสูงขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพและแรงสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้มีค่าลดลง ซึ่งผลกระทบจากส่วนปลายนี้จะส่งผลมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่มีความเร็วสูง

2.2.2 ผลกระทบจากขอบด้านข้าง

ผลกระทบจากขอบด้านข้าง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตามขวาง อันเนื่องมาจากด้านทุติยภูมิมีความกว้างมากกว่าด้านปฐมภูมิ ซึ่งจะพบว่าส่วนที่ยื่นออกไปของด้านกว้างของด้านทุติยภูมิ จะมีกระแสไหลวนอยู่เช่นเดียวกับกับส่วนของด้านทุติยภูมิที่อยู่ในส่วนของปฐมภูมิ กระแสที่ไหลวนอยู่ในส่วนนอกนี้ซึ่งเป็นกระแสที่ไม่ได้ทำให้เกิดแรงกระทำต่อด้านทุติยภูมิ หรือกล่าวได้ว่าไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแต่กระแสดังกล่าวนี้จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นมาครอบงวนเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศทำให้เส้นแรงแม่เหล็กกระจายไม่สม่ำเสมอดังรูปที่ 10, 11



รูปที่ 10 ลักษณะเส้นทางของกระแสเหนี่ยวนำ



รูปที่ 11 ผลลัพธ์การกระจายสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ปในแนวขวาง

2.2.3 การรั่วไหลของฟลักซ์ที่ช่องอากาศเนื่องจากช่องอากาศมีค่ามาก
ลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ส่วนใหญ่จะมีข้อมูลอยู่ในช่วงนี้คือ

แอร์แก๊ปทางกล $g_m \cong 2$ ถึง 15 mm.

$g_m / \tau \cong 0.04$ mm. (τ =pole pitch)

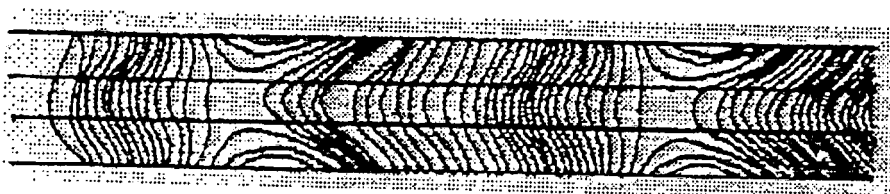
ความหนาของแผ่นเพลทด้านทุติยภูมิ $d \cong 9$ ถึง 6 mm.

แอร์แก๊ปทางแม่เหล็ก $g_o = g_m + d$

ความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่แอร์แก๊ป ทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะรูปร่างดังรูป 12 เมื่อทางเดินของฟลักซ์ผ่านช่องอากาศอย่างไม่สมบูรณ์ ภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการรั่วไหลบางส่วนขึ้นที่ช่องอากาศในกรณีเช่นนี้จึงต้องมีสมการสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาอีกสมการหนึ่งซึ่งเป็นค่าคงที่เรียกว่า “ค่าปรับปรุงความถูกต้อง” (Correction factor : K_1) โดยที่

$$K_1 = \frac{\sinh\left[\frac{\pi}{\tau} g_o\right]}{\frac{\pi}{\tau} g_o} \quad (4)$$

และค่าแอร์แก๊ปใช้งาน g_c จะกลายเป็น $g_c = K_1 g_o$



รูปที่ 12 การกระจายเส้นแรงแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ผลกระทบที่ผิวเนื่องมาจากความหนาของแผ่นเพลททางทุติยภูมิ

การกระจายความเข้มกระแสเหนี่ยวนำในกรณีของผลกระทบที่ผิว เมื่อแผ่นเพลททางด้านทุติยภูมิมีแกนเหล็กตามอุดมคติซ้อนอยู่ด้านหลัง (Solid back iron) ดังในรูปที่ 13 เพราะเหตุนี้เองจึงทำให้ค่าความนำจริงของแผ่นเพลท

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{k_{sk}} \quad (5)$$

เมื่อ k_{sk} คือค่าตัวประกอบความถูกต้องหาได้โดย

$$k_{sk} = \frac{2d}{ds} \left[\frac{\sinh\left(\frac{2d}{ds}\right) + \sin\left(\frac{2d}{ds}\right)}{\cosh\left(\frac{2d}{ds}\right) - \cos\left(\frac{2d}{ds}\right)} \right] \quad (6)$$

เมื่อ d คือความหนาของแผ่นเพลทและ ds คือความลึกหยั่งเห็น (the depth of penetration) ซึ่งหาได้จาก

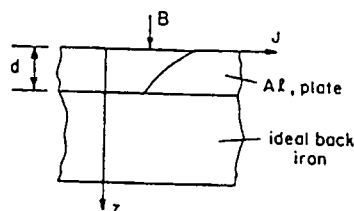
$$d_s = \frac{1}{\sqrt{\left(\pi \sigma f_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2\right)}} \quad (7)$$

เมื่อ f_1 = ความถี่ที่สเตเตอร์

s = สลิป

τ = pole pitch

สำหรับ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบ 2 ด้าน ในสมการที่แสดงค่า k_{sk} จะเปลี่ยน d เป็น $d/2$



รูปที่ 13 ผลกระทบเชิงผิวของเพลทด้านทุติยภูมิซึ่งมีแกนเหล็กทางอุดมคติอยู่ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วงจรเสมือน (Equivalent Circuit)

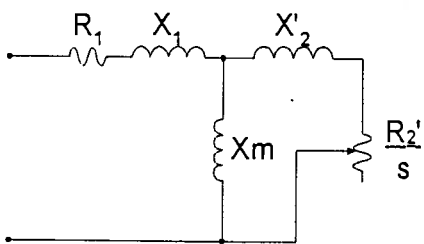
วงจรเสมือนเป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมและการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปรวมทั้งมอเตอร์เชิงเส้นด้วย วงจรเสมือนที่จะกล่าวถึงนี้อาจจะมีความบกพร่องอยู่บ้าง แต่แนวทางในการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจกับวงจรเสมือนก็เป็นแนวทางหนึ่งที่จะนำไปสู่ความเข้าใจในเบื้องต้น วงจรที่มีความใกล้เคียงสูงจะมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์และสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นซึ่งในการกำหนดวงจรเสมือนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นเราจะคำนึงถึงผลของ ผลกระทบจากส่วนปลาย และ ผลกระทบจากด้านข้างด้วย โดยผลของผลกระทบจากด้านข้างจะรวมได้โดยตรงกับอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ ส่วนผลของผลกระทบจากส่วนปลาย นั้นจะเข้าร่วมในวงจรโดยเป็นอิมพีแดนซ์ที่แปรกับสลิปซึ่งค่อนข้างอยู่กับส่วนแนวตั้งในวงจร (magnetizing impedance) โดยจะเรียกว่า อิมพีแดนซ์จากผลกระทบจากส่วนปลาย (end effect impedance) แต่ก็ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นเนื่องจากการใช้งานที่ความเร็วต่ำ ๆ ซึ่งจะมีผลของผลกระทบจากส่วนปลาย น้อยมากจึงสามารถตัดทิ้งได้

เนื่องจากโครงสร้างของด้านทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ทำมาจากแผ่นตัวนำบางซึ่งต้องพิจารณาถึงสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว (Surface resistivity : ρ_r) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

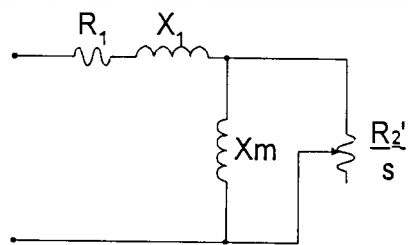
$$\rho_r = \frac{\rho}{d} \quad (8)$$

- เมื่อ ρ_r = สภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว
 ρ = สภาพความต้านทานเชิงปริมาตร
 d = ความหนาของแผ่น โลหะบางที่ใช้ทำทุติยภูมิ

วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบ



รูปที่ 14.1



รูปที่ 14.2

รูปที่ 14 แสดงวงจรเสมือนของ Flat LIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขของการใช้วงจรเสมือนในการวิเคราะห์

- 1.) วงจรเสมือนนี้ใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าวิเคราะห์
- 2.) ตัวแปรต่าง ๆ ภายในวงจรเสมือนนี้พิจารณาเป็นค่าต่อเฟสเท่านั้น
- 3.) X_2 และ R_2 หมายถึงค่าที่ทำการย้ายสู่ด้านปฐมภูมิเรียบร้อยแล้ว
- 4.) เนื่องจากพิจารณาว่า ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ด้านทุติยภูมิ (Secondary leakage reactance X_2) นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ด้านปฐมภูมิ (Primary leakage reactance X_1) ดังนั้นจึงประมาณว่า $X_2 \cong 0$ ดังนั้นจึงได้รูปวงจรเสมือนดังรูปที่ 14.2

การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในวงจรเสมือนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

ความต้านทานด้านปฐมภูมิ :

$$R_1 = \frac{\rho_c K_p^2 q m^2 l N_2 \left(1 + \frac{\tau K_1}{l}\right)}{K_f K_d p \tau^2} \quad \text{/phase} \quad (9)$$

ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ด้านปฐมภูมิ

$$X_1 \approx \frac{2\mu_0 \omega}{p} \left[\frac{(\lambda_c + \lambda_d) l}{q} + \lambda_c \frac{\tau}{\pi} K_2^2 m \right] N^2 \quad (10)$$

ความต้านทานด้านทุติยภูมิ

$$R_2 = \frac{6l}{\pi p} \rho_c (K_w N)^2 \quad \text{/phase} \quad (11)$$

ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ด้านทุติยภูมิ

$$X_2 = 0 \quad \text{/phase} \quad (12)$$

แมคนิไตซิ่งรีแอกแตนซ์

$$X_m = \frac{6\mu_0\omega}{\pi^2} \frac{tl}{pg} (K_w N)^2 \quad (13)$$

ค่าตัวประกอบการออกแบบที่ดี (goodness factor)

$$G = \frac{X_m}{R_2} = \frac{2\mu_0 f \tau^2}{\rho_r \pi g} \quad (14)$$

การคำนวณ (พิจารณาเป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด)

$$\text{กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า} = V_1 I_1 \cos\theta \quad (15)$$

$$\text{ความสูญเสียจากความต้านทานด้านปฐมภูมิ} = I_1^2 R_1$$

$$\text{กำลังส่งถ่าย} = (1-s)(V_1 I_1 \cos\phi_1 - I_1^2 R_1)$$

$$\text{แรงส่งถ่าย} = (\text{กำลังส่งถ่าย}) / \text{ความเร็ว}$$

$$\text{ความสูญเสียจากความต้านทานด้านทุติยภูมิ} = s(V_1 I_1 \cos\theta - I_1^2 R_1)$$

ตัวแปรต่างๆ ที่ปรากฏในสมการมีความหมายดังนี้

ρ_c = copper volume resistance

$$K_p = \frac{t_c}{w} = \frac{\text{slot pitch}}{\text{slot width}} = 2 - 3$$

K_f = Slot filling factor = 0.5 - 0.6

$$K_d = \frac{t}{w} = \frac{\text{slot depth}}{\text{slot width}} = 3 - 5$$

$$K_1 = \frac{\text{Ratio of mean length of coil end connection}}{\text{pole pitch}} = 1.2 - 1.8$$

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

$$\lambda_c = \lambda_s = \text{Slot specific permeances} = \frac{1}{12} K_d (1 + 3\beta)$$

$$\omega = 2\pi f$$

τ = pole pitch

f = supply frequency

$$\beta = \text{cording factor} = \frac{\text{coil pitch}}{\text{pole pitch}}$$

l = stack width

K_w = primary winding distribution factor = 0.9

q = slot / pole / phase

ρ_r = effective resistivity of secondary sheet

$$\lambda_d = \text{differential specific permeances} = \frac{5g/w}{5 + 4g/w}$$

$$\lambda_e = \text{end connection specific permeances} = 0.3(3\beta + 1)$$

$$U_s = \text{synchronous speed} = 2\pi f$$

$g = g_m + d$ = magnetic air gap = (mechanic gap) + (secondary sheet thickness)

m = number of phase

N = turn per phase

p = pole pair

K_2 = winding breadth factor

ตารางที่ 1 สรุปผลจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ

ตัวแปร	เพิ่มขึ้น	ลดลง
ช่องอากาศ g	- กระแสกระตุ้นสูงขึ้น - การสูญเสียที่ปลายด้านข้างสูงขึ้น	- goodness factor สูงขึ้น - แรงลัพท์สูงขึ้น - ประสิทธิภาพสูงขึ้น
ความยาวขั้ว τ	- goodness factor สูงขึ้น - ความหนาของ back iron เพิ่มขึ้น	- จำนวนขั้วมากขึ้น
จำนวนขั้ว $2p$	- end effects ลดลง	- รีแอกแตนซ์รั่วไหลของทุติยภูมิมากขึ้น
ความหนาของทุติยภูมิ	- goodness factor สูงขึ้น - กระแสสตาร์ทสูงขึ้น	- รีแอกแตนซ์รั่วไหลของทุติยภูมิมากขึ้น
สภาพความต้านทานของทุติยภูมิ	- end effect ลดลง	- goodness factor สูงขึ้น - การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานน้อย
ความกว้างของซี่ฟันสล็อต	- รีแอกแตนซ์รั่วไหลมากขึ้น	- แรงลัพท์สูงขึ้น - ประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก (Tubular Linear Induction Motor , TLIM)

