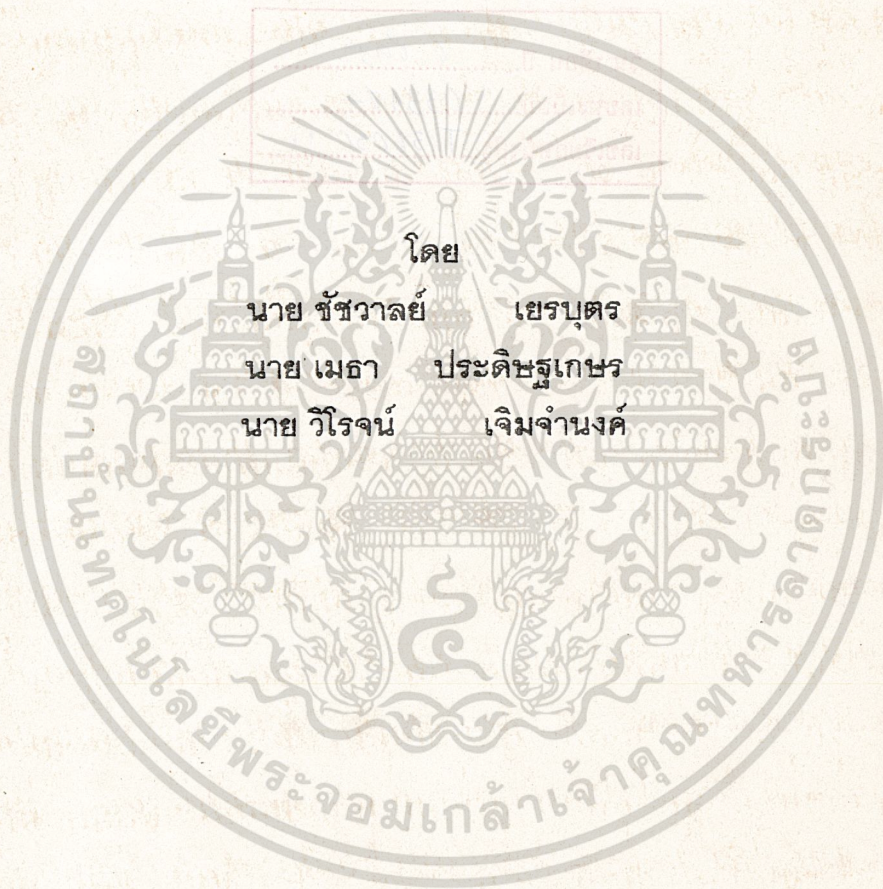


ลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์  
(Linear Induction Motor)



ปฏิญญาฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

033154

ปริญญาบัณฑิตปีการศึกษา 2536


ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ไลน์อร์อินตักชันมอเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นาย ชัชวาลย์ เสรบุตร เลขทะเบียน 33100078
2. นาย เมธา ประดิษฐ์เกษร เลขทะเบียน 33100302
3. นาย วิโรจน์ เจริญจำนงค์ เลขทะเบียน 33100353

  
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ พิชิต ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จุดประสงค์และขอบเขตของโครงการ

1. สร้างต้นแบบ Linear Induction Motor แบบ Single Side (SLIM)
2. สร้างแท่นทดสอบ SLIM
3. วิเคราะห์สภาวะการทำงานของ SLIM ที่โหลดต่างๆ กัน
4. หางจรสมมูลของ SLIM เพื่อใช้ทำนายคุณสมบัติของ SLIM แล้วเปรียบเทียบกับ ผลการทดลอง
5. วิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่างๆ เนื่องจากผลของรูปทรงที่เปลี่ยนไปจาก Rotary induction motor (RIM)
6. หาสภาพสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของ SLIM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทนำ	1
การจำแนกประเภท Linear Electric Machines	3
โครงสร้างของ SLIM	8
หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก	11
Rotating MMF of the stator or armature winding	14
Voltage induce in armature winding	16
SLIM เคลื่อนที่ได้ได้อย่างไร	17
SLIM ขณะ On load	19
ตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของ LIM	19
- ปรากฏการณ์ที่เกิดจากรูปทรงที่แตกต่างของ LIM กับ RIM	22
การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กใน SLIM โดยพิจารณาแบบจำลอง 1 มิติ	26
การสร้าง Single side linear induction motor	36
ต้นแบบเครื่องทดสอบ Linear induction motor	42
Equivalent circuit mode of SLIM	45
การทดลองที่ 1	53
วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 1	68
การทดลองที่ 2	69
วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 2	73
สรุปผลการทดลอง	76
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ และ กราฟ

รูปที่	หน้า
1 แสดงการเคลื่อนที่ของ LEM	1
2 แสดงตัวอย่างการนำ LEM ไปใช้งานแทน REM	2
3 Short-primary DSLIM	3
4 Short-secondary SLIM	3
5 Development of tubular motor	4
6 Double sided C-core TFLIM with distributed winding	4
7 LIM oscillator	4
8 Salient-pole LSM	5
9 Segmented secondary linear reluctance motor	5
10 Linear reluctance vibrator	5
11 DC linear actuator	6
12 AC attraction type levitation machine	7
13 DC attraction type levitation machine	6
14 Three-phase transverse flux linear levitation machine	7
15 Magnetic suspension demonstration model	7
16 ชนิดของ LIM	8
17 แสดงการผ่า RIM แล้วคลี่ออกเป็น LIM	8
18 แสดง Rotor ของ LIM	9
19 Machine flux produced by resultant of rotor and stator MMF fields shown at the instant of maximum current in phase a	11
20 Schematic, two-pole representation	12
21 Current patterns and MMF resolution at the instant the stator current in phase a is maximum	13
22 The breathing field of one phase winding	14
23 Flux linkage of a typical stator coil with airgap flux due to resultant	16
24 MMF of acylindrical rotor of four pole	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
25 แสดงการเคลื่อนที่ของ SLIM	18
26 แสดงการเกิด End-effect	22
27 Secondary current path	22
28 แสดงแกนอ้างอิงในการพิจารณา	23
29 Secondary current pattern	23
30 Transverse distribution of magnetic flux density	23
31a Secondary current pattern	24
31b Transverse distribution of magnetic flux density	24
32 Double-sided primary with a vertical secondary	24
33a Balanced force of repulsion on secondary	25
33b Restoring repulsion force	25
34 ลักษณะของ SLIM ที่นำมาวิเคราะห์	27
35 แกนอ้างอิงและ coordinate ที่ใช้พิจารณา	27
36 แบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์แบบ one dimension	28
37 แสดง end effect ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก	33
38 แสดง Primary winding ของ SLIM	37
39 แสดงลักษณะของ Primary core	38
40 แสดงการลงขดลวดบน Primary core	40
41 แสดง SLIM ที่เสร็จสมบูรณ์	41
42 แสดงต้นแบบเครื่องทดสอบ LIM	44
43 แสดง Primary core และ secondary sheet conductor	45
44 Equivalent circuit ของ RIM	45
45 แสดง Eddy current pu และ total air gap flux	45
46 แสดง Secondary MMF pu length and airgap MMF pu length	46
47 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของ Equivalent circuit ของ LIM	47
48 Equivalent circuit ของ LIM	48
49 แสดง effective motor length	50
50 แสดงการต่อวงจร การทดลอง No-load test	51
51 แสดงการต่อวงจร การทดลอง Blocked-rotor test	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

52	แสดงการต่อวงจรของการทดลองรับภาระของ LIM	56
53	กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของกระแสที่ค่าสลิปต่างๆ	60
54	กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ	60
55	กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ	61
56	กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ	61
57	กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของกระแสที่ค่าสลิปต่างๆ	62
58	กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ	62
59	กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ	63
60	กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ	63
61	กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของกระแสที่ค่าสลิปต่างๆ	64
62	กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ	64
63	กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ	65
64	กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ	65
65	กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของกระแสที่ค่าสลิปต่างๆ	66
66	กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ	66
67	กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ	67
68	กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ	67
69	วงจรการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กใน airgap	69
70	กราฟผลการทดลองที่ 2.1 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator	70
71	กราฟผลการทดลองที่ 2.2 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator	71
72	กราฟผลการทดลองที่ 2.3 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator	71
73	กราฟผลการทดลองที่ 2.4 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator	72
74	กราฟจากการคำนวณหาค่า B ตามความยาวของ stator	74
75	กราฟ B ที่ขยายสเกลจากกราฟที่ 74	74
76	กราฟผลการทดลองวัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์  
LINEAR INDUCTION MOTOR

โดย

ชัชวาลย์ เจริญพร  
เมธา ประดิษฐ์เกษร  
วิโรจน์ เจริญจำนงค์

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ พิชิต ล่ำยอง

**บทคัดย่อ**

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นรายละเอียดของโครงการเกี่ยวกับ ลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ แบบขดลวดปฐมภูมิด้านเดียว ทั้งการสร้างตัวมอเตอร์ แทนทดสอบ รวมไปถึงการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ที่แตกต่างไปจากโรตารีอินดักชันมอเตอร์ เช่น ผลทางด้านปลาย (end effect) ,ผลของขอบ(edge effect) และ แรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์(normal force) นอกจากนี้คณะผู้จัดทำยังได้ทำการทดสอบลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ที่โหลดค่าต่างๆ ที่ความหนาของแผ่นอลูมิเนียมและความกว้างของช่องอากาศต่างๆกัน เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการหาจุดใช้งานที่เหมาะสมของลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์

**ABSTRACT**

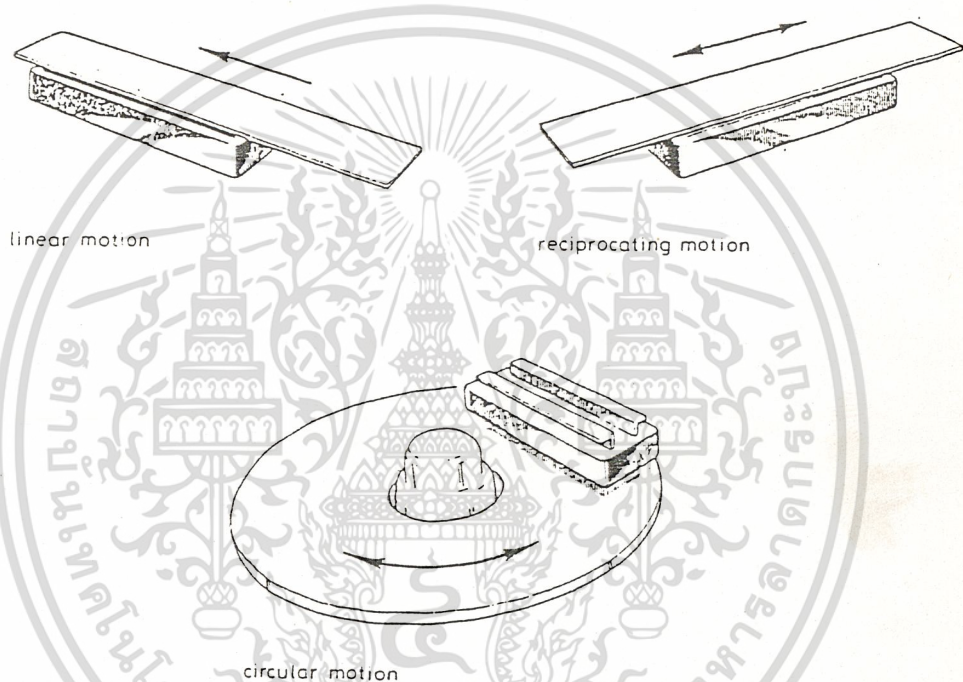
This thesis presents detail in the project about SINGLE SIDE LINEAR INDUCTION MOTORS. The detail is about machine design and construction , testing equipment and also study in phenomenon and characteristic in linear induction motor which different from rotary induction motor such as end-effect , edge-effect and normal force. Besides , this project include linear induction motor testing and result in various load conditions. The conditions of load is vary to the thickness of aluminium and distance of airgap. Result of testing is available to further study in possibility to use linear induction motor in suitable condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LINEAR INDUCTION MOTORS

### บทนำ

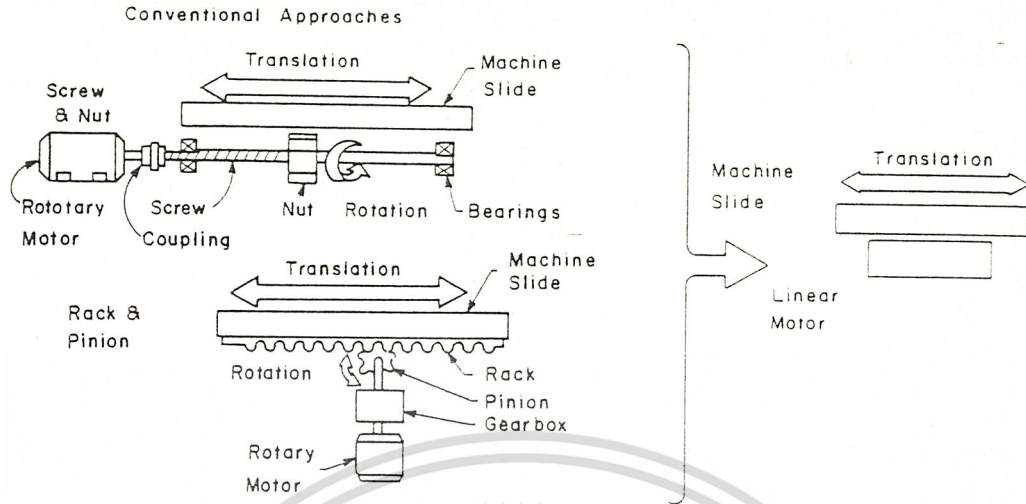
ก่อนที่จะมีการนำ linear electric motor (LEM) มาใช้งานอย่างแพร่หลาย เราใช้ rotary electric motor (REM) ในการขับ load ไม่ว่าจะเป็นการหมุน หรือการเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยผ่าน rotary-to-linear converter เพื่อเปลี่ยนการหมุนให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งสามารถทำได้หลายลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ



รูปที่ 1 แสดงการเคลื่อนที่ของ LEM ซึ่งทำได้ในหลายลักษณะ

ตัวอย่างของการนำไปใช้งานแสดงได้ในรูปที่ 2 เราจะเห็นว่าระบบดังกล่าว (REM) จะต้องมีอุปกรณ์ทางกลต่าง ๆ เช่น เฟือง สายพาน เพลา และ อุปกรณ์อื่นๆ ในทำนองเดียวกัน ซึ่งจะทำให้เกิดความสูญเสียทางกล ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำ LEM มาใช้ เพราะว่า LEM ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทางกลต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้ลดความสูญเสียส่วนนี้ลง และมีความทนทานมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม LEM นั้นมีประสิทธิภาพ และ power factor ต่ำกว่า REM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการนำ LEM ไปใช้งานแทน REM

### ข้อได้เปรียบของ LEM ที่เหนือกว่า REM

1. ความแรงและความหน่วงสูงกว่า
2. การป้องกันกลและทางไฟฟ้า และสามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดีกว่า
3. สะดวกต่อการซ่อม เปลี่ยน และบำรุงรักษา
4. ความสามารถในการดึง secondary ให้เคลื่อนที่โดยปราศจากการต่อทางกล ทำให้ง่ายต่อการควบคุมแรงดึง และความเร็ว
5. มี normal force ซึ่งมีประโยชน์ใน levitation machine

LEM มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะ linear induction motor (LIM) เช่น ระบบสายพาน เครื่องมือจับและเก็บวัสดุ เครื่องบ่มโลหะเหลว เครื่องยกกระเป๋าสานามบิน ระบบเคลื่อนย้ายคน ระบบประตูเลื่อน และใช้ในรถไฟที่ความเร็วต่ำ และความเร็วปานกลาง ส่วน linear synchronous motor (LSM) ถูกใช้ที่ความเร็วสูง เช่น bullet train ของญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การจำแนกประเภทต่าง ๆ ของ LINEAR ELECTRIC MACHINES (LEM)

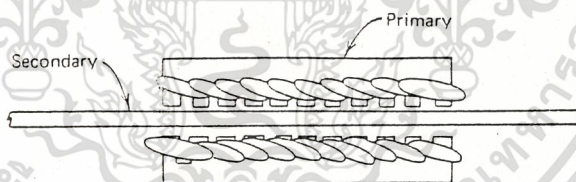
เครื่องจักรไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อที่จะใช้ในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม แต่ก็ได้มีการทำให้แรงจากสนามแม่เหล็กมาใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงจึงได้มี linear motion electric machines ขึ้น สำหรับ rotary machine ทุก ๆ ชนิด ก็จะมี LEM แต่ละชนิดที่ตรงกัน และโดยทั่วไป LEM จะนิยมใช้เป็น motor มากกว่าเป็น generator ซึ่งลักษณะของ LEM แต่ละชนิดจำแนกได้ดังนี้

### 1. linear motors and levitation machine

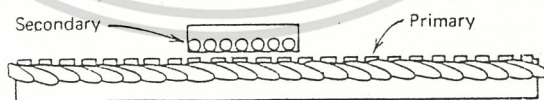
เนื่องจาก LEM นั้นจะมีแรงอยู่ 2 แนว ซึ่งตั้งฉากกัน แรงหนึ่งมีทิศทางไปในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ และอีกแรงตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ แรงตั้งฉากนั้นอาจจะเป็นแรงดูดหรือแรงผลักระหว่าง primary กับ secondary ก็ได้ เครื่องจักรที่ใช้แรงตั้งฉากเพื่อที่จะทำให้ secondary ลอยอยู่บน primary นั้น โดยทั่วไปเรียกว่า linear levitation machine ส่วนเครื่องจักรที่ใช้ในการสร้างแรงดึงเรียก linear motor

### 2. linear induction motor

LIM โดยทั่วไปจะเป็น LIM ชนิดหลายเฟส เมื่อเปรียบเทียบกับ rotary induction motor ชนิดหลายเฟส สนามแม่เหล็กภายใน air gap จะเป็นสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ ซึ่งต่างจาก RIM เนื่องจากใน RIM จะมีส่วนที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและส่วนที่เคลื่อนที่ไปข้างหลังและส่วนที่เป็นการสั้น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของวงจรแม่เหล็ก เมื่อเปรียบเทียบความยาวระหว่าง secondary และ primary สามารถแยก LIM เป็น short primary LIM ดังรูป 3 หรือ short secondary LIM ดังรูป 4 และถ้าหาก LIM มี primary เพียงด้านเดียวก็จะเป็น single side LIM



รูปที่ 3 Short-primary DSLIM.

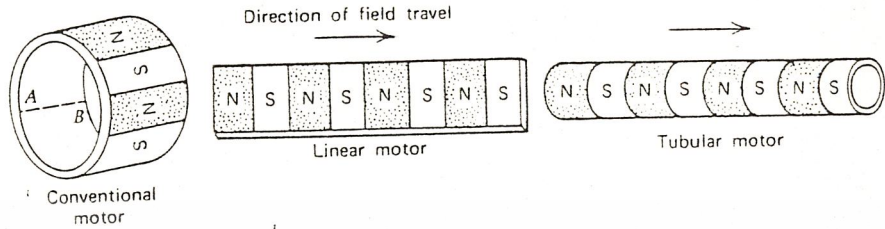


รูปที่ 4 Short-secondary SLIM.

จากที่เราดูมาแล้วว่า LIM นั้น ได้มาจากการผ่า RIM แล้วคลี่ออกซึ่งจะได้เป็น LIM แบบแบนราบ (flat LIM) และถ้าหากเรานำ primary ที่แบนราบมาทำการม้วนรอบแกนอีกที ซึ่งขนานกับทางเดินของแม่เหล็กดังรูป 5 ก็จะทำให้ได้ลักษณะโครงสร้างใหม่ขึ้นมา โดยสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ ในรูปของ primary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

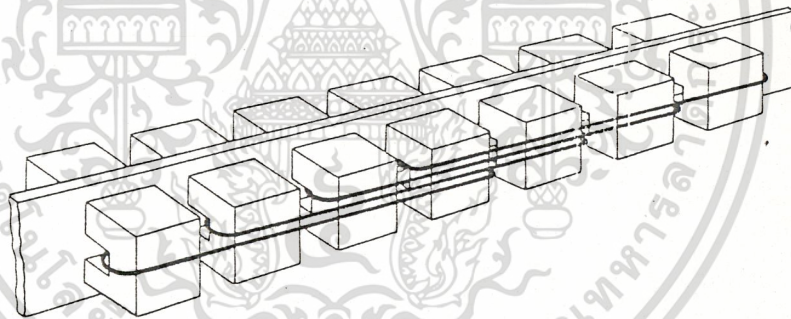
ซึ่ง motor ชนิดนี้เรียกว่า tubular motor ทั้ง flat LIM และ tubular LIM นั้น จัดอยู่ในจำพวกของ motor ที่ฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางของการเคลื่อนที่



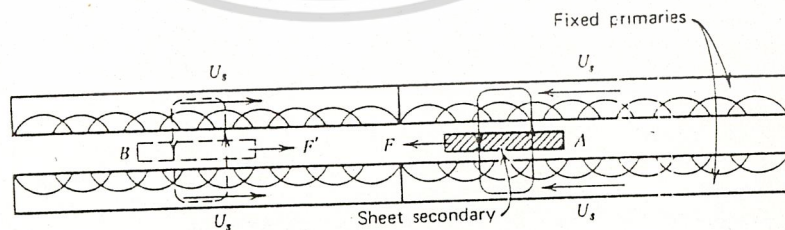
รูปที่ 5 Development of a tubular motor.

อย่างไรก็ตาม ถ้าหากเราดัดแปลงให้วงจรแม่เหล็กมีทางเดินฟลักซ์ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ ก็จะทำให้ได้ transverse flux motor โดยในรูปที่ 6 แสดงลักษณะการจัดเรียงแบบหนึ่ง ของ transverse flux motor

และถ้าหากเรานำเอา LIM สองตัวมาต่อกันหลังชนกัน (back to back) เราก็จะได้ linear oscillator ซึ่งจะเคลื่อนที่ในแบบสั่นไปมา โดยแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 Double-sided C-core TFLIM with distributed winding.



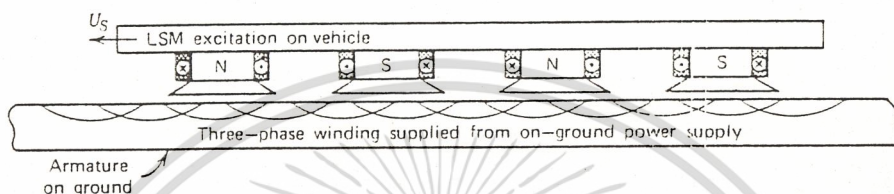
$U_s$  traveling field speed  
 $F$  thrust on the secondary in position A  
 $F'$  thrust on the secondary in position B

รูปที่ 7 An LIM oscillator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

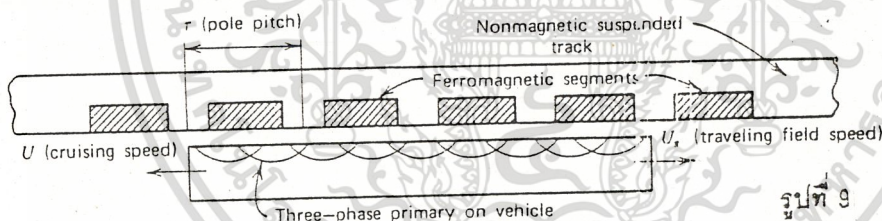
3. linear synchronous motors (LSM)

LSM นั้น จะมีหลักการเหมือนกับใน conventional synchronous motor ซึ่ง LSM ได้เข้ามามีบทบาทเด่นในช่วงหลังนี้ ในอุปกรณ์ขับเคลื่อนสำหรับการขนส่งด้วยความเร็วสูงบนพื้นดิน (high speed ground transportation) ใน LSM นั้น ก็จะมีส่วน dc field excitation และ amature excitation เหมือนกับใน conventional synchronous motor ซึ่งโดยส่วนมาก LSM นั้น จะให้ส่วน field winding เคลื่อนที่และให้ส่วน amature อยู่กับที่ ดังรูปที่



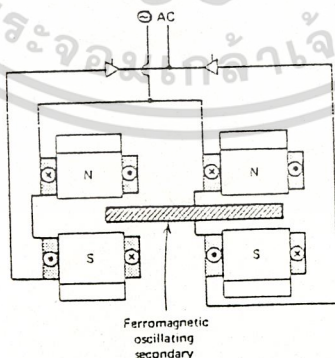
รูปที่ 8 Salient-pole LSM.

LSM อีกชนิดหนึ่งคือ linear reluctance motor (LRM) ซึ่งมีการจัดจำพวก LRM ไว้หลายแบบ แต่ในที่นี้จะยกตัวอย่างให้ดูเพียง 2 แบบคือในรูปที่ 9) จะเป็น LRM ที่ประยุกต์ใช้ในระบบการขนส่ง ส่วนในรูปที่ 10 คือ reluctance linear vibrators



รูปที่ 9

Segmented secondary linear reluctance motor.



รูปที่ 10

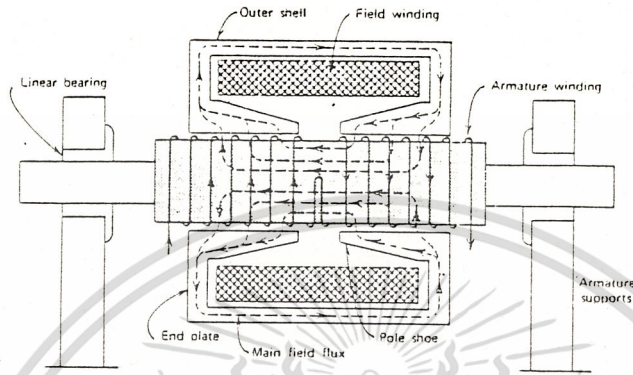
Linear reluctance vibrator.

4. dc.linear motors

dc.linear motor จะนิยมใช้สำหรับกรเคลื่อนที่ในช่องสั้น ๆ (short stroke) โดยใช้แกนเหล็กที่มีภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดขวางเป็นวงกลมซึ่งถูกพันด้วยขดลวดรอบผิวเพียง 1 ชั้นเพื่อที่จะเป็น armature ทิศทางการพันของขดลวด จะมีการกลับทิศบริเวณกึ่งกลาง โดยที่เราจะพันให้ขดลวดมีลักษณะเป็น capsule ซึ่งจะทำให้ไม่ต้องมีแปรง ถ่านหรือ commutator ขดลวด armature จะถูกล้อมรอบโดยขดลวด field ดังรูป 11 ซึ่ง air gap flux ตามแนวรัศมีจะกระทำกับ กระแสของ armature จึงทำให้เกิดแรงที่มีทิศทางเดียวตามแนวแกนได้ในแต่ละ pole



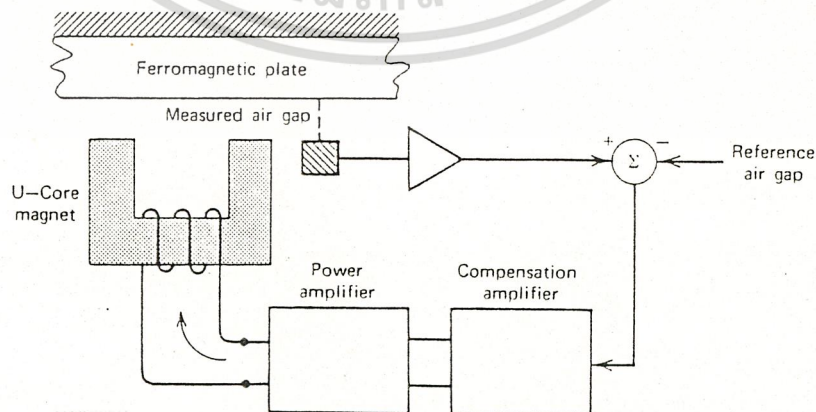
รูปที่ 11

A dc linear actuator. Courtesy

### 5. linear levitation machines

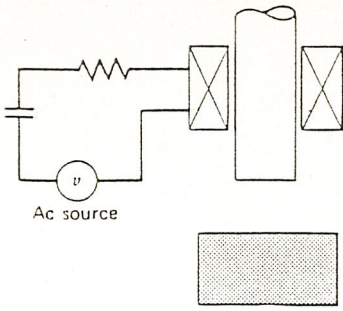
จากที่เราดูมาแล้วว่ามี normal force ใน LIM ซึ่งได้เรียก machine ที่มีลักษณะของ normal force เด่นว่าเป็น linear levitation machine ซึ่งในระบบขนส่งที่ใช้ความเร็วสูงนั้น จะต้องไม่ให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างรางกับตัวพาหนะจึงได้มีการนำ linear levitation machine มาใช้

linear levitation machine มีทั้งชนิดแรงดูดและแรงผลัก ซึ่งในรูปที่ 12 แสดงลักษณะของ LLM แบบดูดที่ใช้ไฟ AC โดยมี capacitor ต่ออยู่ในวงจรด้วยเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ระบบ ส่วนในรูปที่ 13 เป็น LLM แบบดูดที่ใช้ไฟ DC ซึ่งทั้งชนิดที่ใช้ไฟ AC DC ต่างก็มีปัญหาเนื่องจาก drag force (braking force) ที่เกิดจากกระแส eddy ที่ถูกเหนี่ยวนำใน secondary สำหรับ LLM แบบดูดอีกชนิดหนึ่งคือ transverse flux machine แบบ 3 phase ดังรูปที่ 14 ซึ่งเครื่องจักรชนิดนี้ มี drag force น้อยมากแต่ไม่ค่อยมีเสถียรภาพ ต้องมีอุปกรณ์เสริม



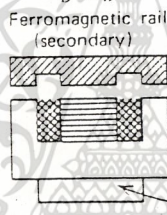
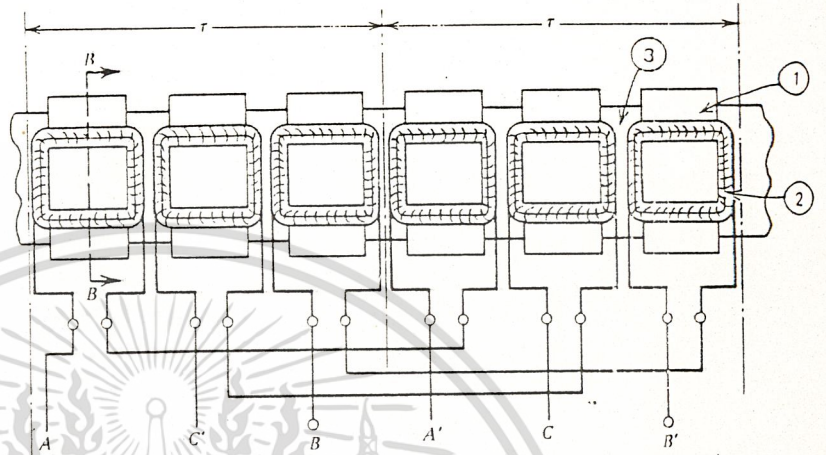
รูปที่ 13 Dc attraction-type levitation machine (with feedback stabilization).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12

Ac attraction-type levitation machine.

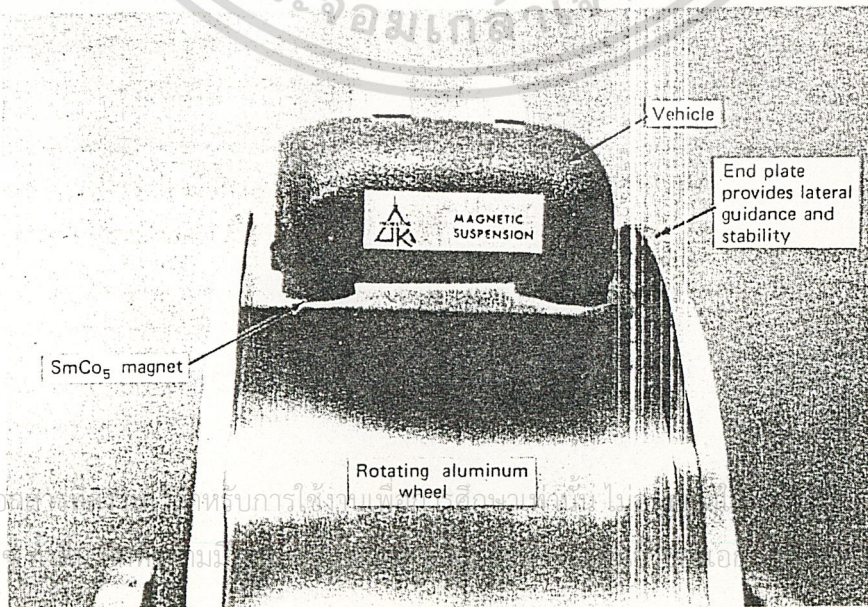


- 1. Coil core
- 2. Coil turns
- 3. Nonmagnetic frame of primary

รูปที่ 14

Three-phase transverse flux linear levitation machine.

