



ลิเนียร์มอเตอร์
LINEAR MOTOR



โดย
นายกำปนาท มโนรัตน์
นายคำนวณ ค้วงมุก
นายจรูญ คะตะวงค์
นายธัชยา เอ็นอารมย์

วัน เดือน ปี ๑๑ ก.ค. ๒๕๔๐
เลขทะเบียน.....๐๓๗๐๕๕
เลขเรียกหนังสือ.....ท ๑๖๑๘ ก๓๑๓ ค

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๓๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้นี้

037055

ปีการศึกษา 2538

ฉิเนียร์มอเตอร์

LINEAR MOTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ประภาส ไพรสุวรรณ

ดร.ชัยวุฒิ นัครอุทัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ติเนียร์มอเตอร์

ผู้จัดทำ



นายกัมปนาท มโนรัตน์

นายค่านวน ค้วงสุค

นายจรูญ คะตะวงค์

นายธรรยา เข็นอารมย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ประภาพร ไทรสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ชัยวุฒิ จิตรฤทัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 หลักการทั่วไปเกี่ยวกับลิเนียร์มอเตอร์	5
2.1 ความแตกต่างพื้นฐานระหว่าง LIM และ เครื่องกลแบบโรตารี	6
2.2 การแยกประเภทของลิเนียร์มอเตอร์ตามหลักกว้างๆ	8
2.3 ลักษณะการใช้งานของ LIM	13
บทที่ 3 กฎเกณฑ์และทฤษฎีการวิเคราะห์ลิเนียร์อินคักชันมอเตอร์	15
3.1 กฎเกณฑ์สำหรับคุณสมบัติของ LIM	15
3.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็ก	16
3.3 การพิจารณาตามหลักความเป็นจริง	22
3.4 วงจรสมมูลย์ของ LIM	31
บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาปรับปรุง	34
4.1 การออกแบบและสร้างชุดทริกกระแสสลับ 3 เฟสแบบโซลิตสเททรีเลย์	34
4.2 การออกแบบตัวราง	41
4.3 การออกแบบตัวรถหรือตัวโรเตอร์	45
บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ	47
5.1 การทดสอบการลยตัวของตัวรถ	47
5.2 การทดสอบการออกตัวของตัวรถ	48
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์	50
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

ลิเนียร์มอเตอร์

นายกำปนาท มโนรัตน์

นายค่านวณ ค้วงหุด

นายจรูญ คะตะวงค์

นายอชชา เย็นอารมย์

ผศ.ประภาส ไพรสวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ชัชวดี ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับการทำโครงการเรื่อง“ลิเนียร์มอเตอร์”โดยทำการพัฒนาและปรับปรุงต่อเนื่องจากโครงการเรื่อง“เครื่องกลไฟฟ้าแนวระนาบ” ปีการศึกษา 2537 ซึ่งได้ดำเนินงานไว้ในขั้นตอนหนึ่ง เพื่อให้มีการพัฒนาเพิ่มเติมให้บรรลุผลสำเร็จในขั้นตอนต่อไป สำหรับการทำให้โครงการในครั้งนี้ ได้อาศัยหลักการทำงานของลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์แบบค้ำเคียว (SLIM) มาจำลองเป็นรถไฟฟ้าขนาดเล็กเคลื่อนที่โดยรอบอยู่บนรางลักษณะวงกลมความยาวเฉลี่ย 16 เมตร โดยมีขดลวดสเตเตอร์อยู่กับที่ ต่อวงจรแบบเคดต้าทั้งหมด 16 ชุด แต่ละชุดจะวางเรียงกันในแนวราบยาวชุดละ 1 เมตร แล้วนำขดลวดเหล่านี้มาวางกระจายอยู่ด้านล่างโดยรอบตามแนวราง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่องในแนวเส้นตรงตามแนวรางได้ ส่วนโรเตอร์นั้นจะใช้เป็นตัวเคลื่อนที่อยู่บนราง โดยมียานพาหนะเป็นรถไฟฟ้าจำลองติดบนโรเตอร์อีกทีหนึ่ง การควบคุมจะอาศัยการส่งงานจากคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส ออกไปสู่ภาคขยายสัญญาณก่อนที่จะนำไปจับชุดโซลิตสเตทรีเลย์ เพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz ให้กับขดลวดสเตเตอร์เฉพาะในช่วงที่โรเตอร์เคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้านั่นเอง ขอบเขตหลักๆของการดำเนินงานในครั้งนี้ได้แก่ การออกแบบและพัฒนาชุดควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบโซลิตสเตทรีเลย์ การพัฒนาปรับปรุงระบบรางและตัวโรเตอร์ ตลอดจนการพัฒนาปรับปรุงคำสั่งควบคุมบางส่วนเพื่อแก้ปัญหาบางประการและเพิ่มเงื่อนไขการควบคุมที่ดีขึ้นสาระสำคัญของโครงการนี้ มีความน่าสนใจตรงที่ การประยุกต์ใช้งานขับเคลื่อนยานพาหนะจำลองให้เคลื่อนที่ได้อย่างลิเนียร์และรวดเร็วสามารถควบคุมได้ง่าย และมีความน่าเชื่อถือสูง

Linear Motor

Kampanart Manorat

Kummuan Duangput

Jaroon Katawong

Atthaya Yenarom

Assc.Prof. Prapas Praisuwantha Advisor

Dr.Chaiwut Chatuthai Advisor

1996

Abstract

This thesis is to presentation detailed about the “Linear Motor” project, which having to improvement and development continuity from the later “Linear Machine” project since 1995, that has been succeed for the first one of procedure, and still required to be a completely development on the next step. For this project , we based on the principle of “Single Sided Linear Induction Motor” and modeled it into a small electric train to moving above the track. So the track is lain over the the stator which configuration as a circle for 16 meter of the meanlength. Stator windings are fixed part lay adjacent on the horizontal plane for 1 meter long each other sets, and then, bring them to provide a loop in order to produce travelling wave continuity along with the track. Whereas rotor is the moving part consist of an aluminum plate, therefor, we could attached a vehicle on the rotor one. For the case of cotrol can be carried out by using a PC in order to send out controlled command to an ac power triggering unit 3-phase 50 Hz namely a solid state relay for suplies ac power to stator windings, so that is the most essentially where the rotor being move pass them, because of a benefitly and economically power consume. The mainly of this thesis is to presents about the designing and development in the part of a 3-phase ac power control unit, the designing and development in a part of track and rotor, and some improvement of controlled program to be adding the better condition for a control. The most essentially interesting of this project is the attempt to aplication for moving a small vehicle to provides a linear and fast motion , easy to control and more reliability.

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การกระจายกระแสด้านเซคคัน์ดารี	3
รูปที่ 1.2 การกระจายความเข้มฟลักซ์ที่ความเร็วสูงๆ	3
รูปที่ 2.1 flat LIM (a) DLIM ; (b) SLIM	7
รูปที่ 2.2 tubular LIM	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะการใช้งาน SLIM และสรุปคำอธิบายประกอบภาพ	8
รูปที่ 2.4 รูปแบบของมอเตอร์แบบฟลักต์คขวาง	9
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการแยกประเภทต่างๆของลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์	10
รูปที่ 2.6 ลักษณะการกระตุ้นสนามแม่เหล็กแบบเดิม	11
รูปที่ 2.7 LSM อีกชนิดหนึ่งแบบ LRM	11
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงบทสรุปการแยกประเภทต่างๆของ LSM	11
รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงบทสรุปการแยกประเภทต่างๆของ LLM	12
รูปที่ 3.1 รูปแบบของ LIM ทางอุดมคติเมื่อความหนาแน่นด้านเซคคัน์ดารีเป็นอนันต์	16
รูปที่ 3.2 LIM ทางอุดมคติซึ่งด้านเซคคัน์ดารีมีความหนาแน่นจำกัด	18
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลากและสติปของ LIM	18
รูปที่ 3.4 การแปรเปลี่ยนของแอร์แก๊ปค่าใช้งานสำหรับ LIM ที่มีแอร์แก๊ปมาก มีผลต่อแอร์แก๊ปรั่วไหล	19
รูปที่ 3.5 การแยกฮาร์โมนิกส์และพินคาเมนทอลของสมมูลย์กระแสเชิงแผ่น	20
รูปที่ 3.6 การแทนกระแสเชิงแผ่น j' และ j' เมื่อสมมติว่าไม่มีความเร็วสัมพันธ์ ระหว่างไพรมารีและเซคคัน์ดารี	20
รูปที่ 3.7 การกระจายความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กทางเซคคัน์ดารี	23
รูปที่ 3.8 ผลกระทบเชิงผิวของเพลททางเซคคัน์ดารีซึ่งมีแกนเหล็กทางอุดมคติอยู่ด้านหลัง	24
รูปที่ 3.9 แบบแผนผลลัพท์ของกระแส	25
รูปที่ 3.10 ผลลัพท์การกระจายสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ปในแนวขวาง	25
รูปที่ 3.11 ผลที่ได้จากการพล็อตสมการที่ (49)	30
รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลย์ของ LIM ตามแบบเดิม	31
รูปที่ 3.13 คุณสมบัติที่คำนวณได้จากวงจรสมมูลย์ของ LIM	33
รูปที่ 4.1 วงจรโซลิตสเทรีเลข 3 เฟส 380 โวลต์ 50 Hz	36
รูปที่ 4.2 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันและกระแสเมื่อเป็นโหลด R และ L	37

รูปที่ 4.3 ลักษณะการหน่วง dv/dt ที่เป็น unit step	38
รูปที่ 4.4 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่แคมบิงแพคเตอร์ค่าต่างๆ	41
รูปที่ 4.5 การหาค่าแพคเตอร์เทียบเคียงระหว่าง V_{pk} และ dv/dt	41
รูปที่ 4.6 วงจรการคอินเตอร์เฟส	42
รูปที่ 4.7 ลักษณะตัวรางเคิม	43
รูปที่ 4.8 ลักษณะของที่พัฒนาปรับปรุง	45
รูปที่ 4.9 ระบบการประคองตัวรอดตัวรอด	47
รูปที่ 4.10 ลักษณะรูปร่างของตัวรอด	48
รูปที่ 5.1 ลักษณะการต่อขดลวด	49



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 สรุปพิกัดคุณสมบัติโดยรวมของ LIM	14
ตาราง 5.1 ผลการทดสอบการลอยตัวของโรเตอร์	50
ตาราง 5.2 ผลการทดสอบการออกตัวของโรเตอร์ 1 ชุด	50
ตาราง 5.3 ผลการทดสอบการออกตัวของโรเตอร์ 2 ชุด	50
ตาราง 5.4 ผลการทดสอบการออกตัวของโรเตอร์ 3 ชุด	51