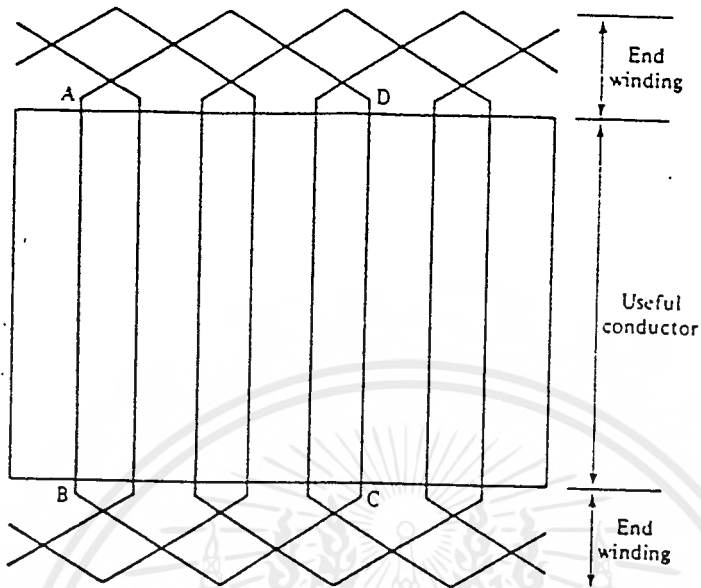
โครงสร้างด้านปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ไม่มีผลของจุดเชื่อมต่อปลายในขดลวดด้านปฐมภูมิและเส้นทางของกระแสด้านทุติยภูมิ ข้อดีทางวงจรไฟฟ้านี้สามารถพิจารณาได้จากรูป (15a) ซึ่งเป็นการแสดงชุดขดลวดด้านปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบ ซึ่งจะมีตัวนำที่ใช้ประโยชน์คือ AB และ CD และมีชุดขดลวดที่เชื่อมต่อปลายคือ BC และ DA (ซึ่งขดลวดเชื่อมต่อปลาย BC,DA นี้เป็นส่วนสั้นเปลือยทองแดงและการสูญเสียจากความต้านทาน และก็ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องกับใด ๆ กับการสร้างแรงของ มอเตอร์เลย)

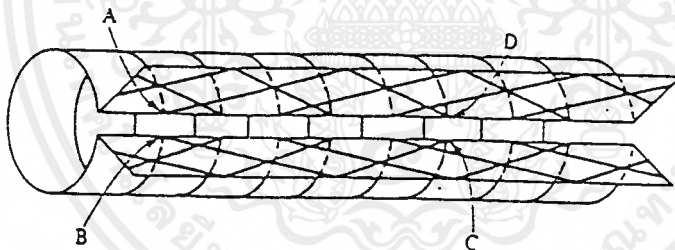
ถ้าทำการม้วนชุดขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบ เป็นทรงกระบอกตามรูป (15b) ก็จะกลายเป็น มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก จะเห็นว่าส่วนที่ใช้ประโยชน์ของขดลวดจะวนครบเป็นวงรอบและชุดขดลวดที่เป็นจุดเชื่อมต่อปลาย มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก จะใช้ประโยชน์จากวัสดุตัวนำได้ดีกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบ เพราะขดลวดด้านปฐมภูมิแบบทรงกระบอกและวงจรทุติยภูมิแบบทรงกระบอกจะไม่มีตัวนำเชื่อมต่อปลาย แสดงว่าในแต่ละชุดขดลวดของปฐมภูมิ และทุติยภูมิจะมีส่วนในการสร้างแรงทั้งหมด ดังนั้นความต้านทานและรีแอกแตนซ์รั่วไหลของตัวนำเชื่อมต่อปลายจะเป็นศูนย์

นอกจากนั้นยังพบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก นั้นแรงในแนวตั้งฉากจะมีค่ารวมเป็นศูนย์ เนื่องจากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก เป็นทรงกระบอกที่สมมาตรจึงง่ายต่อการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นบนลิเนียร์เบียร์ริงส์(linear bearing) อย่างไรก็ตามความยาวของระยะเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ก็ไม่ควรยาวเกิน 1-1.5 เมตร เพราะอาจจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับทางกลได้เนื่องจากแกนของทุติยภูมิต้องอยู่ตรงศูนย์กลางของแกนปฐมภูมิ เพื่อให้มีระยะห่างทางกลของเครื่องจักรมีความสม่ำเสมอ

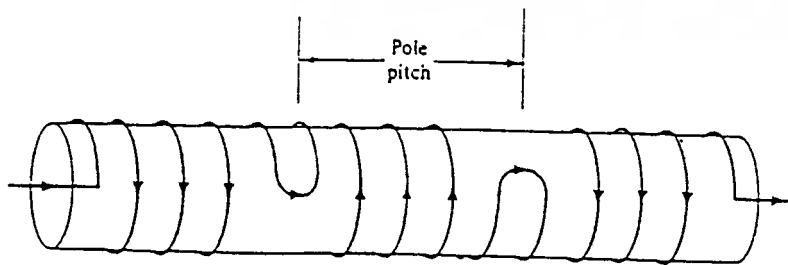
มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกสามารถสร้างได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบ ด้านปฐมภูมิอาจจะใช้หรือไม่ต้องใช้แกนเหล็กอาจจะเป็นชนิดแกนอากาศที่ใช้เพียงขดลวดพันเป็นวงแหวนและอาศัยการต่อวงจรไฟฟ้า เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตามต้องการ รูป(15c) เป็นรูปที่แสดงขดลวดอาร์เมเจอร์เพียงเฟสเดียว (จากทั้งหมด 3 เฟส) ของด้านปฐมภูมิที่มีการใช้งานแบบแกนอากาศ



รูป (15a)



รูป (15b)



รูป (15c)

รูปที่ 15 โครงสร้างคานปฐมภูมิ

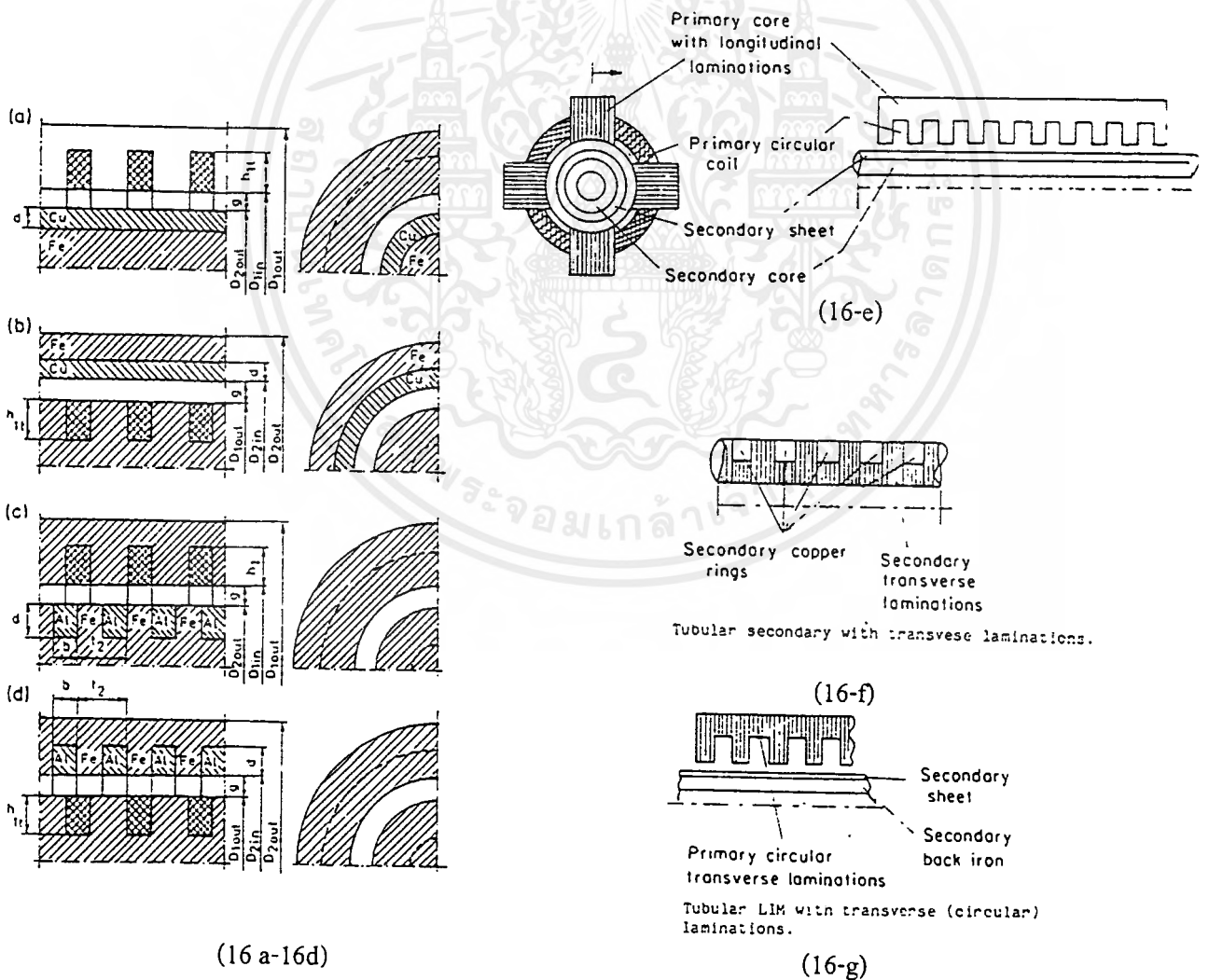
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของด้านทุติยภูมิของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแกนกระบอก

ด้านทุติยภูมิของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก นั้นจะต้องเป็นแกนกระบอกทำด้วยแกนเหล็กซึ่งมีความนำแม่เหล็กที่ดี พื้นผิวที่อยู่ภายนอกนั้นจะเป็นอะลูมิเนียมหรือทองแดงเคลือบอยู่ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่นพ่นด้วยฝุ่นทองแดง, การอัดด้วยท่อทองแดงหรืออะลูมิเนียมให้ติดแน่นอยู่กับแกนเหล็ก หรืออาจจะใช้วิธีการแยกสายละลายด้วยไฟฟ้าช่วยในการเคลือบผิวด้วยก็ได้

สามารถแบ่งรูปแบบของด้านทุติยภูมิได้ดังนี้

1. ทุติยภูมิ 2 ชั้นแบบเรียบอยู่ภายใน รูปที่ (16-a)
2. ทุติยภูมิ 2 ชั้นแบบเรียบอยู่ภายนอก รูปที่ (16-b)
3. ทุติยภูมิแบบลูกกรงอยู่ภายใน รูปที่ (16-c)
4. ทุติยภูมิแบบลูกกรงอยู่ภายนอก รูปที่ (16-d)



(16 a-16d)

(16-g)

รูปที่ 16 โครงสร้างด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดในการออกแบบ

แรงดันด้านปฐมภูมิ	(Primary Voltage /Line)	150	โวลต์
ความถี่ไฟฟ้า	(Primary frequency)	50	เฮิรตซ์
จำนวนเฟส	(Number of phase)	3	เฟส
เส้นผ่านศูนย์กลางของลํากลิ่ง	(Primary bore)	0.034	เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวด	(Primary coil average diameter)	0.064	เมตร
รอบ/ขดลวด	(Turns/Coil)	80	รอบ
ช่องอากาศ	(Air gap)	0.007	เมตร
จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก	(Pole-pair)	2	คู่ขั้ว
ระยะพิชระหว่างสลีต	(Slot-pitch)	0.045	เมตร
ความกว้างของสลีต	(Slot-width)	0.014	เมตร
ความลึกของสลีต	(Slot-depth)	0.042	เมตร
สลีต/โพล/เฟส	(slot/pole/phase)	1	
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทุติยภูมิ	(Secondary average diameter)	0.022	เมตร
ความยาวของทุติยภูมิ	(Secondary or rotor length)	1.2	เมตร
ความหนาของอะลูมิเนียม	(Aluminium thickness)	0.001	เมตร
ความหนาของท่อเหล็ก	(Solid Back Iron thickness)	0.004	เมตร
จำนวนรอบ/เฟส	(Turn/phase)	320	รอบ

จากข้อมูลในการออกแบบนำมาหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรเสมือนได้ดังต่อไปนี้
ความต้านทานด้านปฐมภูมิ (จากสมการ 16)

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q K_p^2 m^2 D_{avp} N^2}{K_f K_d p \tau^2}$$

เมื่อ

$$K_f = 0.427 \quad , \quad K_p = 3.214 \quad K_d = 3, \quad \rho_c = 2 \times 10^{-8}$$