ส่วน LLM ชนิดแรงผลักส่วนมากจะเป็นเครื่องจักรชนิดเหนี่ยวนำซึ่งในรูปที่ 15 แสดงลักษณะเบื้องต้นของพาหนะโดยมี Samarium-Cobalt เป็นแม่เหล็กถาวร ซึ่งถูกยกโดยถูกยกโดยลูกตุ้มอะลูมิเนียมที่หมุนได้ในทางปฏิบัติแม่เหล็กถาวรอาจเปลี่ยนเป็น superconductor ส่วนลูกตุ้มอะลูมิเนียมอาจทำให้เป็น ซี ที คล้ายกันได้



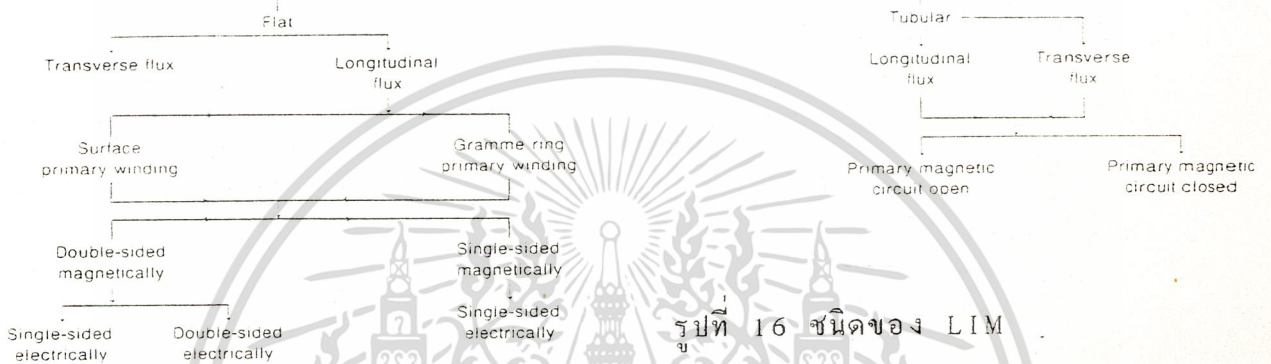
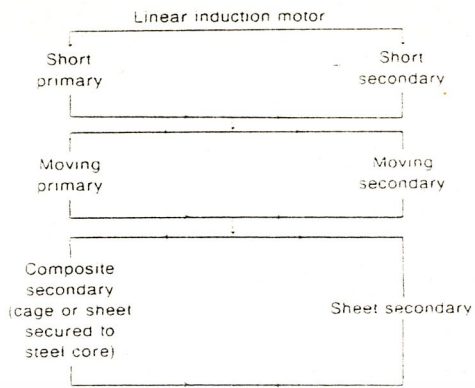
รูปที่ 15

Magnetic suspension demonstration model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการนำไปใช้

**Linear Induction Motor (LIM)**

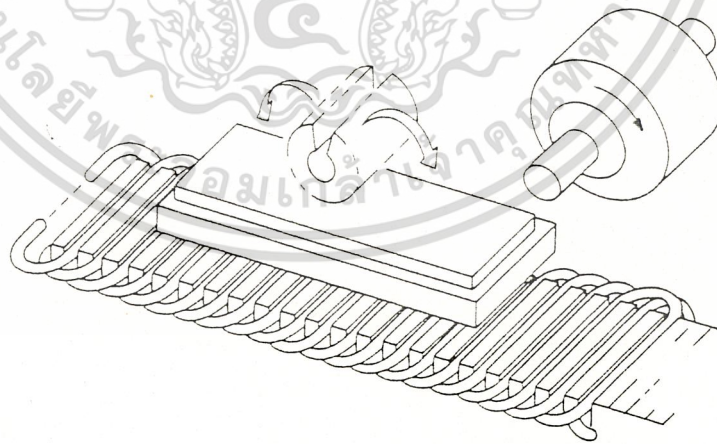
ชนิดของ LIM แสดงได้ตามแผนภาพในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ชนิดของ LIM

**โครงสร้างของ SLIM**

โครงสร้างโดยทั่วไปของ SLIM จะคล้ายคลึงกับ rotary induction machine (RIM) นั่นคือ มีขดลวดป้อน ภูมิภาคทางด้าน stator และ ขดลวดทุติยภูมิทางด้าน motor แต่ SLIM มีรูปร่างเป็นแผ่นแนวราบ ซึ่งได้จากการผ่า RIM แล้วคลี่ออก ดังแสดงในรูปที่ 17

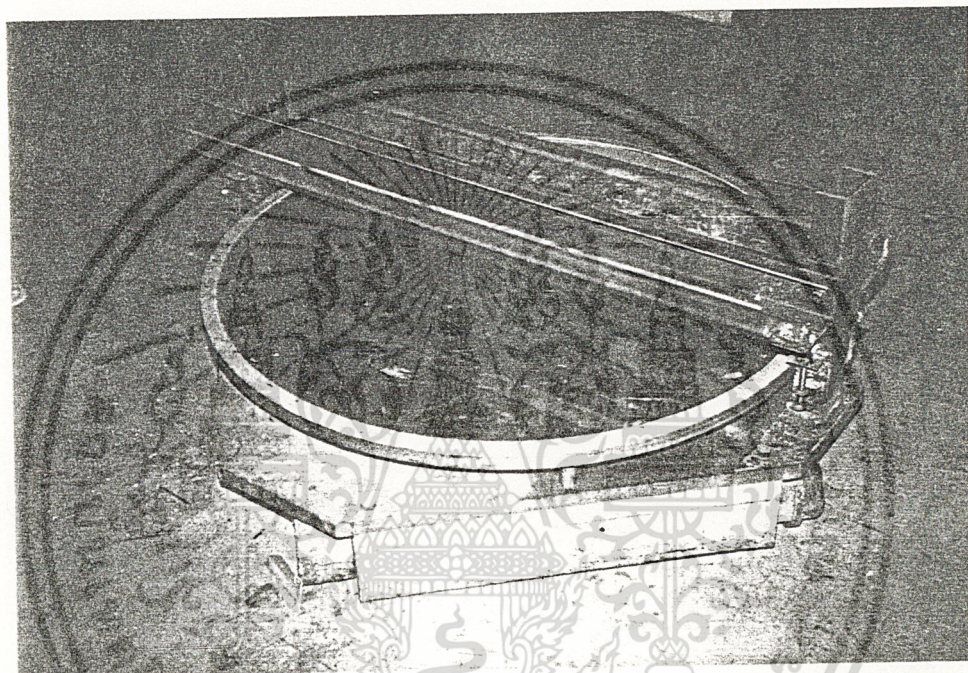


รูปที่ 17 แสดงการผ่า RIM แล้วคลี่ออกเป็น LIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในส่วนในส่วนขดลวดปฐมภูมิที่ stator ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนใน RIM , ใน SLIM ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่เป็นแบบการเคลื่อนที่ของคลื่น (Travelling wave) คือการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไปตามแนวความยาวของ stator ที่คลี่ออก

ส่วน rotor ของ SLIM ใน Project นี้ เราใช้แผ่นเหล็กกลมซึ่งด้านบนปิดด้วยแผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 18 โดยแผ่นเหล็กจะเป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก และแผ่นอลูมิเนียมเป็นทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิที่ stator เคลื่อนที่ตัดผ่าน rotor



รูปที่ 18 แสดง Rotor ของ LIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RIM	LIM
1. stator มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก	1. stator มีรูปร่างเป็นแผ่นในแนวราบ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการผ่า RIM แล้วคลี่ออก
2. สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิที่ stator เป็นสนามแม่เหล็กหมุน	2. เมื่อคลี่ stator ออกเป็นแผ่นในแนวราบ ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่ stator เคลื่อนที่เป็นแบบการเคลื่อนที่ของคลื่น (Travelling wave) คือสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแนวยาวของ stator ที่คลี่ออก
3. การเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม	3. การเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น
4. rotor เป็นแบบกรงกระรอก หรือแบบฟันขดลวด	4. rotor เป็นแผ่นตัวนำ ซึ่งมีส่วนที่เป็นเหล็กเป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก และส่วนที่เป็นอลูมิเนียมเป็นทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำ
5. synchronous speed ( $n_s$ ) $n_s = \frac{120f}{p} \quad (\text{rpm})$	5. synchronous speed ( $v_s$ ) $v_s = 2fp \quad (\text{m/s})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หลักการเบื้องต้นของสนามแม่เหล็ก**

ก่อนที่จะเรามาศึกษาถึงสนามแม่เหล็กภายใน airgap ของ linear induction moter เราควรจะศึกษาถึงหลักการเบื้องต้นของ airgap magnetic field ของ ac machine เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการเบื้องต้นก่อนโดยหลักการเบื้องต้นที่จะศึกษานี้จะเริ่มจาก synchronous machine

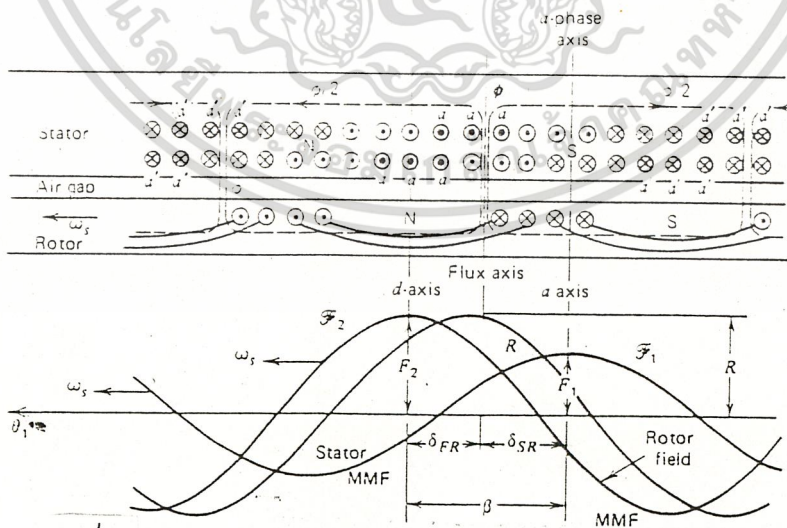
การทำงานของเบื้องต้นของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับนั้น จะขึ้นกับสนามแม่เหล็กจาก stator และ rotor คิดเฉพาะในส่วนของ fundamental ซึ่งลักษณะคลื่นจะเป็น sinusoidal ในสภาวะ steady state จะทำให้มุมระหว่างสนามแม่เหล็กจาก stator และ rotor จะมีค่าคงที่ตลอด ซึ่งหมายความว่าสนามแม่เหล็กจาก rotor และ stator จะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่เท่ากันตลอดคือ ความเร็ว synchronous อย่างไรก็ตามจะมีการปรับมุมระหว่างสนามทั้งสองได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ torque หรือมีการปรับเปลี่ยนกระแสสนาม

เนื่องจาก mmf ของทั้ง stator และ rotor ถูกพิจารณาให้อยู่ในรูปของ sinusoid ดังนั้นผลรวมของ mmf ทั้งสองก็จะต้องเป็น sinusoid ด้วย เราจะหาผลลัพธ์ออกมาได้ โดยใช้ phasor ในการพิจารณาซึ่งจะได้ผลลัพธ์ของ mmf ทั้งสองมาเป็นดังนี้

$$R = F_1 + F_2$$

โดยที่ R คือ mmf รวมที่จ่ายให้แก่วงจรแม่เหล็กของเครื่องจักร หรืออาจเรียกว่า resultant field

ในรูปที่ 19 แสดงลักษณะของ synchronous machine ที่ตัดแล้วคลื่นออกมา ขดลวดบน stator นั้นพันในลักษณะที่มี 3 slot/pole/phase แบบ shortpitch ตำแหน่งของคลื่น fundamental mmf ของทั้ง stator และ rotor ในรูปนั้นจะแสดงขณะที่กระแสของ phase a มีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับ phase b และ c ซึ่งทำให้ stator mmf ผ่านศูนย์กลางของกลุ่มของ phase a โดยเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว synchronous



รูปที่ 19 Machine flux produced by resultant of rotor ( $F_2$ ) and stator ( $F_1$ ) MMF fields shown at the instant of maximum current in phase a.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในรูปจะเห็นว่า mmf ของ rotor นำหน้า stator mmf เห็นมุม  $\beta$  ซึ่งมุมนี้จะคงที่ในขณะที่ steady state โดยเราได้แสดงลักษณะของ rotor และ stator mmf เมื่อนำ mmf ทั้งสองมาบวกกันแบบจุดต่อจุดตลอดช่วงความยาว airgap จะทำให้ได้สนามแม่เหล็กหลัก  $R$  ออกมา

วงจรแม่เหล็กที่เห็นจะไม่ใช่ของ  $F_1$  อย่างเดียวและก็ไม่ใช่ของ  $F_2$  อย่างเดียว แต่เป็น  $F_1 + F_2$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ flux ใน machine จะขึ้นกับ  $R$  ทางเดินของ flux เคลื่อนผ่าน airgap แล้วเข้าไปในแกนเหล็กของทั้ง stator และ rotor ซึ่งค่าสูงสุดของ fluxdensity จะขึ้นกับค่าสูงสุดของ  $R$

ในรูปที่ 19 แสดงข้อกำหนดดังนี้

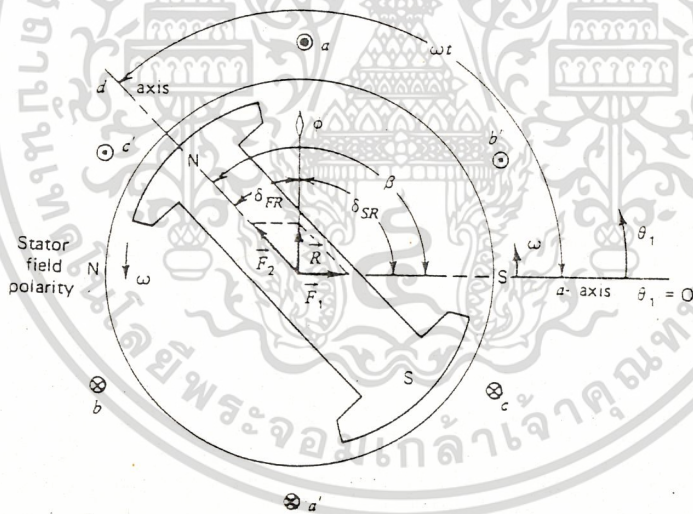
$\beta$  : มุมที่  $F_2$  นำ  $F_1$

$\delta_{FR}$  : มุมระหว่าง  $F_2$  กับ  $R$

$\delta_{SR}$  : มุมระหว่าง  $F_1$  กับ  $R$

$$F_1 = N_1 i_a$$

$$F_2 = N_2 i_f$$



รูปที่ 20 Schematic, two-pole representation

สำหรับรูปที่ 20 จะใช้ machine ชนิด 2pole ในการอธิบายเหตุการณ์ในรูปที่ 19 ซึ่งเป็นชนิด salient pole เพื่อให้เข้าใจต่อการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งได้ดีกว่า cylindrical rotor เราจะเห็นว่า เวกเตอร์  $F_2$  จะอยู่บนแกน d ของ rotor ส่วน flux นั้นจะอยู่บนแกนเดียวกับเวกเตอร์  $R$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ induction motor นั้นเมื่อจ่ายไฟ 3 $\phi$  ให้แก่ขดลวด stator ก็จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดซึ่งทำให้เกิด mmf ขึ้นใน airgap ของ motor ซึ่ง mmf ที่เกิดขึ้นนี้จะเหมือนกับใน synchronous machine ที่เคลื่อนที่ด้วย synchronous speed โดยที่

$$F_1 = N_1 I_1$$

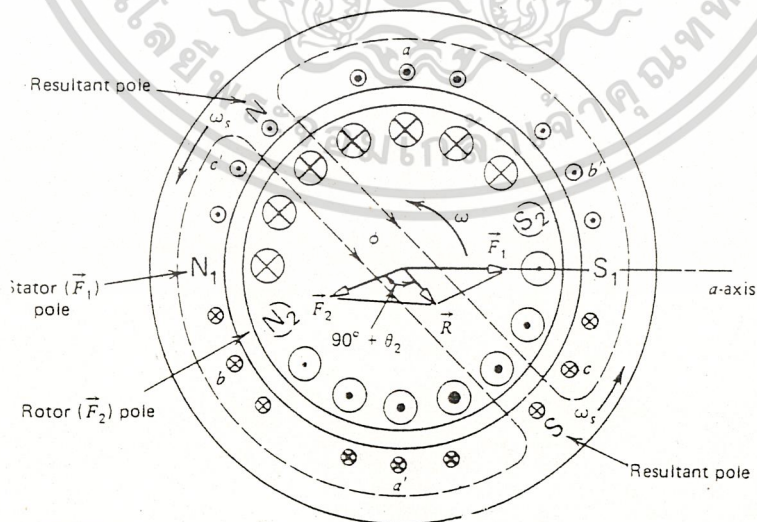
และจากหลักการทํางานของ induction motor ที่ความเร็วของ rotor จะต้องน้อยกว่า synchronous speed เสมอ จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนํา mmf ที่ rotor ( $F_2$ ) ซึ่งจาก synchronous machine ที่กล่าวมาแล้ว flux ภายใน airgap เนื่องจาก resultant mmf ของ stator กับ rotor mmf คือ

$$R = F_1 + F_2$$

ถ้าหากเรานําขนาดของเวกเตอร์ R,  $|R|$  และนําค่า permeance ของวงจรมแม่เหล็กมาคูณกันจะได้ mutual flux ที่เคลื่อนผ่าน airgap ดังสมการ

$$\phi = \mathcal{P} R \text{ Wb}$$

มุมระหว่าง R และ  $F_1$  ที่แสดงในรูปเป็นมุม  $90^\circ + \theta_2$  โดย  $\theta_2$  คือ power factor angle และจากรูปที่ 21 จะเห็นว่าเมื่อกระแสในเฟส a มีค่าสูงสุดจะทำให้  $F_1$  อยู่ในแนวแกน a ส่วน  $F_2$  ที่เกิดจาก rotor จะหาได้จากกฎมือขวา ดังแสดงในรูป 21



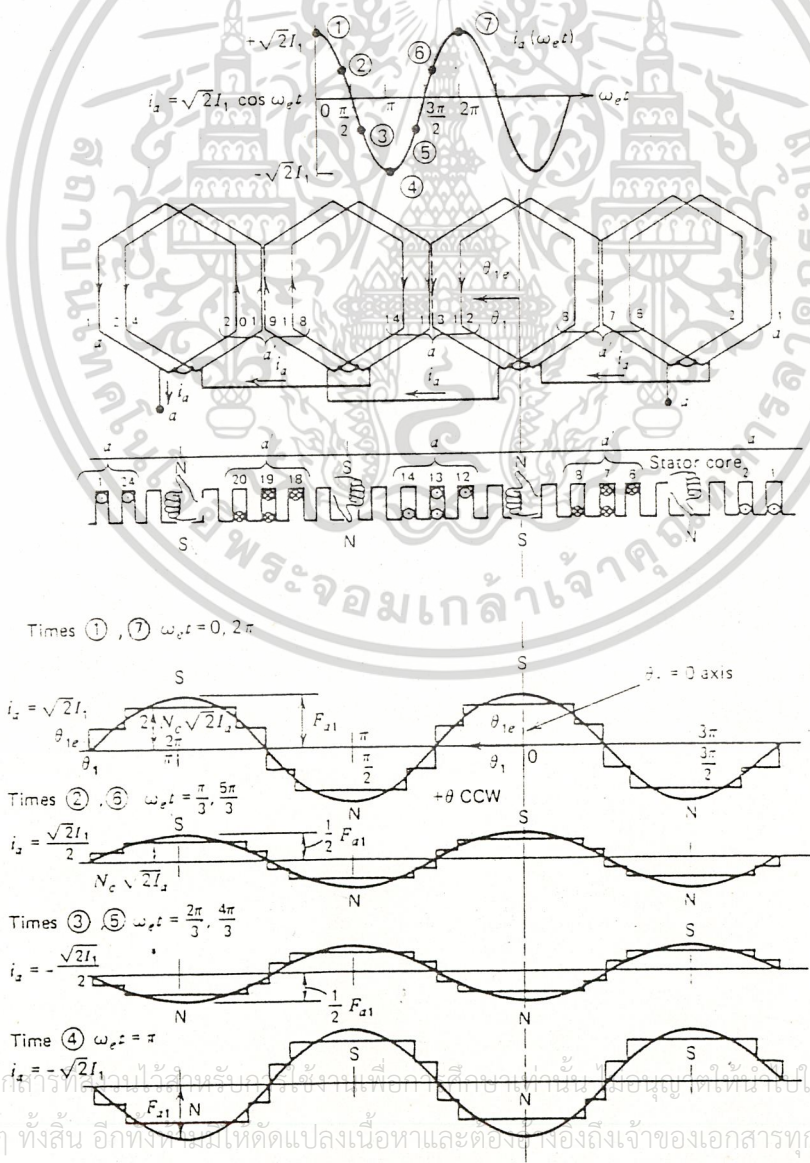
รูปที่ 21 Current patterns and MMF resolution at the instant the stator current in phase a is maximum.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

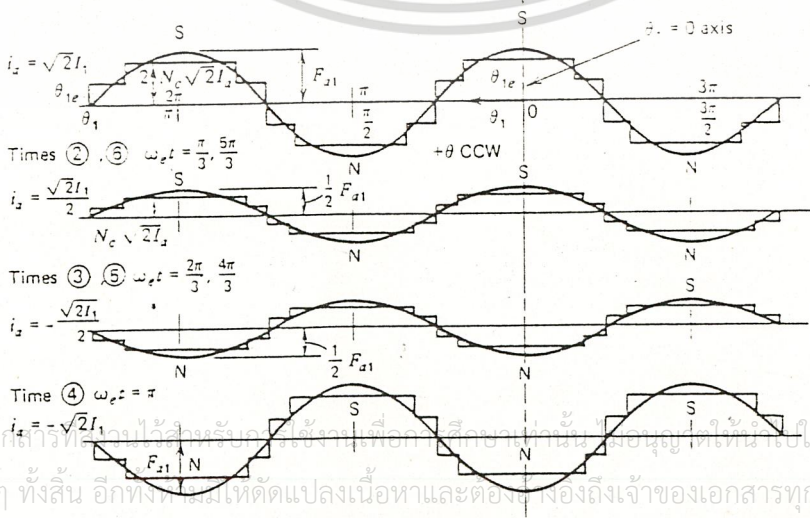
Rotating MMF of the stator or armature winding

ในรูปข้างล่าง แสดงลักษณะของ MMF ของเฟส A เพียงเฟสเดียวในรูปของเวลาและมุม  $\theta$  หากเราให้ subscript "1" เป็นปริมาณของ stator และให้กระแสที่มีทิศทางบวกไหลเข้าทางปลาย a' และออกทาง a สำหรับในรูป นั้นได้มีตัวอย่างของกระแสในเฟส A ที่เวลา ต่างๆ กันซึ่งกระแสที่เวลาต่างๆ กันนั้น จะมีผลต่อ MMF ของเฟส A แยกต่างออกไปดังรูป เช่นที่เวลาที่ 1 และ 7 จะเห็นว่าเป็นเวลาที่กระแสมีค่าสูงสุดคือ  $\sqrt{2}I_1$  จึงส่งผลให้ MMF มีค่าสูงสุดด้วยคือ  $F_{a1}$  แต่ที่เวลาที่ 2 และ 6 จะเห็นว่ากระแสลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียวคือ  $\sqrt{2}I_1/2$  จึงทำให้ MMF ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งด้วยเป็น  $F_{a1}/2$  ดังรูปซึ่งจะมีการขยายตัวยุบตัวของ MMF ไป เช่นนี้เรื่อยๆ หากเราให้ทิศทางของ MMF และ flux เป็นบวกเมื่อพุ่งออกจาก rotor หรือพุ่งเข้า stator ดังนั้นขั้วใต้บน stator จะมีทิศเป็นบวกดังรูป ซึ่งจะมีการขยายตัวและยุบตัวของ MMF เช่นนี้ไปเรื่อยๆ หากเราให้ทิศ

และเส้นแรงแม่เหล็กเป็นบวกเมื่อพุ่งออกจาก rotor หรือพุ่งเข้า stator ดังนั้นขั้วใต้จะมีทิศเป็นบวก



Times ①, ⑦  $\omega_e t = 0, 2\pi$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งขอ... ขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 22 The breathing field of one phase winding.

voltage induce in armature winding

magnetic field จะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิด induce voltage เนื่องจาก magnetic field เกิดจากกระแสไหลที่ขดลวดใน machine หรือ ขดลวดกับแม่เหล็กถาวร ซึ่ง magnetic field จะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ

1. แรงดึงดูดหรือแรงผลักทางแม่เหล็ก ซึ่งทำให้เกิดแรง
2. สนามแม่เหล็กจะทำให้เกิด induce voltage ในขดลวด

จาก Faraday's law กล่าวว่า แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำแรงขดลวด (e) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ magnetic field แสดงโดยสมการ

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

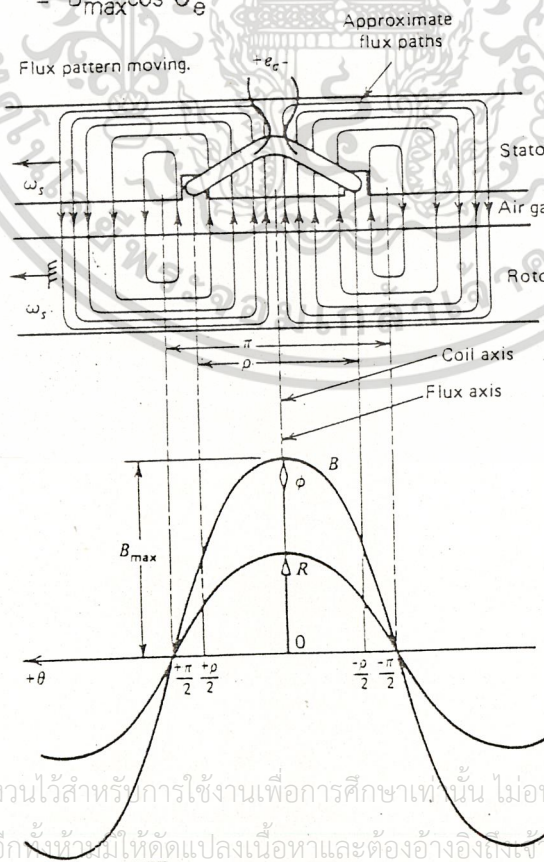
ซึ่ง N เป็นจำนวนรอบของขดลวด

ซึ่งแรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นนี้ จะเป็น generated voltage ในกรณีของ generator หรือเป็น counter voltage ในกรณีของ motor ซึ่งเราจะอธิบายกระบวนการเกิด induce voltage ต่อไป

เนื่องจากเรารู้มาแล้วว่า  $\phi$  ในช่องอากาศเกิดจาก reluctance mmf (R) ดังนั้น ถ้าให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก  $\phi$  ในช่องอากาศมีการกระจายเป็นแบบ sinusoidal ดังรูปที่ 23 เราสามารถเขียน airgap flux density ได้ดังนี้

$$B = B_{max} \cos p\theta$$

$$= B_{max} \cos \theta_e$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีผลนำไปใช้

รูปที่ 23 Flux linkages of a typical stator coil with air-gap flux due to resultant MMF.

ซึ่ง  $p$  = จำนวน pole

15

$\theta$  = มุมทางกล

$\theta_e$  = มุมทางไฟฟ้า

โดย  $\theta, \theta_e$  วัดจาก coil axis

แต่ความจริงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยความเร็วเชิงมุม ( $\omega_s$ )  
จึงอาจเขียนสมการได้ใหม่ในรูปของมุมกับเวลาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} B(\theta, t) &= B_{\max} \cos(\theta - \omega_s t) \\ &= B_{\max} \cos \rho(\theta_e - \omega_e t) \end{aligned}$$

ซึ่ง total flux ที่ผ่าน coil (flux/pole) จะหาได้ดังนี้

$$\phi_c = \phi \cos(\omega_e t) \sin \frac{\rho}{2}$$

ซึ่ง  $\rho$  = coil/pitch

$$\text{แต่ } \sin \frac{\rho}{2} = K_p$$

ดังนั้น coil voltage จะได้จาก Faraday's law หากขดลวดมีจำนวนรอบเท่ากับ  $N_c$  ดังนั้น flux linkage ( $\lambda$ ) จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \lambda &= N_c \phi_c \\ &= N_c K_p \cos \omega_e t \end{aligned}$$

หากเราให้ชื่อของ  $e_c$  มีทิศตามรูป 23 จะได้

$$\begin{aligned} e_c &= -\frac{d\lambda}{dt} \\ &= \omega_e N_c K_p \sin \omega_e t \end{aligned}$$

$$\text{โดย } \omega_e = 2\pi f$$

ดังนั้นค่า peak coil voltage คือ

$$E_{c\max} = \omega_e N_c K_p$$

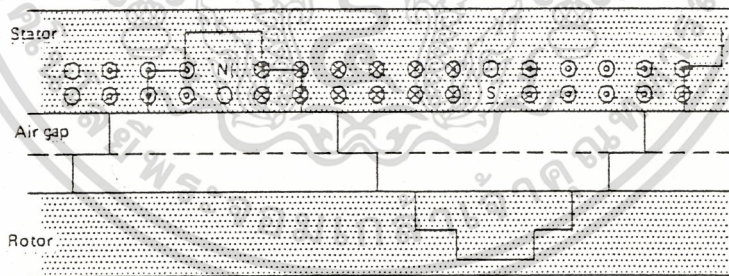
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_c &= \frac{E_{cmax}}{\sqrt{2}} \\
 &= \frac{\omega_e N_c K_p \phi}{\sqrt{2}} \\
 &= 2\pi f N_c K_p \phi \\
 &= 4.44 f N_c K_p \phi
 \end{aligned}$$

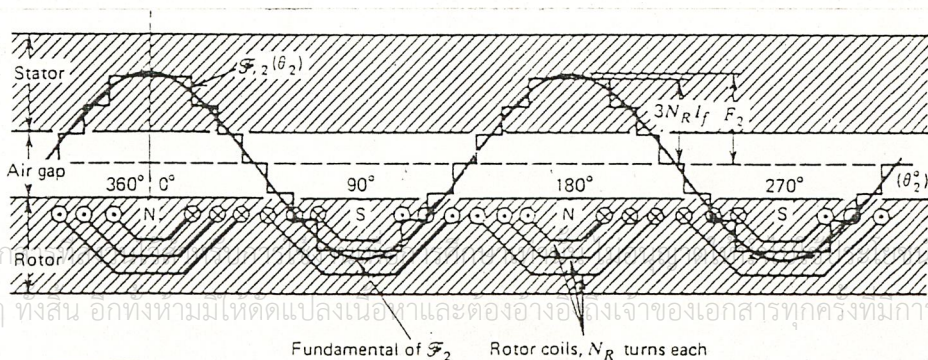
ซึ่งนี่ก็คือ induce voltage ที่เกิดใน machine นั้นเอง

### SLIM เคลื่อนที่ได้อย่างไร

การเคลื่อนที่ของ linear induction motor (LIM) นั้นสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับ rotary induction motor ทั่วๆไปคือ เมื่อจ่ายไฟให้แก่ขดลวดที่ stator จะทำให้เกิด MMF ที่ stator ขึ้นมา (F<sub>1</sub>) โดย MMF นี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว synchronous เมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัด rotor จะทำให้เกิด Induced EMF ที่ rotor (E<sub>2</sub>) และเกิด MMF ที่ rotor (F<sub>2</sub>) เมื่อ F<sub>1</sub> และ F<sub>2</sub> รวมกันจะทำให้เกิด Resultant MMF (R) โดย R = F<sub>1</sub> + F<sub>2</sub> ซึ่ง Resultant MMF จะก่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ ซึ่งจะแสดงลักษณะ MMF ใน stator, rotor, result ได้ดังรูป 24

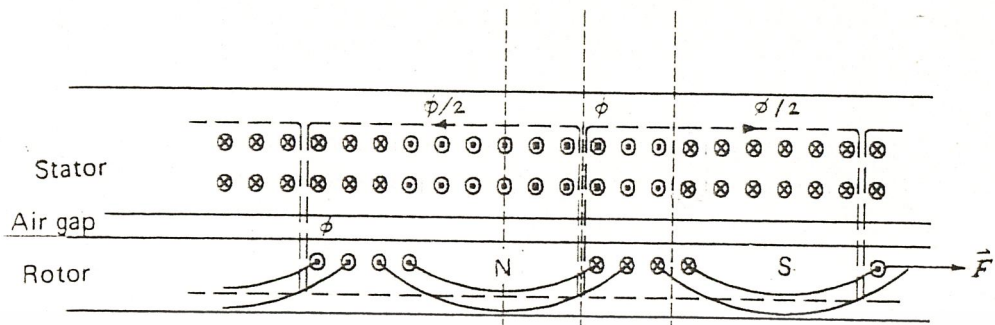


MMF ของ Stator

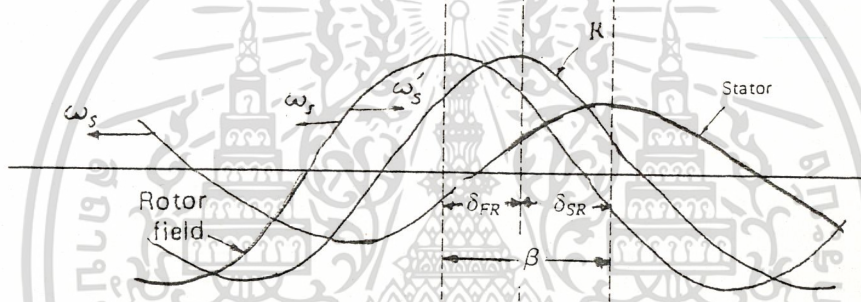


รูปที่ 24 MMF of a cylindrical rotor of four poles (p = 4).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์ใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง



รูปที่ 25 แสดงการเคลื่อนที่ของ SLIM



สำหรับแรงที่ทำให้ rotor (secondary) เคลื่อนที่ได้มันเกิดจากการเคลื่อนตัวของสนามแม่เหล็กตัดแผ่น secondary โดยแสดงได้ดังรูป 25 โดยพิจารณา MMF จาก stator ( $F_1$ ) หากให้  $F_1$  เคลื่อนที่ไปในทิศทางจะเสมือนว่าแผ่น secondary หรือ rotor เคลื่อนไปทางซ้ายสัมพันธ์กับ  $F_1$  จากกฎมือขวาจะทำให้เราได้ทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำที่ใหญ่ในแผ่น secondary ดังนั้นกระแสเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ขั้วแม่เหล็กเหนือ จะมีทิศพุ่งเข้าสู่กระดาษ และกระแสเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ขั้วแม่เหล็กใต้จะมีทิศพุ่งออกจากกระดาษ จากที่เราทราบว่าเมื่อมีกระแสตัดสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงตามสูตร  $F = i \times B$  และจากกฎมือขวาจะได้ทิศทางของแรง (thrust) ที่จุดให้ rotor เคลื่อนที่ไปในทิศทางขวา ซึ่งเป็นทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่ stator ( $F_1$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SLIM ขณะ ON-LOAD

เมื่อ linear induction motor (LIM) รับภาระ (on load) ความเร็วของ rotor จะลดลงตาม load ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วสัมพันธ์ระหว่าง travelling wave กับ ความเร็วของ rotor เพิ่มขึ้นทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ( $E_2$ ) และกระแสเหนี่ยวนำ ( $I_2$ ) เพิ่มขึ้นที่ rotor เมื่อกระแส  $I_2$  เพิ่มขึ้นก็ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก rotor ( $\Phi_2$ ) มากขึ้น ซึ่งจะต้านกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก stator ( $\Phi_1$ ) เส้นแรงแม่เหล็กรวมจะลดลงทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ stator ( $E_1$ ) ลดลง ดังนั้นกระแสที่ไหลเข้าขดลวดที่ stator ( $I_1$ ) จะเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อ LIM รับภาระมากขึ้นจะกินกระแสมากขึ้น

## ตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของ LIM

1. **airgap** ความยาวของ airgap เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่ง ถ้า airgap มีขนาดใหญ่จะทำให้ magnetizing current ( $I_m$ ) มีค่ามาก และทำให้ power factor มีค่าต่ำลง ในกรณีของ  $I_m$  ความสูญเสียของบริเวณ exit-end จะเพิ่มขึ้น ถ้า airgap มีขนาดใหญ่ขึ้น พร้อมกับ output force และ ประสิทธิภาพลดลงในการพิจารณาเบื้องต้นเราใช้ goodness factor (G) ซึ่งแปรผกผันกับ airgap ดังสมการ

$$G = \frac{X_m}{R_2}$$

$$= \frac{2\mu_0 f t^2}{p' \pi g} \quad \text{-----} 1$$

ซึ่ง  $p$  = pole-pitch และ  $p' = p/d$  จะถูกกำหนดด้วยความต้านทานผิวของ secondary  $p$  เป็นความต้านทาน และ  $d$  เป็นความหนา การใช้หลักของ goodness factor มาออกแบบ machine จะได้ผลดีที่สุด สำหรับ low speed LIM การที่ทำให้ goodness factor มากขึ้นจะทำให้ machine ดีกว่า ดังนั้นเราจึงต้องทำให้ airgap มีขนาดเล็กลงเท่าที่จะทำได้

2. **pole-pitch** จากสมการที่ 1 goodness factor จะมีค่ามากขึ้นเมื่อ pole-pitch ( $p$ ) ยาวขึ้น เพราะ  $p$  ถูกยกกำลังสองในสมการของ G แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ  $p$  ยาวขึ้นจะทำให้ back iron มีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้น้ำหนักของ LIM มากขึ้น ประสิทธิภาพลดลง และความยาวของตัวนำในร่อง slot ถึงความยาวของตัวนำทั้งหมดน้อยลง ซึ่งเท่ากับตัวนำใน slot รวมกับ end connections แต่ end connections ไม่มีประโยชน์เพราะทำให้เกิด leakages and losses อย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

synchronous speed ( $V_s$ ) มีความสัมพันธ์กับ  $p$  ตามสมการ

$$V_s = 2pf \quad \text{-----} 2$$

ดังนั้นความถี่ และ pole-pitch เป็นตัวกำหนด synchronous speed ( $V_s$ ) ของ machine ในความยาวของ machine ที่ออกแบบ เราจะไม่ออกแบบให้ machine มี pole-pitch ใหญ่เพื่อให้จำนวน pole น้อยลง

3. **จำนวน pole** end effects จะลดลงเมื่อจำนวน pole ของ LIM มากขึ้น เพราะเมื่อจำนวน pole มากขึ้น จะทำให้ end effect loss ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ถูกเฉลี่ยไปตาม pole ต่าง ๆ ทำให้ machine มีคุณสมบัติขึ้น จากสมการ 2 เมื่อเรากำหนด  $V_s$  และ  $f$  ขึ้นมาก่อน อาจทำให้ความยาวของ LIM ยาวเกินพอดีในจำนวน pole ที่จะถูกสร้างขึ้น

4. **overhang correction factor** จากโครงสร้างของ LIM เราเห็นว่า secondary ยื่นออกมาพ้นจาก ความกว้างของ primary stack เป็นเหตุให้เราต้อง ประมาณเกี่ยวกับ overhang (a correction factor  $K$ ) หรือ Russell-Norsworthy factor ซึ่งถูกแนะนำไว้แล้วในสมการที่ 1

$$K = \frac{\tanh \frac{\pi l}{2\tau}}{\frac{\pi l}{2\tau} \left[ 1 + \tanh \left( \frac{\pi l}{2\tau} \right) \tanh \frac{\pi c}{2\tau} \right]}$$

ซึ่ง  $l$  = stack width

$\tau$  = pole pitch

$c$  = secondary overhang

และสมการที่ 3 ถูกเขียนใหม่ได้เป็น สมการที่ 4 ดังนี้

$$G = \frac{2f\tau^2\mu_0(1 - K) \times (\text{thickness of the secondary})}{\pi g \times (\text{volume resistivity of secondary})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น วัสดุที่ใช้ทำและความหนาของ secondary เป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของ LIM ตามสมการที่ 4 ความหนาของ secondary มากขึ้น ทำให้ G มากขึ้น ในกรณีของ secondary ที่ไม่เป็นเหล็ก ความหนาจะต้องน้อย แต่ต้องมีความแข็งแรงพอที่จะทนต่อแรงที่มากกระทำได้ ในกรณีของ secondary ที่เป็นเหล็ก airgap ไม่ขึ้นกับความหนาของวัสดุ อย่างไรก็ตาม secondary ที่หนากว่าจะให้ กระแสขณะสตาร์ทสูงกว่า ดังนั้นเป็นผลให้การเลือกความหนาขึ้นกับข้อจำกัดของกระแสสตาร์ทมากกว่าที่จะถูกออกแบบให้ G เพิ่มขึ้น

ในสมการที่ 4 ถ้าความต้านทานของ secondary น้อยลงจะทำให้ค่า G มากขึ้น และความต้านทานที่ต่ำ ทำให้ secondary  $I^2R$  loss น้อยด้วย แต่ความต้านทานที่ต่ำทำให้ end effect travelling wave ลดลงไปซ้ำกว่า ซึ่งทำให้ output ลดลง ดังนั้น G และความต้านทานของ secondary ต้องมีการเลือกอย่างเหมาะสม

สำหรับ ferromagnetic material ข้อดีคือมี permeability สูง ซึ่งทำให้  $I_m$  น้อย แต่ข้อเสียคือ เกิดแรงทางแม่เหล็กที่แข็งแรงดูดกันระหว่าง primary and secondary

สำหรับ nonferromagnetic material เป็นวัสดุตัวนำทางไฟฟ้าลดแรงดึงทางแม่เหล็กที่มีขนาดมากได้ แต่เมื่อ permeability ที่ข้าม airgap ต่ำ จะทำให้  $I_m$  มีค่ามาก ดังนั้น secondary ที่ประกอบด้วย ferrous and nonferrous material จะมีข้อดีของแต่ละส่วน ทั้ง high permeability และ ลดแรงดึงแม่เหล็ก (magnetic pull)

5. primary core การออกแบบ stator core มีผลต่อคุณสมบัติของ LIM ถ้าเราให้พื้นที่หน้าตัดของทองแดงที่ใช้คงที่ machine ที่มี teeth แคบกว่า จะผลิตแรงได้มากกว่า power factor และ ประสิทธิภาพจะดีกว่า machine ที่มี teeth ที่กว้าง เพราะว่า machine ที่มี teeth แคบนั้น จะมี leakage reactance ทั้งของ primary and secondary ต่ำ ทำให้เกิด ค่าคงที่ของเวลาที่ secondary (smaller secondary time constance) น้อย ซึ่งจะทำให้ ขนาดของ end effect (end effect travelling wave of smaller magnetude) ลดลง มีผลทำให้ output มากขึ้น การทำให้ความกว้างของ teeth แคบ จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux density) ถูกพิจารณาเนื่องจากจะทำให้ เส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงตัวแปรที่มีผลต่อ LIM

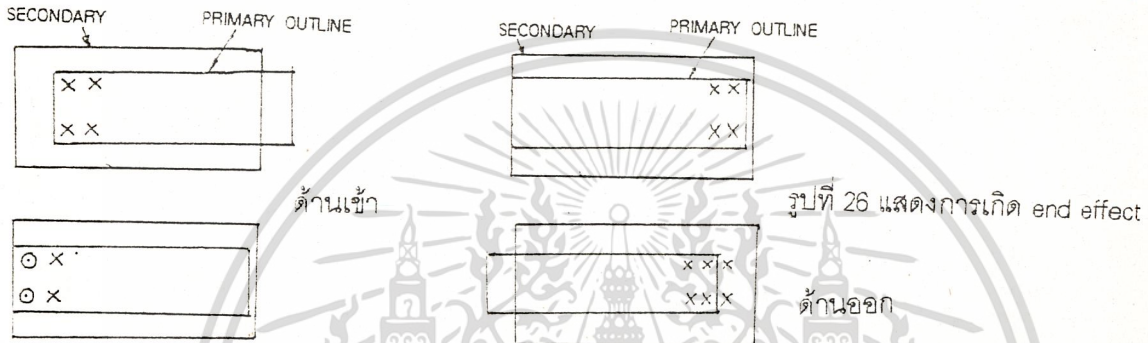
ตัวแปร	เพิ่มขึ้น	ลดลง
airgap (g)	$I_m$ มากขึ้น exit-end loss มากขึ้น	G มากขึ้น output force มากขึ้น
pole-pitch (p)	G มากขึ้น ความหนาของ back iron มากขึ้น	จำนวน pole มากขึ้น
จำนวน pole (2p)	end effect ลดลง	secondary leakage reactance มากขึ้น
ความหนาของ secondary	G มากขึ้น กระแสสตาร์ท มากขึ้น	secondary leakage reactance มากขึ้น
ความต้านทานของ secondary ( $\pm$ )	end effect ลดลง	G มากขึ้น secondary $I^2R$ loss ลดลง
teeth width (w)	leakage reactance มากขึ้น	force มากขึ้น ประสิทธิภาพ มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

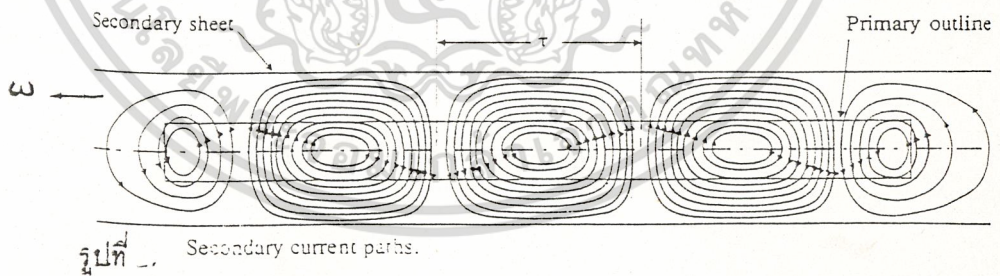
ปรากฏการณ์ที่เกิดจากรูปทรงที่แตกต่างของ LIM กับ RIM

END EFFECT

ปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่ทำให้ LIM แตกต่างไปจากปรากฏการณ์ใน rotational induction motor ก็คือ end effect ใน LIM นั้นทางส่วน primary จะมีส่วนเป็นทางด้านเข้าที่ตัวนำของแผ่น secondary เคลื่อนที่เข้ามาอย่างต่อเนื่องภายใน air gap สำหรับทางด้านออกนั้นตัวนำของแผ่น secondary เคลื่อนที่ออกจาก air gap อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจากกฎของ lenz กระแสของ secondary ในบริเวณด้านเข้าจะพยายามป้องกันการสร้าง flux ภายใน air gap ซึ่งส่งผลให้เมื่อ motor เคลื่อนที่ จะทำให้ความหนาแน่น flux แม่เหล็กเฉลี่ยใน air gap ในช่วงของคู่ pole แรกใกล้ทางด้านเข้า มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ pole ต่อไปใน motor ดังรูป 26



ในทำนองเดียวกัน จากกฎของ lenz ทางด้านออกนั้นหลังจากที่ secondary เคลื่อนตัวออกทางด้านออกกระแสในแผ่น secondary จะพยายามที่จะรักษาให้ flux มีค่าคงที่ ซึ่งกระแสนี้จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในรูปของความต้านทาน โดยที่ไม่มีผลให้เกิดการสร้าง thrust เพิ่มขึ้น ซึ่งเราสามารถแสดงลักษณะทางเดินของกระแสในแผ่น secondary ได้ดังรูป 27



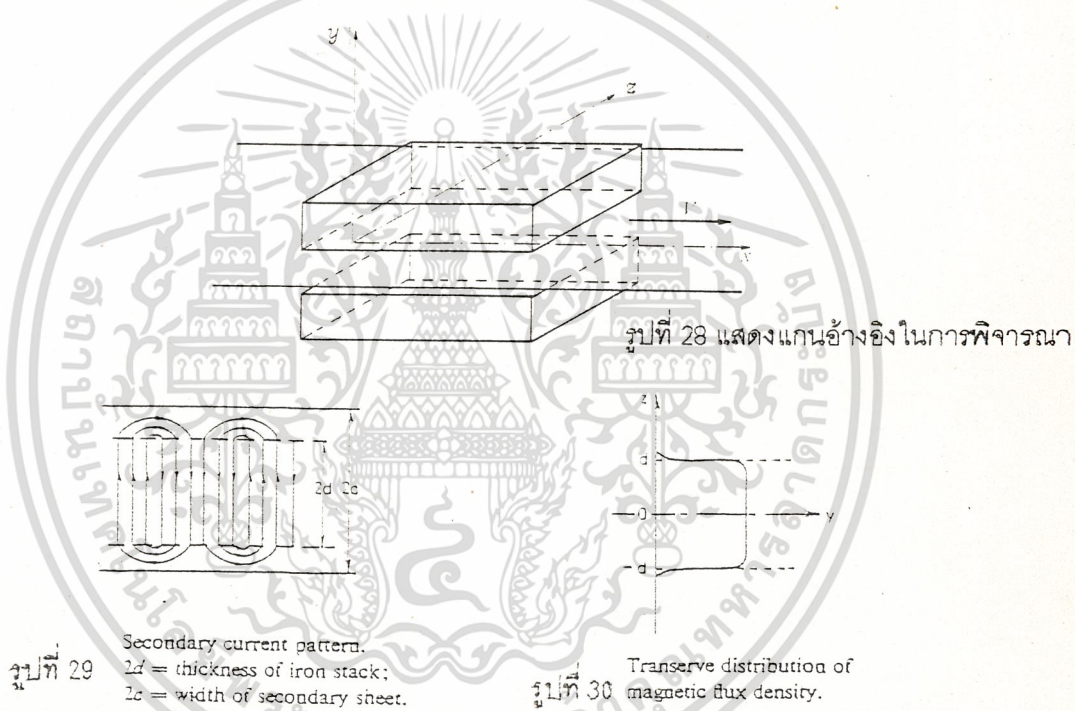
ดังนั้น end effect ซึ่งทำให้ motor มีค่า effective resistance สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ค่า efficiency ลดลงและจะมีผลให้ลดค่า maximum thrust ที่ motor สามารถสร้างขึ้นได้ลงด้วย โดย end effect นี้จะเห็นผลมากใน high speed LIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EDGE EFFECT

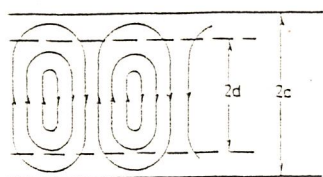
edge effect นั้นแตกต่างกับ end effect อย่างมากทั้งสาเหตุในการเกิดและลักษณะโดยทั่วไป edge effect นั้นไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่าง primary กับ secondary และไม่ใช้ปรากฏการณ์ชั่วคราวใดขณะหนึ่งแต่ edge effect นั้น เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตามขวาง ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ edge effect ได้ดังนี้

ให้แกนอ้างอิงของ LIM มีลักษณะดังรูป 28 และกำหนดให้กระแสใน secondary มีเฉพาะในทิศทางแกน Z เท่านั้นภายในบริเวณของ air gap ดังรูปที่ 29 จากข้อกำหนดนี้จะทำให้กล่าวได้ว่า แผ่น secondary มีความต้านทานเฉพาะในช่วง air gap และส่วนปลายที่ยื่นออกไปนอก air gap นั้นไม่มีความต้านทาน แต่ความจริงแล้วส่วนปลายที่ยื่นนั้นก็ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกันและมีความต้านทาน

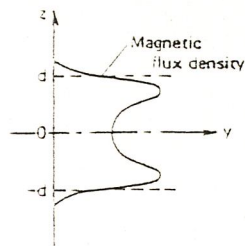


แต่คราวนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือกระแสใน secondary นั้นไม่ได้ไหลแต่เพียงในแกน Z ภายในช่วง air gap เท่านั้น แต่ยังมีส่วนประกอบในแกน X ด้วย ส่วนของกระแสที่ secondary นั้นจะมีวงรอบปิดอยู่ภายในช่อง air gap ซึ่งแสดงดังรูป 31a สำหรับการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางแกน Z นั้นแสดงดังรูป 30 31b ตามลำดับ ในรูปที่ 30 นั้น จะเป็นการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องมาจากกระแสที่ไหลขนานกันภายในบริเวณ air gap ขณะที่รูป 31b เป็นการกระจายของฟลักซ์ที่ไม่สม่ำเสมออันเนื่องมาจากกระแสไหลในทิศทางที่ไม่ขนานกัน ซึ่งจากการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของกระแส secondary และฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางของแกน Z เราจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า edge effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 (a) Secondary current pattern.  
 $2d$  = thickness of iron stack;  
 $2c$  = width of secondary sheet.



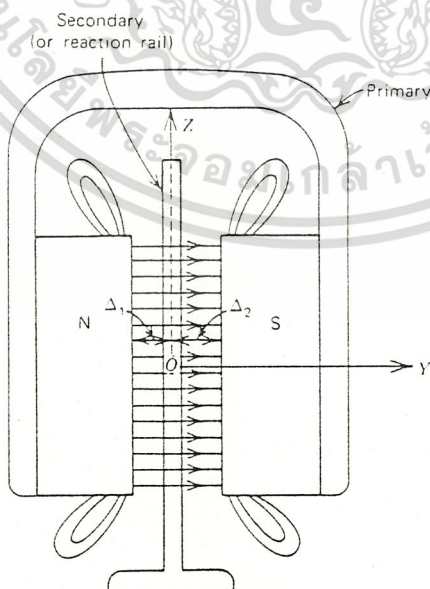
รูปที่ 31 (b) Transverse distribution of magnetic flux density.

รูปที่ 31

**NORMAL FORCE**

แรงที่กระทำระหว่าง primary และ secondary ที่จะกระทำตามแนว OY ในรูป 32 เรียกว่า normal force ซึ่งเราสามารถจำแนก normal force ได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆคือ

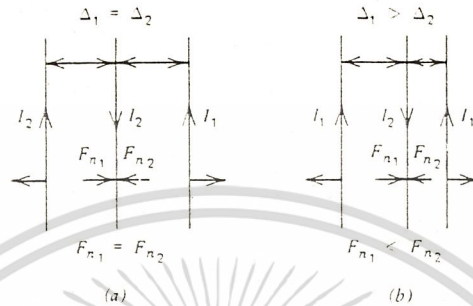
1. แรงดูด (attraction force) เกิดระหว่างผิวของสารแม่เหล็กสองส่วน เช่นระหว่าง primary core กับ back iron ของ secondary ใน SLIM
2. แรงผลัก (repulsion force) เกิดจากกระแสในขดลวด primary และกระแสเหนี่ยวนำใน secondary



รูปที่ 32 Double-sided primary with a vertical secondary.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

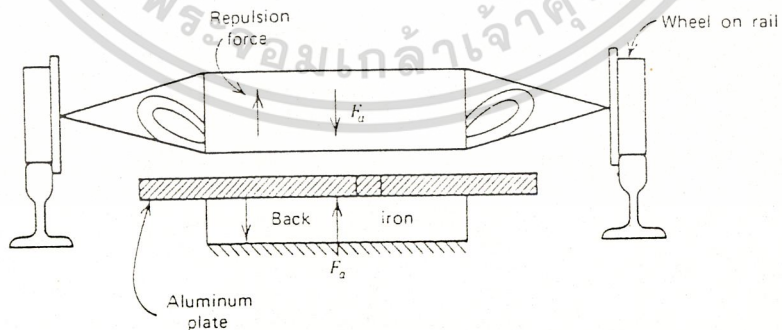
หากเราพิจารณาใน DSLIM ในรูปที่ 32 จะเห็นว่าเมื่อมีแรงเกิดขึ้นระหว่าง primary ทั้งสองโดยแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงดูด ซึ่งไม่ขึ้นกับตำแหน่งของ secondary แรงดูดนี้เพียงแต่ทำให้เกิด stress ขึ้นในโครงของ primary เท่านั้น ซึ่งมีผลต่อการออกแบบโครงของ primary สำหรับแรงหลักที่เกิดขึ้นใน DSLIM แสดงดังรูป 33



รูปที่ 33 (a) Balanced force of repulsion on secondary, (b) restoring repulsion force.

โดยแรงนี้จะเกิดจากการกระทำของกระแส  $I_1$  และ  $I_2$  และจะเห็นว่าเมื่อ secondary ไม่อยู่ในตำแหน่งตรงกลางจะทำให้ normal force สลับกลายเป็น restoring force ซึ่งรู้จักกันในชื่อ stabilizing normal force ซึ่งจะทำให้แผ่น secondary เข้าสู่ตำแหน่งสมดุลเริ่มแรกได้

สำหรับใน SLIM จะเกิด normal force ในทำนองเดียวกับ DSLIM ยกเว้นแรงหลักนั้นจะไม่เกิดการสะสม (nonstoring) และกระทำในทิศทางตรงข้ามกับแรงดูด แรงดูดนั้นจะทำให้หน้าหนักที่ปรากฏของ machine มีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดความเค้นที่โครงสร้างของส่วนติดตั้ง secondary อย่างไรก็ตาม หาก back iron ของ SLIM นั้นไม่ได้ laminated ก็จะทำให้เกิดแรงหลักขึ้นมาระหว่าง primary และ secondary back iron สำหรับใน high speed แรงลัพท์จะเป็นแรงหลัก ซึ่งมีประโยชน์ช่วยในการยก machine ได้



An SLIM with laminated back iron.

รูปที่ 33.1 แสดง SLIM ที่ secondary sheet เป็น back-iron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กใน SINGLE SIDE LINEAR INDUCTION MOTORS  
โดยพิจารณาแบบจำลอง 1 มิติ (ONE DIMENSION MODEL)

มีผู้เขียนหลายท่านได้พยายามค้นคว้าที่จะหาค่าตอบของ การวิเคราะห์สำหรับสนามแม่เหล็กภายในช่องอากาศ (air gap field) ของ linear induction motors ซึ่งมีเพียงส่วนน้อยที่ประสบความสำเร็จโดยในปริญญาพนธ์ฉบับนี้จะนำเอาการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศของ Sakae Yamamura มาใช้ในการอ้างอิงเพื่อวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์นี้จะพิจารณาถึงผลของ end effect ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของ SLIM ด้วย ซึ่งผลของการวิเคราะห์จะช่วยให้เข้าใจถึงการกระจายของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศและคุณสมบัติของ SLIM ได้ในระดับหนึ่ง

การวิเคราะห์โดยใช้ one dimension model นั้นจะพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของ air gap field ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของ motor เท่านั้น ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้ one dimension model นั้นไม่ยุ่งยากนักในการที่จะได้ผลออกมา และยังทำให้เกิดความเข้าใจถึงโครงสร้างของปรากฏการณ์ end effect ได้เป็นอย่างดี ในการวิเคราะห์จะสมมติให้จำนวนของตัวนำในแต่ละ slot มีค่าเท่ากัน และทุก coil ต่อกันแบบ serie ซึ่งจะทำการกระแสที่ไหลจากด้านเข้าไปยังด้านออกในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน

ทฤษฎีเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กใน electrical machine จะแสดงให้เห็นกระแสอยู่ในรูปของ current sheet ซึ่งจะทำการกระจายของกระแสเป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยที่กระแสจริงๆ ในขดลวดจะเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องและมีค่ามากบริเวณตัวนำที่อยู่ภายใน slot แต่ในการใช้งานแล้วจะสามารถใช้แทนกันได้โดยกระแสทั้งสองชนิดจะทำให้เกิด magnetomotive force ที่เป็น sinusoidal เหมือนกัน เราสามารถแทนกระแสที่ primary (I<sub>1</sub>) ได้ด้วย

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \exp(j\omega t).$$

1

โดยที่กระแสในเฟสอื่นของขดลวด primary จะ lag เป็นมุม  $2\pi/3$  และ  $4\pi/3$  ตามลำดับ

เราสมมติให้ค่าสมมูลย์ของ current sheet มีการกระจายของกระแสตามสมการ

$$j_1 = J_1 \exp\{j(\omega t - kx)\} \quad (\text{A/m}).$$

2

โดย

$$k = \frac{\pi}{\tau}.$$

3

ซึ่งทั้งขดลวด primary และค่าสมมูลย์ของ current sheet จะมีระยะ pole pitch เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

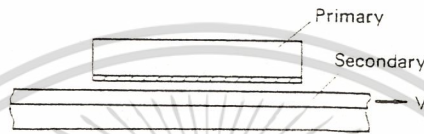
สำหรับ

$$J_1 = \frac{3\sqrt{2} w_1 k_w I_1}{\rho_1 \tau} \quad (\text{A/m}).$$

4

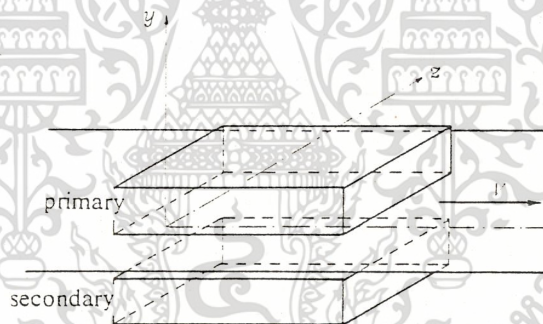
ดังนั้นสมการที่ 2 จึงแทนค่าสมมูลย์ของ current sheet ซึ่งจะสร้าง magnetomotive force (mmf) ที่เป็น sinusoidal เหมือนกับ primary winding

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ถึงสนามแม่เหล็กในช่องอากาศของ SLIM นั้น เราควรทราบข้อกำหนดเบื้องต้นก่อนซึ่งข้อกำหนดก็คือ LIM ที่ศึกษานี้เป็นแบบ short primary และเป็นแบบ single side ดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 ลักษณะของ SLIM ที่นำมาวิเคราะห์

สำหรับแกน reference และ coordinate สำหรับการพิจารณาแสดงดังรูปที่ 35

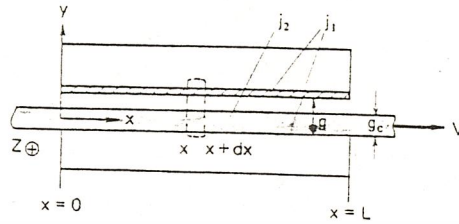


รูปที่ 35 แกนอ้างอิงและ coordinate ที่ใช้พิจารณา

โดยที่กระแสในขดลวด primary จะไหลในทิศทางแกน Z เท่านั้นและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับ secondary คือในทิศทางของแกน X และถ้าหากตัวนำที่ secondary ไม่เป็นสารแม่เหล็กการเปลี่ยนแปลงในแกน Y จะน้อยมาก และจะไม่นำมาพิจารณาดังนั้น one dimension model จะพิจารณาผลที่เกิดขึ้นเฉพาะในแกน X (ทิศทางที่เคลื่อนที่ที่เท่านั้นดังที่ได้กล่าวไปแล้ว สำหรับ secondary back iron นั้น จะต้อง laminated ( $\delta = 0$ ) และไม่มีการอิ่มตัวเกิดขึ้น ( $\mu = \infty$ ) เพื่อที่จะไม่ให้เกิดความแตกต่างใน SLIM และ DLIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปแบบของ one dimension model นั้น จะแสดงดังรูปที่ 36 โดยจุดเริ่มต้นของแกน X คือด้านเข้า (entry end) และด้านออก (exit end) ที่ระยะ  $X = L$  current sheet ใน primary ( $j_1$ ) และ current sheet ใน secondary ( $j_2$ ) ไหลในทิศทางแกน Z และให้ความหนาของ primary core ในทิศทางของแกน Z มีค่า 1m



รูปที่ 36 แบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์แบบ one dimension

ค่า line integral ของสนามแม่เหล็ก (H) ตามเส้นประรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 36 จะเป็นไปตามสมการ

$$\oint H \, dl = \frac{\partial H}{\partial x} g \Delta x$$

สำหรับปริมาณกระแสที่ถูกล้อมรอบด้วยเส้นประคือ

$$(j_1 + j_2) dx.$$

แต่จาก ampere's law ที่กล่าวว่า อินทิกรัลของความเข้มสนามแม่เหล็กรอบเส้นวงปิดใด ๆ จะเท่ากับกระแสที่ถูกล้อมรอบโดยเส้นวงปิดนั้น เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\oint H \, dl = I$$

ดังนั้น จากความสัมพันธ์นี้จะได้

$$g \frac{\partial H}{\partial x} = j_1 + j_2. \tag{5}$$

แต่  $B = \mu_0 H$  ดังนั้น

6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force  $e_2$ ) ใน secondary จะมีทิศทางในแกน Z ซึ่งจะมีค่า line integral ของ emf รอบเส้นกรอบสี่เหลี่ยมบนแผ่น secondary ที่มีความยาว 1 m. และกว้าง  $\Delta x$  ซึ่งจะมีค่า  $(\partial e_2 / \partial x) \Delta x$ .