บทที่ 1

บทนำ

ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของลิเนียร์มอเตอร์นั้นจะมีความซับซ้อนมากกว่าเครื่องกลแบบหมุนรอบตัวๆไป ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นผลกระทบชั่วขณะอันเนื่องมาจากความไม่ต่อเนื่องตามทิศทางการเคลื่อนที่ ขณะเดียวกันผลกระทบจากส่วนปลาย (end effect) ก็ทำให้เกิดปัญหายุ่งยากตามมาเสมอ เนื่องจากการขยายตัวนำด้านเซกชั่นคาร์รี่อื่นเลขออกไปเกินขอบเขตของส่วนปลายนั่นเอง

ดังนั้นการวิเคราะห์ตามทฤษฎีในขั้นต้นนั้น จะอาศัยแบบจำลองทางอุดมคติซึ่งผลกระทบส่วนปลายด้านใดด้านหนึ่งหรือมากกว่าจะถูกละทิ้งไป ผลที่ตามมาก็คือจะนำไปสู่ความผิดพลาดในการคาดการณ์ทางคุณสมบัติของเครื่องกล ความผิดพลาดนี้อาจจะยอมรับได้ในกรณีการออกแบบเครื่องกลเล็กๆซึ่งมีการสูญเสียประสิทธิภาพไปเพียง 5 % แทบไม่ต้องคำนึงถึงเลย แต่ในเครื่องกลขนาดใหญ่ๆจะต้องนำมาพิจารณาด้วย เช่น ในการนำมาใช้งานเกี่ยวกับระบบขนส่งมวลชนความเร็วสูง ถ้าหากมีความไม่แน่นอนในการออกแบบตามหลักทฤษฎีแล้วอาจจะนำไปสู่การสูญเสียเวลาและเงินตราโดยเปล่าประโยชน์

ในด้านวิศวกรรมหลายๆสาขา ปัญหาต่างๆอาจจะไม่สามารถแก้ไขได้เพียงพอโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีอย่างเดียว แต่มักจะแก้ไขด้วยเทคนิคของการจำลองขนาดควบคู่กันไป

ในด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จอห์น ซอพคินตัน เป็นคนแรกที่ได้นำวิธีการดังกล่าวมาใช้ ซึ่งต่อมาจึงได้มีการนำเอาวิธีการจำลองรูปแบบมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการศึกษาปัญหาทางระบบไฟฟ้าและอินคักชันมอเตอร์

ในการกำหนดสัดส่วน (scaling) ของเครื่องกลไฟฟ้าสามารถพิจารณาด้วยวิธีการพื้นฐาน 2 วิธีคือ

- a) การกำหนดสัดส่วนเป็นวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า
- b) การกำหนดสัดส่วนเป็นวงจรแม่เหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ลิเนียร์อินคักชันมอเตอร์ (LIM) ซึ่งประสบความสำเร็จในการใช้งานทางอุตสาหกรรม การวิเคราะห์เมื่อก่อนนั้นจะอาศัยเทคนิคทฤษฎีสนามแม่เหล็กเข้ามาช่วย สมการของแมกซ์เวลล์ถูกนำมาใช้สำหรับแอร์เก็บตามสภาวะขอบเขตที่เหมาะสม และคุณสมบัติที่ได้ก็จะเป็นไปตามสมการแบบปิด วิธีทฤษฎีสนามแม่เหล็กจะให้ผลออกมาเป็นวงจรสมมูลย์ต่อเฟสที่สภาวะคงที่ (steady-state per phase) ซึ่งผู้ออกแบบส่วนใหญ่จะคุ้นเคยเป็นอย่างดี ปัจจุบันนี้วิธีการจำกัดองค์ประกอบมูลฐานทำให้เกิดผลประโยชน์ที่ดี แต่วิธีนี้จะเสียค่าใช้จ่ายแพงในด้านซอฟต์แวร์ สูญเสียเวลาบ้างเป็นธรรมดา และโดยทั่วไปจะให้ผลลัพธ์เฉพาะที่สภาวะเข้าที่แล้ว ส่วนเทคนิคทฤษฎีวง

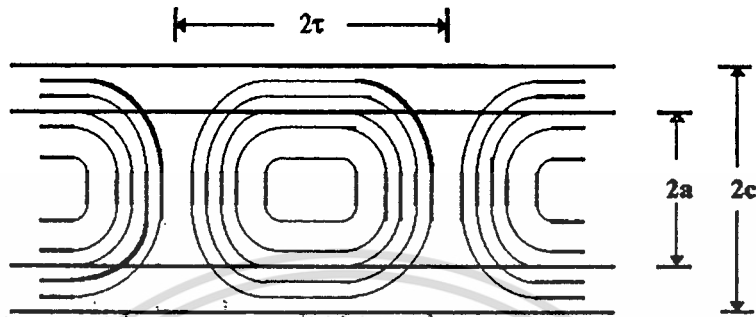
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จรจะวิเคราะห์มอเตอร์ตามส่วนคลยพินิจเพื่อหาความสัมพันธ์โวลต์-แอมป์ที่ขั้วเทอร์มินัล วิธีการนี้ก็สามารถที่จะคาดการณ์ที่สภาวะเข้าที่แล้วได้เช่นเดียวกับที่สภาวะชั่วขณะ

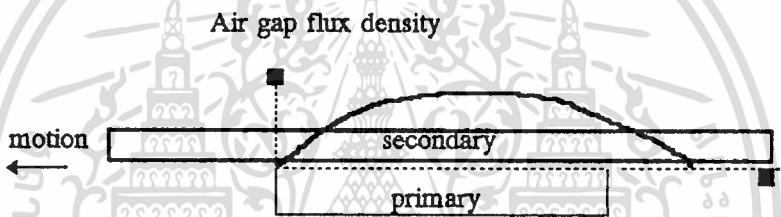
ในการตัดสินใจจะอาศัยวิธีการโดยรวมทั้งสามนี้คือใช้วิธีทฤษฎีของสนามไฟฟ้าในขั้นตอนแรกของการออกแบบเพิ่มความละเอียดในการออกแบบโดยวิธีจำกัดส่วนประกอบพื้นฐานหาค่าคุณสมบัติของระบบทั้งหมดโดยการใช้วิธีทฤษฎีวงจรและขั้นตอนสุดท้ายทำการกลั่นกรองอย่างละเอียดซ้ำๆ จนกระทั่งคุณสมบัติเป้าหมายที่ออกมา นั้นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับวิธีการ ออกแบบทางอุดมคติ

ลิเนียร์อินดักชั่นมอเตอร์จะมีคุณสมบัติตามผลกระทบจากขอบแนวขวาง(transverse-edge effect) และคุณสมบัติผลกระทบจากส่วนปลายตามแนวยาว (longitudinal-end effect) ดังรูปที่ 1.1 แสดงรูปแบบการกระจายของกระแสทางเซคชั่นคาร์รี่ สำหรับ LIM ในขณะที่ทิศทางที่กระแสด้านเซคชั่นคาร์รี่ตามปกติจะอยู่ในแนวขวาง เพื่อที่จะทำให้เกิดการตั้งฉากซึ่งกันและกันระหว่างกระแสเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดฟลักซ์กับทิศทางเคลื่อนที่ของตัวนำ กระแสไหลกลับจะไม่แสดงให้เห็นในขณะที่มีการตั้งฉากซึ่งกันและกัน ผลจากส่วนนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียจากความต้านทานตามขอบขวาง โดยไม่ได้นำไปใช้สร้างแรงผลักแต่ประการใดเลย ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจึงอยู่ในรูปของผลกระทบจากขอบขวาง ในส่วนของอินดักชั่นมอเตอร์แบบหมุนรอบ ขอบจะบรรจบถึงกันด้วยโรเตอร์ทรงกลม ในขณะที่ในลิเนียร์มอเตอร์จะไม่ต่อถึงกัน ด้านไพรมารีของ LIM จะมีปลายด้านเข้า (entry-end) เมื่อมีวัตถุด้านเซคชั่นคาร์รี่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแอกทีฟโซนใหม่ของไพรมารีอย่างต่อเนื่อง และจะมีปลายทางออก (exit-end) เมื่อวัตถุด้านเซคชั่นคาร์รี่เคลื่อนที่ออกจากแอกทีฟโซนอย่างต่อเนื่อง โดยกฎของเลนซ์จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นมาในวัตถุใหม่ที่กำลังเคลื่อนที่เข้าสู่ไพรมารีที่ขอบด้านเข้า และสร้างฟลักซ์สวนต่อต้านกับฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากแอร์แก๊ป ในทำนองเดียวกัน ที่ขอบทางออกวัตถุด้านเซคชั่นคาร์รี่ที่กำลังเคลื่อนที่ออกจากไพรมารีจะหน่วงเหนี่ยวให้แอร์แก๊ปฟลักซ์ตกลงไป ผลลัพธ์นี้จะเห็นการกระจายของแอร์แก๊ปซึ่งจะมีลักษณะลาดเอียง ดังรูปที่ 1.2 ผลกระทบจากการเลือกรูปการกระจายโดยจะทำให้เกิดแรงผลักได้น้อยลง หรือไม่มีแรงจุดเกิดขึ้นที่ขั้วแม่เหล็ก 2-3 ขั้วแรกที่ปลายด้านเข้าเลยและจะเกิดแรงต้านแรงผลักที่ส่วนปลายด้านออก ที่ความเร็วต่ำๆการกระจายความหนาแน่นของแอร์แก๊ปฟลักซ์ค่อนข้างสม่ำเสมอภายใต้ไพรมารี อย่างไรก็ตามที่ความเร็วสูงๆ ผลจากส่วนปลายตามแนวยาวจะแสดงคุณสมบัติออกมาให้เห็นได้เด่นชัดมากกว่า โดยทำให้แรงผลักที่สร้างขึ้นมามีค่าลดลงไป และทำให้เกิดแรงผลักรวมกันแล้วไม่เป็นศูนย์ที่ความเร็วเชิงโรตัส เมื่อเทียบกับมอเตอร์แบบโรตารี โดยทั่วไปแล้ว ผลลัพธ์ตามทฤษฎีจะไม่เป็นแบบปิด (closeform) นั่นคือ

จะต้องมีองค์ประกอบความถูกต้อง (correction factor) มาแก้ไขผลกระทบเหล่านี้ เพื่อให้ได้ตรงตามคุณสมบัติของมอเตอร์ที่สัมพันธ์กัน