ดังนั้น

$$R_1 = \frac{\pi (2 \times 10^{-8}) (3.214^2) (3^2) (0.064) (320^2)}{(0.427)(3)(2)(0.13)^2} = 0.8836 \quad \Omega / \text{phase}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไขการทำงานที่ความเร็วต่ำจะหาตัวประกอบการออกแบบที่ดี ได้ดังนี้

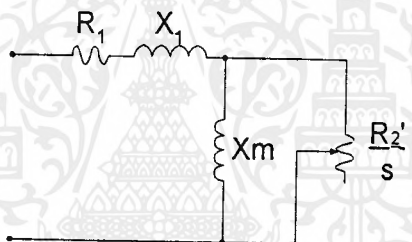
$$G = \frac{X_m}{R_2} = \frac{24.376}{4.899} = 4.975$$

และจากเงื่อนไขการออกแบบ

$$S_r G = 1$$

$$S = \frac{1}{G} = \frac{1}{4.975} = 0.201$$

นำค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ มาหาค่ากระแส, แรงพลัก, ตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 17 วงจรเสมือนที่ใช้คำนวณ

คำนวณหากระแสด้านปฐมภูมิและตัวประกอบกำลัง จากวงจรเสมือนจะได้ว่า

$$I_1 = \frac{V_1}{\left[R_1 + jX_1 + \left(\frac{jX_m R_2 / s}{R_2 / s + jX_m} \right) \right]}$$

$$= \frac{\frac{150 < 0}{\sqrt{3}}}{\left[0.8836 + j11.031 + \left(\frac{j24.376(4.899/0.201)}{4.899/0.201 + j24.376} \right) \right]}$$

$$= 3.25 \angle -60.59 \text{ A.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ขนาดกระแสด้านปฐมภูมิ} &= 3.25 \text{ แอมป์} \\ \text{ตัวประกอบกำลัง} &= \cos(60.59^\circ) = 0.491 \end{aligned}$$

คำนวณหาแรง (คิดเป็นแรงที่เกิดจาก 3 เฟส)

$$F_r = \frac{3I_1^2 R_r}{sU_r \left[\frac{1}{(sG)^2} + 1 \right]} = \frac{3(3.25)^2 (4.899)}{0.201(2 \times 0.13 \times 50) \left(\frac{1}{1^2} + 1 \right)} = 29.71 \text{ N.}$$

ความเร็วของทุติยภูมิ

$$U_r = (1-s)U_s = (1-0.201)(2 \times 0.13 \times 50) = 10.387 \text{ m/s}$$

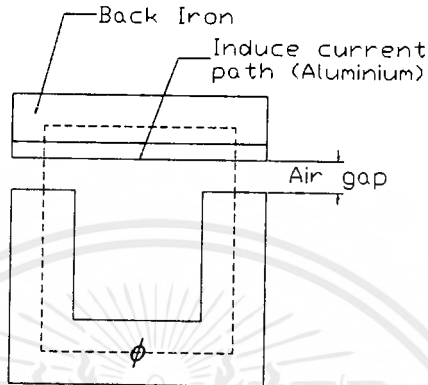
ในการออกแบบของโรตอร์งานนี้จะไม่นำผลของ ผลกระทบจากส่วนปลายและผลกระทบจากขอบด้านข้างมาเกี่ยวข้องเพื่อให้ง่ายและสะดวกในการคำนวณ ซึ่งการออกแบบนี้จะมีข้อจำกัดในหลายส่วนด้วยกัน คือ ความยาวของขั้วแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยขนาดของแกนเหล็กรูปตัว E ที่ต้องมีพื้นที่ไว้ใส่ขดลวดให้เพียงพอ ทำให้ต้องใช้แกนเหล็กตัว E ขนาดแกนกลาง 1 นิ้ว ความยาวของขั้วแม่เหล็กจึงต้องมากตาม ขนาดของท่ออะลูมิเนียมและขนาดของท่อพีวีซี ซึ่งมีผลต่อแอร์แกป และความหนาของท่อเหล็กด้านทุติยภูมิที่ไม่สามารถทำให้หนามากได้เพราะต้องการที่จะลดน้ำหนักของโรเตอร์

และสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอย่างมากอีกประการหนึ่งก็คือขั้วแม่เหล็กซึ่งอาจจะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

$$mmf = Ni = Hl = \frac{B_g (2g)}{\mu_0} \quad (26)$$

$$\therefore B_g = \frac{\mu_0 Ni}{2g} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 80 \times 3.25}{2 \times 0.007} = 0.023 \text{ Tesla}$$

ต่อมาพิจารณาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในท่อเหล็กด้านทุติยภูมิ เนื่องจากเป็นวงจรมแม่เหล็กอนุกรม ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กภายในแกนเหล็กจึงมีค่าเท่ากับเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องว่างอากาศ (ดังรูปที่ 18 ซึ่งแสดงรูปวงจรมแม่เหล็กที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ)



รูปที่ 18 วงจรมแม่เหล็ก

$$\phi_g = \phi_{\text{Back iron}}$$

$$B_g A_g = B_{\text{iron}} A_{\text{iron}}$$

$$\therefore B_{\text{Back iron}} = \frac{0.023 \times 8 \times 1.4 \times 10^{-2} \times 1.3 \times 10^{-2}}{\frac{\pi}{4} (0.022^2 - 0.015^2)} = 0.165 \text{ Tesla}$$

จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในท่อเหล็กด้านทุติยภูมิจะไม่เกิดการอิ่มตัวเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ดีในการออกแบบ

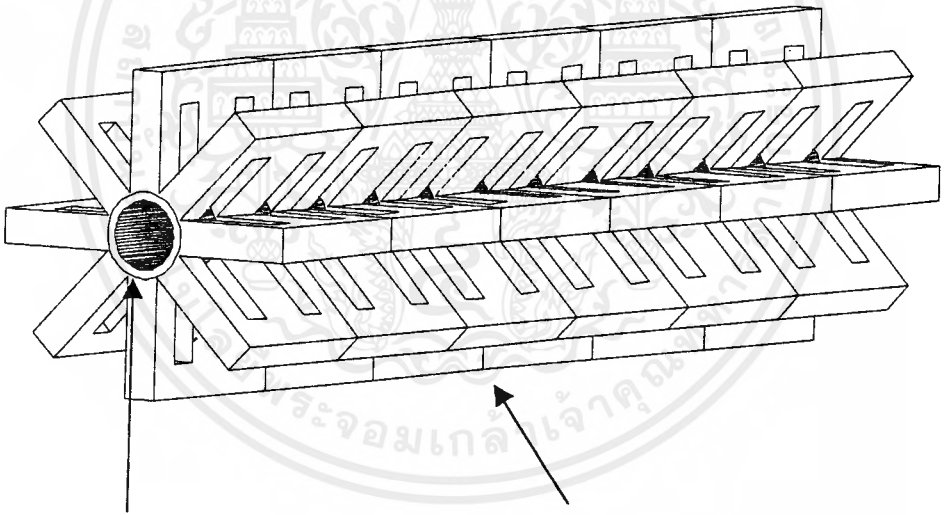
นอกจากนี้ยังมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงด้วย เช่น ขนาดของแรงดัน, พิกัดกระแส ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับลวดทองแดงที่ใช้ ความยาวของขั้วแม่เหล็กจะมีผลกับแรงและความเร็วที่ได้ เป็นต้น

บทที่ 4

โครงสร้างของชิ้นงาน

1) แกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ (Primary Core)

สร้างขึ้น โดยนำแผ่นเหล็กรูปตัววีที่ใช้ทำหม้อแปลงที่มีขนาดแกนตรงกลางประมาณ 1 นิ้ว มาเรียงต่อกันให้มีความหนาประมาณ 13 มม. แล้วเรียงให้เป็นรูปตามส่วนโค้งของที่ใช้เป็นกระบอกยึดของชิ้นงาน ซึ่งจะต้องใช้แกนเหล็กทั้งหมด 8 ชุดตลอด 1 วงรอบของทรงกระบอก ดังนั้นจะใช้แกนเหล็กรูปตัววีทั้งหมด 48 ชุด การเรียงแผ่นเหล็กให้เป็นรูปโค้งตามส่วนโค้งจะช่วยทำให้แอร์แกปมีความสม่ำเสมอ



ท่อ PVC ใช้เป็นแกนกระบอก

แกนเหล็กด้านปฐมภูมิ

(Primary bore)

(Primary or Stator Core)

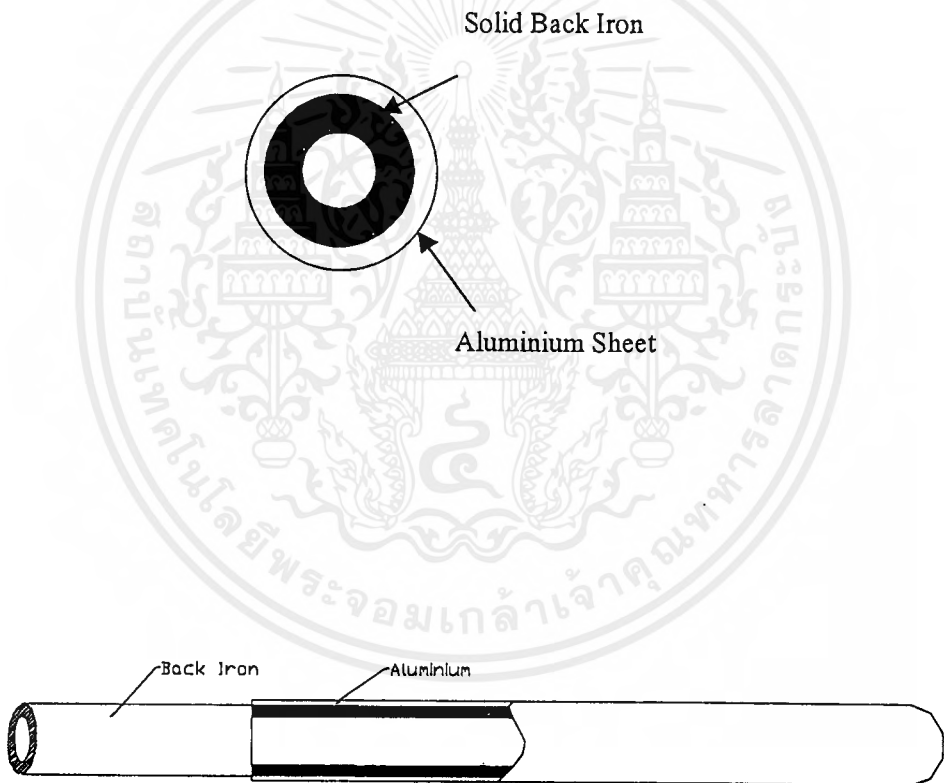
รูปที่ 19 แสดงชุด แกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ ที่ทำเป็น 8 แฉก

2) แกนกระบอก (Primary bore)

ใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 34 ม.ม. ตัดให้มีความยาว 54 ซม. ข้อดีของท่อ พีวีซี คือเป็นฉนวนที่หาได้ง่ายแต่อาจจะมีปัญหาด้านการทนต่อความร้อนอยู่บ้าง ที่ทำให้ท่อเกิดการโค้งงอแต่แก้ไขได้โดยการเปลี่ยนท่อพีวีซีใหม่ ซึ่งในโครงการนี้ก็ได้พยายามออกแบบไม่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นมากจนเกินไปในขณะทำงาน

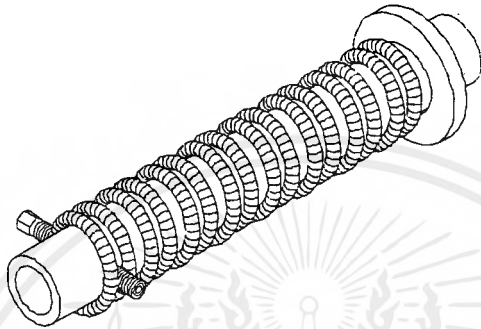
3) โรเตอร์หรือด้านทุติยภูมิ (Rotor or Secondary)

นำท่อเหล็กกลวงที่มีความหนาประมาณ 5 ม.ม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. มากลิ้งให้มีขนาดพอดีสวมลงในท่ออะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 ซม. และความยาวของโรเตอร์ 1.2 ม. ท่อเหล็กกลวงจะทำหน้าที่เป็น Back iron และยังช่วยลดน้ำหนักของโรเตอร์อีกด้วย



รูปที่ 20 แสดงส่วนประกอบของโรเตอร์

บริเวณส่วนปลายทั้ง 2 ด้านจะเจาะรูเพื่อใส่น็อตเพื่อยึดโรเตอร์ไม่ให้หลุดออกนอกสเตเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน และใส่สปริงและแผ่นยางไว้ที่บริเวณปลายเพื่อลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นด้วย