ซึ่ง emf นี้จะมีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วนคือ transformer voltage ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์แม่เหล็กต่อเวลาโดยจะมีค่า  $(\partial b / \partial t) \Delta x$  และอีกส่วนหนึ่งคือ speed voltage ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างตัวนำกับสนามแม่เหล็ก โดยจะมีค่า  $v(\partial b / \partial x) \Delta x$ ,

โดย  $v$  เป็นความเร็วของ secondary ดังนั้นเราจะได้ line integral emf ดังนี้

$$\frac{\partial e_2}{\partial x} = \frac{\partial b}{\partial t} + v \frac{\partial b}{\partial x} \quad 7$$

ในการพิจารณาแบบ one dimension model นั้น จะให้ flux density ( $b$ ) มีทิศทางในแกน Y เท่านั้น โดยไม่มีองค์ประกอบในแกน X เลย ซึ่งหมายความว่าแผ่น secondary ไม่มี leakage inductance ดังนั้น secondary emf ( $e_2$ ) จะสูญเสียไปในรูปของความต้านทานเท่านั้น ดังนั้นเราจะได้

$$e_2 = I_2 P_s \quad 8$$

ในที่นี้  $P_s$  คือ surface resistivity ของแผ่น secondary ซึ่งมีค่า

$$P_s = \frac{\rho}{g_c} \quad 9$$

โดย

$\rho$  : volume resistivity

$g_c$  : ความหนาของแผ่น secondary

จากสมการที่ 6,7,8 เมื่อนำมาแก้สมการรวมกัน จะได้

$$\frac{g}{\mu_0} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \frac{v}{P_s} \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{1}{P_s} \frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\partial j_1}{\partial x} \quad 10$$

เราจะมาหาคำตอบของสมการ 10 นี้ โดยถ้าหากเราป้อนกระแสให้ primary ด้วยกระแสที่เป็นไปตามสมการที่ 11

$$\begin{aligned} j_1 &= J_1 \exp \left\{ j \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) \right\} \\ &= J_1 \exp \left\{ j \frac{\pi}{\tau} (vst - x) \right\} \quad (\text{A/m}). \end{aligned} \quad 11$$

ซึ่งสมการนี้จะเหมือนกับสมการที่ 3 และในที่นี้

$\tau$  : pole pitch ของ primary winding

$\omega$  : angular frequency ของแหล่งจ่ายไฟ

$v$  : ความเร็ว synchronous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำตอบขณะ steady state จะได้สมการของคลื่นเคลื่อนที่ไปแบบ sinusoidal ที่ความเร็ว synchronous ตามรูปแบบดังนี้

$$b_s = B_s \exp\left\{j\left(\frac{\pi}{\tau} v_s t - \frac{\pi}{\tau} x + \delta_s\right)\right\}.$$

12

เมื่อนำสมการที่ 12 มาหา first order และ second order partial derivative เทียบกับ  $x$  และ first order partial derivative เทียบกับ  $t$  ส่วนสมการที่ 11 นำมาหา first order partial derivative เทียบกับ  $x$  แล้วแทนลงในสมการที่ 10 จะได้

$$B_s = \frac{J_1}{\sqrt{\left(\frac{\pi g}{\tau \mu_0}\right)^2 + \left[\frac{1}{\rho_s}(v_s - v)\right]^2}},$$

$$\delta_s = \tan^{-1} \frac{\pi \rho_s g}{\mu_0 \tau (v_s - v)}.$$

13

จากการที่ทำให้ด้านซ้ายของสมการเท่ากับศูนย์ เราจะได้สมการ homogeneous ซึ่งเราจะหาคำตอบของสมการในรูปทั่วไปออกมา

$$\frac{g}{\mu_0} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \frac{v}{\rho_s} \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial b}{\partial t} = 0.$$

14

สมมติให้คำตอบของสมการที่ 14 อยู่ในรูปของ separated variable ดังนี้

$$b(x, t) = X(x)T(t).$$

15

แทนสมการที่ 15 ลงในสมการที่ 14 และต้องมีค่าตัวแปรช่วย (arbitrary constant)  $\lambda$  สำหรับ separated variable  $t$  และ  $x$  เราจะได้

$$\frac{1}{T(t)} \frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{X(x)} \left[ \frac{\rho_s g}{\mu_0} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} - v \frac{dX(x)}{dx} \right] \\ \equiv \lambda.$$

16

แยกคิดระหว่าง  $X(x)$  กับ  $T(t)$  โดยแยกส่วน  $T(t)$  ออกมาพิจารณาจะได้อ

$$\frac{dT(t)}{dt} = \lambda T(t),$$

17

ซึ่งคำตอบของสมการ first order differential ออกมาคือ

$$T(t) = C e^{\lambda t},$$

18

โดย  $C$  เป็น constant

และเมื่อแยกส่วน  $X(x)$  ออกมาจากรูปสมการที่ 16 จะได้

$$\frac{dX(x)}{dx^2} - \frac{\mu_0 v}{\rho_s g} \frac{dX(x)}{dx} - \frac{\mu_0 \lambda}{\rho_s g} X(x) = 0.$$

19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับเชิง  $\rho_s g$  พหุคูณกรศ  $\rho_s g$  เท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้  $X(x)$  มีคำตอบอยู่ในรูป  $e^{kx}$  แล้วแทนลงในสมการที่ 19 จะได้

$$k^2 - \frac{\mu_0 v}{\rho s g} k - \frac{\mu_0 \lambda}{\rho s g} = 0, \tag{20}$$

และจากสมการที่ 20 หากเราของสมการจะได้รากทั้งสองออกมาคือ

$$k_1, k_2 = \frac{\mu_0 v}{2\rho s g} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\mu_0 v}{\rho s g}\right)^2 + \frac{4\mu_0 \lambda}{\rho s g}} \tag{21}$$

แต่ในการพิจารณาเราจะสนใจที่สภาวะ steady state ดังนั้นค่าทุกอย่างจึงต้องอยู่ในสภาวะ steady state ค่า  $\lambda$  ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้ง complex, real หรือ imaginary จึงต้องอยู่ pure imaginary เท่านั้นโดยไม่มีส่วน real และเนื่องจากเรามีแหล่งจ่ายให้แก่ primary พียงอันเดียวซึ่งมี angular frequency เป็น  $\omega$  ดังนั้น  $\lambda$  จึงอยู่ในรูปของ  $\lambda = j\omega$  เท่านั้นเมื่อแทนลงในสมการที่ 21 จะได้

$$k_1, k_2 = \frac{\mu_0 v}{2\rho s g} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\mu_0 v}{\rho s g}\right)^2 + 4j \frac{\omega \mu_0}{\rho s g}} \tag{22}$$

ดังนั้นสมการที่ 15 จะสามารถเขียนใหม่ได้ในรูปนี้คือ

$$b(x,t) = \exp(j\omega t) \{B_1 \exp(k_1 x) + B_2 \exp(k_2 x)\} \tag{23}$$

ซึ่งสมการที่ 23 จะเป็นเพียงคำตอบของสมการ homogeneous เท่านั้นแต่คำตอบของสมการที่ 10 ในรูปทั่วไปจะได้มาจากการรวมกันของ  $B_s$  ในสมการที่ 12 และสมการ  $b(x,t)$  ในสมการที่ 23 เข้าด้วยกันจะทำให้ได้

$$b(x,t) = B \exp\left(j\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right)\right) \exp(j\omega t) \{B_1 \exp(k_1 x) + B_2 \exp(k_2 x)\} \tag{24}$$

หากเราจัดให้

$$\sqrt{\left(\frac{\mu_0 v}{\rho s g}\right)^2 + 4j \frac{\omega \mu_0}{\rho s g}} = X + jY,$$

ดังนั้นเราจะได้

$$k_1 = \frac{\mu_0 v - \rho s g X}{2\rho s g} - j \frac{Y}{2} = -\frac{1}{\alpha_1} - j \frac{\pi}{\tau_e}, \tag{25}$$

$$k_2 = \frac{\mu_0 v + \rho s g X}{2\rho s g} + j \frac{Y}{2} = \frac{1}{\alpha_2} + j \frac{\pi}{\tau_e}, \tag{26}$$

ซึ่ง

$$\alpha_1 = \frac{2\rho s g}{\rho s g X - \mu_0 v}, \tag{27}$$

$$\alpha_2 = \frac{2\rho s g}{\rho s g X + \mu_0 v}, \tag{28}$$

$$\tau_e = \frac{2\pi}{Y}. \tag{29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเราแทนสมการที่ 25 ถึง 29 ลงไปในสมการที่ 24 เราจะได้คำตอบของสมการสนามแม่เหล็กของ single side linear induction motor ขณะ steady state ดังนี้

$$b = B_s \exp(j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)) + B_1 \exp(-\frac{x}{\alpha_1}) \exp(j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)) + B_2 \exp(\frac{x}{\alpha_2}) \exp(j(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x)).$$

30

ทั้ง 3 เทอมของสมการนี้ จะ steady เมื่อเทียบกับเวลา (t) ในส่วนแรกเป็นส่วนของ normal travelling wave โดยอยู่ในสมการ 12 โดย ในส่วนที่สองนี้จะเป็น travelling wave ที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางแกน X+ และจะทำให้คลื่นลดลงทางด้านเข้า สำหรับส่วนที่สามนั้น จะเป็น travelling wave ที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางแกน X- ซึ่งจะทำให้คลื่นเพิ่มขึ้นทางด้านออก ซึ่งคลื่นของ  $B_1$  นั้น จะเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของ primary core ทางด้านเข้า (entry end) ส่วนคลื่น  $B_2$  นั้นเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของ primary ทางด้านออก (exit end) ซึ่งทั้งคลื่น  $B_1$  และ  $B_2$  นี้ เรียกว่า end effect wave โดยที่ end effect wave นั้น จะมี angular frequency เป็น

$\omega$  เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟ และมีความยาวครึ่งลูกคลื่นเป็น  $\tau_e$  ซึ่งต่างจากความยาวครึ่งลูกคลื่นของขดลวด primary ที่มีค่าเท่ากับ  $\tau$  ดังนั้น ความเร็วของ end effect wave จะมีค่าเท่ากับ

$$v_e = \frac{\omega \tau_e}{\pi} = v_s \frac{\tau_e}{\tau} = 2f\tau_e.$$

31

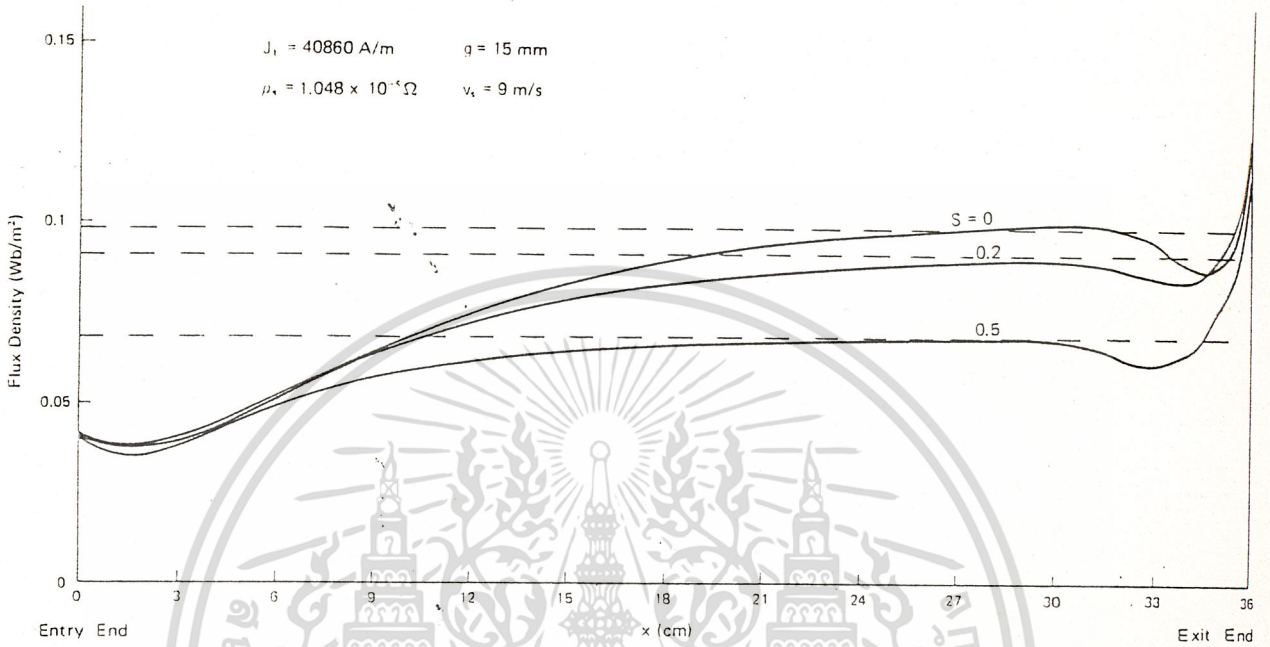
ในสมการที่ 30 เราจะหาค่าคงที่  $B_s, B_1, B_2$  ออกมาโดยที่ ส่วน  $B_1$  และ  $B_2$  นั้น จะหาได้จาก boundary condition ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

ในสมการที่ 30 เทอมของ  $B_s$  นั้นเป็นคลื่นปกติที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางของแกน X+ ส่วนเทอม  $B_1$  เป็นคลื่น end effect ที่เคลื่อนที่ไปทางแกน X+ โดยเกิดที่ด้านเข้า (entry end) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า entry end effect wave ส่วนเทอม  $B_2$  นั้นเป็นคลื่น end effect wave ที่เคลื่อนที่ไปในแกน X- โดยเกิดที่ด้านออก ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า exit end effect wave

entry end effect wave จะเบาบางลงเมื่อเคลื่อนที่ไปในทิศทางแกน X+ โดยที่ระยะทางที่ entry end effect wave เคลื่อนที่เข้าไปแทนด้วย  $\alpha_1$  ส่วน exit end effect wave นั้นจะเบาบางลงเมื่อเคลื่อนที่ไปในทิศทางของแกน X- โดยที่ระยะทางที่ exit end effect wave ที่เคลื่อนที่เข้าไปแทนด้วย  $\alpha_2$  และจากสมการที่ 27 และ 28 จะเห็นว่า  $\alpha_1 \gg \alpha_2$  ซึ่งหมายความว่า entry end effect wave จะเคลื่อนที่เข้าไปใน air gap ได้มากกว่า exit end effect wave โดย entry end effect wave อาจเข้าไปได้ตลอดทั้งความยาวของ primary core เลยก็ได้ ซึ่งคลื่น  $B_1$  นี้จะมีผลอย่างมากต่อสนามแม่เหล็กภายใน air gap และสภาวะการทำงานของ motor ในทางกลับกันคลื่น  $B_2$  จะพบบริเวณทางด้านออก เท่านั้นและไม่ค่อยมีผลมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะของ end effect ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กโดยทางด้านเข้ามีขนาดสนามแม่เหล็กลดลงแต่ทางด้านออกมีขนาดสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นดังรูป



รูปที่ 37 แสดง end effect ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก

สำหรับ boundary condition จะสามารถหาได้ดังนี้ โดยมีข้อกำหนดเบื้องต้นคือให้ magnetic flux ไม่ออกจากแกนเหล็กผ่านทางด้านหลังและทางด้านขอบ อีกทั้งทางด้านเข้าและออกไม่มี fringing field ซึ่งจะส่งผลให้ flux เข้าและออกจากแกนเหล็กอยู่ภายในช่องของ air gap เท่านั้นดังนั้นเราจะได้

$$\int_0^L b dx = 0$$

32

โดย L คือ ความยาวของ primary core

ซึ่งสมการที่ 32 นี้เป็นเงื่อนไขหนึ่งในหลายๆกรณีซึ่งกรณีอื่นๆเราจะหาต่อไป

จากสมการที่ 7 และ 8 หากเราแทนสมการ 8 ลงใน 7 จะได้สมการนี้ออกมา

$$\mu_s \frac{\partial j_z}{\partial x} = \frac{\partial b}{\partial t} + v \frac{\partial b}{\partial x}$$

33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านเข้าของ air gap จะมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กโดยที่การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (b) ต่อเวลาเป็นอย่างมากโดยเฉพาะใน high speed หรือเขียนได้ในรูป  $|\frac{\partial b}{\partial t}| \gg |\frac{\partial b}{\partial x}|$

ดังนั้น

$$\left| v \frac{\partial b}{\partial x} \right| \gg \left| \frac{\partial b}{\partial t} \right|$$

34

จึงส่งผลให้สมการที่ 33 นั้นตัดเทอมของ-ออกไปจากการพิจารณาได้ จึงได้

$$\rho_s \frac{\partial j_2}{\partial x} = v \frac{\partial b}{\partial x}$$

35

และถ้าหากไม่มี fringing flux จะทำให้กล่าวได้ว่า  $j_2=0$  และ  $b=0$  ที่ระยะ  $x<0$  จึงทำให้สมการที่ 35 เมื่อพิจารณาที่ระยะ  $x=0$  เป็นดังนี้

$$b \Big|_{x=0} = \frac{\rho_s}{v} j_2 \Big|_{x=0}$$

36

เนื่องจากผลของ end effect ทำให้สนามแม่เหล็กอ่อนลงทางด้านเข้า ดังนั้นกระแส magnetize จะถูกหักล้างหมดไปจึงทำให้ที่ระยะ  $x=0+$  นั้นจะมีค่ากระแส  $j_1+j_2=0$  หรือ  $j_1=-j_2$  ที่ระยะ  $x=0+$  และสมการที่ 36 จึงกลายเป็น

$$b \Big|_{x=0} = -\frac{\rho_s}{v} j_1 \Big|_{x=0}$$

37

ซึ่งสมการที่ 37 นี้เป็นเงื่อนไขหนึ่งเหมือนกัน จากสมการที่ 6 เราจัดรูปของสมการใหม่ได้ดังนี้

$$j_2 = \frac{\sigma}{\mu_0} \frac{\partial b}{\partial x} - j_1$$

38

ทางด้านเข้า(entry end) เทอม  $B_2$  จะมีผลเพียงในช่วง exit end เท่านั้นจากสมการที่ 30 ทำการหา partial derivative เทียบกับ  $x$  จะได้

$$\frac{\partial b}{\partial x} \Big|_{x=0} = - \left[ j \frac{\pi}{\tau} B_s \exp(j\delta_s) + \left( \frac{1}{\alpha} + j \frac{\pi}{\tau} \right) B_1 \exp(j\delta_1) \right] \exp(j\omega t)$$

39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 36,38,39 เราย้ายเอาสมการที่ 38 แทนลงไปนสมการที่ 36 แล้วจัดใหม่ให้อยู่ในรูปของ-แล้วไปเทียบสมการที่ 39 เราจะได้

$$B_1 \exp(j\delta_1) = \frac{-\frac{\rho_s}{v} \left[ j_1 + j \frac{\gamma}{\mu_0} \frac{\pi}{\tau_2} B_s \exp(j\delta_s) \right] - B_s \exp(j\delta_s)}{1 + \frac{\rho_s}{v} \frac{\gamma}{\mu_0} \left( \frac{1}{\alpha_1} + j \frac{\pi}{\tau_2} \right)} \quad 40$$

$B_1 \exp(j\delta_1)$  นี้ก็คือค่าของ  $B_1$  ในสมการที่ 30 นั้นเอง

สำหรับทางด้านออกนั้น คล้ายกับสมการที่ 36 เราจะได้  $b=0$  ที่ระยะ  $x>L$  ดังนั้น

$$b \Big|_{x=L} = \frac{\rho_s}{v} j_2 \Big|_{x=L} \quad 41$$

จากสมการที่ 30 จะได้

$$b \Big|_{x=L} = \left[ B_s \exp(j\delta_s) + B_1 \exp\left(-\frac{L}{\alpha_1}\right) \exp\left[j\left(-\frac{\pi L}{\tau_2} + \delta_1\right)\right] + B_2 \exp(j\delta_2) \right] \exp(j\omega t) \quad 42$$

และจากสมการที่ 38,40,41 เราจะได้

$$B_2 \exp(j\delta_2) = - \frac{\left[ 1 + \frac{\rho_s \gamma}{v \mu_0} \left( \frac{1}{\alpha_1} + j \frac{\pi}{\tau_2} \right) \right]}{1 - \frac{\rho_s \gamma}{v \mu_0} \left( \frac{1}{\alpha_2} + j \frac{\pi}{\tau_2} \right)} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{L}{\alpha_1}\right) \exp\left(-j \frac{\pi L}{\tau_2}\right) \right] B_1 \exp(j\delta_1) \quad 43$$

ซึ่ง นี้ก็คือค่าของ  $B_2$  ในสมการที่ 30 นั้นเอง

จาก boundary condition ที่ได้ออกมาในสมการที่ 36 ซึ่งอยู่ในรูป

$$b = -\frac{\rho_s}{v} j_1 \quad \text{ที่ระยะ } x=0 \quad 44$$

ซึ่งหมายความว่า flux density ทางด้านเข้านั้นจะมีค่าน้อยมากโดยเฉพาะในพวก high speed จะเห็นได้ชัดว่า เมื่อ  $v$  มาก ๆ ก็จะทำให้  $b$  ยิ่งน้อยลง

สำหรับคลื่น  $B_2$  นั้นเป็นคลื่นที่สะท้อนมาจากด้านออก ซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วจนทำให้ไม่มีผลของ  $B_2$  ไปปรากฏทางด้านเข้า และจาก boundary condary ขึ้น

$$\frac{\partial b}{\partial x} = 0 \quad \text{ที่ระยะ } x=L \quad -45$$

ซึ่งหมายความว่า magnetic flux density จะมีค่ามากที่สุดทางด้านออก(exit end)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสร้าง Single Side Linear Induction Motor

ในการสร้าง SLIM วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้มีดังนี้

1. แกนเหล็กหม้อแปลงขนาด 8 cm \* 38.5 cm
2. เหล็กฉากขนาด 2" ยาว 50 cm 2 ท่อน
3. ลวดอาบนํ้ายา SWG 18
4. กระดาษฉนวน

สำหรับขั้นตอนต่างๆในการสร้างและออกแบบสามารถอธิบายได้ตามลำดับดังนี้

### 1. เริ่มจากการพิจารณาที่ synchronous speed ที่ต้องการ

จากการที่เราทราบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง synchronous speed กับ pole pitch ว่าจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$V_s = 2fp$$

โดย  $V_s$  : synchronous speed (m/s)

$f$  : ความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ (Hz)

$p$  : Pole pitch (m)

ในการสร้างให้ความเร็วอยู่ในช่วง 0-10 m/s เลือก synchronous speed ที่ 7.4 m/s ดังนั้นถ้าใช้ไฟที่มีความถี่ 50 Hz จะได้ระยะ pole pitch ( $p$ ) ดังนี้

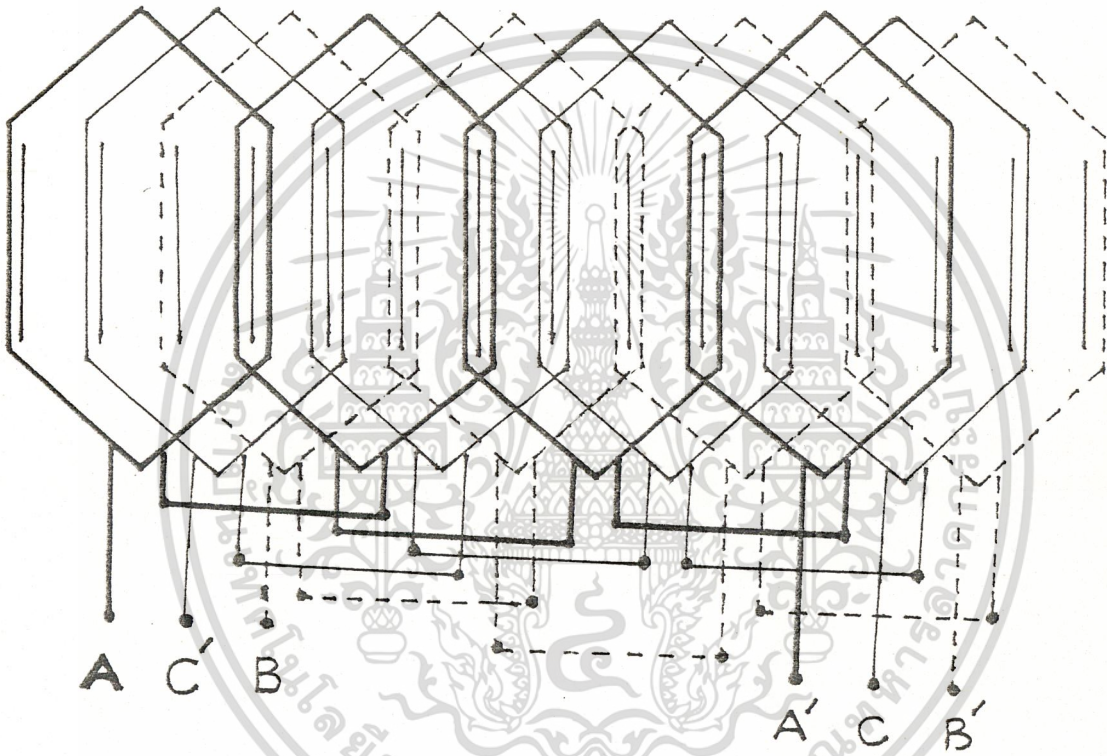
$$p = \frac{7.4}{2 \cdot 50} = 7.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

จากระยะ pole pitch จะนำไปเป็นข้อมูลประกอบกับลักษณะการพันเพื่อใช้ในการออกแบบ primary core (stator) ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. พิจารณารูปแบบการพันขดลวดบน primary core

เนื่องจาก SLIM มาจากการตัด rotary machine แล้วคลี่ออก ดังนั้นในการออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามหลักการของ induction เบื้องต้น จึงพันเป็น 3 phase แบบ double layer โดยมีจำนวน pole เป็น 4 pole และมีค่า slot/pole/phase เป็น 1 ซึ่งจะทำให้มีจำนวน slot = 15 slot โดยแสดงลักษณะการพัน (winding) และการเชื่อมต่อระหว่างขดลวดได้ดังรูป



รูปที่ 38 แสดง Primary winding ของ SLIM

จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการพันของ SLIM จะเหมือนกับ rotary machine ทุกประการ แต่จะต่างกันตรงส่วนของ 3 slot แรกและ 3 slot สุดท้ายซึ่งจะมีขดลวดเพียง 1 layer เท่านั้นหรือเรียกว่า half filled end slot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. พิจารณาแกนเหล็กที่จะมาทำเป็น primary core

ในส่วนของ primary core จะเป็นส่วนที่พันขดลวด primary ลงไป เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ ซึ่งแกนเหล็กที่นำมาพิจารณาได้แก่ แกนเหล็ก E-I ขนาดขากกลาง 2" และแกนเหล็กหม้อแปลงขนาด 38.5 cm \* 8 cm โดยได้พิจารณาเลือกแกนเหล็กหม้อแปลงขนาด 38.5 cm \* 8 cm มาใช้เนื่องจากไม่มีปัญหาในเรื่องการอิมิตัวของแกนเหล็ก ซึ่งหากใช้แกนเหล็ก E-I จะมีการอิมิตัวได้ง่ายอีกทั้งยังนำมาประกอบกันได้ยาก จึงนำแกนเหล็กหม้อแปลงมาใช้โดยเรียงให้มีความหนา 7 cm จากนั้นนำไปเจาะให้มีร่อง slot ตามขนาดที่ต้องการซึ่งจะนำข้อมูลจากข้อ 1,2 มาช่วยพิจารณา โดยเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมารวมด้วยกัน จะได้ข้อมูลดังนี้

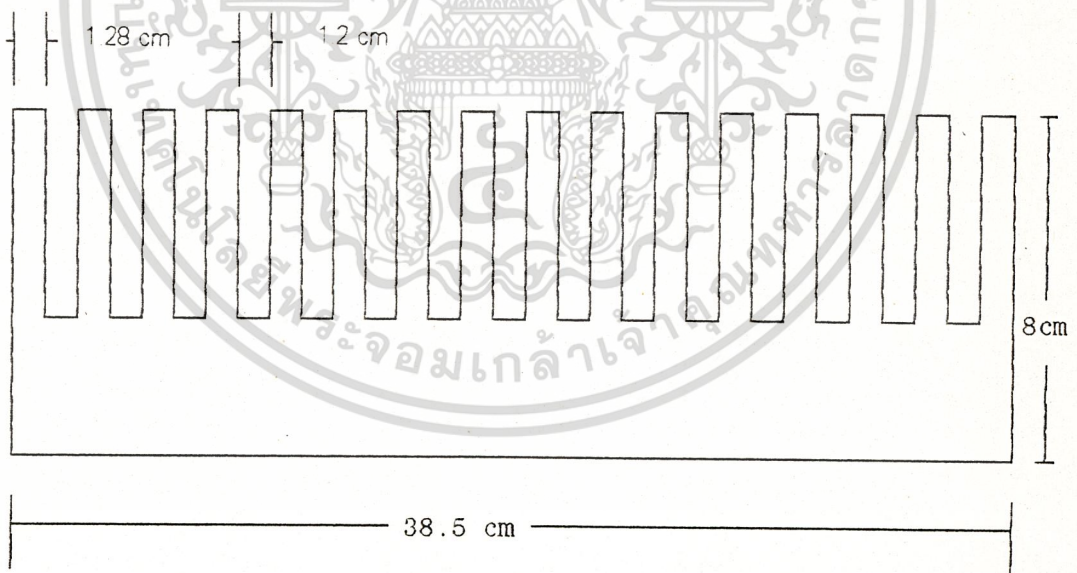
ความกว้างของ teeth = 1.28 cm

ความกว้างของร่อง slot = 1.2 cm

ความลึกของร่อง slot = 5 cm

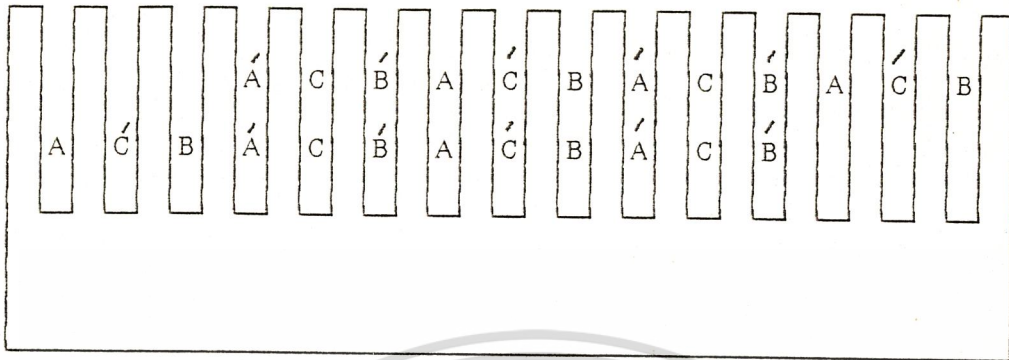
ระยะ pole pitch = 7.4 cm

ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของ primary core ได้ดังรูปที่ 5 สำหรับการเจาะแกนเหล็กทำเป็น primary core นั้นใช้เครื่อง MILLING ทำเป็นร่อง slot



รูปที่ 39 แสดงลักษณะของ Primary core

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 40 แสดงการลงขดลวดบน Primary core

#### 4. การคำนวณหาพิกัดการใ้งานของ Single Side Linear Induction motor

จากหลักการทำงานเบื้องต้นของ induction machine เมื่อมีการเคลื่อนที่ของตัวนำตัดกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิด generated voltage ขึ้นซึ่ง generated voltage per phase มีสมการดังนี้

$$E_{ph} = 4.44fN_{ph}BA$$

โดย  $E_{ph}$  : generated voltage per phase (volt)

$N_{ph}$  : จำนวนรอบของขดลวดใน 1 phase (turn)

$f$  : ความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 50 Hz

$B$  : ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ (air gap flux density)

สำหรับค่า  $B$  นั้น เนื่องจากเราได้ค้น ขึ้นมาสองครั้งโดยนำข้อมูลของความเข้มสนามแม่เหล็กจากตัวแรกมาเป็นข้อมูลในการค้นครั้งต่อไป โดยค่า  $B$

มีค่า 0.285 tesla ที่ระยะช่องอากาศเท่ากับ 2 mm

$A$  : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กในช่วง 1 pole pitch

$$\text{ในที่นี้ } A = 7 \cdot 10^{-2} \cdot 7.4 \cdot 10^{-2} = 5.18 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{ph} = 4.44 * 50 * N_{ph} * 0.285 * 5.18 * 10^{-3}$$

$$E_{ph} = 0.327 N_{ph}$$

1

พิจารณา MMF ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กในช่องอากาศในแต่ละ pole

เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในช่องอากาศมาจาก 3 phase ซึ่งจากหลักการของ induction machine ผลรวมของ MMF จะเป็น 3 เท่าของ MMF ในแต่ละ phase ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

2

$$3 N_c I_m = \frac{B * g}{\mu}$$

$$2 \mu$$

โดย  $N_c$  : จำนวนรอบของขดลวดใน 1 pole (turn)

ซึ่ง  $N_c * \text{pole number} = N_{ph}$

$I_m$  : magnetizing current (A)

$B$  : air gap magnetic flux (Tesla)

ในที่นี้ให้  $B = 0.285$  Tesla ที่  $gap = 2$  mm

$g$  : ระยะห่างช่องอากาศ ในที่นี้เท่ากับ 2 mm

ดังนั้น

$$3 N_c I_m = \frac{0.285 * 0.002}{4\pi * 10^{-7}}$$

$$2$$

$$N_c I_m = 302.3$$

2

สำหรับลวดที่จะมาพันให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้นใช้ลวดอบน้ำยา SWG 18 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด = 1.18 mm<sup>2</sup> โดยสามารถรับกระแสได้ 5-6.5 A