รูป 1.1 การกระจายกระแสด้านเซคชั่นคาร์



รูป 1.2 การกระจายความเข้มฟลักซ์ที่ความเร็วสูงๆ

จากหลักการพื้นฐานที่แน่นอนอย่างใดอย่างหนึ่ง สามารถประยุกต์ใช้งาน ก่อให้เกิดประโยชน์มากมายตามปรากฏการณ์ต่างๆ ในสื่อกลางอื่นๆแตกต่างกันไป ยกตัวอย่าง เช่นการสมมูลย์ตามกฎของโอห์ม อาจนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวงจรทางแม่เหล็ก วงจรทางอุณหภูมิจึงหรือวงจรทางไฮดรอลิก ทฤษฎีทางอินดักชันมอเตอร์โดยทั่วไปก็จะสื่อผ่านออกมาด้วยหลักการของสนามแม่เหล็กหมุน กล่าวคือเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับตัวนำ จะเกิดการเหนี่ยวนำ e.m.f ขึ้นและก่อให้เกิดกระแสไหลในตัวนำได้ แต่จะได้ว่า กระแสส่วนนี้จะเกิดปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กเพื่อสร้างแรงบิดขึ้นมา ถ้าจะอธิบายกันจริงๆแล้วจะต้องอาศัยหลักการของ electric power drive โดยใช้ทฤษฎีของอินดักชันมอเตอร์ทำซ้ำๆกัน ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่ยากต่อการทำความเข้าใจสำหรับผู้ที่มีพื้นฐานทางด้านนี้น้อย อย่างไรก็ตาม ยกตัวอย่างเช่น การลอยตัวได้ของแม่เหล็กรูปเกือบม้าเหนือจานทองแดงและหมุนไปได้นั้น สามารถมองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก เหมือนกับของเหลวเหนียว การหมุนได้ของแม่เหล็กก็เปรียบได้กับธรรมชาติของการเคลื่อนที่อาจจะถ่วงหรือช้ากว่าส่วนการขับเคลื่อน

สำหรับการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อศึกษาการทำงานของลิเนียร์มอเตอร์โดยได้จำลองระบบการทำงานเป็นรถไฟฟ้าขนาดเล็ก อาศัยหลักการทำงานแบบลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ชนิดฟเลตตซิงเกิลไซค์ (Flat SLIM) ซึ่งมีจุดเด่นอยู่ตรงที่สามารถเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงได้อย่างอิสระและรวดเร็ว มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าพวกมอเตอร์แบบโรตารี เนื่องจากในขณะที่เคลื่อนที่จะลอยตัวบนอากาศจึงไม่มีส่วนใดสัมผัสกันทางกลเลย

ลิเนียร์มอเตอร์ขนาดใหญ่ๆมักจะนำมาใช้ในระบบขนส่งมวลชนที่ความเร็วสูงมากกว่า 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป ดังจะเห็นได้จากการใช้งานในประเทศอิมหาอำนาจทั้งหลาย ซึ่งเขาได้มีการศึกษาและพัฒนากันอย่างจริงจังๆ และสามารถใช้งานได้มาเป็นเวลาช้านาน ในขณะที่ประเทศไทยที่จะเริ่มสนใจกันเป็นทางการชั่วระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาเอง

จากการศึกษาลิเนียร์มอเตอร์พบว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง และน่าจะมีบทบาทที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานต่างๆในอนาคต เพราะว่าขีดความสามารถในการทำงานของลิเนียร์มอเตอร์ไม่ได้ยึดติดอยู่ที่การใช้งานอย่างใดอย่างหนึ่งหากแต่สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ทั้งนี้จะต้องได้รับการพิจารณาถึงข้อดีข้อเสียอย่างถูกต้องตามหลักเหตุผล ดังนั้นตามปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พยายามชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีเด่นต่างๆของลิเนียร์มอเตอร์ทั้งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองและข้อมูลอื่นๆใกล้เคียงกันที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทำความเข้าใจ แม้กระนั้น ยังได้นำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับระบบไฮสปีดเทรนของต่างประเทศที่สำคัญๆ และระบบไฮสปีดเทรนในประเทศไทยซึ่งจะได้เริ่มนำเข้าไปในแผนพัฒนาเศรษฐกิจฉบับที่ 8 ซึ่งนับว่าเป็นผลคืออย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ

บทที่ 2

หลักการทั่วไปเกี่ยวกับลิเนียร์มอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าทั่วไปจะสร้างให้มีการเคลื่อนที่หมุนเป็นวงกลม (rotary) ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าแบบลิเนียร์ จะสร้างให้เคลื่อนที่อย่างลิเนียร์หรือเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ถ้าเราลองสำรวจทั่วไป จะพบว่ามีการนำเอามอเตอร์แบบโรตารีมาใช้ในการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงอยู่มากมาย เช่นใช้ในการเลื่อนลูกบิดเพื่อทำเป็นตัวปิด-เปิดประตู หรือในเครนเหนือหัว มอเตอร์แบบโรตารียังมีการนำไปใช้ทำการเคลื่อนที่เป็นลูกสูบ (เดินหน้าและย้อนหลังกลับไปกลับมาตลอดเวลา) เช่นในเครื่องไวเบรเตอร์ หรือคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ ทั้งนี้ต้องอาศัยพวกเกียร์, วอร์มสกรู และอุปกรณ์ทางกลอื่นๆเข้ามาช่วยในการเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนที่แบบเส้นรอบวงให้เคลื่อนที่แบบเส้นตรงหรือลิเนียร์ แต่ถ้าเป็นการใช้ลิเนียร์มอเตอร์ในการทำงานแนวเส้นตรงแล้ว สามารถตัดปัญหาเกี่ยวกับระบบเกียร์และอุปกรณ์ทางกลทั้งหลายออกไป แต่ยังมีข้อดีเข้าอีกเกี่ยวกับความเงียบและความน่าเชื่อถือสูง

ลิเนียร์มอเตอร์ไม่ใช่จะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดเสมอไปสำหรับการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงทุกอย่าง ถึงแม้ว่า จะมีอายุเก่าแก่เกือบศตวรรษก็ตาม ลิเนียร์มอเตอร์ยังคงอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาอย่างช้าๆในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เหตุผลประการหนึ่ง เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาระหว่างการประดิษฐ์คิดค้นนานมาก และการพัฒนาลิเนียร์มอเตอร์นั้นจะพบว่าจะมีลักษณะประจำตัวคือมีแอร์แก๊ปมาก และประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นโดยภาพรวมๆจึงอาจเข้าใจว่าไม่ค่อยดีนัก ถึงแม้ว่าลิเนียร์มอเตอร์ยังคงมีแอร์แก๊ปมาก และประสิทธิภาพต่ำก็จริง แต่ยังมีข้อดีในแง่ของความเงียบกว่าและมีความน่าเชื่อถือดีกว่าการใช้มอเตอร์แบบโรตารีมาสร้างเป็นการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง และยังมีค่าใช้จ่ายค่าอีกด้วย สำหรับการใช้งานเฉพาะบางอย่างที่จำเป็นต้องคัดสินใจเลือกใช้ลิเนียร์มอเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเชิงเส้นตรง (LEM) ซึ่งอาศัยแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการสร้างการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง จากหลักการดังกล่าว จะเห็นว่า LEM มีลักษณะการทำงานเป็นส่วนหนึ่งของมอเตอร์แบบโรตารีทุกชนิดแต่ก็มีเพียงลิเนียร์อินคัคชั่นมอเตอร์ ลิเนียร์จิงโครนัสมอเตอร์ รวมทั้งลิเนียร์สเต็ปเปอร์มอเตอร์เท่านั้นที่ยังคงมีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

เมื่อคุณลักษณะทางโครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้าถูกคัดแปลงขึ้นมาเช่นคั้งที่ทำการพัฒนาปรับปรุงในด้านของ LEM จากเครื่องกลแบบโรตารี คั้งนั้นเงื่อนไขการทำงานและกฎเกณฑ์ในการออกแบบสำหรับเครื่องกลตัวใหม่นี้ก็จะพิจารณาแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงทางวงจรมแม่เหล็กของเครื่องกล ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ใหม่ซึ่งไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ทั้งหมดตามทฤษฎีเดิม คั้งนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์จากแบบเดิม และในบางครั้งก็จะสามารถพัฒนาเป็นทฤษฎีใหม่ไปเลย

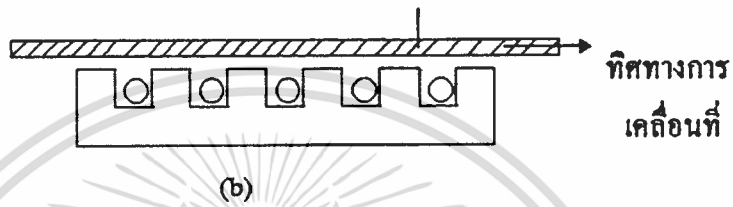
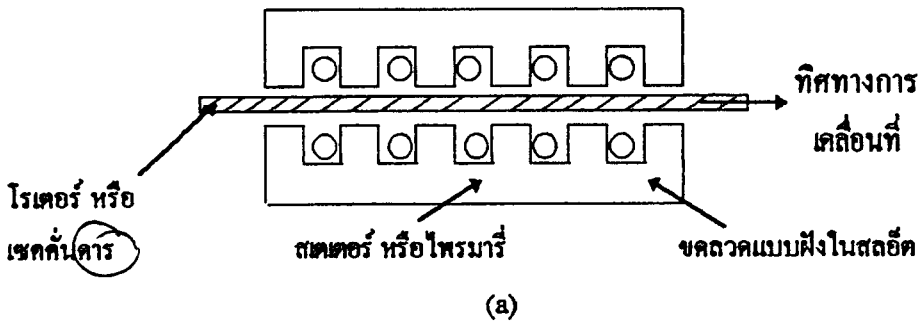
ด้วยการเคลื่อนที่แบบลิเนียร์ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง แรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวลิเนียร์มักจะเรียกว่า แรงผลักดัน (thrust , propulsion force หรือ traction force) ในทางกลับกันก็จะมีแรงอีกชุดหนึ่งที่อยู่ใต้วงเวียนกับทิศทางของแรงผลักดัน เรียกว่า แรงในแนวตั้งฉาก (normal force) ซึ่งเป็นข้อแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนอีกประการหนึ่งเมื่อเทียบกับเครื่องกลแบบโรตารีซึ่งไม่เกิดแรงนี้ขึ้น

2.1 ความแตกต่างพื้นฐานระหว่าง LIM และเครื่องกลแบบโรตารี

การอธิบายหลักการของอินดักชันมอเตอร์ที่สัมพันธ์กับลิเนียร์มอเตอร์ วิธีหนึ่งที่จะทำให้มองเห็นภาพพจน์ของลิเนียร์มอเตอร์ได้ก็คือ การผ่ามอเตอร์แบบโรตารี แล้วคลี่ออกด้านเดียว หรืออีกวิธีหนึ่ง โดยการผ่าครึ่งสเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์ออกเป็น 2 ส่วนแล้วคลี่ออกเราก็จะได้สเตเตอร์เป็นมอเตอร์แบนราบ 2 ด้าน (double side flat motor) ดังรูป 2.1 เมื่อเราวางแผ่นโลหะ (โรเตอร์) ที่อยู่ระหว่างครึ่งหนึ่งของสเตเตอร์ เราก็จะได้ลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์แบบด้านคู่ (double side linear induction motor : DSLIM) เมื่อเรานำสเตเตอร์ท่อนหนึ่งออกไปเราก็จะได้ลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์แบบด้านเดียว (single side LIM : SLIM)