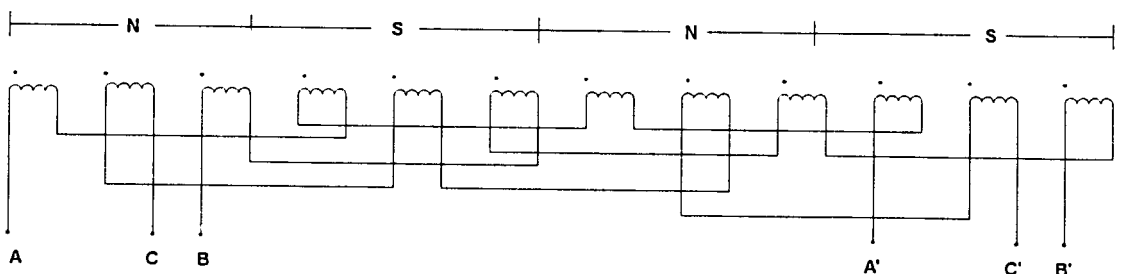
รูปที่ 21 สปริงกันกระแทก

4) แบบในการพันขดลวด

ใช้ท่อพีวีซีที่ทำเป็นแกนตัดให้มีมีความยาว 1.4 ซม. และนำไม้อัด 2 แผ่น เจาะรูเพื่อยึดกับแกนของเครื่องพันลวดประกบเข้ากับท่อพีวีซีที่ตัดไว้ยึดให้แน่นเพื่อใช้เป็นแบบในการพันขดลวดต่อไป

5) ขดลวดด้านปฐมภูมิ

ใช้ลวดขนาดเบอร์ 14 AWG พันลงในแบบพันลวดที่ทำขึ้นจำนวน 80 รอบใช้ผ้าพันไว้ให้แน่นแล้วชุบด้วยน้ำยาวานิชทิ้งไว้จนแห้ง

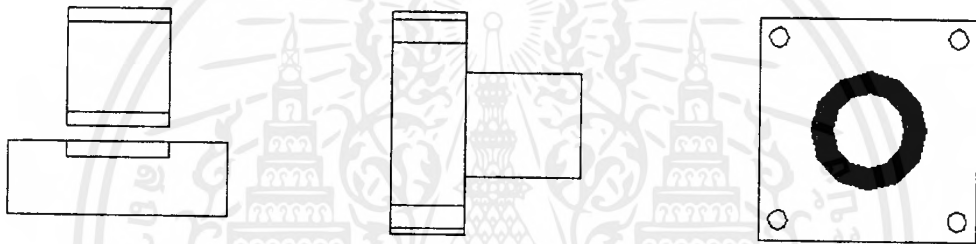


รูปที่ 22 แสดงการเชื่อมต่อขดลวด

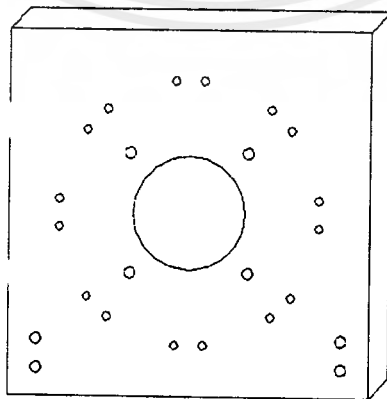
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) แบริ่ง (Bearing)

ใช้ลิเนียร์แบริ่ง หรือ สไลด์แบริ่ง (slide bearing) ซึ่งเป็นแบริ่งที่ใช้การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องที่ใส่โรเตอร์ขนาด 25 มม. นอกจากนี้ยังมีส่วนของฐานรองแบริ่งที่น่าหนักขนาด 8x8x2 ซม. มากถึงเพื่ออัดแบริ่งเข้าไป และเจาะรูบริเวณมุมทั้ง 4 เพื่อใช้สำหรับยึดแผ่นเบกาไลต์



รูปที่ 23 แบริ่ง

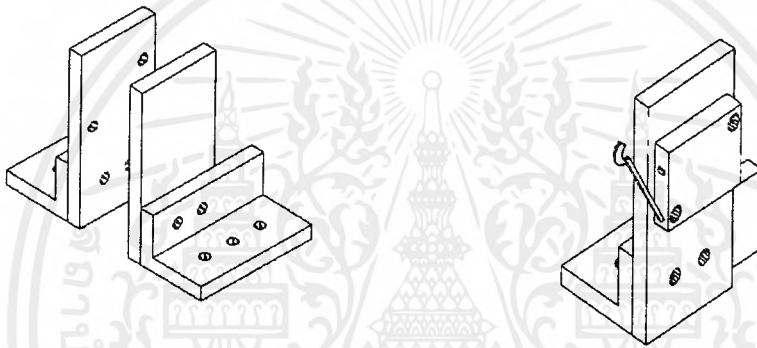


รูปที่ 24 แผ่นเบกาไลต์ยึดโครงสร้างสเตเตอร์

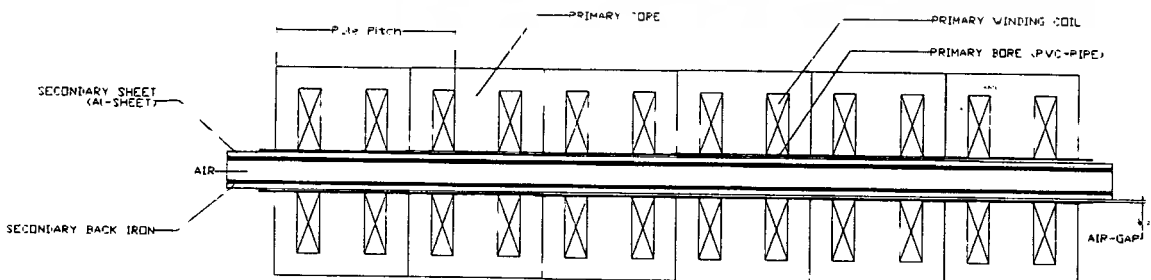
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ชุดรับแรงกระแทก

เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานแรงที่ได้นั้น ค่อนข้างจะมากอยู่พอสมควรดังนั้นจึงต้องทำชุดรับแรงกระแทกเพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนปลายของโรเตอร์ที่เป็นตัวกันไม่ให้โรเตอร์หลุดออกจากตัวสเตเตอร์นั้นกระแทกกับแบร์ริงโดยตรง โดยนำแท่งเหล็ก 2 แท่ง มาทำเป็นตัวกันกระแทกแล้วทำฐานเพื่อยึดติดกับตัวฐานของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังติดตัวลิมิตสวิตช์ไว้ที่บริเวณแท่งเหล็กด้วยเพื่อใช้ประโยชน์ในวงจรควบคุมซึ่งจะกล่าวต่อไป

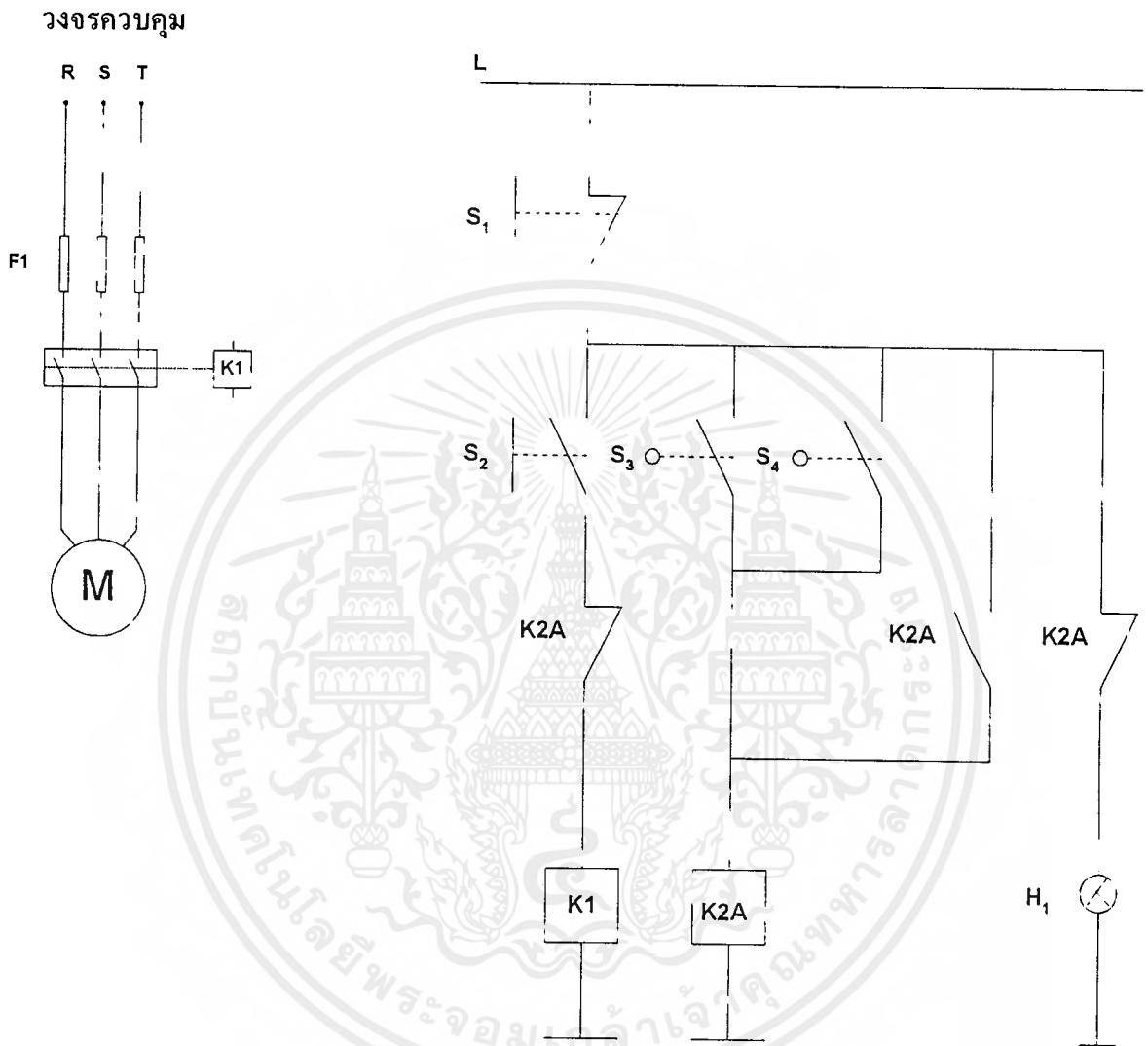


รูปที่ 25 ชุดรับแรงกระแทกและลิมิตสวิตช์



รูปที่ 26 แสดงภาคตัดขวางของโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่แนะนำให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 วงจรถควบคุม

วงจรถควบคุมที่ใช้นี้จะใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (K1) เป็นตัวตัดวงจรกำลังเข้ามอเตอร์ โดยใช้สวิทช์กดปุ่มเป็นตัวสั่งงาน (S2) และเนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ค่อนข้างจะมากจึงใช้ลิมิตสวิทช์เป็นตัวตัดวงจรกำลังที่ป้อนเข้ามอเตอร์ออกเมื่อส่วนปลายของโรเตอร์เคลื่อนที่มาชนกับลิมิตสวิทช์ที่ติดไว้ที่ชุดรับแรงกระแทก ลิมิตสวิทช์ก็จะสั่งให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ช่วย (K2A) ทำงานเพื่อปลดไฟที่ป้อนเข้ามอเตอร์ออก เป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับตัวชิ้นงาน

บทที่ 5

ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

วัตถุประสงค์การทดลอง ทดสอบแรงออกตัวที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ กัน

อุปกรณ์

1. Variac 3 phase 15 A	1	ตัว
2. VOM	1	ตัว
3. Clamp Amp Meter	1	อัน
4. Watt meter	1	อัน
5. ชูตรอก	1	ชุด
6. ตาชั่งสปริง	1	อัน
7. คีมหนีบ	10	ลูก
8. Junction Fuse	1	อัน