จากรูปที่ 40 พื้นที่ช่องว่างในแต่ละ slot = 1.2 \* 5 = 6 cm<sup>2</sup> = 600 mm<sup>2</sup> ให้พื้นที่ของตัวนำใน slot คิดเป็น 50% ของที่ว่างทั้งหมดซึ่งเท่ากับ 600 \* 0.5 จะได้เท่ากับ 300 mm<sup>2</sup> ซึ่ง 300 mm<sup>2</sup> จะมีตัวนำได้เท่ากับ 300 / 1.18 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 254 ตัวนำ แต่ในการพันเป็น 2 layer ดังนั้นใน 1 layer จะมีจำนวนตัวนำ = 254 / 2 = 127 ตัวนำ ซึ่งก็คือ  $N_c$  นั่นเอง แต่ในการพันจริง ๆ เพื่อตัดปัญหาในการนำขดลวดลงสลิต จึงใช้เพียง 100 รอบ ดังนั้น  $N_c = 100$  รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 1 หากแทน  $N_c = 100$  ลงไปจะได้

$$E_{ph} = 0.327 * 4 * 100 = 130.8 \text{ V}$$

แต่ในการใช้งานจริงจะใช้ที่ 130 V

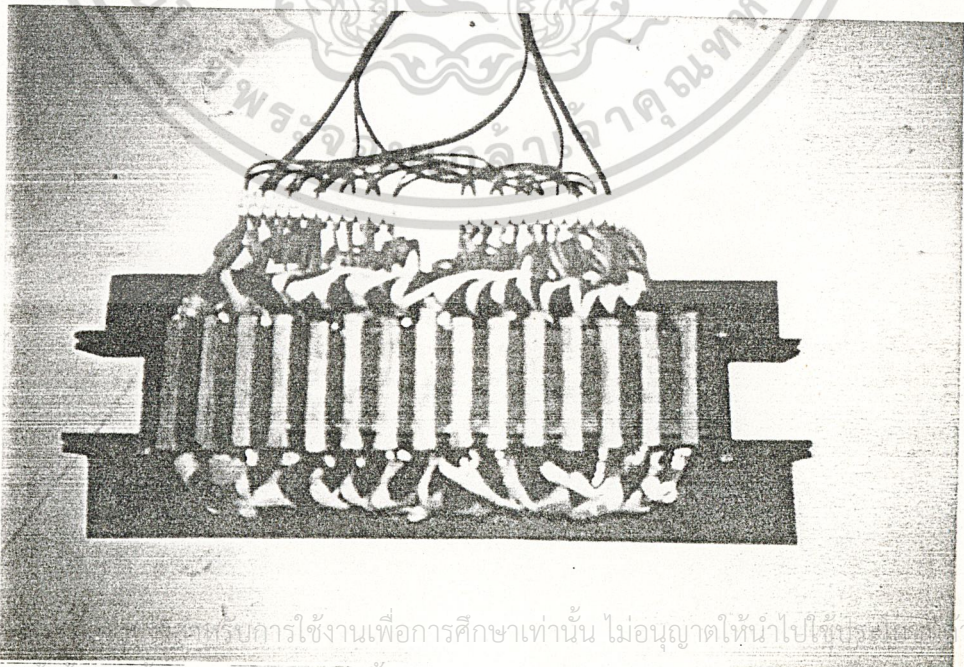
และจากสมการที่ 2 ได้

$$I_m = 302.3/100 = 3.02 \text{ A}$$

จึงทำให้ SLIM มีพิกัดทำงานคือ 3 phase ,130 V, 6.5 A

### 5. การนำขดลวดลง primary core

สำหรับการพันขดลวดที่ primary core นั้นเริ่มจากการทำ coil form ซึ่งเป็นแบบสำหรับใช้ในการพันขดลวด นำลวดไปพันบน coil form ที่เตรียมไว้ให้ได้จำนวนรอบเท่ากับที่ออกแบบไว้จากนั้นถอดลวดที่พันออกเรียบร้อยแล้วออกจาก coil form นำมาพันที่ primary core ที่เจาะเป็นร่อง slot ไว้เรียบร้อยแล้ว ก่อนนำขดลวดลงไปใน primary core ต้องมีการรองกระดาษฉนวนเพื่อป้องกันการเสียหายของฉนวนที่เคลือบขดลวด และเมื่อนำขดลวดใส่ลงใน slot หมดแล้วควรตรวจสอบว่ามีการลัดวงจรกันระหว่าง primary core กับขดลวดด้วยหรือไม่ เพื่อป้องกันการรั่วของกระแสสู่ primary core เมื่อพันขดลวดเสร็จทุก slot ก็ต่อขดลวดเข้าด้วยกัน โดยดูตำแหน่งของต้น coil และปลาย coil ให้ถูกต้องด้วย และควรตรวจสอบว่าส่วนไหนมีการ open circuit หรือไม่ โดยทำการใช้ VOM ตรวจสอบความต้านทานในแต่ละเฟส ทดสอบเฟสโดยขาดโดยตรวจสอบเช็คระหว่างจุดต่อของขดลวดแต่ละขดเพื่อหาขดที่ต้องซ่อมและตรวจสอบว่ามีส่วนไหนลัดวงจรหรือไม่ โดยพิจารณาแต่ละ phase แล้วป้อน volt คงที่ค่าหนึ่ง ดูกระแส หากขดลวดชุดไหนมีการลัดวงจรจะมีกระแสสูงผิดปกติ จากนั้นจึงนำ primary core ที่พันขดลวดเรียบร้อยแล้วไปอบวานิชเพื่อเพิ่มความคงทนของฉนวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ต้นแบบเครื่องทดสอบ Linear Induction Motor

จุดประสงค์การสร้างเครื่องต้นแบบ

1. ต้องการทดสอบสภาวะ Noload Test
2. ต้องการทดสอบสภาวะ Block Rotor Test
3. ต้องการทดสอบ LIM ขณะมี Load ที่สภาวะต่างๆกัน และสามารถหาค่า Input Power ได้
4. สามารถวัดค่า กระแส, แรงดัน, Power Factor, Torque ของ LIM ได้
5. สามารถวัด Torque ขณะหยุดนิ่งของ LIM ที่แรงดันต่างๆกันได้
6. สามารถวัดความเร็วของ LIM ขณะมี Load และทำการหาค่า Slip ได้

จากความต้องการเบื้องต้น สามารถออกแบบเครื่องทดสอบ LIM ได้ โดยต้นแบบแรกจะเป็นการประยุกต์จากอุปกรณ์ทดลองที่ไม่ใช้แล้วมาทำการดัดแปลง และแบบที่สอง เป็นแบบที่พัฒนามาจากต้นแบบแรก โดยนำข้อบกพร่องของเครื่องแรกมาทำการแก้ไข

เครื่องทดสอบที่ 1. ทำให้เราสรุปข้อผิดพลาดที่ต้องแก้ไขดังนี้

1. แรงเสียดทานที่เกิดจากการหมุนมีค่ามากเกินไปทำให้ไม่สามารถทดสอบที่พิกัดได้
2. ลักษณะของร่องลื่นไม่สามารถวิ่งรอบสูงๆได้
3. ไม่สามารถหา Out put power ของ LIM เพื่อที่จะนำมาหาค่า Efficiency ได้
4. การปรับระดับความสูงหรือปรับ gap เป็นไปด้วยความลำบาก มีความถูกต้องน้อย
5. ไม่สามารถหาค่า magnetizing current ได้ เพราะเครื่องทดสอบมีแรงเสียดทานสูงมาก ทำให้เกิด

ภาระแก่ LIM อยู่ก่อนแล้ว

จากข้อเสียดังกล่าว ได้ทำการพัฒนาเครื่องต้นแบบที่ 2 ขึ้นมาและได้แก้ไขข้อเสียดังกล่าวให้หมดไป

### ต้นแบบเครื่องทดสอบที่ 2.

เครื่องทดสอบหมายเลข 2. ได้ทำการแก้ไขข้อเสียของเครื่องแรก โดยสามารถแสดงเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญๆได้ดังนี้

#### 1. ฐาน (Base)

ฐานได้ทำการเปลี่ยนจากรูปแบบเดิมโดยทำการยกให้สูงขึ้นเพื่อสามารถที่จะติดตั้ง generator ได้ เพื่อที่จะทำการวัด output power ของ generator ที่ใช้ LIM ขับ ซึ่งจะช่วยให้หาค่า Efficiency ของ LIM ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. แผ่นจานหมุน (disk)

ทำการเปลี่ยนแบบใหม่โดยใช้เหล็กหนา 1" ทำการตัดเป็นรูปวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.22 ม. ทำการเจาะรูที่จุดศูนย์กลาง เพื่อใส่เพลลาและเชื่อมเข้าด้วยกัน ส่วนจุดรองรับของแผ่นจานหมุนนั้นจะใช้ Thrust bearing สวมเข้าไปในเพลลาเพื่อรองรับน้ำหนักที่ตกลงบนฐาน ส่วนการรับแรงที่เกิดจากแรงเหวี่ยงเนื่องจากการหมุนจะใช้ bearing 2 ตัวสวมเข้าไปในเพลลาโดย bearing ทั้ง 2 ตัวจะวางอยู่ในท่อเหล็กทรงกระบอกที่ได้รับการกลึงให้เส้นผ่าศูนย์กลางภายในพอดีที่จะสวม bearing ลงไปได้

## 3. การปรับระดับ

การปรับระดับสูงต่ำสามารถทำได้โดยการหมุนพวงมาลัยเพื่อทำการหมุนเพลลาที่เป็นเกลียวซึ่งจะทำให้แขนจับยึด LIM สามารถเลื่อนขึ้นลงสูงต่ำตามต้องการได้ทำการติดตั้งเสาเหล็กไว้ด้านหลังเพลลาเกลียวแล้วใช้บูสท์ทองเหลืองสวม และเชื่อมแขนเข้ากับเพลลาเกลียวและบูสท์เพื่อทำการยึดแขนให้อยู่กับที่ไมแกงไปมา

## 4. การต่อ Generater

การหมุนของแผ่นจานหมุนเป็นการหมุนในแนวนอน จะทำการเปลี่ยนแนวการหมุนไปสู่การหมุนในแนวระดับ โดยการใช้ออกจอกที่มีอัตราทด 1:1 หลังจากนั้นทำการทดรอบให้มีความเร็วรอบที่สูงขึ้นโดยการใช้ pulley สายพานร่องเดี่ยว B ทำการทดรอบถึงสองครั้งเพื่อที่จะให้ความเร็วที่เพลลาที่จะไปขับ generater มีความเร็วรอบเข้าใกล้ 1500 rpm

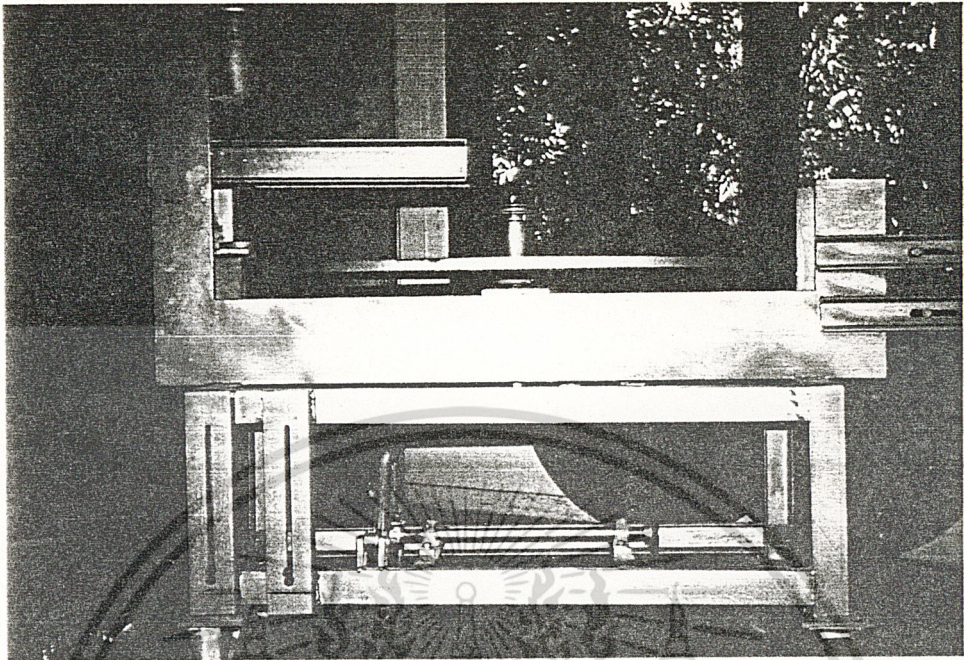
## 5. สิ่งเพิ่มเติมจากแบบที่ 1

1. ทำการติดตั้ง generater และทำการ coupling เข้ากับเพลลาที่ใช้ LIM ขับ ทำให้สามารถจ่ายโหลดและทำการวัดค่า power output เพื่อที่จะคำนวณหา Efficiency ได้

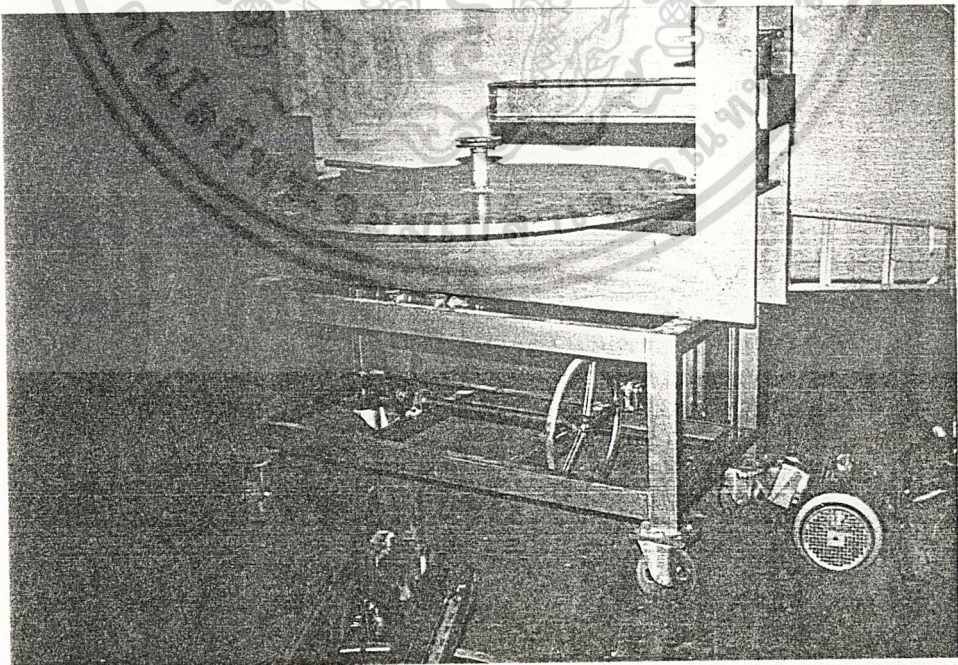
2. motor ทำการติดตั้งและ coupling เข้ากับเพลลาของแผ่นจานหมุนโดยตรง ทำให้สามารถใช้มอเตอร์ขับแผ่นจานหมุนให้มีความเร็ว synchronous speed ได้ แล้วทำการจ่ายไฟเข้า LIM ที่พิกัดแรงดัน ทำให้สามารถหาค่า  $I_{magnetizing\ current}$  ได้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเมื่อนำมาประกอบเป็นรูปร่างจะได้เครื่องทดสอบเป็นดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 42 แสดงต้นแบบเครื่องทดสอบ LIM

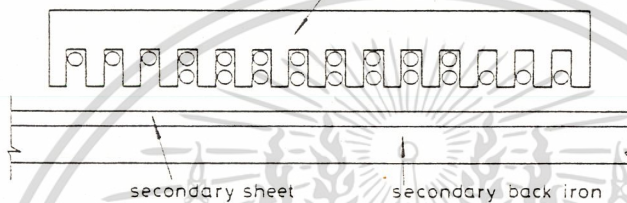


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

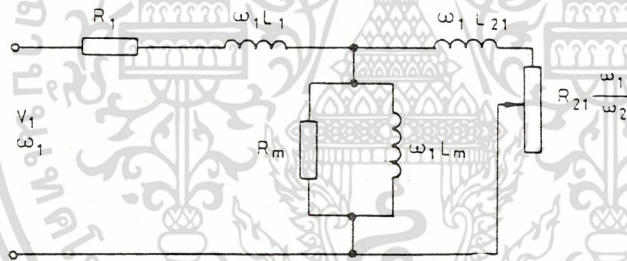
Equivalent circuit model of LIM

ในการหา Equivalent cct. ของ LIM จะมีความแตกต่างจาก RIM เนื่องจากผลของรูปทรง ซึ่ง RIM เป็นทรงกระบอกกลม แต่ LIM เป็นแผ่นแบนราบซึ่งมีผลของ End-effect และเกิดความไม่สมมาตรของสนามแม่เหล็ก (Asymmetrical magnetic) ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องสร้าง Equivalent cct. ขึ้นมาใหม่โดยอาศัย Equivalent cct. เดิมเป็นพื้นฐานโดยสามารถทำการวัดค่าต่างๆได้เช่นเดียวกับ RIM และยังสามารถวัดหาค่า Vertical force ได้ LIM ที่แสดง Primary เป็นแกนเหล็กซึ่งถูกทำให้เป็น Open slot และ Secondary เป็น Sheet conductor โดยเป็น Composite material ให้ Aluminium เป็นแผ่นที่ทำหน้าที่ให้เป็นทางเดินของกระแส โดย Back-iron เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 43 แสดง Primary core และ secondary sheet conductor



RIM Equivalent cct. ที่ปรากฏในภาพไม่สามารถนำมาใช้ได้เลย เนื่องจาก LIM มีผลของ End effect ซึ่ง Equivalent cct. ของ RIM ไม่สามารถคิดผลของ End-effect ได้



การคิดผล End-effect

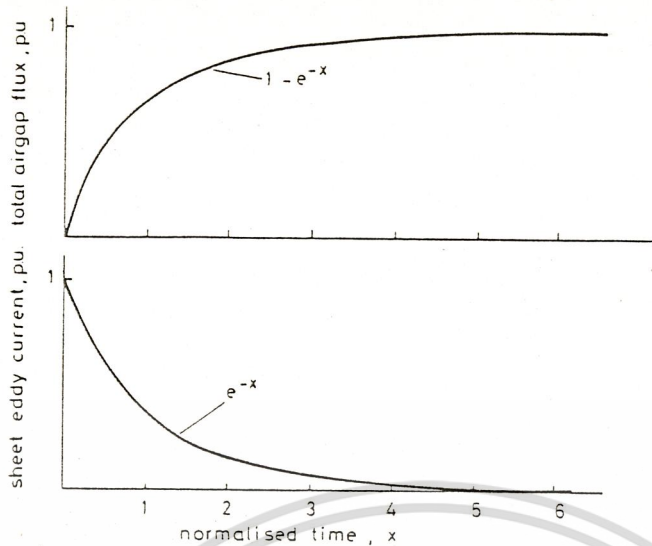
รูปที่ 44 Equivalent circuit ของ RIM

Magnetising branch inductance

พิจารณาภาพ เมื่อใช้ LIM ขับงาน Secondary จะทำให้งาน Secondary เคลื่อนตัวผ่าน Primary จะทำให้เกิดการต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น (โดยพยายามจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ละน้อย) ดังนั้น Equivalent cct. ของ LIM จึงควรที่จะสามารถคิดผลของงาน Secondary ที่เคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณ Air gap ที่ทำให้เกิด End-effect ซึ่งสามารถหาได้จาก Magnetising branch ของ Equivalent cct.

จากรูป ถ้าทำการจ่ายไฟ DC. เข้าที่ Primary จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่อยู่กับที่ ถ้านำงาน Secondary ตัดผ่านสนามแม่เหล็กทันที จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์ทันที และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สามารถแสดงได้ในภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 45 แสดง Eddy current pu และ total air gap flux

ขณะที่  $t=0$  กระแส Secondary eddy current จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งจะทำให้ Flux ที่เกิดจาก Primary ลดลงเป็นศูนย์ ค่ากระแสไหลวน (Eddy current) จะถูกควบคุมโดยค่า Time constant  $L_{21}/R_{21}$  (มีค่าน้อยมาก) ดังนั้นจึงคิดว่ากระแสไหลวน (Eddy current) ที่เวลา  $t=0$  ที่ Refer ไปทาง Primary มีค่าใกล้เคียงกับ Primary magnetising current  $I_m$  และจะลดลงเป็น Exponential ซึ่งมีค่า Time constant

$$T_2 = (L_m + L_{21})/R_{21}$$

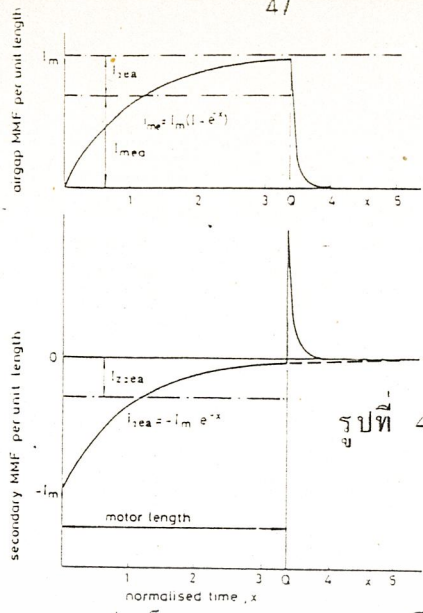
กระแส Eddy current จะไหลตรงข้ามกับ  $I_m$  แต่ใน RIM Eddy current จะทำให้เกิดกระแสในแผ่น Secondary ซึ่งจะไปทำให้เกิด Flux ซึ่งมาต้านกับ Primary flux ทำให้ Airgap flux (Total airgap flux) ลดลง โดยกระแสที่เวลานี้ Refer ไปทางด้าน Primary  $I_{2e}$  จะเห็นว่า  $I_{2e}$  จะล้าหลัง Secondary slip current  $I_{21}$  90 องศา

#### การศึกษาปรากฏการณ์ของ Secondary eddy current

เมื่อจ่ายไฟ 3 เฟส เข้าไปจะทำให้ MMF per unit length และ Flux density มีการกระจายเป็น Sinusoidal ตามความยาวของ motor และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ผลของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่) ถ้าการพันของ Primary มีจำนวน Turns per unit length มีค่าคงที่ เราสามารถนำ  $I_m$  มาแสดงผลของ MMF pu length ที่เปลี่ยนแปลง ถ้าไม่เกิดการอิ่มตัว Magnetising current สามารถหาค่า Flux density ได้

ถ้าทำการแทน Secondary sheet ด้วยชิ้นส่วนเล็กๆ ที่วางตั้งสนามแม่เหล็ก (Uniform magnetic field) ชิ้นส่วนเหล่านี้จะทำให้เกิดกระแส Eddy current สูงสุด และจะมีผลทำให้ Flux density ลดลงเป็นศูนย์ ที่ขอบด้านหน้าของ motor และในเวลาต่อมา Flux ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังได้อธิบายแล้ว และหลังจากที่ชิ้นส่วนเล็กๆ เหล่านี้ผ่านออกจากมอเตอร์ ส่วนขอบหลังของมอเตอร์จะทำให้เกิดการลดลงของ Flux อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสะท้อนของ Rail eddy current เพื่อที่จะพยายามรักษา Airgap flux ไว้ และ Exit rail eddy current จะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งมีค่า Time constant มีความสัมพันธ์กับ Leakage inductance งาน Secondary ผลของการเปลี่ยนแปลงแย่งจับพลังของ Entry and Exit end ของมอเตอร์สามารถแสดงได้ในรูป ซึ่ง plot อยู่ในพจน์ของ  $T_2$  จากที่กล่าวมาถ้าเรายอมรับผลของ  $T_2$  เราก็สามารถหา Equivalent cct. ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 46 แสดง Secondary MMF pu length and airgap MMF pu length

ระยะห่างของการกระจายของสนามแม่เหล็กตามความยาวมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ สัมพันธ์กับ secondary sheet และระยะทางที่ถูกเคลื่อนโดย Primary ในเวลา 1 วินาที ซึ่งมีค่า

$$\text{Time constant} = v \cdot T2$$

v = Primary velocity

เวลาที่ถูกใช้ในการเคลื่อนที่จนถึงจุด Transverse point

$$T_v = D/v$$

$T_v$  อยู่ในรูปของ Secondary time constant  $T2$  คือ

$$Q = T_v/T2 = D \cdot R_{21}/(Lm + L21) \cdot v$$

Q นั้นไม่มีหน่วย แต่เป็นตัวเลขที่แสดงถึงความยาวของมอเตอร์บน Normalise time scale จากพื้นฐานนี้ ความยาวของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ เช่นที่ความเร็วเท่ากับศูนย์ มอเตอร์มีความยาวเป็นอนันต์ แต่ถ้ามอเตอร์มีความเร็ว ความยาวของมอเตอร์จะลดลง จากกราฟรูปที่ 4 แสดง  $i_{me}$  โดย  $X=0$  และ  $X=Q$  ซึ่งจะแสดงการกระจายของ MMF pu length

ถ้าไม่เกิด Saturation จะทำให้เรหาค่า MMFจริง ได้สรุปได้ว่าที่ความเร็ว Primary สูงๆ จะทำให้เกิดการสูญเสียของ flux ที่บริเวณขอบด้านเข้ามาก แต่ที่ความเร็วเป็นศูนย์เราจะถือว่าไม่เกิดการสูญเสียเลย ดังนั้นผลของ End-effect จะน้อยลง จะต้องทำให้ค่า Q มีค่าสูงๆ

ค่าของ Q จะชี้แสดงถึงความสามารถในการลดการสูญเสียที่เกิดจาก End-effect แต่ผลที่ตามมาของการเพิ่มค่า Q จะทำให้ค่า R ลดลง, Magnetic reluctance (Lm) มีค่าสูง ซึ่งจะทำให้เป็นสัดส่วนผกผันกับ Goodness factor [Laithwaite] ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ LIM

$Qv$  เป็นค่าความเร็วคงที่ขึ้นอยู่กับขนาดของมอเตอร์และ Secondary material

$$Qv = D \cdot R_{21}/(Lm+L21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส Primary magnetising ซึ่งทำให้เกิดการกระจายของ MMF ตามความยาวของมอเตอร์ เช่นกัน Secondary demagnetising current เมื่อ Transfer to primary ปรากฏว่าจะเป็นเฟสตรงข้ามกับ Primary magnetising ซึ่งจะทำให้เกิด negative MMF ค่ากระแส Eddy current ของงาน Secondary  $i_{2e}$  จะมีค่าต่างๆกันบนความยาวของมอเตอร์ เมื่อกระแสสะท้อนเข้าไปใน Primary winding จะทำให้เกิดค่าเฉลี่ยของกระแสที่มีทิศทางตรงข้าม Primary magnetising current ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยได้ตามสมการ

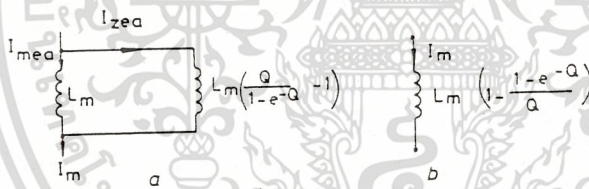
ค่าเฉลี่ยของ Eddy current pu length ( $i_{2e}$ )

$$I_{2ea} = \frac{I_m}{Q} \int_0^Q \exp(-x) dx = I_m \frac{\{1 - \exp(-Q)\}}{Q}$$

ค่าเฉลี่ยของ  $i_{me}$ , กระแสกระตุ้นประสิทธิผลต่อหน่วยความยาว

$$I_{mea} = I_m - I_{2ea} = I_m \left\{ 1 - \frac{1 - \exp(-Q)}{Q} \right\}$$

ปรากฏการณ์ Demagnetising เนื่องมาจาก Secondary eddy current ( $i_{2e}$ ) สามารถแทนได้ด้วยค่าความเหนี่ยวนำซึ่งต่อขนานกับ  $L_m$  และดึงกระแส  $I_{2e}$  ดังแสดงในรูป



รูปที่ 47 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของ Equivalent circuit ของ LIM

Inductance ที่ต่อขนานกับ  $L_m$  จะดึงกระแสจาก  $I_m$  ไป  $I_{2ea}$  ซึ่งไม่มีส่วนไปช่วยในการกระตุ้น(Excite) ซึ่งสามารถหาค่า Inductance ได้ดังนี้

$$L_m I_{mea} / I_{2ea} = L_m \left\{ \frac{Q}{1 - \exp(-Q)} - 1 \right\}$$

Shunt Inductance =

$$L_m \left\{ 1 - \frac{1 - \exp(-Q)}{Q} \right\}$$

Magnetising Current =  $I_m = I_{mea} + I_{2ea}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ข้อสังเกต** ถ้าความเร็วเท่ากับศูนย์ ความยาวมอเตอร์เป็นอนันต์ magnetic branch inductance ( $L_m$ ) จะไม่มีผลของ End-effect ปรากฏอยู่

### Rail eddy current losses

Secondary eddy current เป็นตัวแปรอีกตัวที่ต้องพิจารณา ขณะที่ Secondary current ไหลวนในจาน Secondary ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับ Slip current ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่าง Polepitch ซึ่งค่าความต้านทานของวงจรถูกเท่ากับ  $R_{21}$  และ Ohmic loss ที่เกิดขึ้นจะถูกกำหนดโดย Eddy current ซึ่งความสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถประมาณค่าได้จากค่า RMS ของ

$I_{2er}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$I_{2er} = \left\{ \frac{I_m^2}{Q} \int_0^Q \exp(-2x) dx \right\}^{0.5}$$

$$= I_m \left\{ \frac{1 - \exp(-2Q)}{2Q} \right\}^{0.5}$$

Eddy current loss =

$$I_m^2 R_{21} \frac{1 - \exp(-2Q)}{2Q}$$

ขณะที่แผ่นจาน Secondary เคลื่อนผ่านมอเตอร์ไป จะทำให้ MMF ของจาน Secondary หายไป และจะทำให้เกิดการสร้าง MMF สะท้อนสมมูลย์ และจะมีกระแสไหลในจาน Secondary เพื่อที่จะทำให้สนามแม่เหล็กคงที่(ดังรูปที่ 4) พลังงานสนามแม่เหล็กที่จุดปลายด้านนอกของมอเตอร์จะจางหายไปในความต้านทานของจาน Secondary ความสูญเสียเหล่านี้สามารถแทนได้ด้วย อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามแม่เหล็กขณะผ่าน Airgap

พลังงานสนามแม่เหล็กใน Airgap pu length ของมอเตอร์ที่จุดปลายด้านออกมีค่าเท่ากับ

$$0.5(L_m + L_{21}) \{I_m^*(1 - \exp(-Q))\}^2 / D$$

ซึ่งกระแสกระตุ้นประสิทธิผล(Effective magnetising current)ที่ปลายด้านออกมีค่าเท่ากับ

$$I_m^*(1 - \exp(-Q))$$

กำลังงานที่สูญเสียสามารถหาได้โดยคุณนิพจน์ของพลังงานโดยอยู่ในรูปความเร็วของมอเตอร์ ( $v$ )

$$\text{Exit power loss} = 0.5(L_m + L_{21}) I_m^2 \{1 - \exp(-Q)\}^2 v / D$$

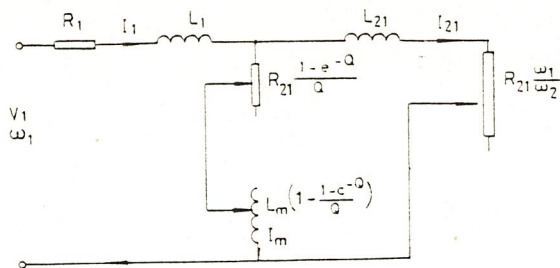
$$= I_m^2 R_{21} \frac{\{1 - \exp(-Q)\}^2}{2Q}$$

พลังงานสูญเสียรวมที่เกิดเนื่องจาก Eddy current เท่ากับ

$$= I_m^2 R_{21} \frac{\{1 - \exp(-Q)\}}{Q}$$

ในการที่จะหา Power loss ใน Equivalent cct. มีความจำเป็นต้องเพิ่มตัวต้านทานใน Magnetics branch ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสิ่งที่เพิ่มเติมเข้ามาจะทำให้การคำนวณทำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 48 Equivalent circuit ของ LIM

อย่างไรก็ตามขณะที่ความถี่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะไม่สามารถใช้ Equivalent cct. รูป ได้ซึ่งจะเป็นเงื่อนไขของ Direct current dynamic braking ใน Induction motor