เมื่อทำการผ่าแล้วคลี่สเตเตอร์ออก เราสามารถดัดแปลงลักษณะการต่อวงจรทางไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์ได้หลายวิธี ยกตัวอย่าง เช่น ดังรูป 2.2 เป็นผลที่ได้จากการผ่ามอเตอร์แล้วคลี่ออก จากนั้นทำการม้วนกลับในอีกทิศทางหนึ่ง เราก็จะได้รูปแบบของลิเนียร์มอเตอร์ชนิด tubular ซึ่งจะมีข้อแตกต่างออกไปสำหรับการต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก โดยที่ขดลวดของ tubular motor จะไม่มีจุดปลายการต่อภายนอก แต่จะต่อกันอยู่ภายใน เราจะใช้ลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์เป็นหลักในการอธิบายเพื่อชี้ให้เห็นความแตกต่างระหว่าง LIM และมอเตอร์แบบโรตารี ความแตกต่างหลักๆประการที่หนึ่งก็คือ จากหลักความเป็นจริงที่ว่า ลิเนียร์มอเตอร์มีจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุด (ส่วนปลาย) ตามทิศทางของการเคลื่อนที่ ในขณะที่โรตารีมอเตอร์ไม่มีคุณลักษณะเช่นนี้ก่อให้เกิดผลกระทบจากขอบ (end effect) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เป็นปฏิกิริยาต่อการทำงานของลิเนียร์มอเตอร์อย่างหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ในบางกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่ความเร็วต่ำๆ แล้ว อิทธิพลผลกระทบจากส่วนปลายนี้สามารถจะทิ้งได้

ข้อแตกต่างประการที่สองระหว่างลิเนียร์มอเตอร์กับโรตารีมอเตอร์ ซึ่งลิเนียร์มอเตอร์จะมีแอร์เก็บค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวที่เกิดจากการสร้างลิเนียร์มอเตอร์นั่นเอง ในขณะที่แอร์เก็บในโรตารีมอเตอร์จะต้องมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากจะทำให้เกิดวงจรแม่เหล็กที่ดี แอร์เก็บยิ่งมากยิ่งทำให้เกิดผลอันไม่พึงประสงค์กับคุณสมบัติของลิเนียร์มอเตอร์



รูปที่ 2.1 Flat LIM (a) DLIM , (b) SLIM



รูปที่ 2.2 Tubular LIM

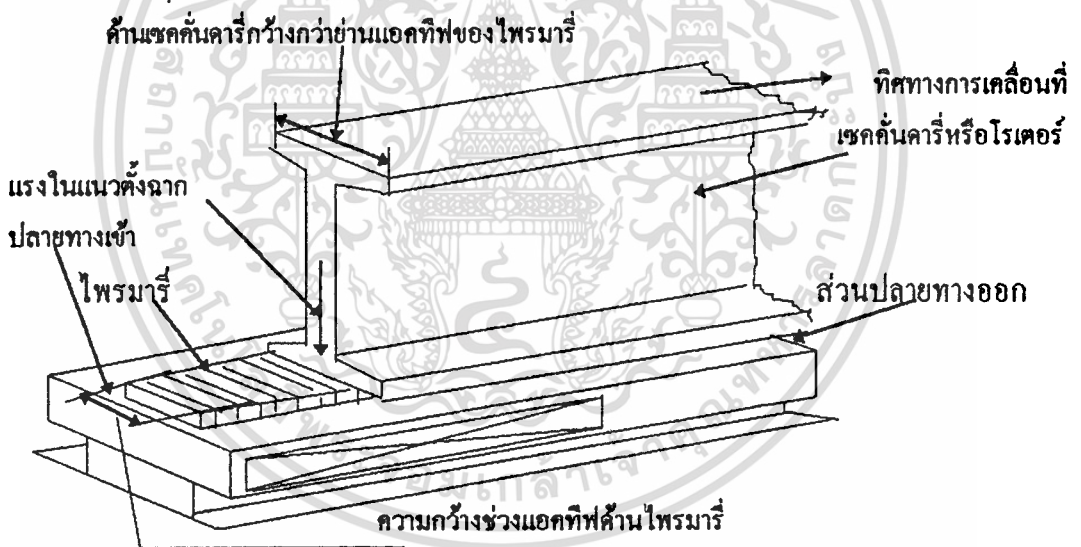
ข้อแตกต่างประการที่ 3 คือลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ส่วนใหญ่ จะไม่มีแท่งตัวนำหรือคอปต์ อยู่บนสมมุติทางไฟฟ้าของโรเตอร์ ตัวเคลื่อนที่ของอินดักชันมอเตอร์ส่วนใหญ่มักจะทำจากตัวนำตัน (solid) หรือแผ่นตัวนำอัดซ้อน (sheet)

คุณสมบัติของเซลล์คาร์หรือโรเตอร์ของลิเนียร์มอเตอร์ที่แตกต่างไปจากโรตาร์มอเตอร์โดยสิ้นเชิง ซึ่งโรเตอร์ของโรตาร์มอเตอร์จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงให้กว้างกว่าแกนเหล็กคานไพรมารี คุณสมบัติส่วนนี้จะเป็คุณสมบัติเห็นได้ชัดเจนของลิเนียร์มอเตอร์โดยเฉพาะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างยิ่งลิเนียร์อินดักชันมอเตอร์ ซึ่งจะส่งผลกระทบจากขอบแนวขวาง (transverse edge-effect) ซึ่งจะเป็นผลกระทบหลักต่อคุณสมบัติของลิเนียร์มอเตอร์

ข้อแตกต่างประการสุดท้ายคือ แรงดึงดูดกับแนวการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีในลิเนียร์มอเตอร์แบบด้านเดียว (single sided linear induction motor) หรือที่เรียกว่า normal force ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ทั้ง การคึงคูดหรือการผลัก แรงดึงดูดที่จะสมดุลย์เสมอในโรตารีมอเตอร์ เหนือขดลวดรอบๆแอร์เก็บ

รูปที่ 2.3 แสดงถึง SLIM ซึ่งเป็นตัวอย่างหนึ่งประยุกต์ใช้ในการเคลื่อนที่ท่อนโลหะ โดยแสดงคุณลักษณะสรุปการอธิบายคร่าวๆของลิเนียร์มอเตอร์ที่ผ่านมา โดยแสดงให้เห็นถึงส่วนปลาย "end" ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบจากส่วนปลาย(end effect)ขึ้นเป็นธรรมดาสำหรับการใช้งานที่แอร์เก็บค่อนข้างมาก ด้านเซคชั่นคาร์จะแสดงให้เห็นเป็นท่อนโลหะตัน และด้านเซคชั่นคาร์มีความกว้างมากกว่าแกนเหล็กด้านไพรมารีซึ่งจึงก่อให้เกิดผลกระทบจากขอบแนวขวางขึ้น และสิ่งสุดท้ายแสดงให้เห็นถึงแรงดึงดูดชนิดการคึงคูด



รูปที่ 2.3 ลักษณะการใช้งาน SLIM และสรุปคำอธิบายประกอบภาพ

2.2 การแยกประเภทของลิเนียร์มอเตอร์ตามหลักกว้างๆ

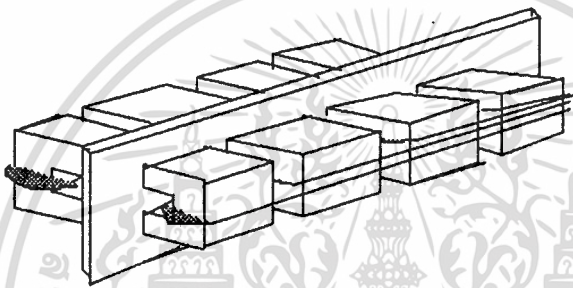
สามารถแยกตามประเภทของมอเตอร์แบบโรตารีได้ 3 ชนิดหลักๆคือ

2.2.1 ลิเนียร์มอเตอร์แบบมอเตอร์กระแสตรง (dc Linear Motor : DCLM) มีจุดที่แตกต่างไปจากมอเตอร์กระแสตรงทั่วไปคือ ในทางปฏิบัติแล้ว DCLM จะไม่นิยมใช้คอมมิวเตเตอร์ แต่จะใช้อุปกรณ์ควบคุมพวกโซลิดสเตต (solid-state controller) แทน