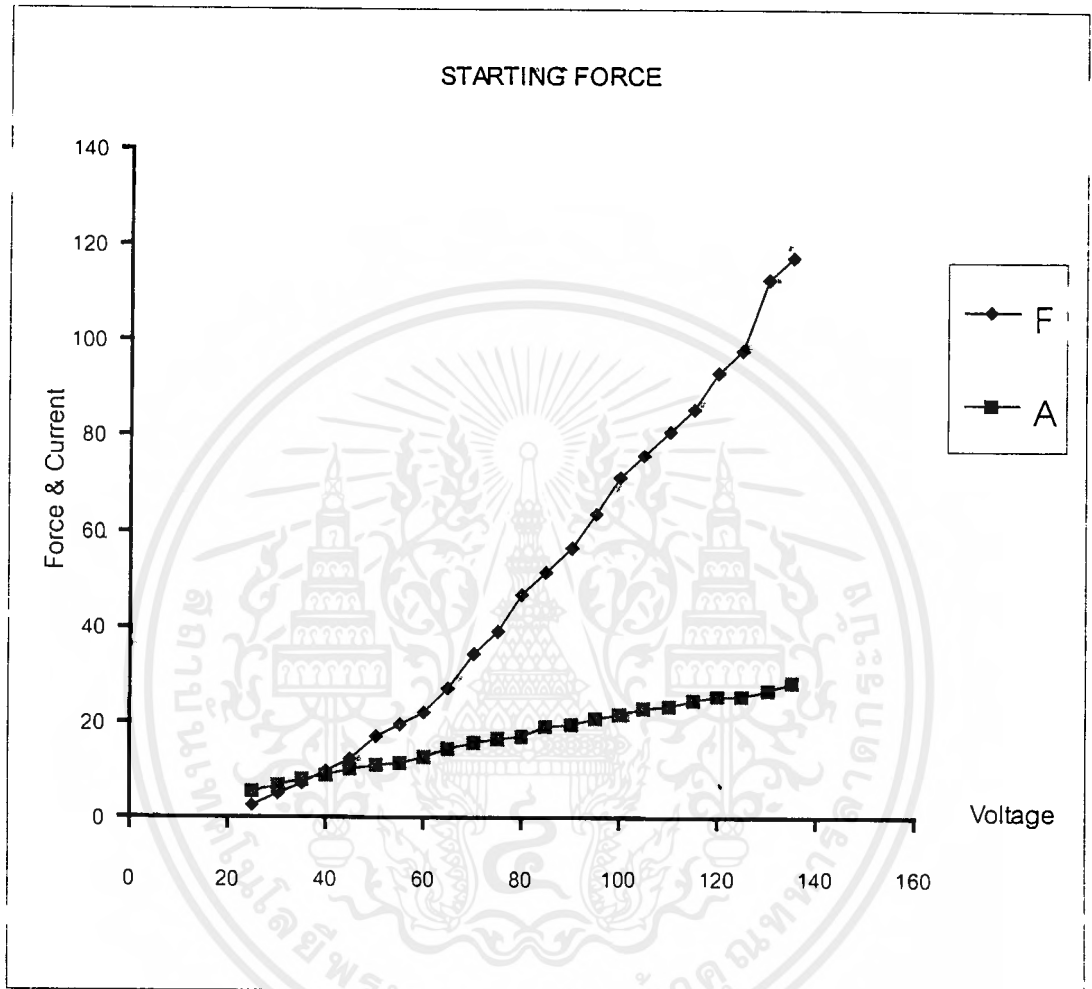
ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งขึ้นงานให้มีระดับของโรเตอร์เข้ากับระดับของรอกที่ทำขึ้น ใช้เชือกยึดโรเตอร์แล้วผ่านรอกเพื่อมัดกับคีมหนีบต่อไป
2. ใช้คีมหนีบเริ่มต้นที่ 0.25 กก. แล้วค่อยปรับแรงดันตั้งค่าไว้ที่ค่าหนึ่ง แล้วกด Push button switch เพื่อให้โรเตอร์เคลื่อนที่ถ้าโรเตอร์ยังไม่เคลื่อนที่ปรับแรงดันไฟฟ้าขึ้นครั้งละ 5 โวลต์ จนทำให้โรเตอร์จะเคลื่อนที่ได้หมด
3. เพิ่มคีมหนีบครั้งละ 0.25 กก. แล้วทำซ้ำในข้อ 2.

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลอง 1

V	F	I (A)			W	P.F.
	(N)	R	S	T		
25	2.45	5.60	4.20	5.10	125	0.58
30	4.90	6.60	5.10	6.10	200	0.65
35	7.36	8.10	6.70	6.50	250	0.58
40	9.81	8.90	7.90	7.50	300	0.53
45	12.26	10.10	8.90	9.70	400	0.54
50	17.17	11.20	9.90	10.80	500	0.54
55	19.62	11.60	10.30	11.20	575	0.55
60	22.09	12.80	11.50	12.50	600	0.47
65	26.98	14.60	13.40	14.20	700	0.44
70	34.35	15.60	14.80	15.50	850	0.46
75	39.24	16.50	15.80	16.30	875	0.42
80	46.59	17.00	16.20	16.90	1100	0.48
85	51.50	19.00	18.20	19.00	1200	0.44
90	56.41	19.50	18.90	19.00	1250	0.42
95	63.76	20.60	19.90	20.50	1300	0.39
100	71.12	21.60	20.70	21.70	1600	0.43
105	76.03	23.00	22.30	23.00	1750	0.42
110	80.93	23.50	22.70	23.70	1850	0.42
115	85.83	24.60	23.60	24.70	1900	0.39
120	93.19	25.40	24.60	25.60	2000	0.38
125	98.10	25.60	24.90	25.70	2100	0.38
130	112.81	26.70	25.70	26.30	2300	0.39
135	117.72	28.30	26.70	27.50	2400	0.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 28 แสดงผลการทดลองแรงออกตัวเทียบกับแรงดันไฟฟ้า

การทดลองที่ 2

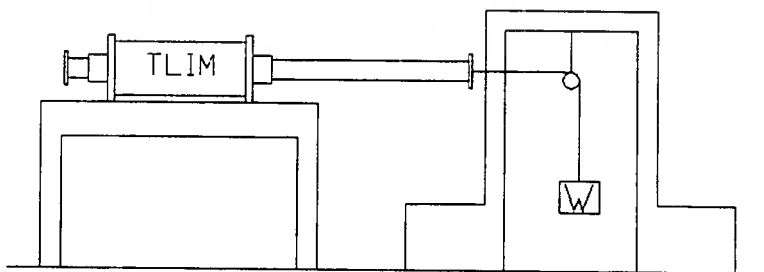
วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์เทียบกับความเร็ว

อุปกรณ์

1. Variac 3 phase 15 A	1	ตัว
2. VOM	1	ตัว
3. Clamp Amp Meter	1	อัน
4. Watt meter	1	อัน
5. ชูดรอก	1	ชุด
6. ตาชั่งสปริง	1	อัน
7. ต้มน้ำหนัก	10	ลูก
8. Junction Fuse	1	อัน
9. ชุดวัดความเร็ว	1	ชุด

ขั้นตอนการทดลอง

- ใช้ต้มน้ำหนักทำเป็นโหลด โดยเริ่มต้นที่ 1 กก. แล้วปรับเปลี่ยนแรงดันครั้งละ 5 โวลต์ จากนั้นกด push button switch เพื่อให้มอเตอร์ทำงาน ทำการวัดความเร็วของมอเตอร์โดยใช้ชุดวัดความเร็วที่สร้างขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ จนถึง 150 โวลต์
- เปลี่ยนต้มน้ำหนักโดยเพิ่มครั้งละ 1 กก. แล้วทำซ้ำในข้อ 1 จนกระทั่งถึงน้ำหนัก 10 กก.



รูปที่ 29 แสดงการทดลอง

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลอง 2

Load (kg)	Volts	Velocity (m/s)	Current (A)	I/P Power (Watt)	O/P Power (Watt)	pf	Eff (%)	Slip
1	40	0.43	8.1	300	4.2183	0.53	1.41	0.967
	45	0.51	9.7	300	5.0031	0.40	1.67	0.961
	50	0.77	10.5	350	7.5537	0.38	2.16	0.941
	55	0.83	11.3	400	8.1423	0.37	2.04	0.936
	60	0.9	11.8	400	8.829	0.33	2.21	0.931
	65	0.98	12.4	450	9.6138	0.32	2.14	0.925
	70	1.08	13.4	500	10.5948	0.31	2.12	0.917
	75	1.2	13.9	500	11.772	0.28	2.35	0.908
	80	1.44	14.8	550	14.1264	0.27	2.57	0.889
	85	1.54	16.1	550	15.1074	0.23	2.75	0.882
	90	1.8	17	550	17.658	0.21	3.21	0.862
	95	2.16	17.5	600	21.1896	0.21	3.53	0.834
	100	2.4	18	600	23.544	0.19	3.92	0.815
	105	2.7	18.7	650	26.487	0.19	4.07	0.792
	110	3.08	19.2	650	30.2148	0.18	4.65	0.763
	115	4.32	21.7	700	42.3792	0.16	6.05	0.668
	120	5.4	22.5	750	52.974	0.16	7.06	0.585
	125	6.35	23.3	750	62.2935	0.15	8.31	0.512
	130	7.5	24.2	800	73.575	0.15	9.20	0.423
	135	8.6	24.9	800	84.366	0.14	10.55	0.338
	140	9.3	25.3	850	91.233	0.14	10.73	0.285
	145	10.2	25.9	900	100.062	0.14	11.12	0.215
	150	10.8	26.5	900	105.948	0.13	11.77	0.169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load	Volts	Velocity	Current	I/P Power	O/P Power	pf	Eff	Slip
(kg)		(m/s)	(A)	(Watt)	(Watt)		(%)	
2	55	0.33	11.90	500	6.4746	0.44	1.29	0.975
	60	0.41	12.20	500	8.0442	0.39	1.61	0.968
	65	0.51	12.90	500	10.0062	0.34	2.00	0.961
	70	0.67	13.90	550	13.1454	0.33	2.39	0.948
	75	0.98	14.50	550	19.2276	0.29	3.50	0.925
	80	1.08	15.80	600	21.1896	0.27	3.53	0.917
	85	1.14	16.20	600	22.3668	0.25	3.73	0.912
	90	1.20	16.80	650	23.544	0.25	3.62	0.908
	95	1.35	17.70	650	26.487	0.22	4.07	0.896
	100	1.66	18.10	700	32.57	0.22	4.65	0.872
	105	1.80	18.80	700	35.32	0.20	5.05	0.862
	110	1.96	19.30	750	38.46	0.20	5.13	0.849
	115	2.40	21.50	800	47.09	0.19	5.89	0.815
	120	2.70	23.80	800	52.97	0.16	6.62	0.792
	125	3.08	24.20	850	60.43	0.16	7.11	0.763
	130	3.60	25.30	850	70.63	0.15	8.31	0.723
	135	5.40	25.80	900	105.95	0.15	11.77	0.585
	140	6.75	26.20	950	132.44	0.15	13.94	0.481
	145	8.20	26.90	950	160.88	0.14	16.94	0.369
	150	9.00	27.20	1000	176.58	0.14	17.66	0.308
3	65	0.43	13.5	700	12.65	0.46	1.81	0.967
	70	0.51	14.3	700	15.01	0.40	2.14	0.961
	75	0.57	15.5	750	16.78	0.37	2.24	0.956
	80	0.6	16	800	17.66	0.36	2.21	0.954
	85	0.67	16.8	800	19.72	0.32	2.46	0.948
	90	0.77	17.1	850	22.66	0.32	2.67	0.941
	95	0.83	18.2	850	24.43	0.28	2.87	0.936
	100	0.98	18.9	850	28.84	0.26	3.39	0.925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kg)	Volts	Velocity (m/s)	Current (A)	I/P Power (Watt)	O/P Power (Watt)	pf	Eff (%)	Slip
	105	1.08	19.8	900	31.78	0.25	3.53	0.917
	110	1.27	20.4	900	37.38	0.23	4.15	0.902
	115	1.8	21.3	950	52.97	0.22	5.58	0.862
	120	1.96	23.2	950	57.68	0.20	6.07	0.849
	125	2.16	25.1	950	63.57	0.17	6.69	0.834
	130	2.16	26	1000	63.57	0.17	6.36	0.834
	135	2.7	26.7	1000	79.46	0.16	7.95	0.792
	140	3.6	27.3	1100	105.95	0.17	9.63	0.723
	145	4.32	27.8	1100	127.14	0.16	11.56	0.668
	150	6.75	28.2	1100	198.65	0.15	18.06	0.481
4	75	0.24	15.9	900	9.42	0.44	1.05	0.982
	80	0.26	16.4	900	10.20	0.40	1.13	0.980
	85	0.31	17	950	12.16	0.38	1.28	0.976
	90	0.4	17.4	950	15.70	0.35	1.65	0.969
	95	0.45	18.5	950	17.66	0.31	1.86	0.965
	100	0.49	19.2	1000	19.23	0.30	1.92	0.962
	105	0.72	20.2	1000	28.25	0.27	2.83	0.945
	110	0.9	20.8	1050	35.32	0.26	3.36	0.931
	115	1.03	21.6	1050	40.42	0.24	3.85	0.921
	120	1.08	23.7	1100	42.38	0.22	3.85	0.917
	125	1.2	24.9	1100	47.09	0.20	4.28	0.908
	130	1.35	26.6	1100	52.97	0.18	4.82	0.896
	135	1.8	27.1	1150	70.63	0.18	6.14	0.862
	140	2.4	27.5	1150	94.18	0.17	8.19	0.815
	145	3.08	27.9	1200	120.86	0.17	10.07	0.763
	150	4.32	28.8	1200	169.52	0.16	14.13	0.668