แรงดึงที่เกิดจากความสูญเสียนี้ หาได้จากนำ Total loss ของมอเตอร์หารด้วย ความเร็ว(v) จากกฎของ Lenz แรงดึงนี้จะต้านการเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ

$$= \frac{3I_m^2 R_{21} \{1 - \exp(-Q)\}}{vQ}$$

**ข้อสังเกต** เมื่อมอเตอร์มีความยาวมากๆ Magnetising branch resistance จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นแรงดึงนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย(เช่นกรณีของ RIM) ที่ความเร็ว v=0 จะยังคงมีแรงดึงต้านนี้อยู่ด้วยขนาด

$$3I_m^2 \frac{(L_m + L_{21})}{D}$$

อาจเกิดการเปลี่ยนเครื่องหมายเมื่อความเร็วเพิ่มมากกว่าค่าศูนย์ การเปลี่ยนเครื่องหมายจะมีความเหมือนกับความเร็วผิดทางกล และผลของ Eddy current loss จะปรากฏอยู่ในรูป Magnetic friction

**Vertical force** เป็นแรงที่ตั้งฉากกับระนาบของ Airgap ในกรณีของ SLIM แรงตั้งฉากเหล่านี้จะมีผลอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างของ SLIM และอุปกรณ์ในการติดตั้ง แรงที่ตั้งฉากสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1 เป็นแรงที่มีผลมากที่สุด คือ เป็นแรงตั้งฉากที่เป็นแรงดึงระหว่าง Primary และ Secondary back iron ซึ่งเกิดจากการที่ Main flux เคลื่อนที่ผ่านช่อง Airgap มีสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของค่ากระแสและระยะต้นประสิทธิผล กับความเหนี่ยวนำ Lm ซึ่งผลที่ได้จะเป็นพลังงานสะสมที่อยู่ใน Airgap

ค่า RMS ของ  $i_{me}$  ตลอดความยาวมอเตอร์

$$I_{mer} = \left( \frac{I_m^2}{Q} \int_0^Q (1 - \exp(-x)) dx \right)^{0.5}$$

$$= I_m \left( 1 - \frac{(1 - \exp(-Q))(3 - \exp(-Q))}{2Q} \right)^{0.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดึงตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 
$$F_{va} = K_a L_m I_m^2 \left( 1 - \frac{(1 - \exp(-Q))(3 - \exp(-Q))}{2Q} \right)$$

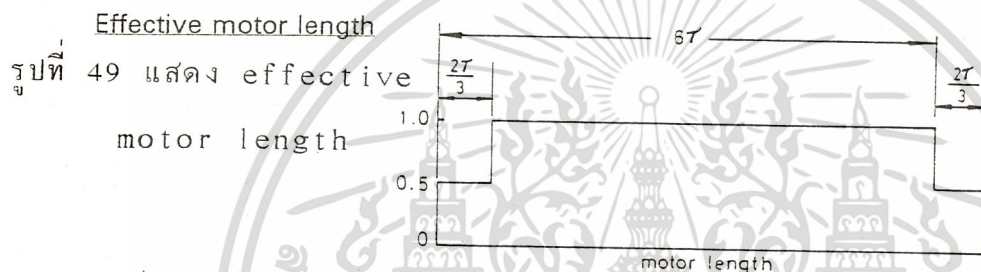
ค่าคงที่  $K_a$  ได้จากการทดสอบสภาวะหยุดนิ่งของมอเตอร์ และมีการคูณ 3 เมื่อเปลี่ยนจาก 1 เฟส เป็น 3 เฟส L

2 เป็นแรงผลักรหว่าง Secondary slip current  $I_{21}$  และกระแส Primary winding ซึ่งแรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ

$$F_{vr} = K_r \frac{I_{21}^2}{d}$$

$d$  : เป็นระยะทางกึ่งกลางระหว่าง Primary และ Secondary current layer

$K_r$ : เป็นค่าคงที่ได้จากการทดสอบสภาวะหยุดนิ่ง



จากที่กล่าวมากำหนดการฟันเป็น Full slot แต่ในความเป็นจริง ที่ปลายทั้งสองข้างของ SLIM จะมีขดลวดครึ่งหนึ่งของ Slot ซึ่งปลายทั้งสองข้างนั้นจะมีความยาว 2 ใน 3 เท่าของความยาวของ Polepitch ซึ่งทำให้ต้องคิดความยาวมอเตอร์เป็นความยาวประสิทธิผล จากรูปจะเห็นว่ามอเตอร์มี 6 Pole แต่ความยาวมอเตอร์จริงเป็น  $(6 + 2/3)$  เท่าของ Polepitch ถ้าคิดเป็น Effective length จะได้  $(6 + 1/3)$  เท่าของ Polepitch

#### Linear motor equivalent circuit

รูปแบบ Equivalent cct. ของ LIM ได้ถูกดัดแปลงนำมาใช้เป็น Equivalent cct. ของ LIM เพื่อที่จะคำนวณหาคุณสมบัติของมอเตอร์ รวมทั้ง Vertical force, แรงดึงที่เกิดจาก Slip current โดยแรงดึงเนื่องจาก Slip current

$$3I_{21}^2 R_{21} \frac{\pi}{\omega_2 \tau} N$$

แรงดึงเนื่องจาก Eddy current

$$= 3I_m^2 R_{21} \frac{(1 - \exp(-Q))}{vQ} N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดึงที่เกิดจาก Slip current จะมีค่าเป็นลบเมื่อความถี่ลื่นเปลี่ยนเครื่องหมาย คือเปลี่ยนจาก Motor เป็น Generator และแรงดึงที่เกิดจาก Eddy current loss จะเปลี่ยนเครื่องหมายเมื่อเครื่องหมายความเร็วเปลี่ยน ซึ่งจะมีผลด้านการเคลื่อนที่จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น Output power,Thrust,Speed,Power factor สามารถหาได้ตลอดย่านของ Slip frequency และไม่คิดผลของการอิมิตัวของสนามแม่เหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองที่ 1

### จุดประสงค์

- 1 ทำการทดสอบ Noload Test
- 2 ทำการทดสอบ Blocked rotor Test
- 3 ทำการหา Equivalent circuit

### อุปกรณ์ทดลอง

- 1 Wattmeter
- 2 Voltmeter
- 3 Ammeter
- 4 Oscilloscope
- 5 Resister 3\*(0.1ohm),10watt
- 6 Tachometer
- 7 Rectifier
- 8 Variac 3phase , 1phase
- 9 แทนทดลอง

### ขั้นตอนการทดลอง

- 1 ทำการทดลองวิธีเดียวกันกับ Blockrotor, Noload ของ Rotary induction motor โดยที่ใช้แรงดันเท่ากับ 130 Volt โดยต้องวงจรตามภาพ
- 2 ขณะทำการ Noload จะใช้ Inverter จ่ายไฟให้กับ Motor ที่ Coupling เข้ากับแทนทดลอง ชับจานหมุนให้ถึงความเร็ว Synchronous ของ SLIM ซึ่งจะมีผลทำให้ Watt loss ที่เกิดขึ้นเป็นค่าสูญเสียของแกนเหล็กซึ่งจะทำให้ได้  $PF = 90$  องศา
- 3 เมื่อจะทดลองให้ motor รับภาระให้ทำการ Coupling Secondary disc เข้ากับ Generator แล้วให้ SLIM ชับ Load ที่ขนาดต่างๆกันแล้วบันทึกผลการทดลองโดยต้องวงจรตามรูป
- 4 หลังจากที่ทำการทดลองแล้ว ให้ใช้ Program ในการคำนวณหาค่า Parameter ของ SLIM Equivalent circuit โดยมี Parameter ที่คงที่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency = 50 Hz

Turn/phase = 400

Core length = 0.385 m.

Pole = 5 pole

Slot/pole/phase = 1

Synchronous speed = 7.44 m/s

Radius = 0.45 m.

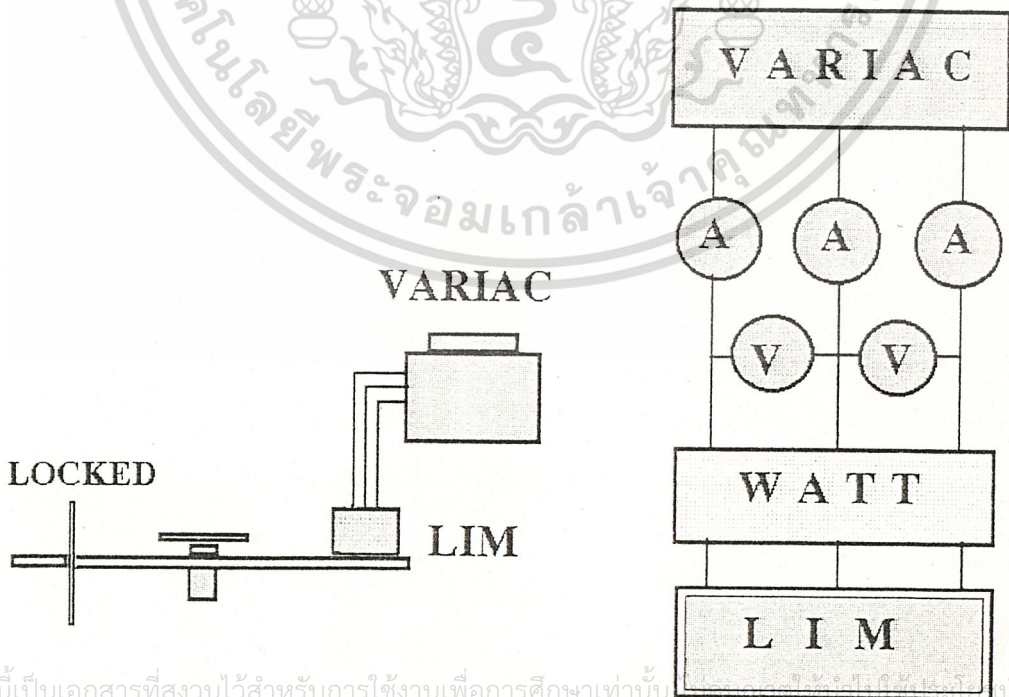
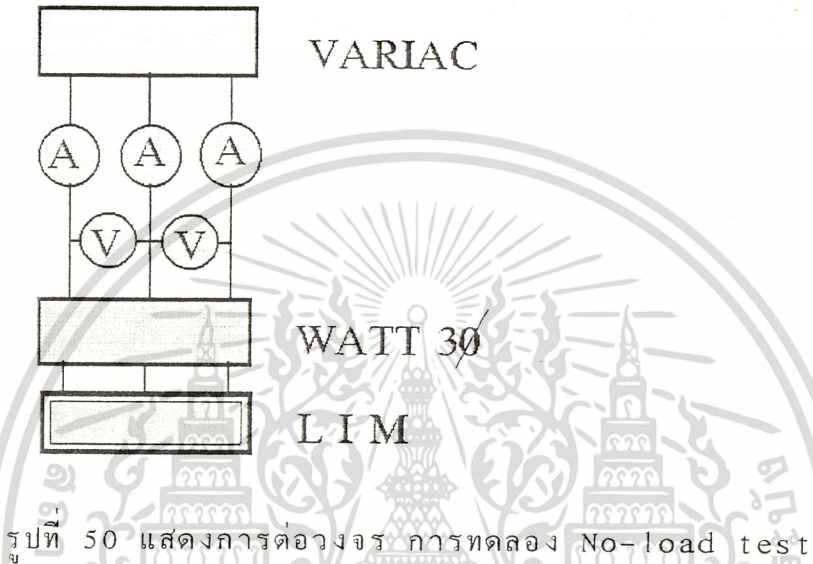
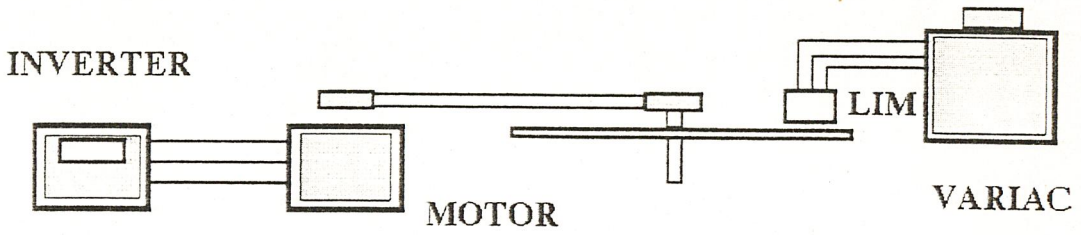
Height of slot = 5 cm.

Width of slot = 1.2 cm.

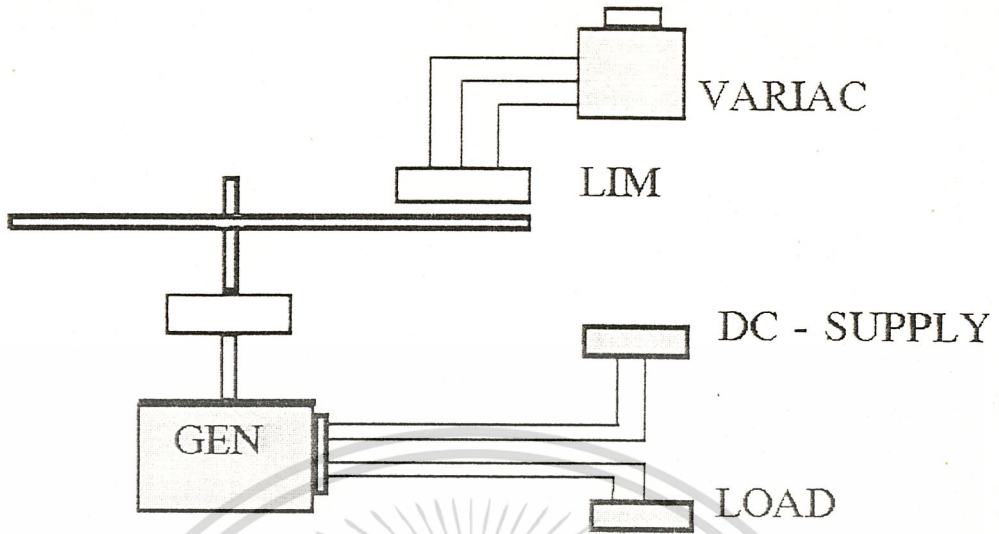
Voltage = 130 Volt



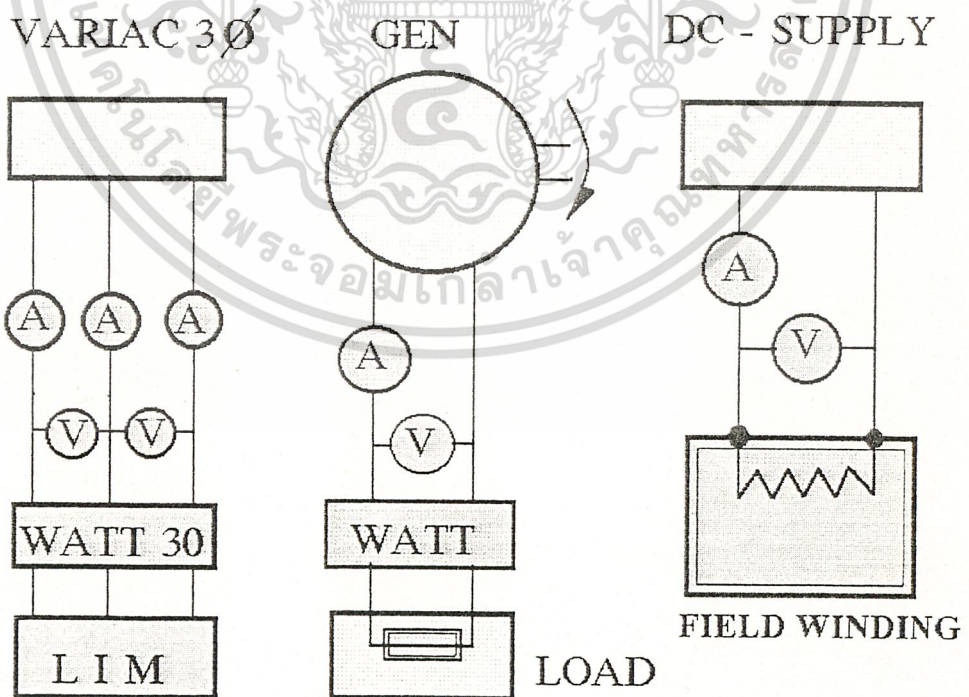
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 51 แสดงการต่อวงจร การทดลอง Blocked-rotor test



รูปที่ 52 แสดงการต่อวงจรของการทดลองรับภาระของ LIM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลการทดลอง**

1 Aluminium 2 mm., Airgap 2 mm.

**Noload**

$V = 130 \text{ Volt}$

$I = 4.3 \text{ A.}$

$W = 116.8 \text{ Watt}$

$pf = 0.063$

**Block rotor**

$V = 112 \text{ Volt}$

$I = 6.5 \text{ A.}$

$W = 983 \text{ Watt}$

$pf = 0.45$

2 Aluminium 2 mm., Airgap 1 mm.

**Noload**

$V = 130 \text{ Volt}$

$I = 4.57 \text{ A.}$

$W = 148.8 \text{ Watt}$

$pf = 0.087$

**Block rotor**

$V = 112 \text{ Volt}$

$I = 6.5 \text{ A.}$

$W = 1000.8 \text{ Watt}$

$pf = 0.233$

3 Aluminium 3 mm., Airgap 2 mm.

**Noload**

$V = 130 \text{ Volt}$

$I = 5.6 \text{ A.}$

$W = 174.2 \text{ Watt}$

$pf = 0.063$

**Block rotor**

$V = 98 \text{ Volt}$

$I = 6.5 \text{ A.}$

$W = 725.8 \text{ Watt}$

$pf = 0.233$

4 Aluminium 3 mm., Airgap 1 mm.

**Noload**

$V = 130 \text{ Volt}$

$I = 5.3 \text{ A.}$

$W = 197.8 \text{ Watt}$

$pf = 0.063$

**Block rotor**

$V = 98 \text{ Volt}$

$I = 6.5 \text{ A.}$

$W = 782.25 \text{ Watt}$

$pf = 0.31$

**ผลการทดลอง V-I Method**

V(Volt)

I(Amp)

12

5

9.6

4

7.2

3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Watt Loss ของ Fix loss ของแท่นทดลอง

$$\text{Input power} = \text{Output power} + \text{Cu loss (LIM)} + \text{Core loss} + \text{Fixloss(แท่นทดลอง)} + \text{Culoss(Gen)}$$

$$\text{Fixloss} = 74.6$$

### ผลการทดลองวันภาวะ

ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,

Al = 2 mm , airgap = 2 mm

Slip	Input Watt	I(input)	Force	Output Watt	Efficiency
0.196	787.5	5.4	24.9	-	-
0.27	937.5	5.6	33.56	94	18.9
0.34	1012.5	5.8	37.34	152	23.88
0.56	1087.5	6	41.1	176	24.6

ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,

Al = 2 mm , airgap = 1 mm

Slip	Input Watt	I(input)	Force	Output Power	Efficiency
0.23	862.5	5.2	30.7	-	-
0.3	975	5.4	37	44	12.6
0.36	1087.5	5.6	43	72	14.14
0.42	1237.5	5.8	51.86	84	13.59

ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,

Al = 3 mm , airgap = 2 mm

Slip	Input Watt	I(input)	Force	output Watt	Efficiency
0.17	825	5.8	25.2	-	-
0.23	975	6	33.8	53	13.6
0.31	1087.5	6.3	39.4	88	15.76
0.35	1200	6.5	45.5	101	15.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,

Al = 3 mm , airgap = 1 mm

Slip	Input Watt	I(input)	Force	Output watt	Efficiency
0.23	862.5	5.2	30.73	-	-
0.3	975	5.4	37	44	12.6
0.36	1087.5	5.6	43.24	72	14.14
0.42	1237.5	5.8	51.86	84	13.5

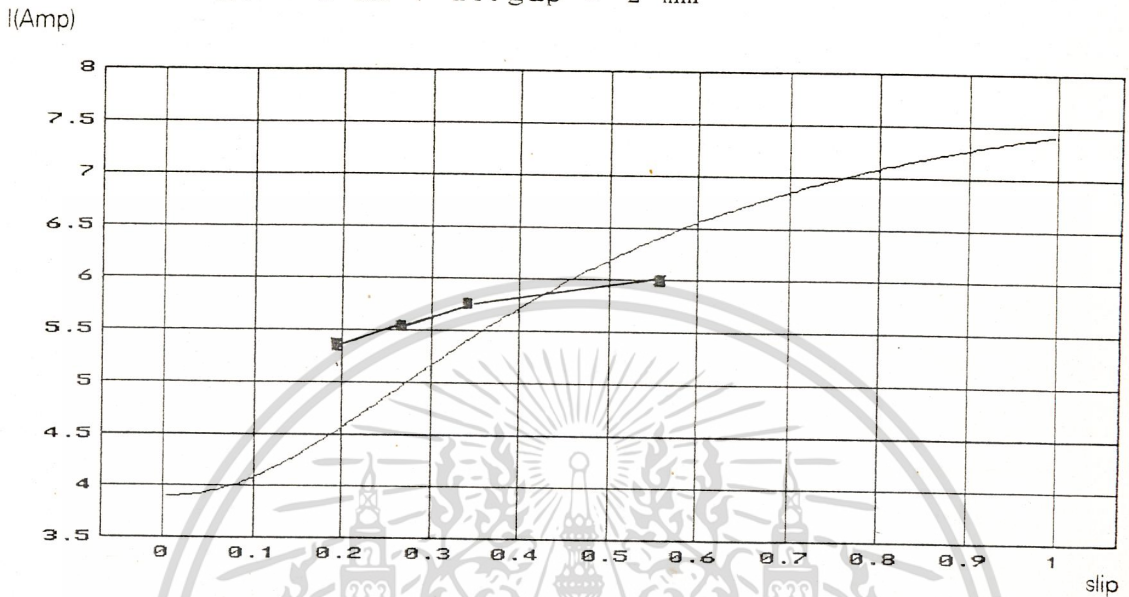
ผลการทดลองจาก Program

	Al 2,Gap 2mm.	Al 2,Gap 1mm.	Al 3,Gap 2mm.	Al 3 Gap 1mm.
Rc	434.1	340.73	291.05	256.32
Xm	30.3	28.55	23.29	24.64
X1	13.52	13.52	13.52	13.52
X2	1.87	1.8	0.43	0.24
R1	2.4	2.4	2.4	2.4
R2	5.36	5.5	3.33	3.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

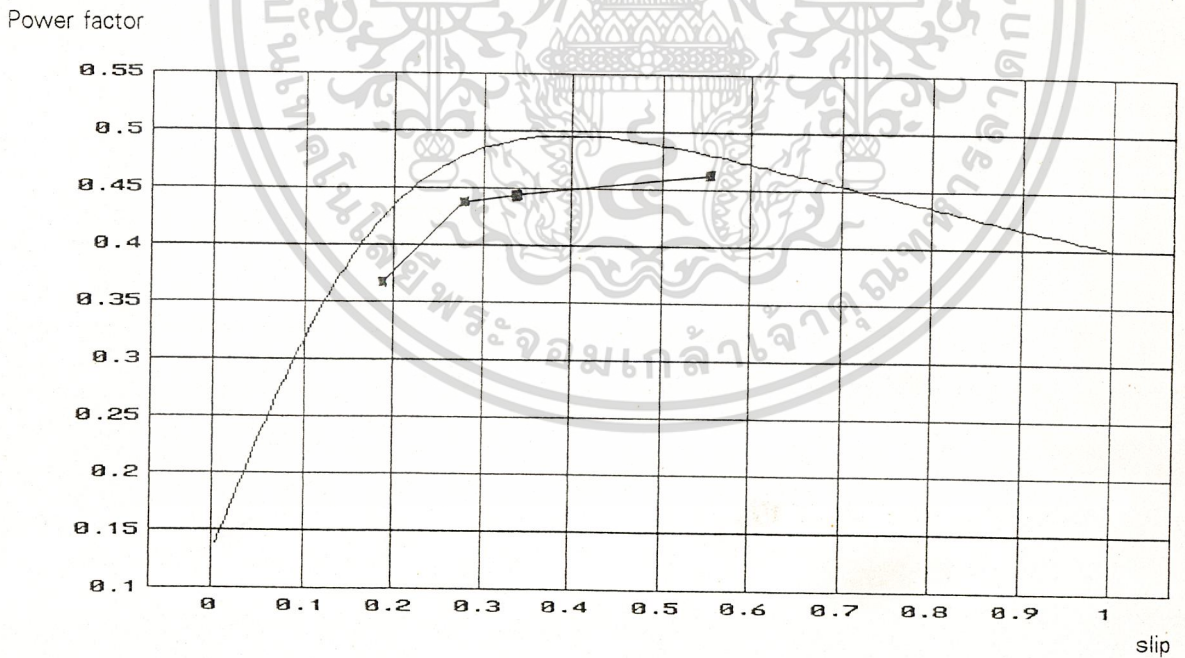
เปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณ

current ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,  
 $Al = 2 \text{ mm}$  ,  $airgap = 2 \text{ mm}$



การทดลอง —■— คำนวณ ———

รูปที่ 53 กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของกระแสที่ค่าสลิปต่างๆ

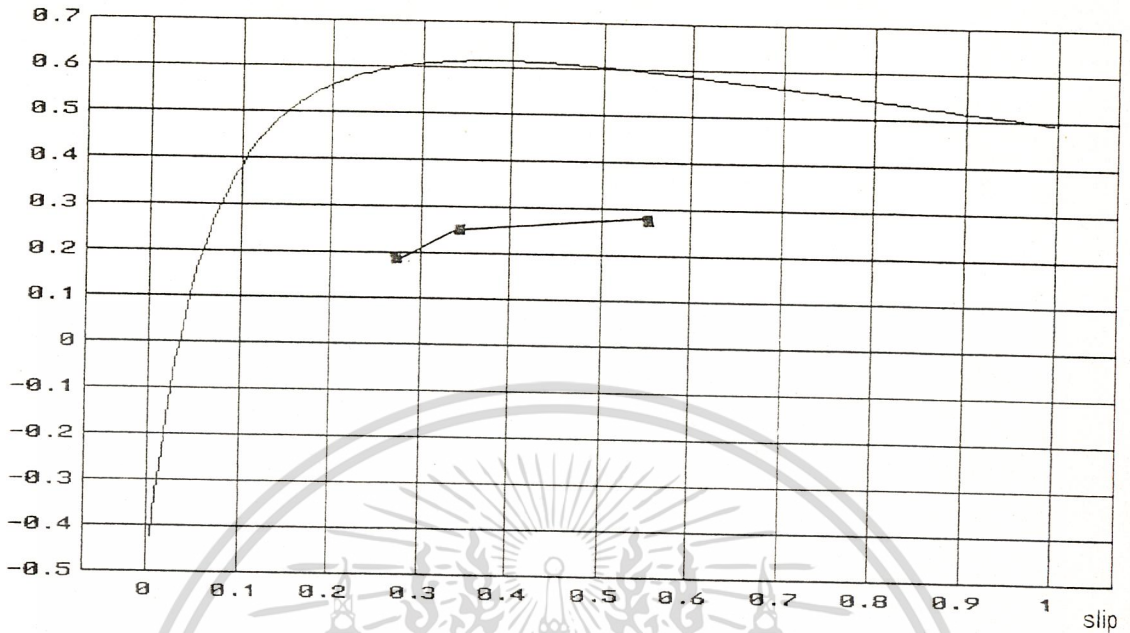


การทดลอง —■— คำนวณ ———

รูปที่ 54 กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency

Efficiency



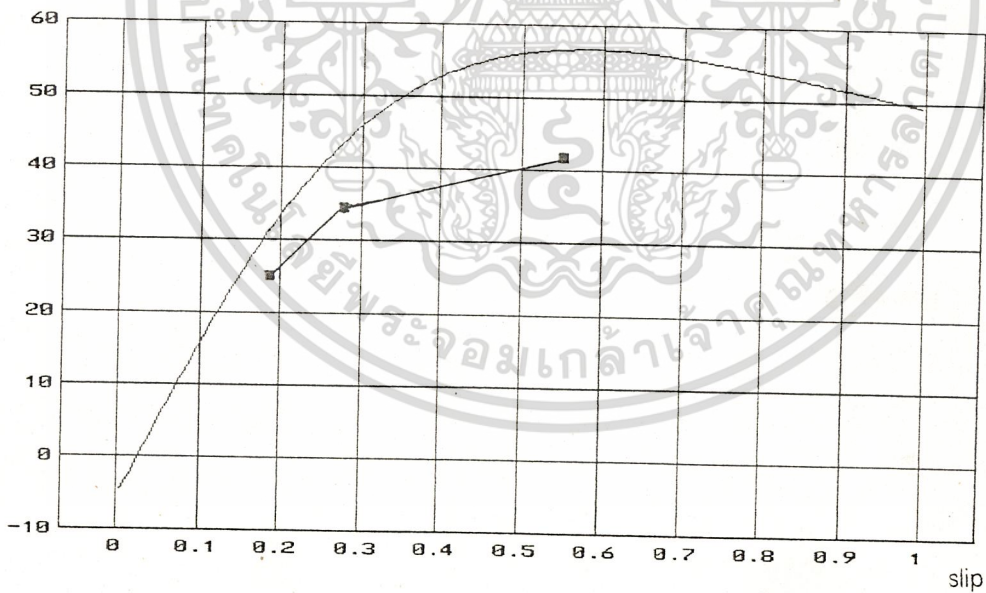
Thrust

Thrust(N)

การทดลอง

คำนวณ

รูปที่ 55 กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ



การทดลอง

คำนวณ

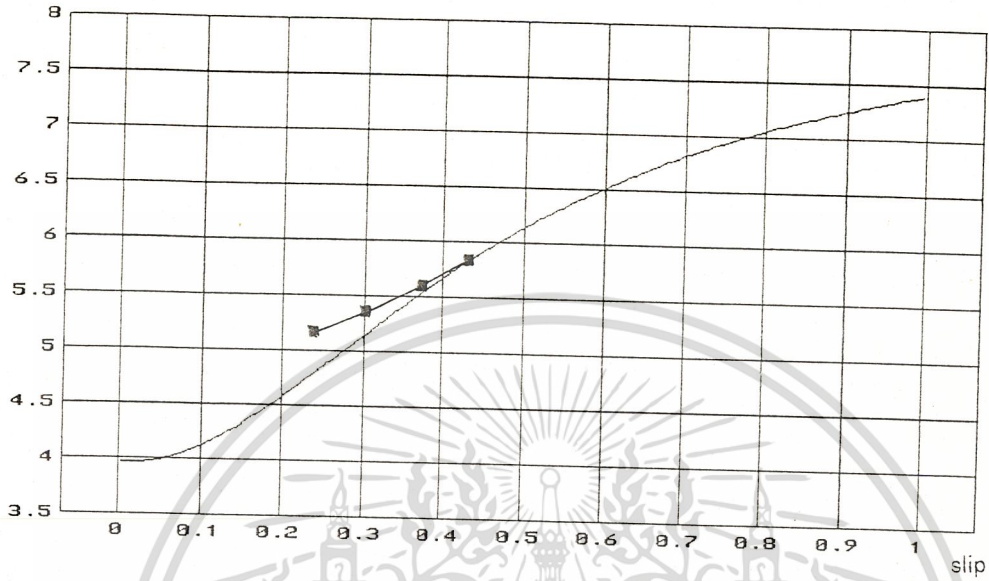
รูปที่ 56 กราฟผลการทดลองที่ 1.1 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,

Al = 2 mm , airgap = 1 mm

Current  
I(Amp)

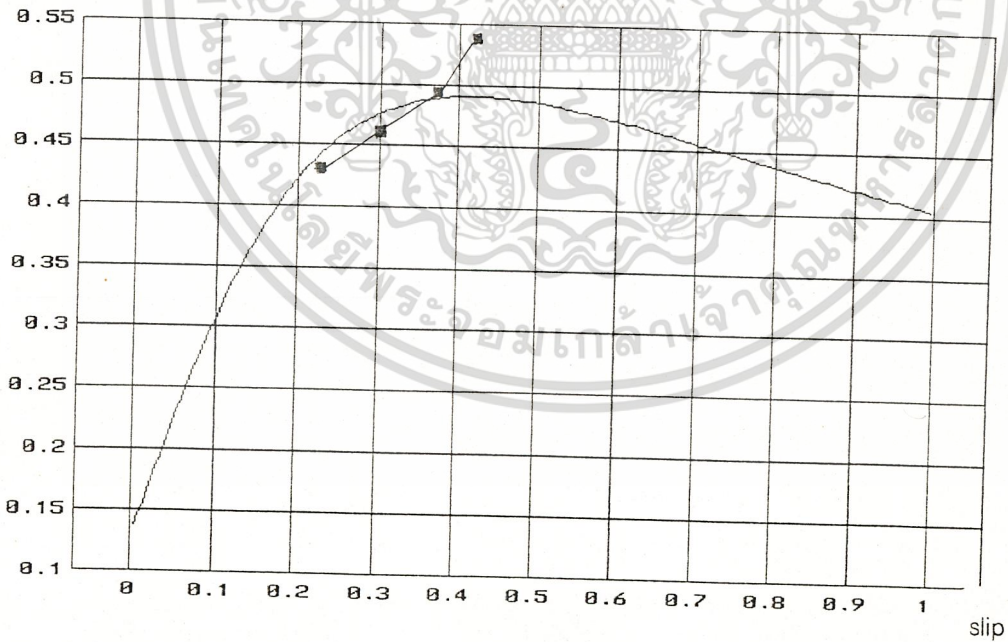


การทดลอง —■— ค่าทวน ———

Power factor

รูปที่ 57 กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของกระแสที่ค่าสลิปต่างๆ