2.2.2 ลิเนียร์มอเตอร์แบบอินดักชันมอเตอร์ (Linear Induction Motor :LIM) สามารถ

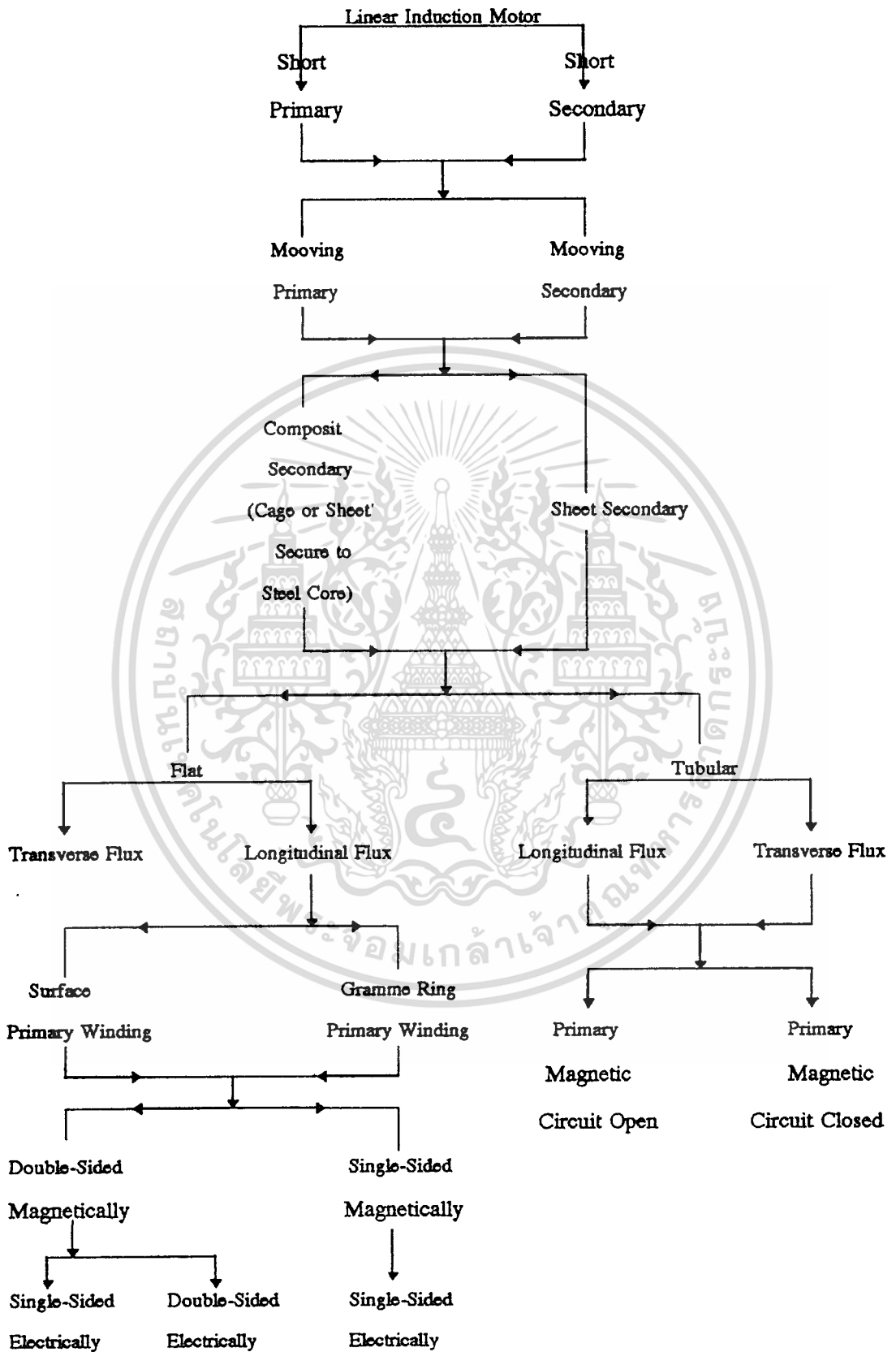
แยกการทำงานเป็นแบบ Flat LIM และ Tubular LIM ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ สำหรับ

รูปที่ 2.2 นั้น ฟลักแม่เหล็กไปทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของตัวนำซึ่งจะเรียกการทำงานประเภทนี้ว่า มอเตอร์แบบฟลักเคลื่อนที่ตามแนวยาว (Longitudinal Flux Motor) และหากมีการตัดแปลงวงจรแม่เหล็กให้ทางเดินของฟลักอยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำก็จะเรียกว่า มอเตอร์แบบฟลักตัดขวาง (Transverse Flux Motor) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการสร้าง LIM จริงๆแล้วสามารถสร้างได้มากกว่าร้อยชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ซึ่งพอสรุปการแยกย่อย LIM เป็นชนิดต่างๆได้ดังรูป 2.5

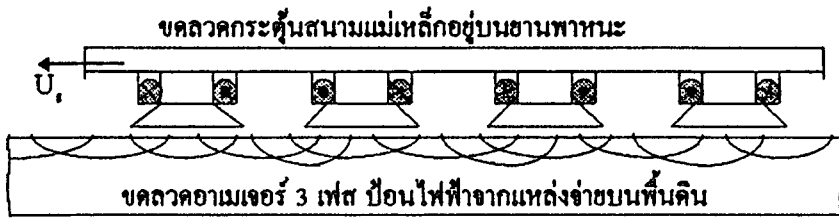


รูปที่ 2.4 รูปแบบของมอเตอร์แบบฟลักตัดขวาง

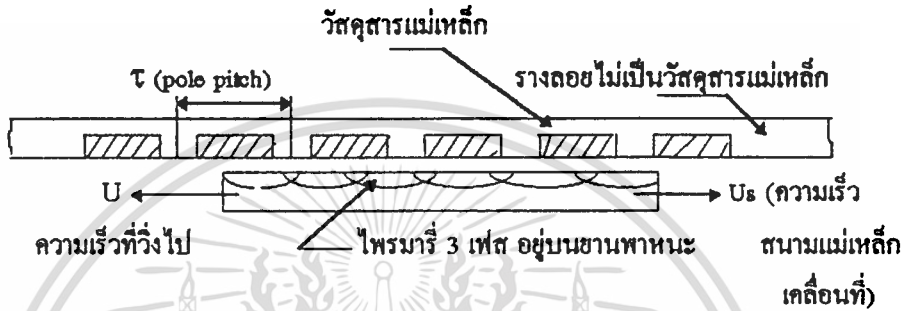
2.2.3 ลิเนียร์มอเตอร์แบบซิงโครนัสมอเตอร์ (Linear Synchronous Motor : LSM) มีหลักการทำงานคล้ายๆกับมอเตอร์แบบซิงโครนัส LSM ฟังจะโคจรเด่นขึ้นมาเพียงชั่วระยะเวลาไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมาเอง โดยจะใช้งานเป็นตัวขับเคลื่อนในระบบขนส่งมวลชนทางบกความเร็วสูง(High-Speed Ground Transportation : HSGT)โดยการกระตุ้นอาร์เมเจอร์ด้วยระบบโพลีเฟส (ปกติจะเป็น 3 เฟส) และการกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยระบบไฟกระแสตรง การกระตุ้นสนามแม่เหล็กอาจจะใช้วิธีการแบบคังเคิม (ดังรูปที่ 2.6) หรืออีกวิธีหนึ่งอาจจะมีขดลวดสนามแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Field Winding) ก็ได้ ข้อแตกต่างหลักๆสำหรับการทำงานก็คือ LSM สามารถทำได้ทั้งการใช้อาร์เมเจอร์เป็นตัวเคลื่อนที่ หรือขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวเคลื่อนที่ ซึ่งมีใช้ในทางปฏิบัติแทบเท่าทุกวันนี้ และการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของ LSM อาจจะใช้แม่เหล็กถาวรก็ได้ เช่นเดียวกับกับมอเตอร์แบบซิงโครนัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ไว้ว่าห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

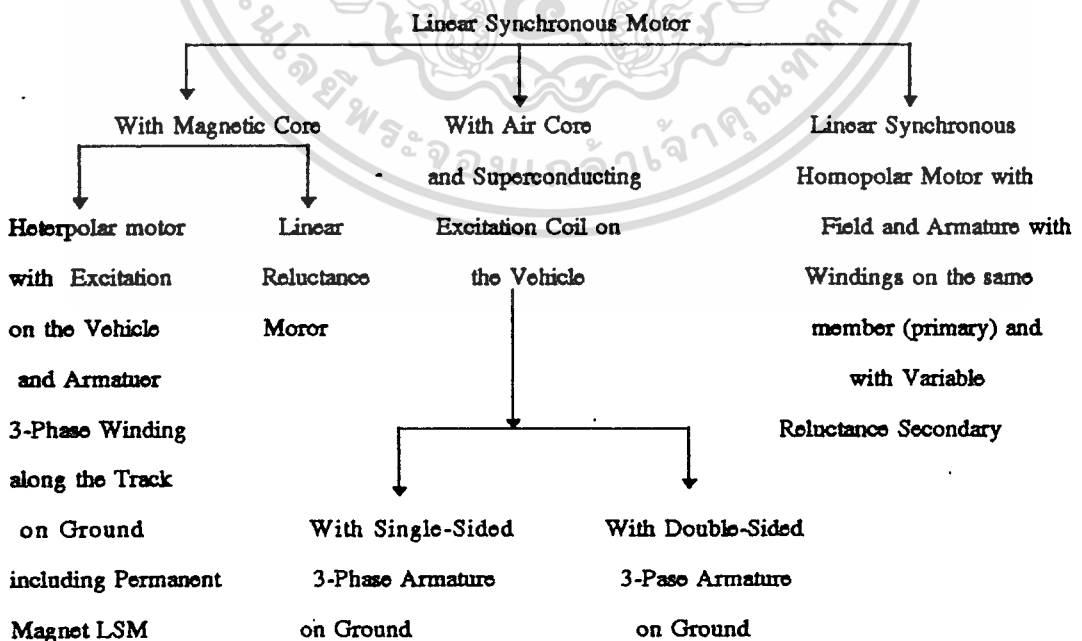


รูปที่ 2.6 ลักษณะของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กแบบเดิม