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

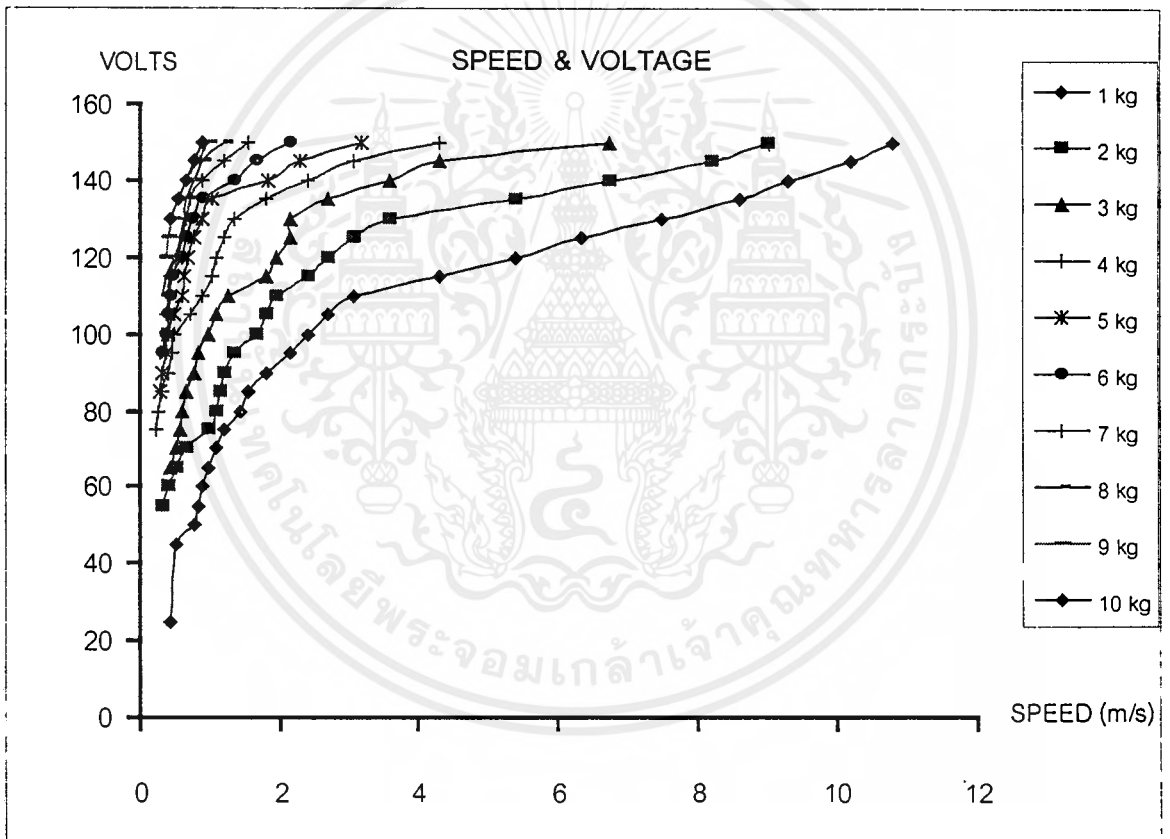
Load (kg)	Volts	Velocity (m/s)	Current (A)	I/P Power (Watt)	O/P Power (Watt)	Pf	Eff (%)	Slip
5	85	0.29	17.1	1200	14.22	0.48	1.19	0.978
	90	0.31	17.7	1250	15.21	0.45	1.22	0.976
	95	0.36	18.5	1250	17.66	0.41	1.41	0.972
	100	0.4	19.8	1350	19.62	0.39	1.45	0.969
	105	0.49	20.5	1400	24.03	0.38	1.72	0.962
	110	0.6	21.2	1400	29.43	0.35	2.10	0.954
	115	0.63	23.1	1400	30.90	0.30	2.21	0.952
	120	0.69	24.3	1450	33.84	0.29	2.33	0.947
	125	0.77	25.9	1500	37.77	0.27	2.52	0.941
	130	0.9	27.2	1500	44.15	0.24	2.94	0.931
	135	1.02	27.9	1550	50.03	0.24	3.23	0.922
	140	1.85	28.3	1550	90.74	0.23	5.85	0.858
	145	2.3	28.9	1600	112.82	0.22	7.05	0.823
	150	3.2	29.5	1600	156.96	0.21	9.81	0.754
6	95	0.33	18.5	1350	19.42	0.44	1.44	0.975
	100	0.37	19.9	1500	21.78	0.44	1.45	0.972
	105	0.4	21.1	1500	23.54	0.39	1.57	0.969
	110	0.43	21.5	1550	25.31	0.38	1.63	0.967
	115	0.47	23.2	1600	27.66	0.35	1.73	0.964
	120	0.6	24.9	1600	35.32	0.31	2.21	0.954
	125	0.67	26.3	1650	39.44	0.29	2.39	0.948
	130	0.74	27.8	1700	43.56	0.27	2.56	0.943
	135	0.9	28.8	1700	52.97	0.25	3.12	0.931
	140	1.35	29.5	1750	79.46	0.24	4.54	0.896
	145	1.66	29.9	1800	97.71	0.24	5.43	0.872
	150	2.16	30.4	1800	127.14	0.23	7.06	0.834

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

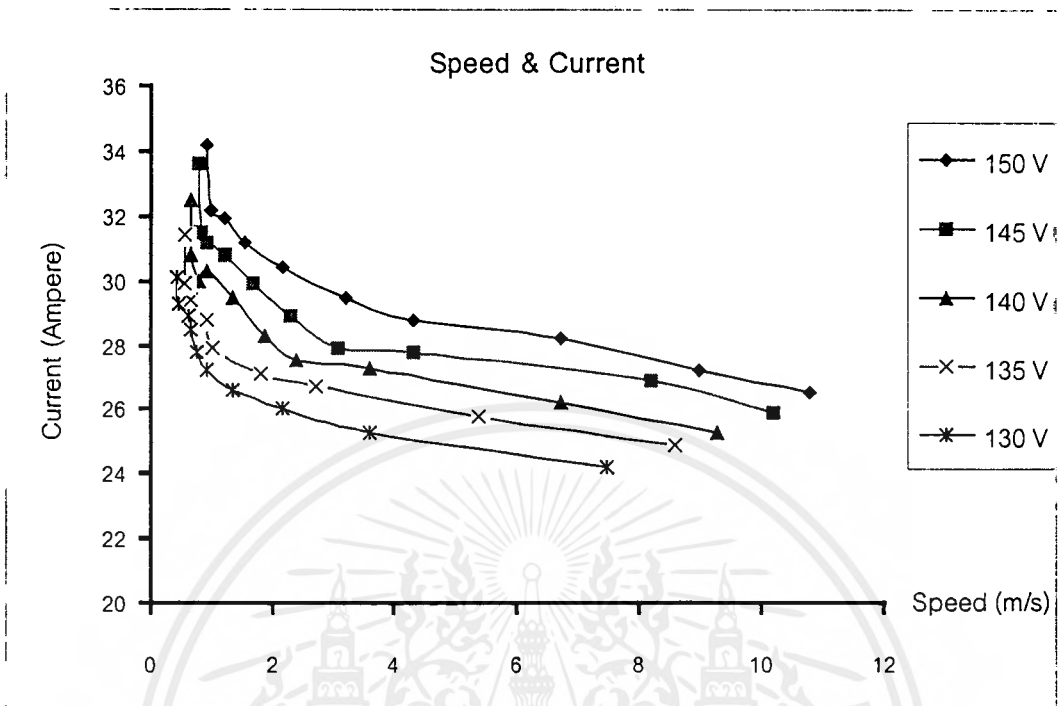
Load (kg)	Volts	Velocity (m/s)	Current (A)	I/P Power (Watt)	O/P Power (Watt)	Pf	Eff (%)	Slip
7	105	0.37	20.8	1700	25.41	0.45	1.49	0.972
	110	0.4	21.9	1700	27.47	0.41	1.62	0.969
	115	0.43	23.8	1750	29.53	0.37	1.69	0.967
	120	0.51	25.5	1750	35.02	0.33	2.00	0.961
	125	0.6	26.7	1750	41.20	0.30	2.35	0.954
	130	0.67	28.5	1800	46.01	0.28	2.56	0.948
	135	0.72	29.4	1800	49.44	0.26	2.75	0.945
	140	0.9	30.3	1850	61.80	0.25	3.34	0.931
	145	1.2	30.8	1900	82.40	0.25	4.34	0.908
	150	1.54	31.2	1900	105.75	0.23	5.57	0.882
8	110	0.32	22.4	1900	25.11	0.45	1.32	0.975
	115	0.37	24.8	1900	29.04	0.38	1.53	0.972
	120	0.48	26	1950	37.67	0.36	1.93	0.963
	125	0.57	27.5	2000	44.73	0.34	2.24	0.956
	130	0.63	28.9	2000	49.44	0.31	2.47	0.952
	135	0.67	29.4	2050	52.58	0.30	2.56	0.948
	140	0.77	30	2050	60.43	0.28	2.95	0.941
	145	0.9	31.2	2100	70.63	0.27	3.36	0.931
	150	1.2	31.9	2100	94.18	0.25	4.48	0.908
9	120	0.36	26.6	2100	31.7844	0.38	1.51	0.972
	125	0.41	27.7	2150	36.1989	0.36	1.68	0.968
	130	0.47	29.3	2150	41.4963	0.33	1.93	0.964
	135	0.54	29.9	2200	47.6766	0.31	2.17	0.958
	140	0.67	30.8	2200	59.1543	0.29	2.69	0.948
	145	0.83	31.5	2300	73.2807	0.29	3.19	0.936
	150	0.98	32.2	2300	86.5242	0.27	3.76	0.925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

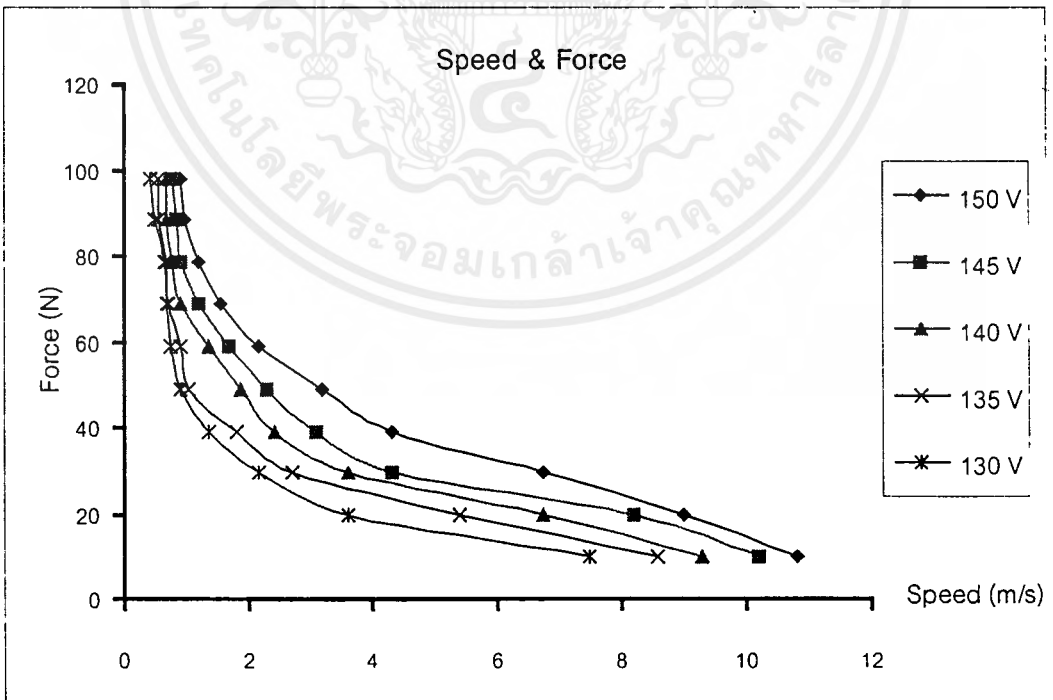
Load (kg)	Volts	Velocity (m/s)	Current (A)	I/P Power (Watt)	O/P Power (Watt)	pf	Eff (%)	Slip
10	130	0.42	30.1	2400	41.202	0.35	1.72	0.968
	135	0.54	31.4	2400	52.974	0.33	2.21	0.958
	140	0.67	32.5	2450	65.727	0.31	2.68	0.948
	145	0.77	33.6	2500	75.537	0.30	3.02	0.941
	150	0.9	34.2	2550	88.29	0.29	3.46	0.931