Power factor



การทดลอง —■— ค่าทวน ———

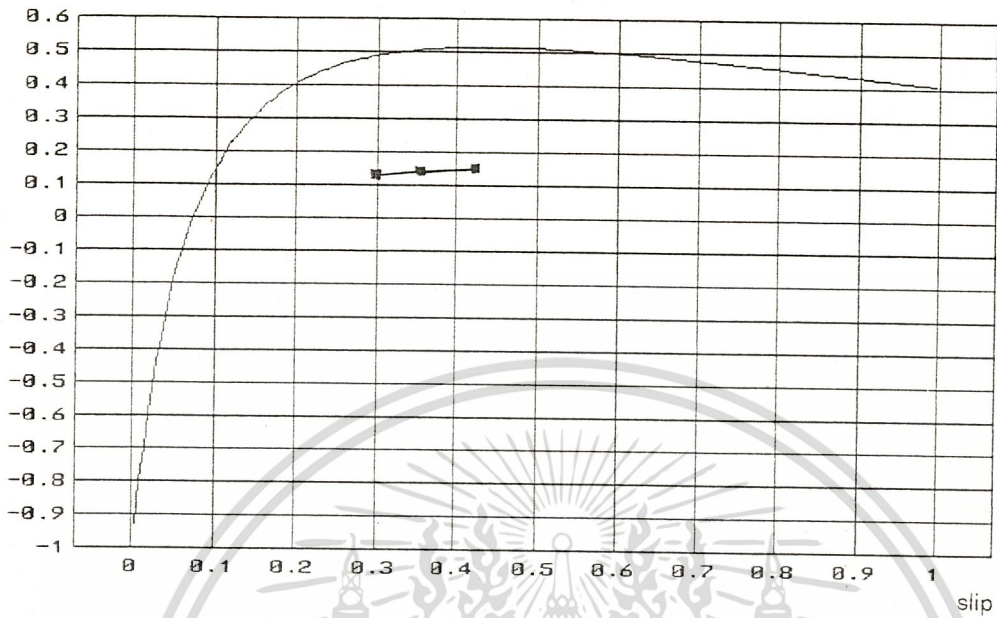
รูปที่ 58 กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency

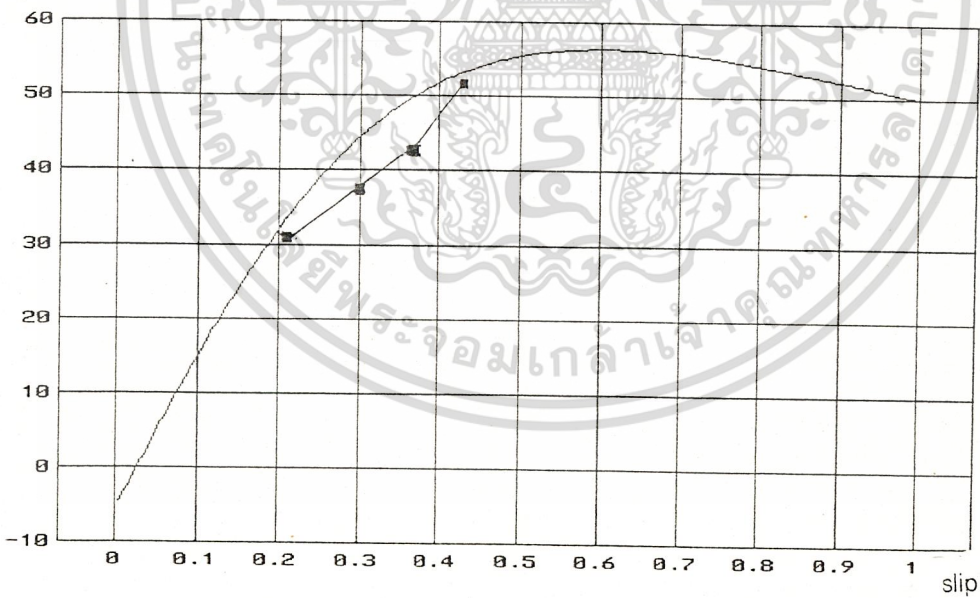
Efficiency



รูปที่ 59 กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ

การทดลอง —■— ค่าทฤษฎี ———

Thrust (N)

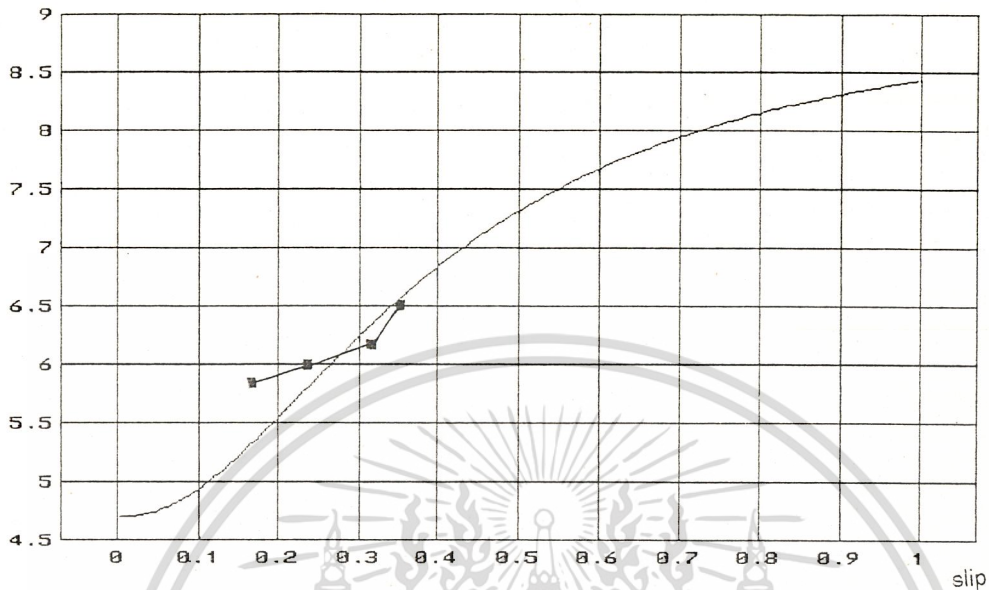


รูปที่ 60 กราฟผลการทดลองที่ 1.2 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ

การทดลอง —■— ค่าทฤษฎี ———

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

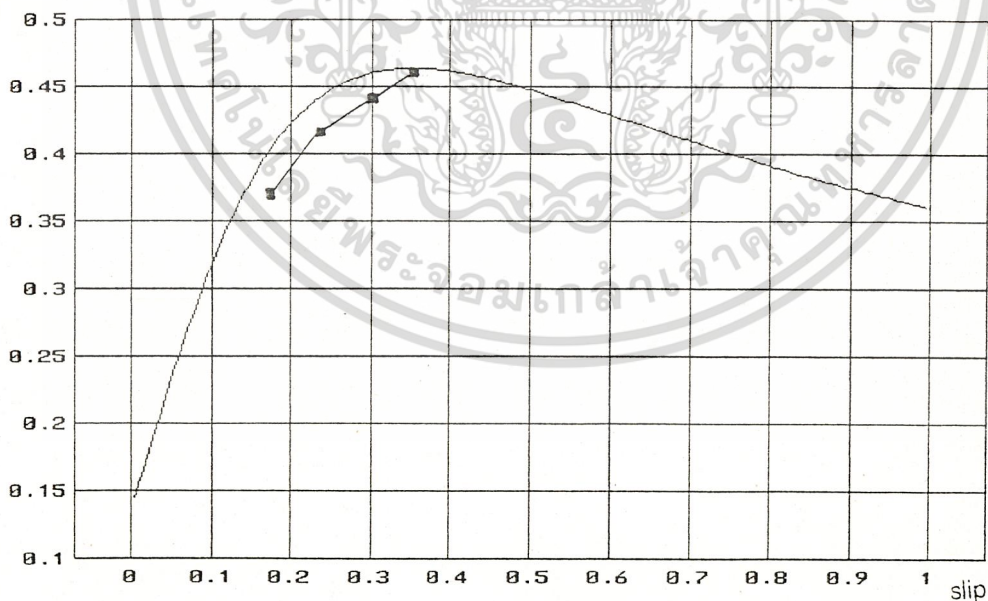
Al 3 mm, gap 2 mm. ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,  
 current  
 I(Amp) Al = 3 mm , airgap = 2 mm



การทดลอง —■— จำนวน ————  
 รูปที่ 61 กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของกระแสค่าสลิปต่างๆ

Power factor

Power factor

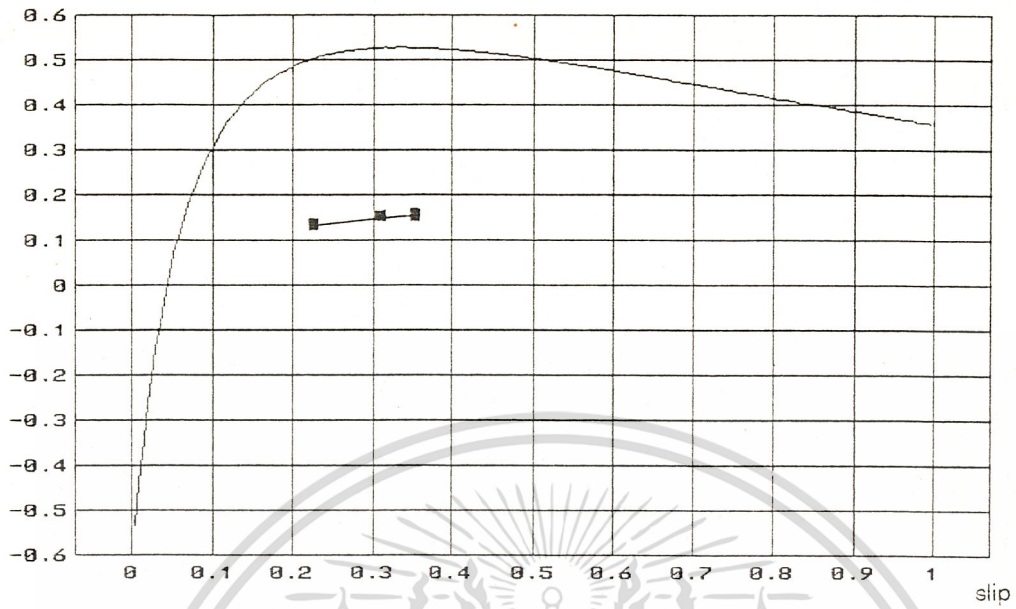


การทดลอง —■— จำนวน ————

รูปที่ 62 กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นใบเซปรีเซชันด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency

Efficiency



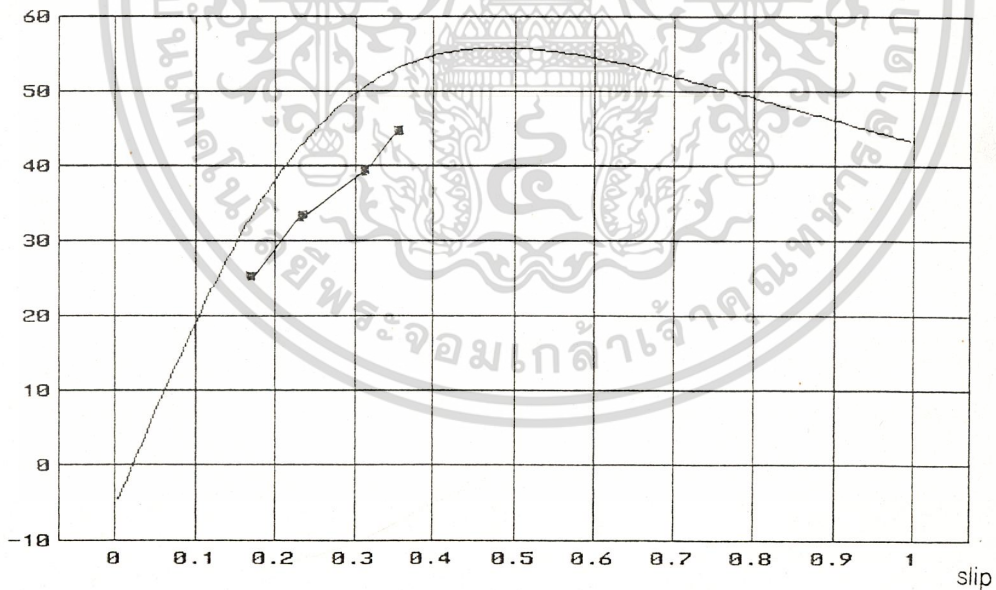
การทดลอง

คำนวณ

รูปที่ 63 กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ

Thrust

Thrust(N)



การทดลอง

คำนวณ

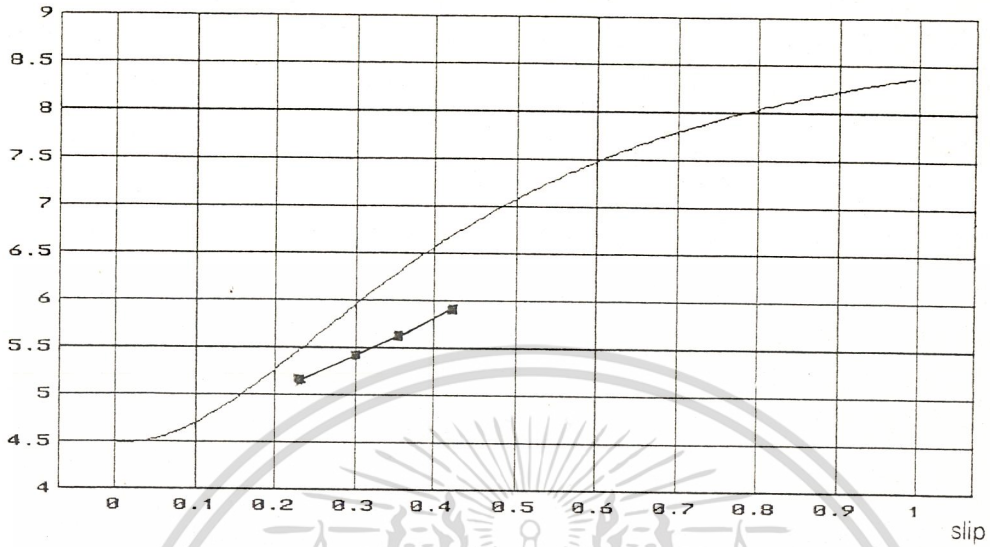
รูปที่ 64 กราฟผลการทดลองที่ 1.3 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองที่ 130 V , 50 Hz ,

I(Amp)

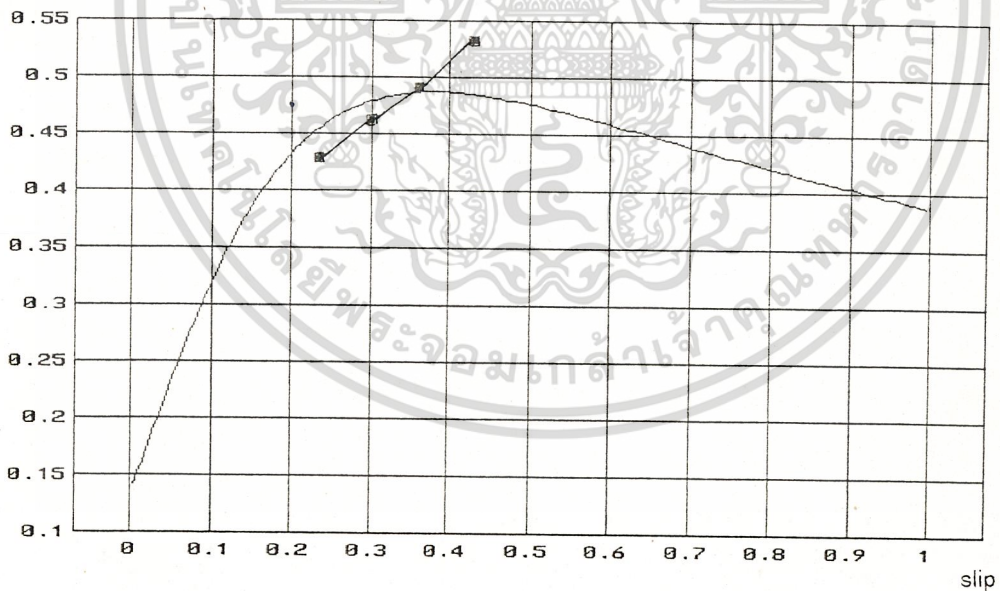
Al = 3 mm , airgap = 1 mm



การทดลอง —■— จำนวน ———

รูปที่ 65 กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของกระแสที่ค่าสลิปต่างๆ

Power factor



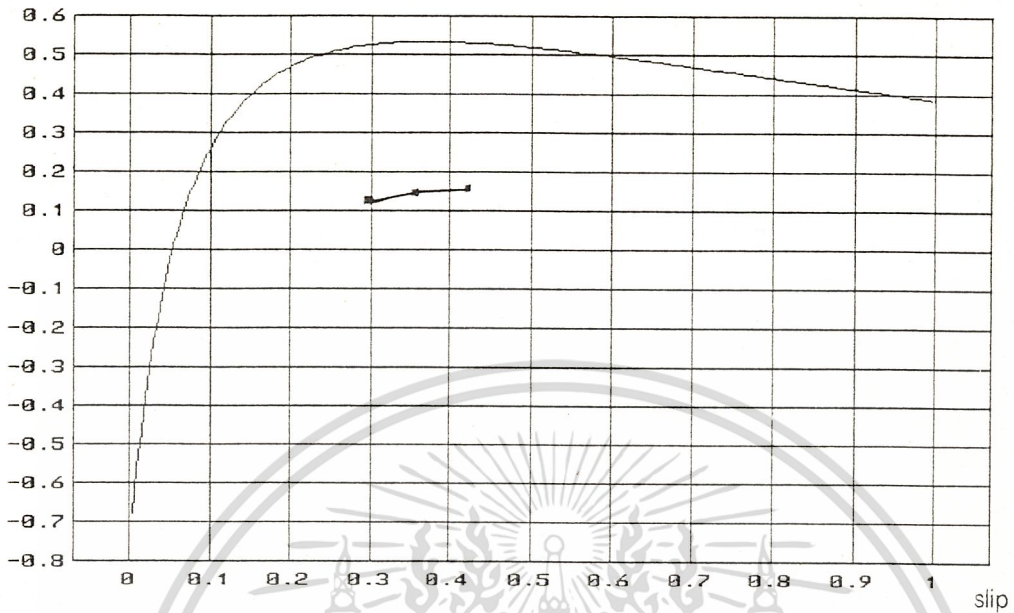
การทดลอง —■— จำนวน ———

รูปที่ 66 กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของ Power factor ที่ค่า slip ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency

Efficiency

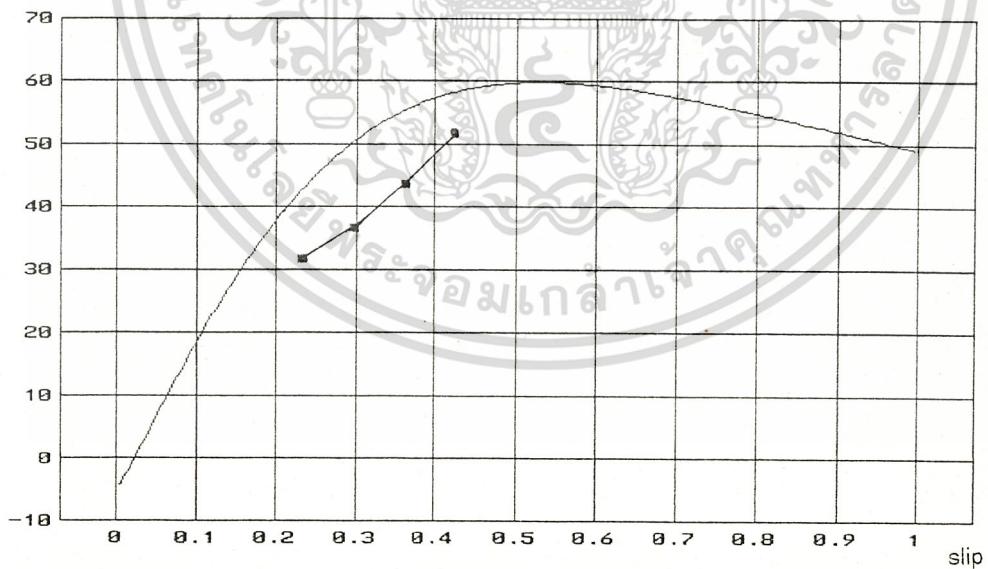


การทดลอง —■— ค่าทฤษฎี ———

Thrust

Thrust(N)

รูปที่ 67 กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของประสิทธิภาพ ที่ค่า slip ต่างๆ



การทดลอง —■— ค่าทฤษฎี ———

รูปที่ 68 กราฟผลการทดลองที่ 1.4 ของ Thrust ที่ค่า slip ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจริงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จาก Equivalent cct. ที่เรานำมาพิจารณา จะเห็นว่าในส่วนของกระแสและแรงดึง กราฟที่ได้จากการคำนวณเทียบกับการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน โดย Equivalent cct. ที่เรานำมาพิจารณาจะคิดผลของ End-effect ในส่วนของตัวเหนี่ยวนำ  $Lm(Q/(1-\exp(-Q)))$  จะทำให้ Program สามารถคำนวณค่าคุณลักษณะได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สังเกตได้ว่า ที่ Ai 2 mm., Airgap 2 mm. ซึ่งเป็นจุดออกแบบการทำงานของ SLIM ตัวปัจจุบัน จะได้ผล กราฟจากการคำนวณเทียบกับการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ในส่วนของแรงดึงที่ Slip มีค่าน้อยๆ กราฟจากการคำนวณมีค่าลดลงเร็วมากและอาจเป็นลบ ซึ่งเป็นผลจากเราทำการชดเชยผลของ End-effect มากเกินไป

ส่วน Power factor จะสังเกตได้ว่าที่จุดการทำงานที่ค่า Slip 5-10 percent มีค่าต่ำมาก เนื่องจาก SLIM มี Airgap ค่อนข้างกว้างทำให้ต้องใช้กระแสกระตุ้น (Magnetising current) สูง

ส่วน Efficiency ผลที่ได้จากการทดลองเทียบกับการคำนวณ มีความแตกต่างกันมาก เป็นผลมาจากเครื่องทดสอบ ซึ่งมีประสิทธิภาพทางกลไม่ดีนัก การส่งถ่ายพลังงานมีประสิทธิภาพต่ำด้วย

แนวทางแก้ไขเครื่องทดสอบ SLIM ได้โดยการเปลี่ยนดอกจอกซึ่งปัจจุบันเป็น 1:1 ให้เป็น 3:1 แล้วทำการทดสอบด้วยสายพานรองคู่ แล้วทำการ Coupling เข้า Generator โดยทดสอบใช้ Pulley 4:1 ทำให้ความเร็วที่ Secondary disc สูงจากเดิม 12 เท่า เป็นการทดสอบผ่านสายพาน 1 ครั้งเท่านั้น

สามารถสรุปได้ว่า Equivalent cct. ที่นำมาศึกษาสามารถนำไปใช้คำนวณหาคุณลักษณะของ SLIM อย่างคร่าวๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองที่ 2

### จุดประสงค์

1 ต้องการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายใน Airgap

### อุปกรณ์

- 1 Variac 3 เฟส
- 2 Ammeter
- 3 Voltmeter
- 4 Tachometer
- 5 Gauss meter

### วิธีทำการทดลอง

1 ทำการขับ LIM แบบ Noload ที่แรงดันต่างๆกันดังนี้

Al 2 mm.

Airgap 7 mm. ใช้แรงดัน 120 V.

Airgap 10mm. "——" 100 V.

Al 3 mm

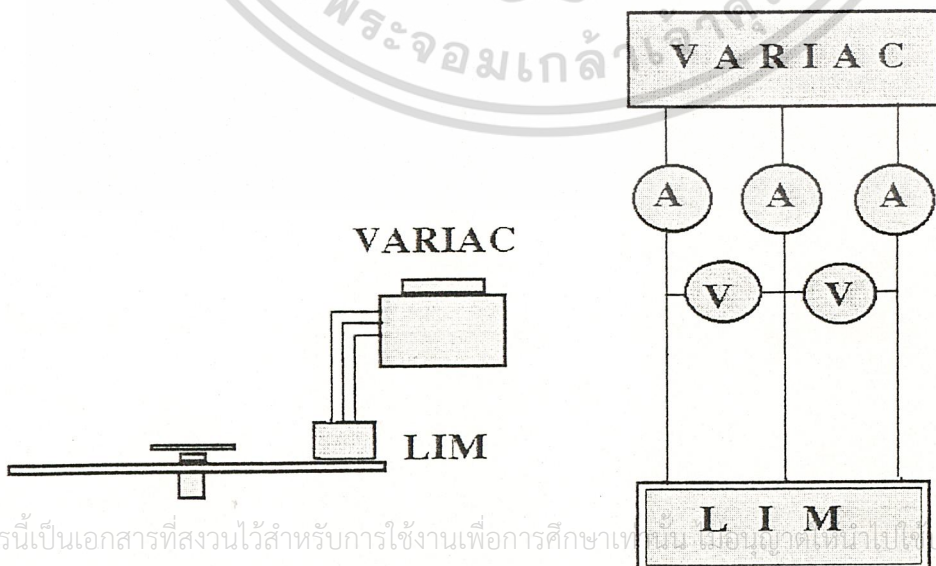
Airgap 6 mm. ใช้แรงดัน 120 V.

Airgap 9 mm. "——" 100 V.

โดยต่อวงจรตามรูป

2 ปรับ gap ที่ขนาดต่างๆกันและทำการบันทึกผลการทดลองทุกๆ Slot โดยใช้ Gauss meter ทำการวัดค่า Bs (เลือก Search coil ให้เหมาะสมกับค่าที่จะวัด)

3 ทำการ plot ค่า Bs ที่ได้จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า  
-ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

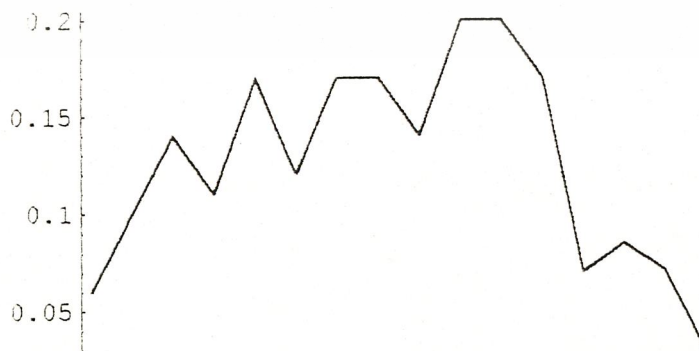
## ผลการทดลอง

slot	Al 2 mm. gap 7mm	Al 2mm gap 10mm	Al 3 mm gap 6 6mm	Al 3 mm. gap 9mm
1	0.06	0.014	0.03	0.02
2	0.1	0.05	0.04	0.04
3	0.14	0.06	0.1	0.06
4	0.11	0.06	0.1	0.06
5	0.17	0.14	0.15	0.12
6	0.12	0.14	0.1	0.13
7	0.17	0.14	0.17	0.14
8	0.17	0.09	0.18	0.1
9	0.14	0.12	0.13	0.12
10	0.2	0.13	0.18	0.12
11	0.2	0.08	0.15	0.08
12	0.17	0.12	0.2	0.1
13	0.07	0.08	0.15	0.08
14	0.085	0.1	0.13	0.1
15	0.071	0.07	0.14	0.07
16	0.028	0.04	0.08	0.05

ทดลองที่ 120 V , 7.2 A , 50 Hz

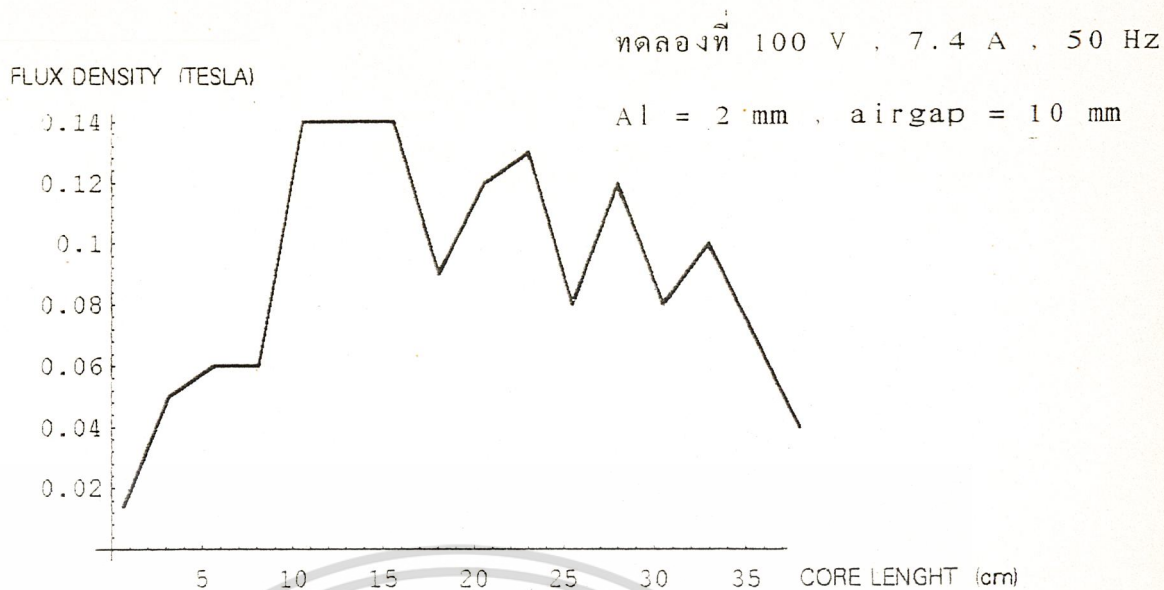
Al = 2 mm . airgap = 7 mm

FLUX DENSITY (TESLA)

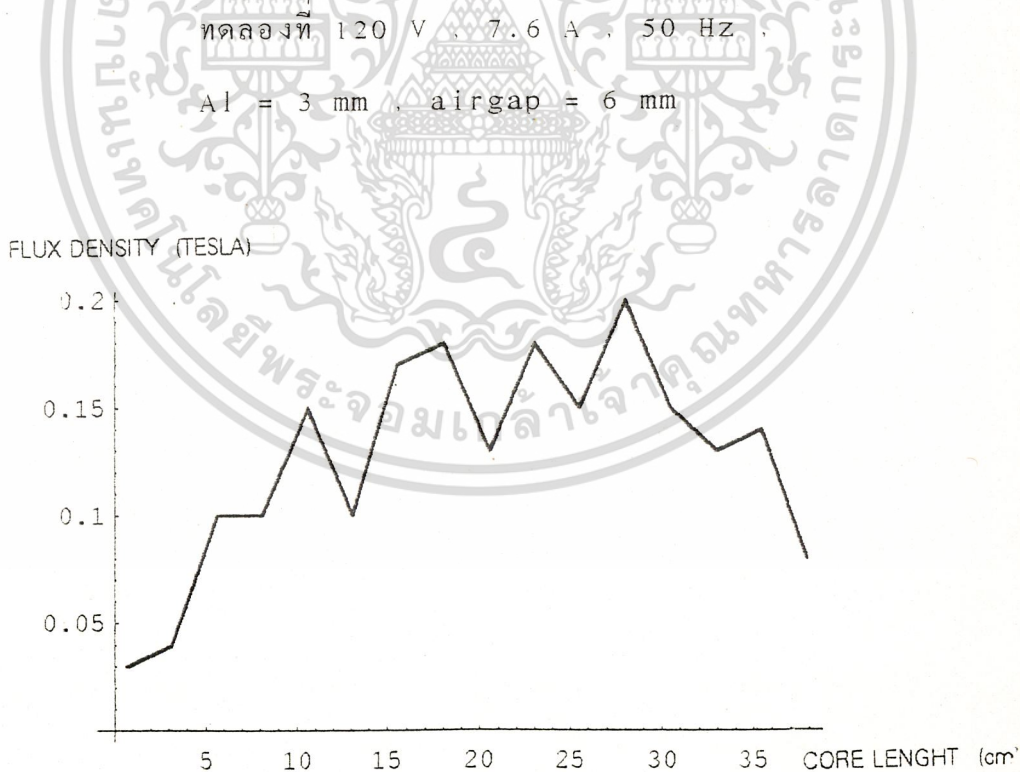


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง 5 มม. ในแต่ละช่อง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่นำมาไปใช้

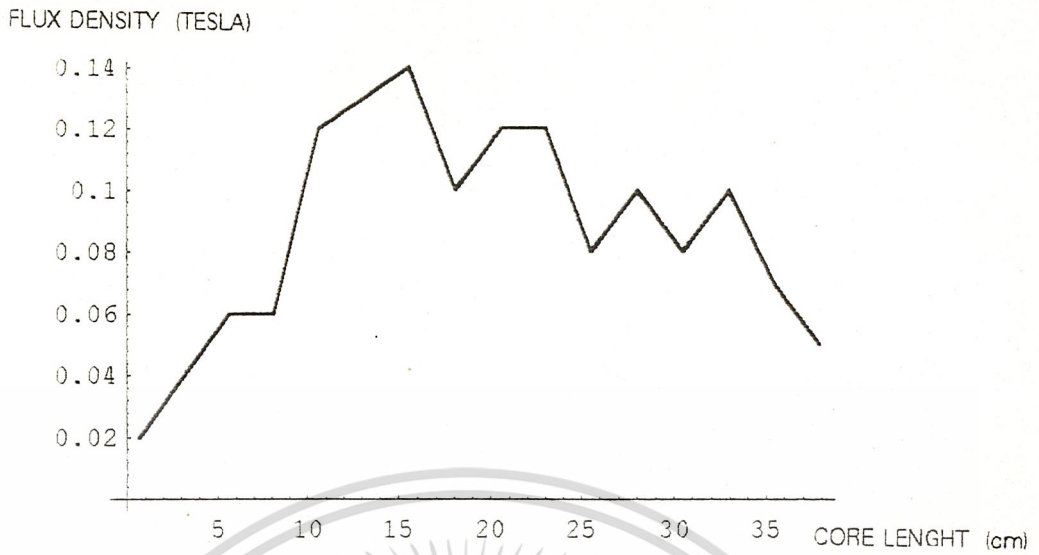
รูปที่ 70 กราฟผลการทดลองที่ 2.1 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator



รูปที่ 71 กราฟผลการทดลองที่ 2.2 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator



รูปที่ 72 กราฟผลการทดลองที่ 2.3 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 73 กราฟผลการทดลองที่ 2.4 วัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator

ทดลองที่ 100 V , 7.9 A , 50 Hz .