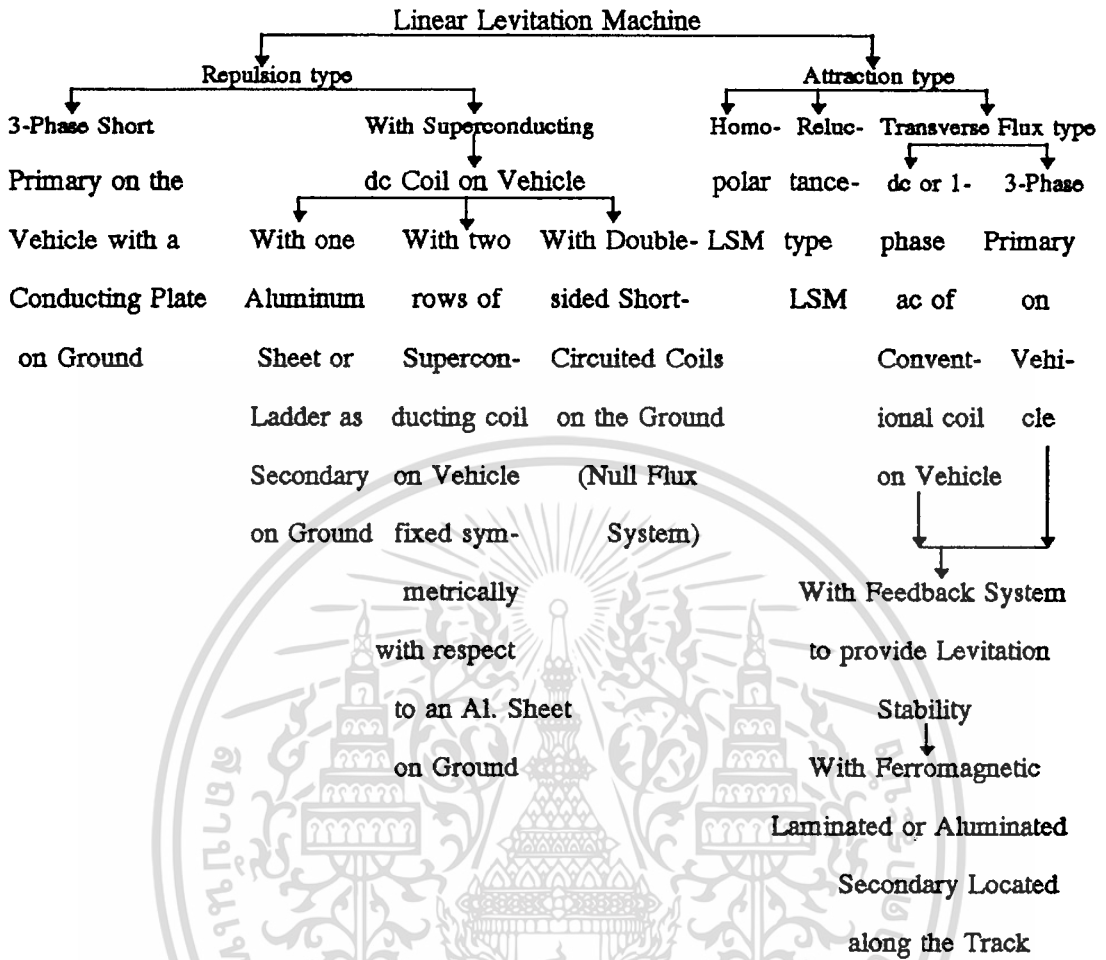


รูปที่ 2.7 LSM อีกชนิดหนึ่งแบบ LRM

LSM ยังสามารถแยกย่อยได้อีกหลายชนิด แต่มีอยู่ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจคือลิเนียร์มอเตอร์แบบรีลัคแตนซ์ (Linear Reluctance Motor : LRM) ดังรูปที่ 2.7 และ LRM เองก็สามารถแบ่งเป็นชนิดต่างได้อีกหลายชนิดดังแผนภาพสรุปการแบ่งชนิดของ LSM ดังรูปที่ 2.8 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าจะมีแรงในแนวตั้งฉากเกิดขึ้นใน LIM แต่สำหรับรูปที่ 2.9 จะเป็นแผนภาพแสดงการแยกประเภทของลิเนียร์มอเตอร์ที่ทำงานโดยอาศัยแรงตั้งฉากหรือที่เรียกว่า เครื่องกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงบทสรุปการแยกประเภทต่างๆของ LLM

แบบลิเนียร์ลิเวชัน (Linear Levitation Machine : LLM) ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับใช้ในกิจการขนส่งมวลชนทางบกความเร็วสูง (HSGT) โดยจำเป็นอย่างยิ่งที่ตัวยานพาหนะต้องไม่มีส่วนใดสัมผัสกับราง ดังนั้นการใช้งานในลักษณะลอยตัวของยานพาหนะส่วนใหญ่จึงนิยมใช้เครื่องกลแบบลิเวชัน แบตเตอรี่แม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของ LLM

สำหรับ LLM นี้ก็จะแยกเป็นเครื่องกลได้อีก 2 ประเภท ประกอบไปด้วยเครื่องกลชนิดแรงดึงดูดและชนิดแรงผลักดัน โดยทั่วไปแล้วเครื่องกลลิเวชันแบบแรงดึงดูดนี้จะมีคุณลักษณะประจำตัวที่ไม่เสถียรภายใต้สภาวะหนึ่ง แต่ก็สามารถทำให้เสถียรได้ โดยอาศัยการป้อนกลับแบบลบของค่าผิดพลาดระหว่างค่าแอมป์อ้างอิงกับค่าแอมป์ที่วัดได้จริงเพื่อคำนวณค่าการควบคุมสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเป็นไปได้ทั้งแบบกระแสตรงและกระแสสลับ

เครื่องกลลิเนียร์ลิวิตซ์ชนิดแรงผลักดันส่วนใหญ่แล้วจะเป็นพวกที่ทำงานด้วยการเหนี่ยวนำ หรืออาจจะเรียกว่าเครื่องกลลิวิตซ์แบบอินดักชันก็ได้ หลักการทำงานพื้นฐานคือเมื่อมีการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กอยู่ด้านบนของแผ่นตัวนำ กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำจะก่อให้เกิดแรงผลักดันกันระหว่างแม่เหล็กและแผ่นตัวนำ ในทางปฏิบัติ แม่เหล็กบางที่จะสร้างขึ้นจากแม่เหล็กไฟฟ้าตัวนำยิ่งยวด และแผ่นตัวนำก็จะใช้เป็นลักษณะโครงข่ายแลคเคอร์แทนที่เป็นซีท

2.3 ลักษณะการใช้งานของ LEM

ลิเนียร์มอเตอร์มีขีดความสามารถการใช้งานได้ไม่จำกัด LIM ส่วนใหญ่จะพบในใช้งานทางอุตสาหกรรมทั่วไป มีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ตลอดจนการใช้งานในระบบรถไฟความเร็วต่ำและความเร็วปานกลาง ส่วน LSM ยังคงมีอยู่ในระบบรถไฟความเร็วสูง “Bullet” ในประเทศญี่ปุ่น ลิเนียร์มอเตอร์มีข้อดีบางประการที่เหนือกว่ามอเตอร์แบบโรตารีทั่วไปพอสรุปได้ดังนี้

1. มีอัตราเร่งและอัตราลดความเร็วได้สูง ในขณะที่เพิ่มหรือลดอัตราเร็วไม่มีการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง
2. การป้องกันระบบทางกลและไฟฟ้า ตลอดจนความน่าเชื่อถือ ที่สามารถทนทานต่ออุปสรรคอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมได้ดีกว่า
3. ง่ายต่อการบำรุงรักษา การซ่อมแซม และการถอดเปลี่ยน
4. ความสามารถในการสร้างแรงผลักดันขึ้นบนเซคชั่นคาร์โดยปราศจากการสัมผัสทางกลจากส่วนใดๆ จึงง่ายต่อการควบคุมแรงผลักดันและความเร็ว
5. มีแรงในแนวตั้งฉาก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในเครื่องกลลิเนียร์แบบลิวิตซ์

ลิเนียร์มอเตอร์ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้ พอที่จะสามารถแบ่งประเภทการใช้งานของ LEM ออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้ดังนี้

ประเภทที่ 1 การใช้งานทางด้าน “Force Machine” หมายถึงเครื่องกลลิเนียร์ที่ใช้งานช่วงสั้นๆ (Short-duty Machine) จุดทำงานหลักอยู่ที่ความเร็วเข้าใกล้จุดหยุดนิ่ง (Stansstill) หรือในระบบโลว์สปีด ประสิทธิภาพไม่ใช่สิ่งสำคัญต่อการพิจารณาถึงคุณสมบัติโดยรวม ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องกลขนาดเล็ก โดยมากจะเป็นลิเนียร์มอเตอร์ชนิด SILM

ประเภทที่ 2 การใช้งานทางด้าน “Power Machine” มักจะทำงานที่ความเร็วมีเดียมหรือไฮสปีด และเป็นเครื่องกลที่ใช้งานต่อเนื่อง (Continuous-duty Machine) ซึ่งจะต้องมีประสิทธิภาพสูง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นลิเนียร์มอเตอร์ระบบแรงผลักดันและระบบลิวิตซ์สำหรับระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนส่งมวลขนทางบกความเร็วสูง (HSGT: มากกว่า 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป) ลิเนียร์มอเตอร์สำหรับใช้ในระบบ HSGT สามารถเป็นไปได้ทั้ง LIM และ LSM

ประเภทที่ 3 การใช้งานทางด้าน “Energy Machine” หมายถึงเครื่องกลที่ใช้งานในช่วงสั้นๆ ซึ่งจะพบเห็นในการใช้งานในลักษณะเป็นตัวเร่งความเร็วให้กับเครื่องอากาศยาน และในระบบการทดสอบแรงกระแทกของการผลิตรถยนต์

ตาราง 2.1 สรุปพิกัดของคุณสมบัติโดยรวมของ LEM

ชนิดของลิเนียร์มอเตอร์	ขนาดแรงผลักดัน	ความสามารถในการควบคุมประสิทธิภาพ		กำลังน้ำหนัก	ความน่าเชื่อถือ
		ความสามารถ	ประสิทธิภาพ		
DC Homopolar	ต่ำ	ดี	ต่ำ	สูง	ต่ำ
DC Brushless	ต่ำ	ยุ่งยาก	สูง	ต่ำ	สูง
LSM	สูง	ดี	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
LSHM	ปานกลาง	ดี	สูง	สูง	ปานกลาง
LSRM	ปานกลาง	ดี	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
DSLIM	สูง	ดี	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
SLIM	ปานกลาง	ดี	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กฎเกณฑ์และทฤษฎีการวิเคราะห์ลิเนียร์อินคัมพริบเบิล

ในช่วงกลางปี 1980 ลิเนียร์มอเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้งานที่ความเร็วต่ำ หรือ stand still ที่ความเร็วต่ำๆนี้ ผลกระทบเนื่องจากส่วนปลายตามแนวยาว (longitudinal end effect) สำหรับ LIM แล้วไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก และวงจรสมมูลย์ของลิเนียร์มอเตอร์แบบคั้งเดิมนั้นก็อาจนำมาใช้ ด้วยการดัดแปลงปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ให้ถูกต้องเสียก่อน สำหรับงานที่ใช้ความเร็วต่ำ ทั้ง flat LIM และ tubular LIM จะมีความเหมาะสมที่สุด แต่สำหรับการทำโครงการนี้มีความสนใจมุ่งเน้นศึกษาการทำงานและออกแบบโดยยึดหลักการของลิเนียร์มอเตอร์ชนิด flat LIM เป็นหลัก ดังนั้นทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ตลอดจนการออกแบบพอสังเขปมีดังต่อไปนี้

3.1 กฎเกณฑ์สำหรับคุณสมบัติของ LIM

กล่าวถึงอินคัมพริบเบิลมอเตอร์แบบโรตารีตามกฎเกณฑ์ต่างๆไป สามารถประเมินคุณภาพได้จาก ประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานและอัตราของ กำลังเอาต์พุต/น้ำหนัก สำหรับกฎเกณฑ์อื่นๆก็อาจจะพิจารณาเป็นอัตราส่วนของกำลัง/ต้นทุน หรืออาจกล่าวได้ว่า โดยทั่วไปแล้วเรามักจะตั้งเป้าหมายไปที่กำลังเอาต์พุต และจะพิจารณาขีดค่าออกมาเพื่อจะบอกถึงคุณภาพหรือ "goodness" ของเครื่องกลนั้นๆ เมื่อเครื่องกลรันด้วยความเร็ว n rpm (ตามความเร็วเชิงมุม $\omega_m = 2\pi n / 60$ rad/sec) เกิดแรงบิดที่แกนเพลาคือ T_m นิวตัน-เมตร จะได้กำลังเอาต์พุตคือ

$$P_o = T_m \omega_m \quad \text{watt} \quad (1)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเป็นลิเนียร์มอเตอร์ก็จะสร้างแรงดูดขึ้นที่จุดปลายของมันเท่ากับ F นิวตัน ในขณะที่วิ่งไปด้วยความเร็ว u m/s ก็จะทำกำลังเอาต์พุตได้คือ

$$P_o = F u \quad \text{watt} \quad (2)$$

เมื่อความเร็ว u ในสมการ (2) หรือ ω_m ในสมการ (1) เข้าใกล้ศูนย์ กำลังเอาต์พุตก็จะเข้าใกล้ศูนย์เช่นกัน จริงๆแล้วจุดนี้จะเรียกว่าจุด "standsstill" ซึ่งจะไม่มีการเอาต์พุตปรากฏออกมา จึงมีการทำลิเนียร์มอเตอร์ไปใช้งานมากมายที่ความเร็วต่ำมากๆเข้าใกล้จุด standsstill เช่นในลิเนียร์มอเตอร์ชนิดตัวกระตุ้น (actuators) หรือลิเนียร์มอเตอร์ชนิดสร้างแรง (force-producing LIM) ในกรณีเช่นนี้กฎเกณฑ์ที่เป็นประสิทธิภาพและอัตราส่วนกำลัง/น้ำหนัก จึงไม่ควรใช้เพื่อวัดหาคุณภาพของลิเนียร์มอเตอร์ สำหรับการใช้งานที่ standsstill และ low-speed จึงประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ แรง/น้ำหนัก, แรง/กำลังเอาต์พุต และ แรง/ต้นทุน