รูปที่ 30 แสดงความเร็วของมอเตอร์เทียบกับแรงดันไฟฟ้า

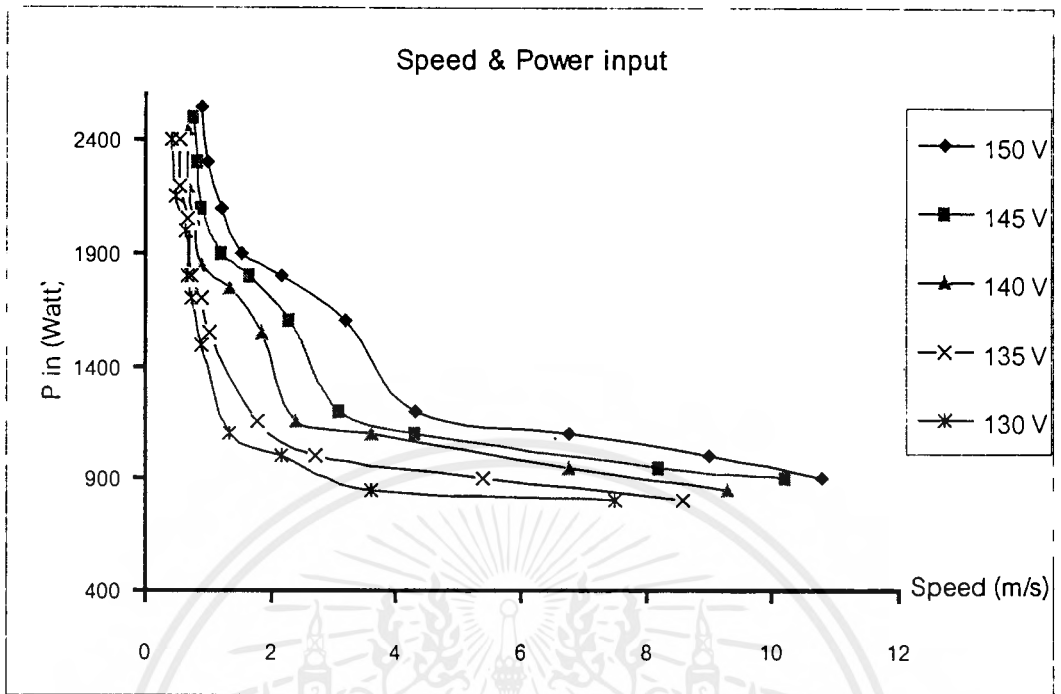


รูปที่ 31 แสดงกระแสต้านปรุ้มภูมิเทียบกับความเร็วของมอเตอร์

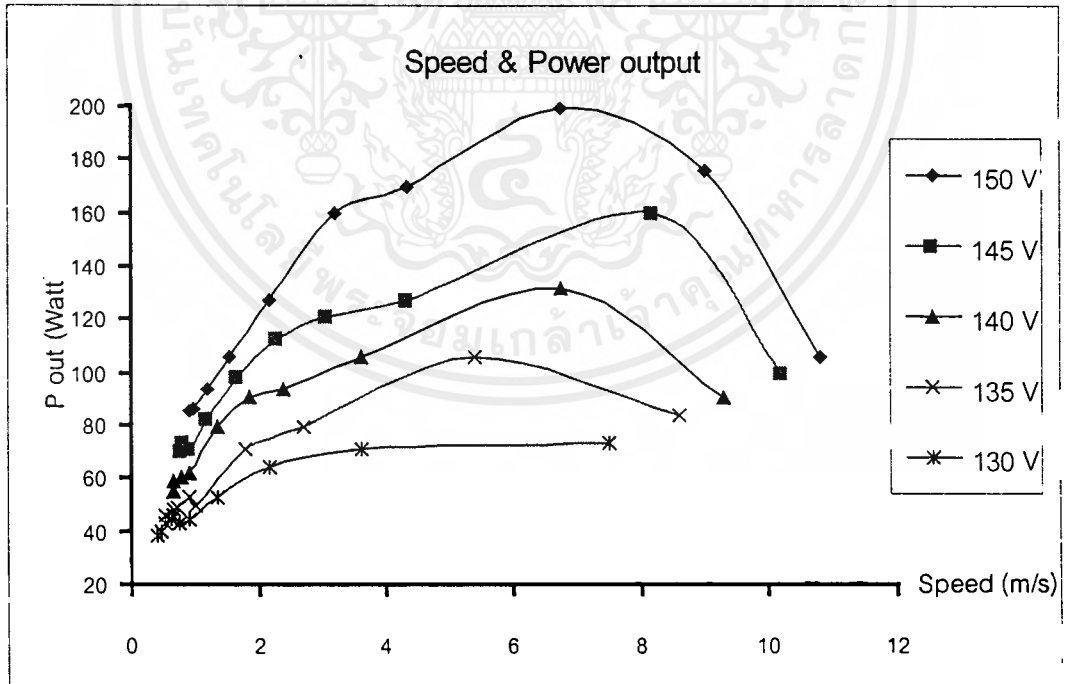


รูปที่ 32 แสดงแรงผลั้กเทียบกับความเร็วของมอเตอร์

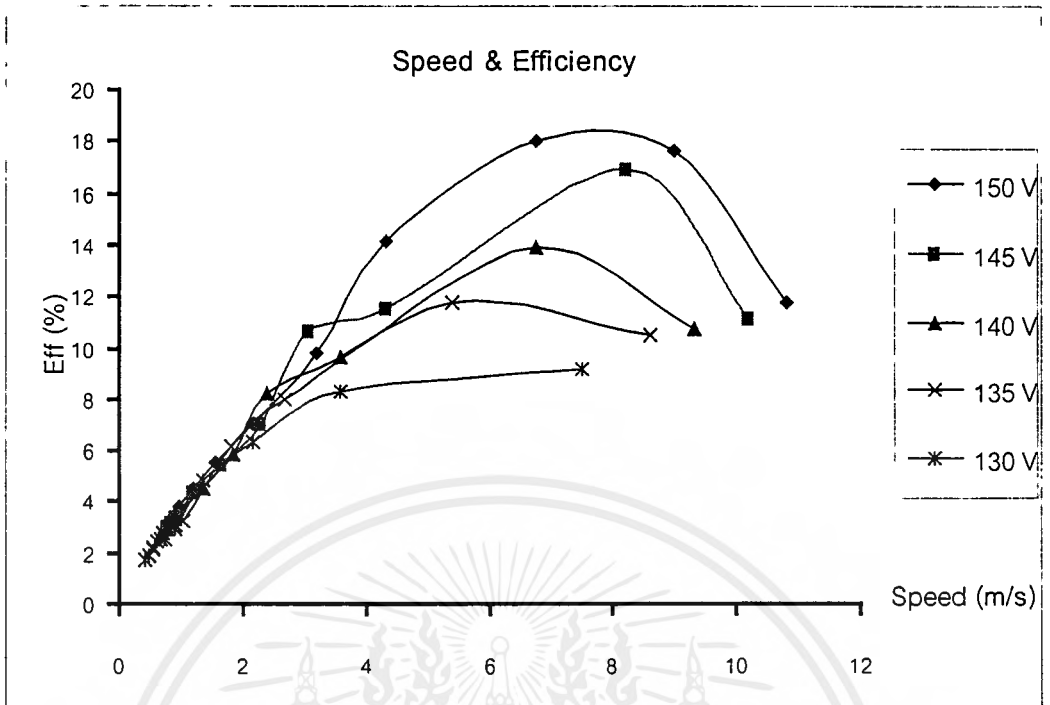
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



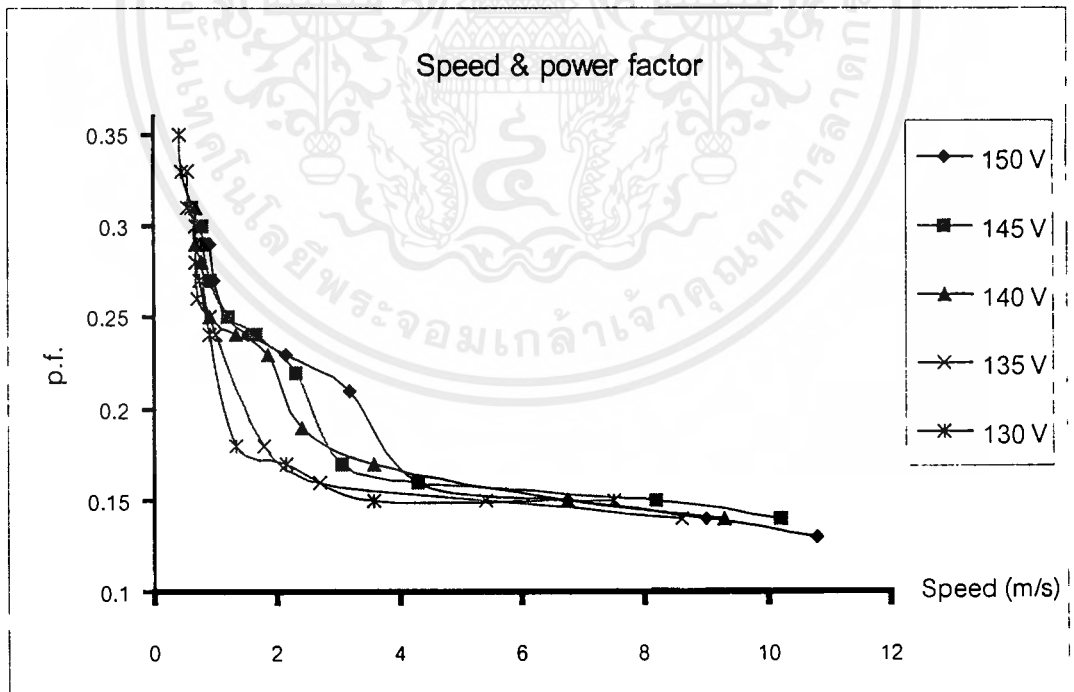
รูปที่ 33 แสดงกำลังไฟฟ้าขาเข้าเทียบกับความเร็วของมอเตอร์



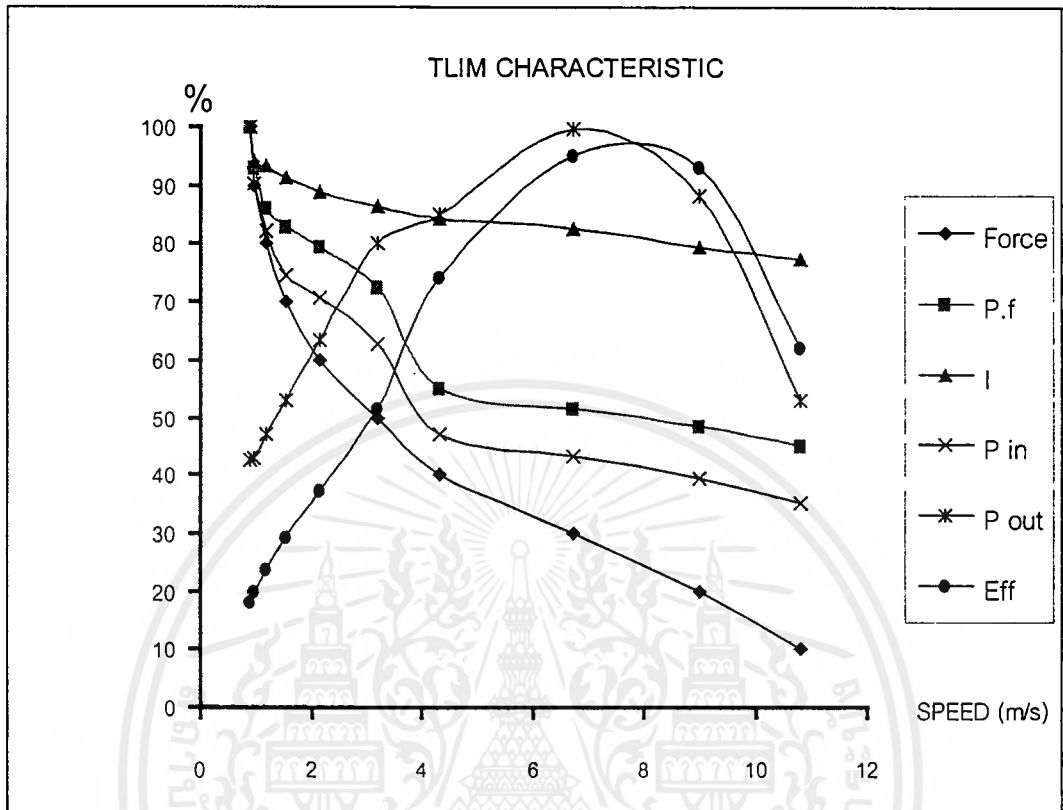
รูปที่ 34 แสดงกำลังไฟฟ้าขาออกเทียบกับความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 35 แสดงประสิทธิภาพเทียบกับความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 36 แสดงค่าตัวประกอบกำลังเทียบกับความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 37 แสดงคุณสมบัติโดยรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