$A_l = 3 \text{ mm}$  , airgap = 9 mm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิเคราะห์ผลการทดลองเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก

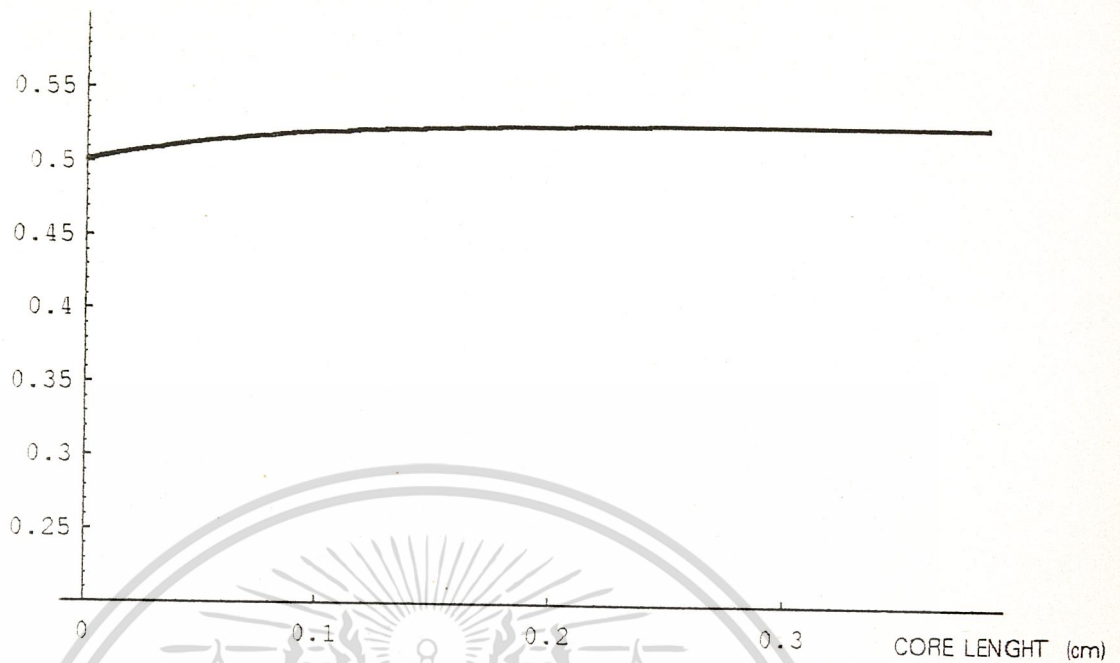
จากการวิเคราะห์แบบ one dimension model นั้นจะสามารถอธิบายลักษณะการเคลื่อนของ travelling wave ได้ในระดับหนึ่ง อีกทั้งยังสามารถอธิบายถึงการเกิด end effect wave และผลของ end effect ที่เกิดขึ้นได้ และจากสมการที่ 30 สามารถแสดงลักษณะของ travelling wave ที่เกิดขึ้นภายในช่องอากาศ (air gap) ได้โดยนำเฉพาะส่วน Absolute ของสมการที่ 30 มาพิจารณา แล้วนำค่า boundary condition ที่หามาได้จากสมการต่าง ๆ แทนค่า parameter ต่างๆ ลงไป

ซึ่งจากการใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATHEMATICA ช่วยในการคำนวณและวาดกราฟ จึงได้ลักษณะกราฟออกมาดังรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัด magnetic flux density ในช่องอากาศจริงโดยแสดงค่า parameter ต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{array}{ll}
 J = 36693 \text{ A/m}^2 & X = 215.2 \\
 \tau = 7.4 \times 10^{-2} \text{ m} & Y/2 = 54.2 \\
 \rho_s = 3.38 \times 10^{-6} & \alpha_1 = 0.068 \text{ m} \\
 \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} & \alpha_2 = 4.98 \times 10^{-3} \text{ m} \\
 g = 0.01 \text{ m} & B_s \exp(j\delta_s) = 0.045 + j 0.02 \\
 V = 5 \text{ m/s} & B_1 \exp(j\delta_1) = -0.059 - j 0.01 \\
 V_s = 7.4 \text{ m/s} & B_2 \exp(j\delta_2) = 0.12 + j 0.48
 \end{array}$$

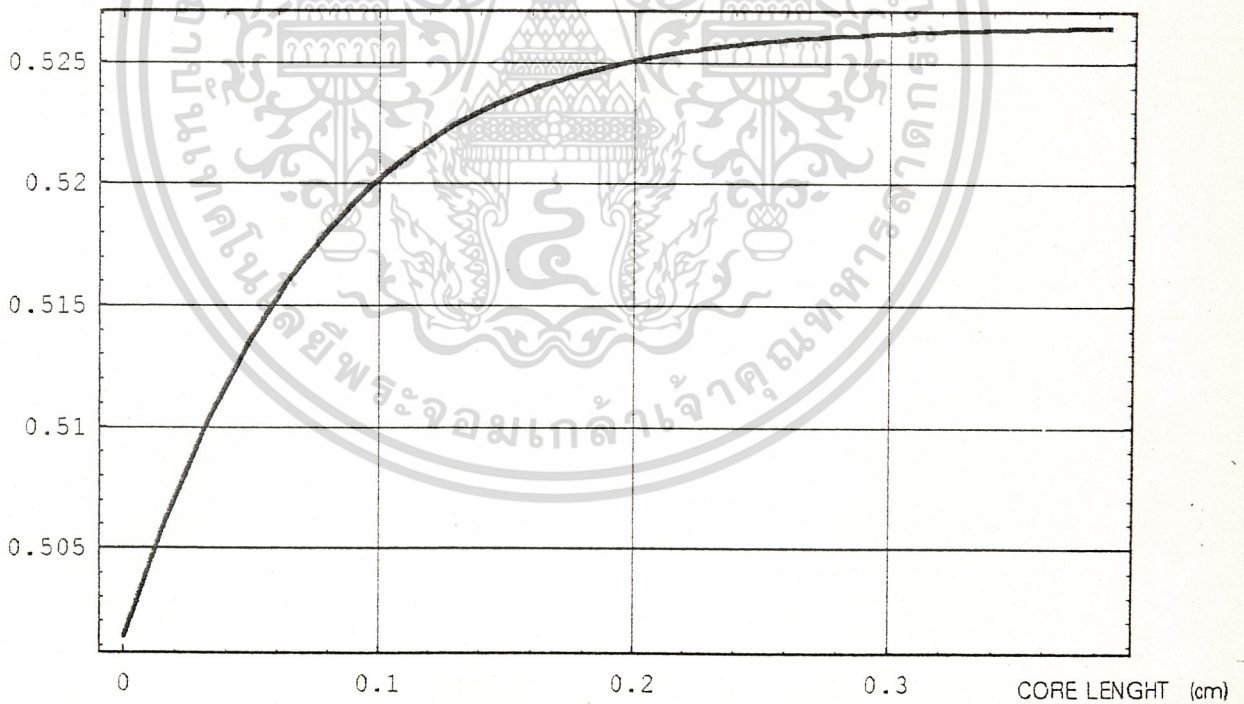
จากกราฟในรูปที่ 1,2 จะเห็นว่รูปที่ 2 นั้นเป็นกราฟที่ได้จากการคำนวณ โดยจะเห็นว่า end-effect ก่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กทางด้านเข้าลดลง ตรงตามทฤษฎี ซึ่งในรูปที่ 1 นี้จะเห็นว่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเป็น SLIM ชนิด low speed ส่วนในรูปที่ 2 เป็นกราฟที่ได้จากการทดลองจริง โดยค่า B ที่วัดนั้นวัดจากเครื่อง Gauss meter ซึ่งจากข้อมูลที่ได้มา จะเห็นว่า ค่า B ลดลงทั้งทางด้านเข้าและด้านออก แต่ด้านเข้าจะลดลงมากกว่าโดยที่ทั้งทางด้านเข้าและด้านออกมีสนามแม่เหล็กลดลงทั้งคู่นั้นเป็นผลจาก SLIM ที่เราทดลองเป็นชนิด half filled end slot แต่จากการคำนวณเป็นชนิด full filled slot จึงทำให้ใน 3 slot แรกและ 3 slot สุดท้ายมีค่า flux น้อยกว่า slot อื่นๆ ซึ่งกราฟที่ได้แตกต่างจากการคำนวณเป็นชนิด full filled slot จึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงเพียงด้านเข้าเท่านั้น แต่จะเห็นได้ว่าค่า flux density มีค่าต่างกันเนื่องจากมี leakage flux เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLUX DENSITY (TESLA)



รูปที่ 74 กราฟจากการคำนวณหาค่า B ตามความยาวของ stator

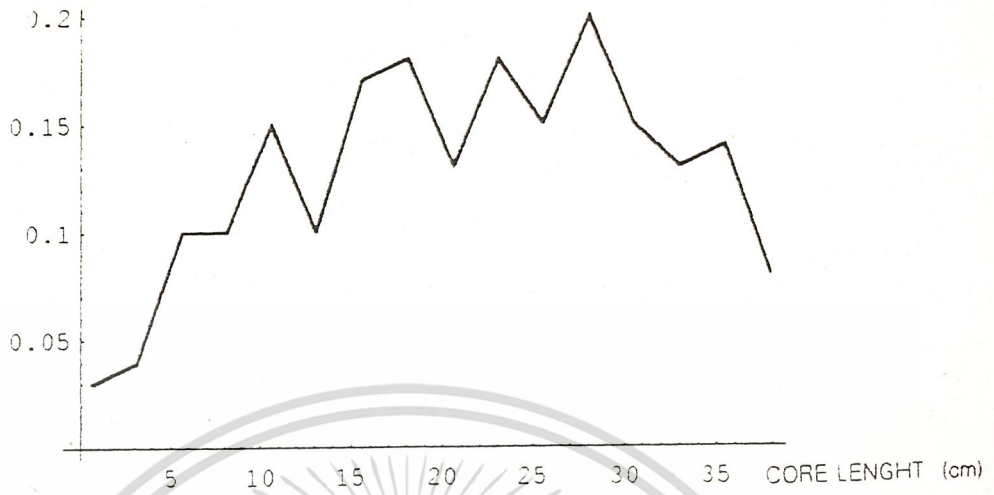
FLUX DENSITY (TESLA)



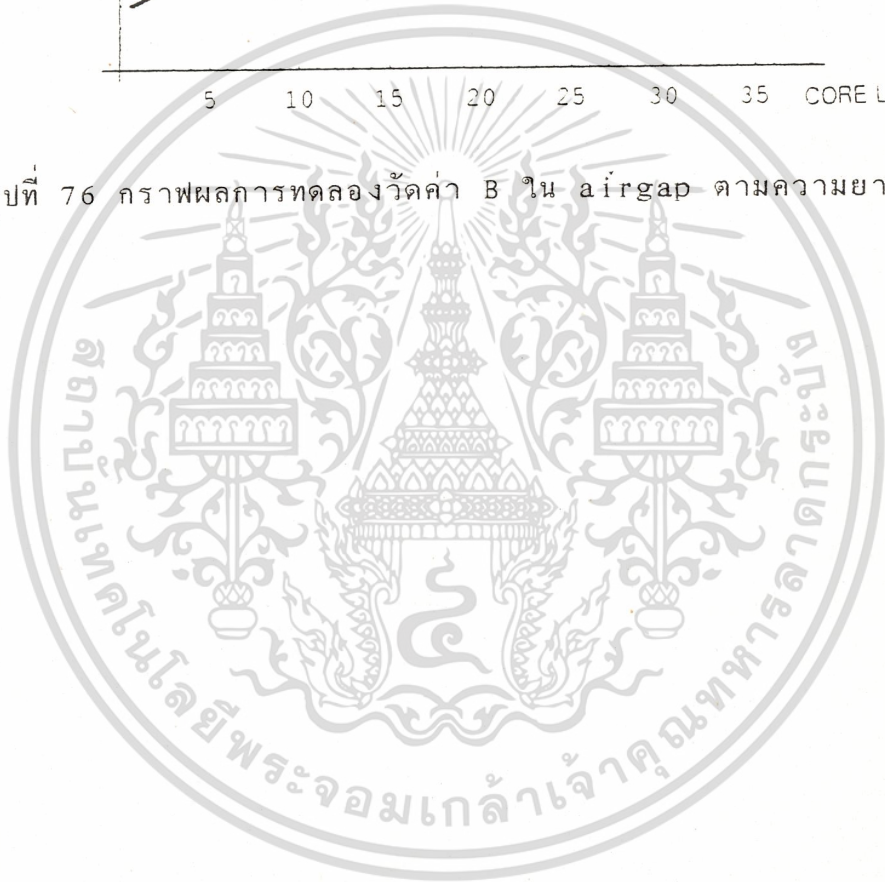
รูปที่ 75 กราฟ B ที่ขยายสเกลจากกราฟที่ 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLUX DENSITY (TESLA)



รูปที่ 76 กราฟผลการทดลองวัดค่า B ใน airgap ตามความยาวของ stator



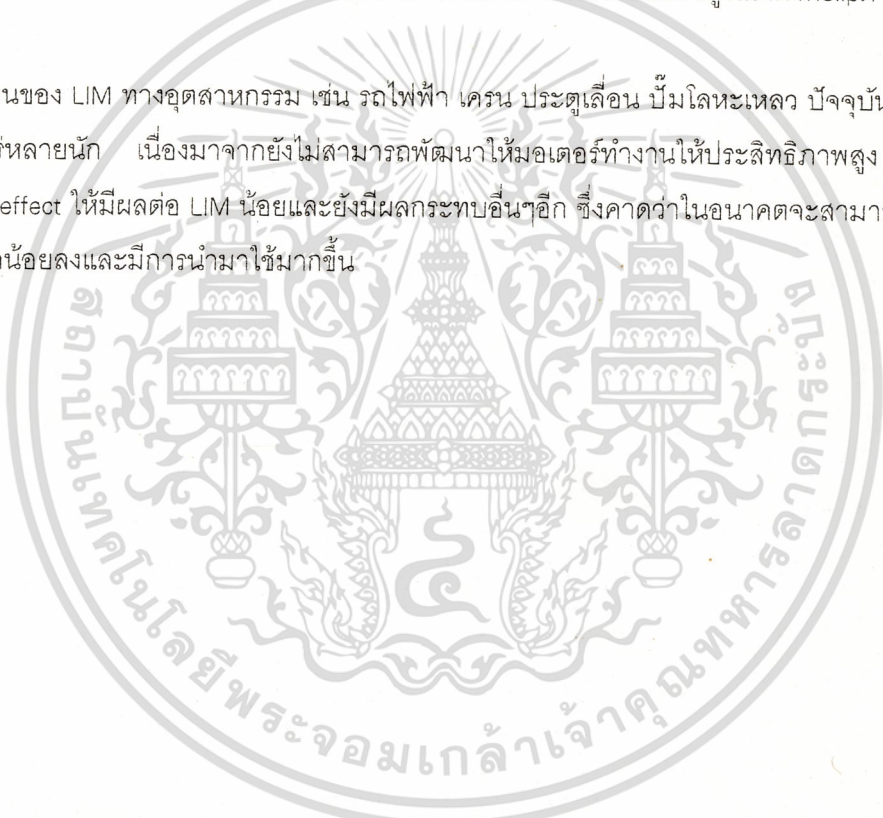
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองจะทำให้เราทราบถึงคุณสมบัติของ SLIM ซึ่งจะมีข้อดีในการใช้งานเชิงราบโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นมาเสริม โดยการทำงานจะใช้หลักการเหนี่ยวนำเช่นใน RIM และผลที่ไม่ต้องมีอุปกรณ์ทางเครื่องกลมาเสริมจะทำให้ไม่ต้องมีการ Maintenance จะมีผลดีสำหรับระบบ Mass transportation ซึ่งต้องมีการ Maintenance บ่อยมาก ซึ่งจะทำให้ Maintenance cost ลดลงไปได้มาก

เนื่องจาก SLIM มี Airgap กว้าง ทำให้ Magnetising current มีค่าสูงมาก (ทำให้เกิดผลของ power factor ต่ำด้วย) ผลจากรูปทรงที่แบนราบทำให้สนามแม่เหล็กที่ระนาบแกนเหล็กเกิดการไม่สมมาตร และต่อเนื่อง ทำให้เกิดผลของ End-effect มีผลให้กระแสแต่ละเฟสไม่เท่ากัน, Efficiency มีค่าต่ำและที่สลลิปมีค่าต่ำๆจะทำให้แรงดึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและถ้าเป็นมอเตอร์ที่ทำงานที่ความเร็วสูงแรงดึงที่ Slip ต่ำจะมีค่าเป็นลบ

การนำไปใช้งานของ LIM ทางอุตสาหกรรม เช่น รถไฟฟ้า เครื่อง ประตูเลื่อน บันไดโลหะเหลว ปัจจุบันยังมีการนำไปใช้แพร่หลายนัก เนื่องจากยังไม่สามารถพัฒนาให้มอเตอร์ทำงานให้ประสิทธิภาพสูง และแก้ไขผลของ End-effect ให้มีผลต่อ LIM น้อยและยังมีผลกระทบอื่น ๆ อีก ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้ลดน้อยลงและมีการนำมาใช้มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

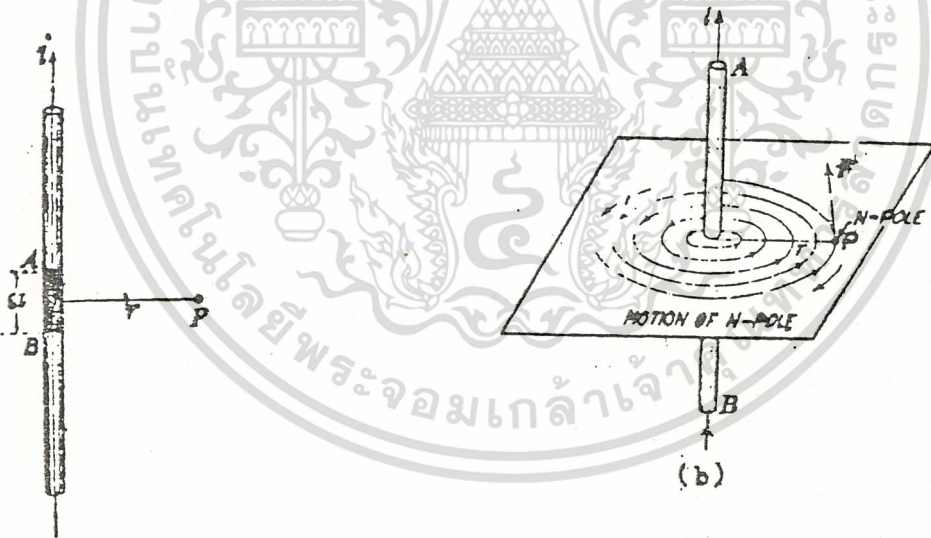
ภาคผนวก

1. กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) กล่าวว่าแรง (แรงในที่นี้ หมายถึงความแรงของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็ก ณจุดที่ต้องการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟที่ไหลผ่านตัวนำอันหนึ่งกระทำกับหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กที่ระยะหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองของระยะทางที่ตั้งฉากจากหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กไปยังตัวนำนั้น ดังรูปที่ 1 (a) จากคำจำกัดความนี้ก็ได้สมการ

$$df \propto \frac{|\delta I|}{r^2}$$

$$df = \frac{|\delta I|}{4\pi r^2}$$

เมื่อ  $4\pi$  เป็นค่าคงที่ของตัวที่เป็นสัดส่วนกับแรงที่เกิดขึ้น ทิศทางของแรงนี้ตั้งฉากกับระนาบซึ่งผ่านตัวนำและเส้นตรงที่ต่อเชื่อมระหว่างจุด P ไปยังความยาว  $\delta l$  (ดูรูปที่ 1) กฎของแอมแปร์นี้ไม่สามารถพิสูจน์ได้โดยตรง แต่ก็แสดงให้เห็นได้จากการทดลอง



รูปที่ 1 (a) แสดงถึงกฎของแอมแปร์ (b) แสดงถึงทิศทางของแรง F ที่เกิดขึ้นในแนวสัมผัสกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิด F จากกระแสไฟ ไหลผ่านตัวนำกับขั้วแม่เหล็กหนึ่งหน่วยขั้วเหนือที่จุด P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กฎของการเหนี่ยวนำ ในปี 1831 Faraday ได้ค้นพบกฎเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ต่อมาภายหลัง Lenz ได้ทำการศึกษา และสรุปกฎเหล่านี้คือ กฎข้อที่หนึ่งเรียกว่ากฎของ Lenz ส่วนกฎข้อที่สองเป็นกฎของ Faraday ดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1 (Lenz's Law) กล่าวว่า ในวงจรปิดใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจรย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรมานั้น โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร มีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจรมานั้นๆ

กฎข้อที่ 2 (Faraday's Law) กล่าวว่า การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของขดลวดหรือ loop อันหนึ่งนั้นเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบขดลวดนั้นๆ หรือการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของแท่งตัวนำอันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <stdio.h>          PROGRAM ในการคำนวณคุณลักษณะของ SLIM
#include 'conio.h'
#include 'math.h'
main()
{
float a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,pf1,pf2,rb,xb,r1,r2,zb,p,Ssp,Q,pp,k1,RC,XM,ZC,
      Z2,Z1,s,T,I1,I2,H,Co,Hs,Ws,x2,Tp,L,P,Spp,r,Tt,Ts,Te,Tez,T1,x1,v,agZ2,
      agZC,ZBt,agZBt,ZBu,agZBu,ZB,agZB,ZBR,ZBI,ZTR,ZTI,ZT,agZT,pf,V,agV,V2R,
      V2,Im,V1,agV1,zc;

```

```
double ang1,ang2,rc,xm;
```

```
FILE *f1;
```

```
clrscr();
```

```
printf(" Data of noload test \n");
```

```
printf("Enter value of power loss 3 phase \n");
```

```
scanf("%f",&a);
```

```
printf("Enter value of magnetising current per phase \n");
```

```
scanf("%f",&b);
```

```
printf("Enter value of voltage perphase\n");
```

```
scanf("%f",&c);
```

```
printf("Enter value of frequency of motor\n");
```

```
scanf("%f",&H);
```

```
printf("\n\n");
```

```
printf(" Data of blocked rotor test \n");
```

```
printf("Enter value of copper loss 3 phase \n");
```

```
scanf("%f",&d);
```

```
printf("Enter value of current perphase\n");
```

```
scanf("%f",&e);
```

```
printf("Enter value of voltage perphase\n");
```

```
scanf("%f",&f);
```

```
printf("\n\n");
```

```
printf(" Data of V-I method test\n");
```

```
printf("Enter value of the first voltage perphase\n");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

scanf(" %f",&g);
printf("Enter value of the first current perphase\n");
scanf(" %f",&h);
printf("Enter value of the second voltage perphase\n");
scanf(" %f",&i);
printf("Enter value of the second current perphase\n");
scanf(" %f",&j);
printf("\n\n");

printf("Enter value of height of slot(cm.)\n");
scanf("%f",&Hs);
printf("enter value of width of slot(cm.)\n");
scanf("%f",&Ws);
printf("enter value of turn/phase\n");
scanf("%f",&Tp);
printf("enter value of armature core length(m.)\n");
scanf("%f",&L);
printf("enter total number of pole\n");
scanf("%f",&P);
printf("enter value of slot/pole/phase\n");
scanf("%f",&Spp);
printf("enter velocity of LIM at synchronous speed(m/s)\n");
scanf("%f",&Ssp);
printf("enter length of polepitch(m.)\n");
scanf("%f",&pp);
printf("enter value of radius of lim which far from center(m.)\n");
scanf("%f",&r);

```

```

pf1 = (a/(3*b*c));
zc = c/(b);
ang1 = acos(pf1);
xm = zc*sin(ang1);
rc = zc*pf1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

p = (pow(zb,2) - pow(rb,2));
xb = sqrt(p);
r1 = ((i-g)/(j-h));
r2 = (rb-(r1));
Co = (Hs/(3*Ws));
x1=(15.8E-6)*(H)*(pow(Tp,2))*L*Co/(P*Spp);
x2=xb-x1;

printf("rc = %8.3f\n",rc);
printf("xm = %8.3f\n",xm);
printf("xb = %8.3f\n",xb);
printf("x1 = %8.3f\n",x1);
printf("x2 = %8.3f\n",x2);
printf("r1 = %8.3f\n",r1);
printf("r2 = %8.3f\n",r2);

f1 = fopen("testl.wk1",'w');
printf(" Slip | PF | Ts | Te | Ttn");
fprintf(f1," Slip | PF | Ts | Te | Ttn");
for( s=0.995;s>=0.005;s=s-0.005)
{ v = (1-s)*Ssp;
  Q = (((P)*pp)*r2/(((xm/(2*3.1416*H)))+(x2/(2*3.1416*H))))*v);
  k1 = (1-(exp(-Q))/Q);
  RC = r2*(k1);
  XM = xm*(1-k1);
  Z2 = sqrt(pow((r2/s),2)+pow(x2,2));
  agZ2 = atan(x2/(r2/s));
  ZC = sqrt(pow(RC,2) + pow(XM,2));
  agZC = atan(XM/RC);
  ZBt = ZC*Z2;
  agZBt = agZC+agZ2;
  ZBu = sqrt(pow((RC+(r2/s)),2)+pow((XM+x2),2));
  agZBu = atan((XM+x2)/(RC+(r2/s)));
  ZB = ZBt/ZBu;
  agZB = agZBt-agZBu;
  ZBR = ZB*cos(agZB);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ZBI = ZB*sin(agZB);
ZTR = ZBR + r1;
ZTI = ZBI+x1;
ZT = sqrt(pow(ZTR,2)+pow(ZTI,2));
agZT = atan(ZTI/ZTR);
I1 = c/ZT;
pf = cos(-agZT);
V1 = I1*sqrt(pow(r1,2)+pow(x1,2));
agV1 = -agZT+atan(x1/r1);
V2R = c-(V1*cos(agV1));
V2 = sqrt(pow(V2R,2)+pow(V1*sin(agV1),2));
I2 = V2/Z2;
Im = V2/ZC;
Ts = 3*pow(I2,2)*r2/(s*(Ssp));
/*Fs = 3*pow(I2,2)*r2/(s*v);*/
Te = 3*pow(Im,2)*r2*(k1/Ssp);
Tt = Ts-Te;
T1 = Tt*(r);
fprintf(f1,'%6.3f %6.3f %6.3f %8.3f %8.3f %8.3f\n',s,I1,pf,Ts,Te,T1);
printf("%6.3f %6.3f %6.3f %8.3f %8.3f %8.3f\n",s,I1,pf,Ts,Te,T1);
}

Tez = 3*pow(Im,2)*((xm+x2)/(2*3.1416*H*((P-1)+(1/3))*pp));
printf("Thrust due to eddy current at zero velocity = %8.3f\n",Tez);
fclose(f1);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

List of symbols

$R_1$	=	primary resistance
$R_{21}$	=	secondary resistance referred to primary
$L_1$	=	primary leakage inductance
$L_{21}$	=	secondary leakage inductance referred to primary
$L_m$	=	magnetising inductance
$D$	=	motor effective length
$v$	=	motor velocity
$d$	=	distance between midpoints of secondary and primary current layers
$\tau$	=	motor pole pitch
$\omega_1$	=	supply frequency
$\omega_2$	=	slip frequency
$P$	=	number of poles in motor
$I_{21}$	=	secondary slip current referred to primary
$I_m$	=	magnetising current
$I_1$	=	primary current
$i_{2e}$	=	instantaneous secondary eddy currents referred to primary
$I_{2ea}$	=	average value of $i_{2e}$ over motor length
$i_{me}$	=	instantaneous effective magnetising currents
$I_{mea}$	=	average value of effective magnetising current over motor length
MMF	=	magnetomotive force
$a$		half-width of primary stack, m
$B$		flux density, T
$c$		half-width of secondary plate, m
$d$		thickness of secondary plate, m
$f$		frequency, Hz
$\langle F \rangle$		time-average force, N
$F_l$		levitation force, N
$F_n$		normal force, N
$g$		airgap, m
$G$		goodness factor
$H_c$		coercive force, A/m
$I$		phase current, A
$I_m$		amplitude of linear current density, A/m
$k_w$		winding factor
$K$		overhang correction factor
$k_c$ or $K_c$		Carter's coefficient
$K_l$		airgap leakage coefficient
$K_s$		skin-effect coefficient
$L$		self-inductance, H
$m$		number of phases
$M$		mutual inductance, H
$n$		speed of rotation, r/min
$p$		number of pole pairs
$P$		power, W
$R_1$		primary resistance (per phase), ohm
$R_2$		secondary resistance (per phase), ohm
$s$		slip
$u$ or $U$		linear velocity, m/s
$U_s$		synchronous speed, m/s
$V$		phase voltage, V
$W$		number of turns per phase
$X_d$		direct-axis reactance, ohm
$X_m$		magnetizing reactance (per phase), ohm
$X_q$		quadrature-axis reactance, ohm
$\beta = 2\pi/\lambda$		wave number, $m^{-1}$
$\lambda = 2\tau$		wavelength, m
$\mu_0$		permeability of free space, H/m
$\omega$		angular frequency, r/s
$\phi$		flux, weber
$\sigma$		conductivity, S/m
$\tau$		pole pitch, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## REFERENCE

1. Sakae Yamamura , **Theory of Linear Induction Motors** ,John Wiley & Son ,New York,1918
2. S.A Nasar I.Boldea , **Linear Induction Electric Machines** , John Wiley & Son ,New York,1976
3. M.Poloujadoff , **The Theory of Linear Induction Machinery** , Oxford University Press ,  
New York,1980
4. Syed A. Nasar I.Boldea , **Linear Electric Motor** , Prentice-Hall ,1987
5. Rokosh Das Begamudre , **Electro-Mechanical Energy Conversion with Dynamics of  
Machines** , Wiley Estern Limited ,1988
6. GR. Stemon A.Straughen ,**Electrical Machines** , Addison-Wesley Publishing , USA ,1980
7. George McPherson , **An Introduction to Electrical Machines And Transformers** , John Wiley  
Son , Singapore ,1981
8. J. Duncan , **Linear Induction Motor-Equivalent Circuit model** ,IEEE PROC B ,Vol.130 ,No.1 ,  
January 1983

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของท่านต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อาจารย์ พิเชิต ล้ายอง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาทางด้านวิชาการต่างๆ

2. อาจารย์ วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ให้ความช่วยเหลือในการทำแทนทดสอบ

3. อาจารย์ ดำวิทย์ จันทร์แสงสุก

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ให้ความช่วยเหลือในการทำแทนทดสอบ

4. อาจารย์ อานันท์วัฒน์ คุณากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจ ในฐานะรุ่นพี่กับรุ่นน้อง

5. นาย มณฑา เทียมเมือง

เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล แนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือเจาะร่อง slot ของ stator

6. เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล ให้ความช่วยเหลือในการทำ  
แทนทดสอบและอุปกรณ์ทดลอง

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้