คุณลักษณะอีกประการหนึ่งในการใช้ LIM ที่ low-speed ก็คือผลเกี่ยวกับ end effect แต่จากการวิเคราะห์และการออกแบบ LIM ให้ทำงานที่ low-speed สามารถพิจารณาเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

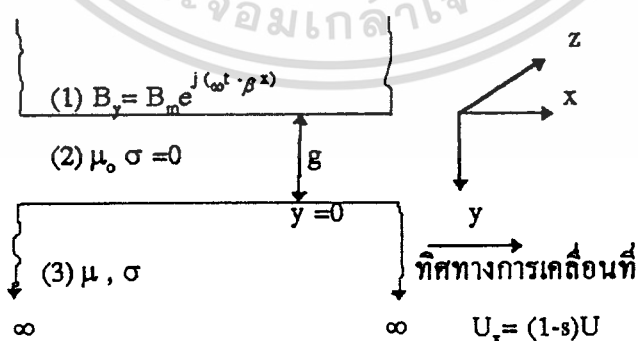
กับอีกวิธีหนึ่ง ที่ใช้งานที่ high-speed ได้ง่าย ๆ เมื่อปรากฏการณ์ end effect เป็นคุณลักษณะที่เกิดขึ้นประจำตัวของ LIM จากการเปรียบเทียบสามารถยึดเป็นหลักเกณฑ์ได้ว่า end effect ที่ low-speed มีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ แต่ที่ high-speed ต้องนำมาคิดเสมอ

3.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็ก

เราจำเป็นต้องหาวิธีการบางอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ LIM โดยขั้นแรกเราจะพิจารณา LIM มีลักษณะทางอุดมคติ ไม่คิดผลกระทบเนื่องจากส่วนปลาย จึงมองคล้ายๆกับเครื่องกลแบบโรตารี สมการไม่ยุ่งยากนัก หลังจากนั้นจึงหาสมการการใช้งานเทียบเท่าสำหรับ LIM ตามความเป็นจริง วิธีการวิเคราะห์ LIM ที่ใช้กันมาช้านาน ได้แก่ วิธีทฤษฎีการรวมพารามิเตอร์ทางวงจรไฟฟ้า (lumped-parameter circuit theory method) และวิธีการกระจายพารามิเตอร์ทางสนามแม่เหล็ก (distributed-parameter field theory method) เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์สนามแม่เหล็ก เราจะใช้สมการของแม็กเวลล์เป็นหลักในการวิเคราะห์ ตลอดจนการใช้งานบางอย่าง จากสมการของแม็กเวลล์เราจะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับพิจารณา LIM ทางอุดมคติ แบ่งวิธีการวิเคราะห์ได้เป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบแรกจะสมมติว่าด้านเซคคันดารีมีความหนาเป็นอนันต์ ในขณะที่รูปแบบที่สองจะพิจารณา รวมถึงผลกระทบเนื่องจากด้านเซคคันดารีมีความหนานำจำกัด วิธีการทั้งสองรูปแบบนี้จะนำเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงตามสภาวะขอบเขต (boundary condition) อีกที

3.2.1 LIM ทางอุดมคติเมื่อด้านเซคคันดารีมีความหนาเป็นอนันต์

รูปแบบของ LIM ตามรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย 3 ย่าน ได้แก่ ย่านที่ 1 เป็นด้านไพรมารี , ย่านที่ 2 เป็นแอร์แก๊ป และย่านที่ 3 คือด้านเซคคันดารี โดยจุดเริ่มต้นอยู่ที่ผิวของ ไพรมารี ตามขอบขวาง ตามสมมติฐานดังต่อไปนี้ที่จะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ได้แก่



รูปที่ 3.1 รูปแบบของ LIM ทางอุดมคติเมื่อความหนาด้านเซคคันดารีเป็นอนันต์

- เลขอร์ทั้งหมดขยายออกเป็นอนันต์ในทิศทาง $\pm x$
- ด้านเซคคันดารีขยายออกเป็นอนันต์ในทิศทางของ y

c) ขดลวดกระตุ้นจะวางอยู่ในสล็อตตามโครงสร้างของไพรมารี เพื่อความสะดวกจะกำหนดให้โครงสร้างมีลักษณะผิวเรียบสม่ำเสมอ

d) การเคลื่อนที่ของเซคคันด์ารีจะเคลื่อนไปในทิศทาง x เท่านั้น

e) ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ของเลเยอร์มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ (homogeneous), Isotope, และเป็นเชิงเส้น

g) วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกไม่มีการอิ่มตัว

g) การเปลี่ยนแปลงในทิศทาง z สามารถละทิ้งได้

h) กระแสทั้งหมดไหลในทิศทาง z เท่านั้น

i) ไพรมารีสร้างจากแผ่นเหล็กอัดซ้อน เพื่อให้แน่ใจว่า สามารถละทิ้งความนำในทิศทาง z ได้

j) เวลา และ ระยะห่าง (space) แปรตามรูปคลื่นไซน์

เมื่อดำเนินการครบตามการตั้งสมมติฐาน แล้วใช้สมการของแม็กเวลล์ (ในลักษณะจุด) ก็จะสามารถหาแรงผลักดัน (thrust) เฉลี่ยต่อเวลา คือ

$$\langle F_x \rangle = \frac{\sigma B_m^2 U_s \lambda}{4|\Delta|^2 \text{Re}(\alpha)} \quad N \quad (3)$$

เมื่อ σ = ค่าความนำของเซคคันด์ารี

B_m = ความเข้มสูงสุดของฟลัก

S = สลิต, U_s = ความเร็วเชิงโครนัส, $\lambda = 2$ เท่าของ pole pitch

$$\Delta = \cosh \beta_g + (\alpha \mu_0 / \beta \mu) \sinh \beta_g$$

$$\alpha^2 = \beta^2 + j \omega \mu_0 \sigma, \quad R_g = \text{ส่วนจริงของ}$$

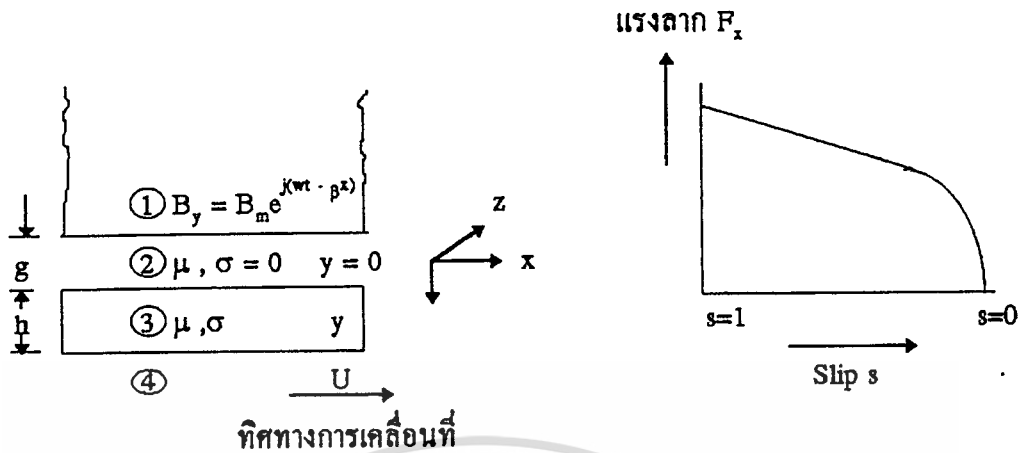
I = ความกว้างของไพรมารี, ω = ความถี่อินพุต

$$\beta = 2\pi / \lambda = \pi / \tau$$

3.2.2 LIM ทางอุดมคติเมื่อคานเซคคันด์ารีมีความหนาจำกัด

ดังรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบทางคานเซคคันด์ารีซึ่งมีความหนาจำกัดเท่ากับ h จุดเริ่มต้นอยู่ที่ผิวของเซคคันด์ารี ตามข้อสันนิษฐานเดิม สามารถใช้ได้แต่ต้องเพิ่มเติมเงื่อนไขบางอย่างคือ สมมติว่าแอร์แก๊ปมีค่าน้อยมากซึ่งทำให้เกิดฟลักซ์รั่วไหลหรือการลดลงของ B ในแอร์แก๊ป ซึ่งเลเยอร์ต่างๆในรูปที่ 3.2 มีดังนี้ เลเยอร์ 1 คือ ไพรมารี, เลเยอร์ 2 คือ แอร์แก๊ป, เลเยอร์ 3 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 LIM ทางอุดมคติด้านเซกชั่นคาร์รี มีความหนาจำกัด

รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลากและสลลิป

เซกชั่นคาร์รี และ เลขอร์ 4 คือ อากาศในเซกชั่นคาร์รี จะได้แรงเฉลี่ยที่เวลาใดๆ ที่เกิดขึ้นทางเซกชั่นคาร์รี ในทิศทาง x คือ

$$F_x = \frac{B_m^2 \sigma_s U_s I \lambda}{4 |\Delta|^2 |\lambda|^2} \left[|\alpha|^2 \left(\frac{1}{2m_1} \sinh 2m_1 h + \frac{1}{2m_2} \sin 2m_2 h \right) + a^2 \left(\frac{1}{2m_1} \sin 2m_1 h - \frac{1}{2m_2} \sin 2m_2 h \right) + a (\cosh 2m_1 h - \cos 2m_2 h) \right] \quad \text{N} \quad (4)$$