บทที่ 6

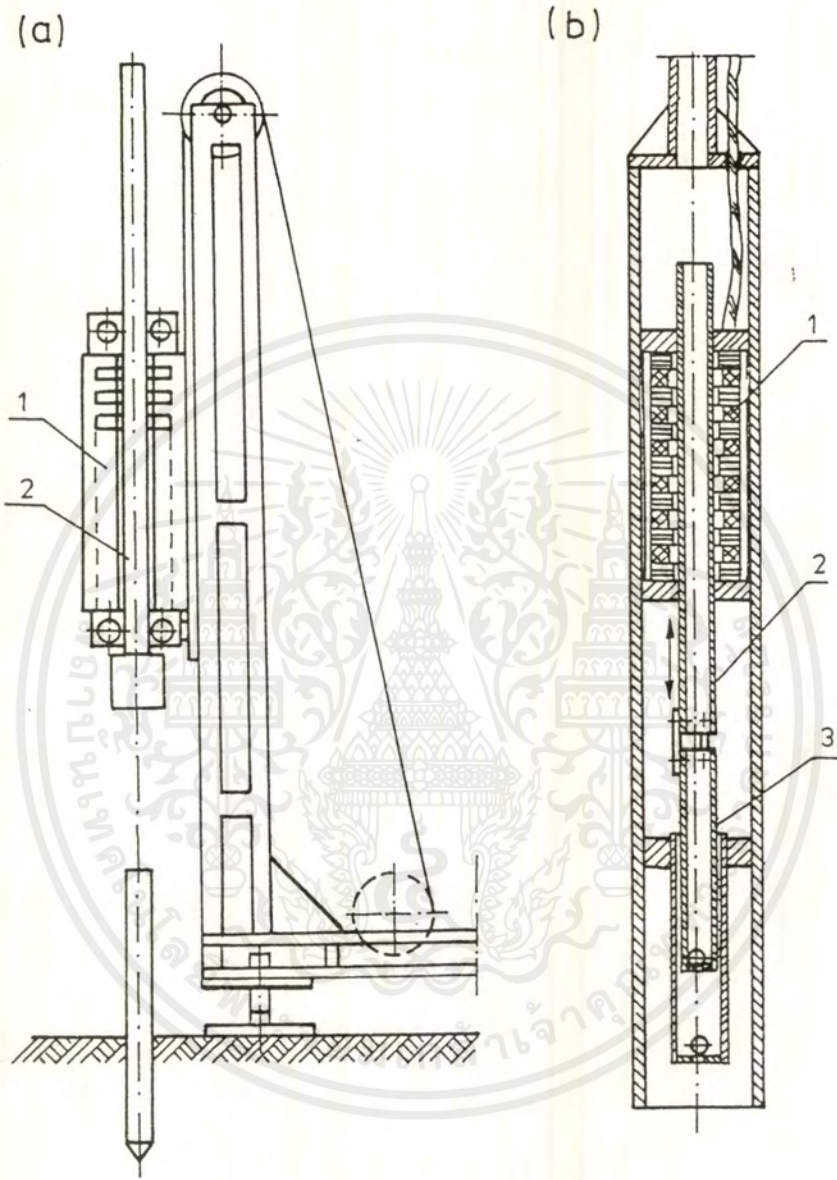
บทวิจารณ์และสรุป

จากชิ้นงานต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่าลักษณะของส่วนประกอบต่าง ๆ ก่อนข้างที่จะยุ่งยาก รวมทั้งการสร้างที่ไม่สามารถทำตามทีที่ออกแบบไว้ได้ทั้งหมด เนื่องจากประสบปัญหาเรื่องวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้นำมาใช้ต้องปรับปรุงแก้ไขให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ ในการทดสอบการทำงานในครั้งแรกเนื่องจากใช้ตัวเบร็ริงเป็นตัวรับแรงกระแทกโดยตรงจึงประสบปัญหาด้านการสั่นสะเทือนของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่จนเกิดความเสียหายแก่ตัวชิ้นงานที่สร้างขึ้นและนอกจากนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ซึ่งค่อนข้างสูงทำให้ไม่สามารถที่จะปลดวงจรกำลังได้ทันเมื่อส่วนปลายของ โรเตอร์เคลื่อนที่ชนกับเบร็ริงจึงต้องทำการแก้ไข โดยสร้างชุดรับแรงกระแทกให้ติดอยู่กับตัวฐาน เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับชิ้นงาน โดยตรงและติดลิมิตสวิทช์ไว้ด้วยเพื่อใช้ตัดวงจรกำลังออก

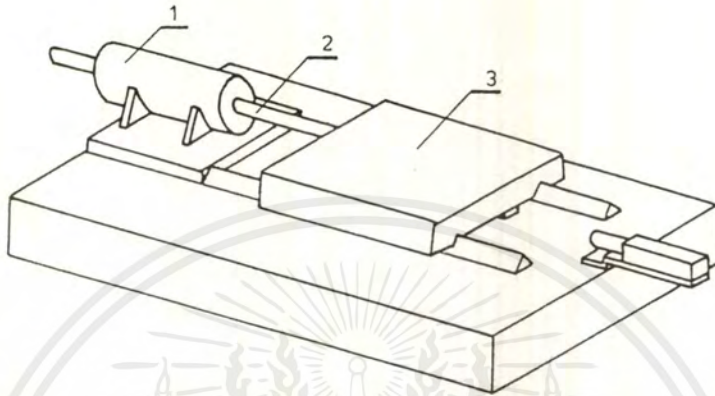
ในส่วนการทดสอบส่วนแรกจะเป็นการทดสอบแรงออกตัวที่แรงดันต่าง ๆ กันพบว่าแรงออกตัวจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป แต่สิ่งที่สังเกตได้อีกอย่างหนึ่งคือแรงที่ได้จะเป็นแรงกระตุกในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนต่ำกว่าจุดที่ออกตัวได้เล็กน้อยซึ่งโรเตอร์สามารถเคลื่อนตัวได้ในระยะสั้น ๆ ก่อนที่จะหยุดและเคลื่อนที่กลับและเมื่อทดสอบการทำงานโดยใช้โหลดที่เป็นตุ้มน้ำหนักคงที่ แล้วปรับค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ กันผลที่ได้คือความเร็วจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ใช้ ส่วนพฤติกรรมอื่นจะมีแนวโน้มใกล้เคียงทฤษฎีที่ได้ศึกษามา

ถ้ากล่าวโดยภาพรวมแล้วชิ้นงานที่สร้างขึ้นยังมีข้อด้อยอีกหลายประการทั้งด้านกระแสสตาร์ทที่สูงเนื่องจากช่องว่างอากาศค่อนข้างมาก ประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังค่อนข้างจะต่ำ และนอกจากนี้ยังพบปัญหาเกี่ยวกับผิวอะลูมิเนียมในส่วนของโรเตอร์ที่จะมีการสึกเป็นร่องเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเบร็ริงหลาย ๆ ครั้งรวมไปถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนของโรเตอร์เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานที่เป็นลักษณะปิด ทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดีนัก และน้ำหนักของชิ้นงานที่ค่อนข้างมาก แต่ถ้าพิจารณาด้านแรงที่ได้โดยไม่คำนึงถึงประสิทธิภาพก็อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงยังต้องมีการปรับปรุงแก้ไขให้เหมาะสมอีกมาก ชิ้นงานที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับไฮดรอลิกและนิวแมติกได้ใช้ทำเป็นเครื่องปั๊มแผ่นโลหะใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุในแนวราบ ซึ่งในปัจจุบันในประเทศอุตสาหกรรมหลายประเทศได้มีการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแกนกระบอกไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

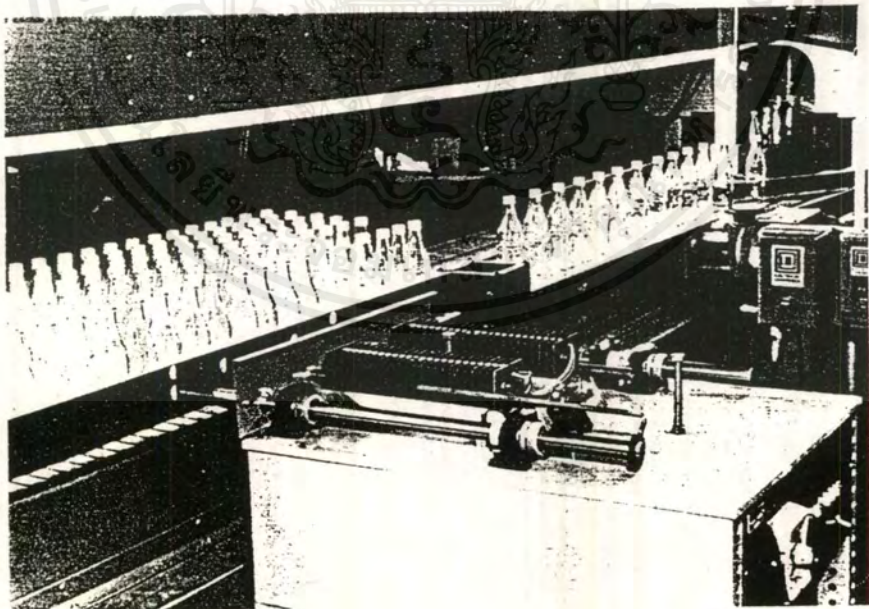
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 38 แสดงการประยุกต์ใช้งาน TLIM (a) เครื่องตอกเสาเข็ม (b) ปั่นลูกสูบ



รูปที่ 39 แสดงการประยุกต์ใช้งานในลักษณะเครื่องควบคุมตำแหน่ง

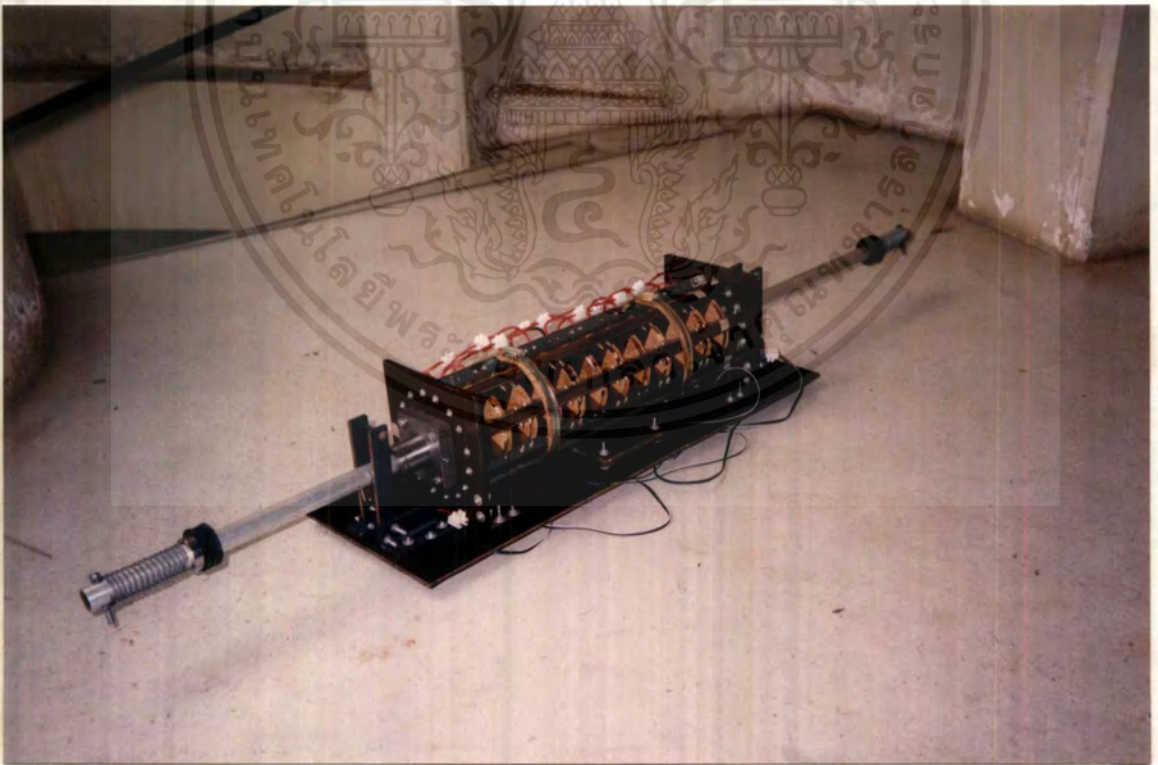


รูปที่ 40 แสดงการประยุกต์ใช้งานในการเคลื่อนย้ายวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ควรพัฒนาต่อไป

1. เลือกตัวนำที่ใช้เป็นตัวนำในโรเตอร์ให้สามารถทนแรงกดจากลูกปืนในแบร์ริงได้
2. พัฒนาชุดควบคุมเพื่อให้สามารถควบคุมการหยุดโดยสามารถรับโหลดอยู่ได้ในลักษณะการทำงานของไฮดรอลิกหรือนิวแมติกได้ การกลับทิศทางการเคลื่อนที่ได้
3. ลดช่องว่างอากาศเพื่อลดกระแสสตาร์ท
4. พัฒนาไปสู่การทำงานให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ทั้งในลักษณะการหมุนและเคลื่อนที่แนวเชิงเส้น (Helical Movement)



รูปที่ 41 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องดังนี้

- ท่านอาจารย์ ประภาส ไพรสุวรรณ สำหรับคำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ ที่ทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
- เจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ
- ธานี ศิริโสม สำหรับรูป Auto Cad ประกอบปริญญานิพนธ์



เอกสารอ้างอิง

1. I. Boldea ,S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems" ,Johnwiley & Sons
1985 ,Chapter 4,7
2. I. Boldea,S.A. Nasar, "Linear Electric Motor : Theory Design ,and Practical
Applications, 1987 ,Chapter 3
3. I. Boldea, S.A. Nasar,"Linear Motion Electric Machine", Johnwiling & Sons 1976
; Chapter 8
4. Jack F. Gieras,"Linear Induction Drives", Monographs in Electrical and Electronic
Engineering –30, 1994