เมื่อ $a = \mu\beta/\mu_0$ และ $\alpha = m_1 + jm_2$ ซึ่งสามารถพล็อตสมการที่ (4) ได้ดังรูปที่ 3.3 สำหรับ LIM ที่มีความหนาด้านเซกชั่นคาร์รี 3 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาในอีกแง่หนึ่ง รูปแบบของ LIM สามารถสร้างแรงแนวตั้งฉากขึ้นมาในทิศทาง y ได้เช่นกัน ซึ่งตามหลักความเป็นจริงแล้ว $m_1 \gg 1$ นั่นคือ สมการที่ (4) จะลดรูปเหลือ

$$\langle F_x \rangle = \frac{B_m^2 \sigma_s U_s \lambda I (m_2 \sin 2m_1 h - m_1 \sin 2m_2 h)}{4m_1 m_2 (\cosh 2m_1 h - \cos 2m_2 h)} \quad \text{N} \quad (5)$$

3.2.3 หลักการของกระแสเชิงแผ่น (Current Sheet)

จะเห็นได้ว่า ในการวิเคราะห์ LIM นั้นมักจะทำตามตามสมการทางสนามแม่เหล็กเสมอ จะเห็นได้ชัดว่า โครงสร้างสล็อตทางไพรมารีพร้อมด้วยขดลวดนั้น ไม่ได้มีขอบเขตตามอุดมคติ พอที่จะหาสูตรการคำนวณได้อย่างง่ายๆ เพื่อลดข้อยุ่งยากทั้งหลายเหล่านี้ สามารถทำได้โดยการเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

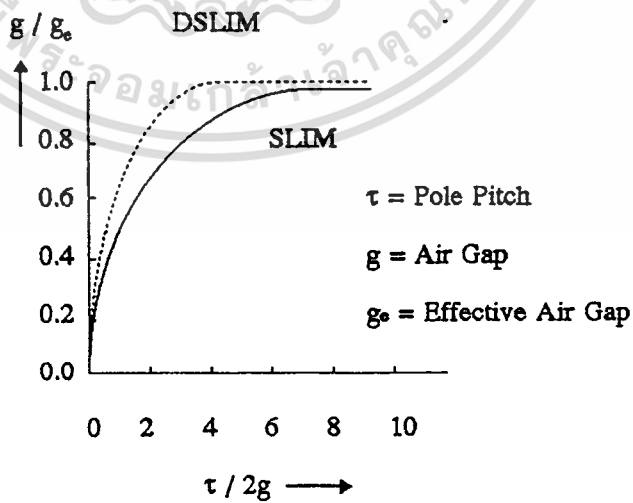


แทนโครงสร้างสถิตจริงเป็นควเรียบสมำเสมอ และกระแสที่ไหลในขดลวดก็จะแทนด้วยแผ่น กระแสบางๆหรือ "Current Sheet" มีความเข้มของกระแสเป็นเชิงเส้นตรง (A/m) ส่วนแอร์เก็บจริงก็จะแทนด้วย แอร์เก็บค่าที่ใช้งานได้ (effective airgap ≈ 1.02 ถึง 1.2 เท่าของค่าแอร์เก็บจริง) ดังรูปที่ 3.4 แสดงถึงแอร์เก็บค่าที่ใช้งานได้ที่แปรเปลี่ยนเนื่องจากแอร์เก็บจริงมีค่ามาก

การวางกระจายระยะห่างขดลวดตามลักษณะไซน์เวฟนั้น เป็นเป็นเพียงหลักการทางอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ ลักษณะเช่นนี้จึงต้องหาหาค่า mmf. ออกมาในรูปองค์ประกอบทางฮาร์โมนิกส์โดยการวิเคราะห์ฟูเรียร์ โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาเฉพาะการกระจายในเทอมของฟังก์ชันคอสแทนที่นั่นที่เป็นแหล่งจ่ายให้แอร์เก็บ ดังรูป 3.5 ซึ่งจะได้ mmf. ที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได แยกออกเป็นองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์และฟังก์ชันคอส โดยการสมมูลย์เป็นแผ่น กระแสบางๆ มีค่าสูงสุดเท่ากับ J_m หาได้โดย

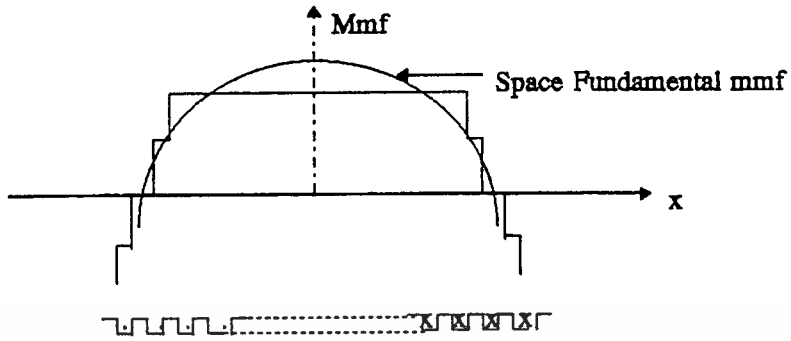
$$J_m = \frac{\text{ผลรวมกระแสสูงสุดในขดลวดของเครื่องกล} \times \text{ค่าคงที่การพัน}}{\text{ความยาวขดลวดของเครื่องกล}}$$

$$= \frac{m(2\omega\sqrt{2})I}{2p\tau} k_w = \frac{\sqrt{2mWI}}{p\tau} k_w \quad \text{A/m} \quad (7)$$



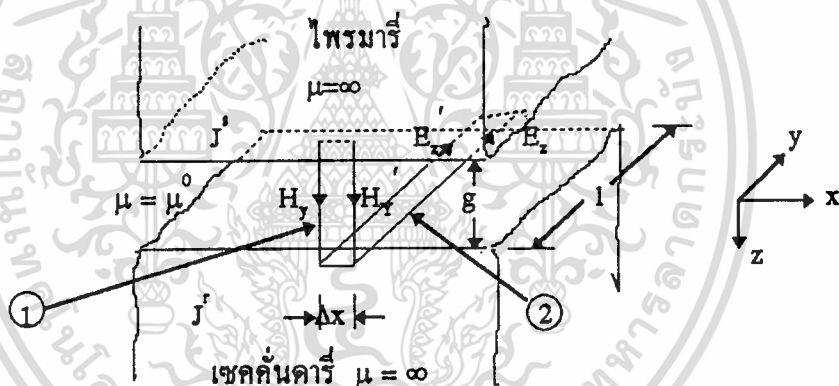
รูปที่ 3.4 การแปรเปลี่ยนของแอร์เก็บค่าใช้งานสำหรับ

LIM ที่มีแอร์เก็บมากมีผลต่อแอร์เก็บรั้วไหล



รูปที่ 3.5 การแยกฮาร์โมนิกส์และพินดามทอลของ
สมมูลย์กระเชิงแผ่น

3.2.4 สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บ



รูปที่ 3.6 การแทนกระแผ่น J' และ J'' เมื่อสมมติว่าไม่มีความเร็ว
สัมพันธ์ระหว่างไพรมารีและเซคคันดารี

สนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บถูกสร้างขึ้นมาจากกระแสไพรมารีและเซคคันดารี ความสัมพันธ์ระหว่างกระแผ่นบางๆด้านไพรมารีและสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บ จะนำเข้ามารวมไว้ในสมการสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บ

กำหนดให้กระแสด้านไพรมารีและเซคคันดารีแทนด้วยกระแสด้านบางๆ J' และ J'' ตามลำดับ มีความเข้มอย่างลิเนียร์ สมมติให้กระแสไหลในทิศทาง z เท่านั้น และความซึมซาบของวัสดุแกนกลางมีค่าเป็นอนันต์ เมื่อพิจารณารูป 3.6 ประกอบ (สมมติว่าไม่มีความเร็วสัมพันธ์ระหว่างไพรมารีและเซคคันดารี) จะได้ว่า

$$H_y' = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Delta x + H_y \tag{8}$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z' = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Delta x + E_z \quad (9)$$

จากกฎของแอมแปร์

$$\oint H \cdot dl = \int_s J \cdot ds \quad (10)$$

จะได้

$$g \frac{\partial H_y}{\partial x} = J^s + J^r \quad (11)$$

และ

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (12)$$

แต่จาก Ohm's law

$$J^r = \sigma E_z \quad (13)$$

เมื่อ σ' คือค่าความนำเชิงผิว สัมพันธ์กับความนำเชิงปริมาตร σ คือ $\sigma' = \sigma \times d$ ซึ่ง d คือความหนาของเพลทเซกคันดารี ดังนั้น จากสมการที่ (8) - (13) ผลที่ได้คือ

$$g \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} = \mu_0 \sigma' \frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\partial J^s}{\partial x} \quad (14)$$

หรือในเทอมของ B_y ก็จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \frac{\mu_0 \sigma' \partial B_y}{g \partial x} = \frac{\mu_0 \partial J^s}{g \partial x} \quad (15)$$

โดยจะเรียกว่า “สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ป” (Air Gap Field Equation)

ถ้าหากว่ามีความเร็วสัมพัทธ์ U_x เกิดขึ้นระหว่างไพรมารีและเซกคันดารี สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ปจะเปลี่ยนเป็น

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \frac{\mu_0 \sigma' U_x \partial B_y}{g \partial x} - \frac{\mu_0 \sigma' \partial B_y}{g \partial t} = \frac{\mu_0 \partial J^s}{g \partial x} \quad (16)$$

สำหรับลิเนียร์มอเตอร์ชนิด LIM สามารถใช้สมการที่ (15) ได้ ในกรณีที่ทำการพิจารณาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ตามหลักการของความถี่สลิป ก็สามารทำได้โดยการแทน $\partial / \partial x = j\omega s$ เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุมทางไพรมารี และ s คือ อัตราส่วนสลิป ดังนั้น ถ้าหากว่าเรารู้ค่ากระแสเชิงแผ่นทางไพรมารี ก็จะสามารถหาค่าการกระจายความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่แอร์แก๊ปได้

3.2.5 กฎเกณฑ์การออกแบบค่าปรับปรุงที่ดี (Goodness Factor)

เมื่อไม่สามารถนำกฎเกณฑ์การออกแบบสำหรับเครื่องกลแบบโรตารีมาใช้กับลิเนียร์อินคัทชั่นมอเตอร์ ได้ เราจะต้องต้องมีค่าปรับปรุงที่ดี (Goodness Factor : G) เป็นตัววัดในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเมินคุณภาพของ LIM ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกวิธีหนึ่ง สำหรับ LIM แล้ว เราจะกำหนดให้กระแสเชิงแผ่นทางไพรมารีมีค่าเป็น

$$J^s = Jme^{j(\alpha x - \beta x)} \quad (17)$$

เมื่อ $\beta = \pi / \tau$, τ เป็นระยะ pole - pitch หรือครึ่งหนึ่งของกระแสเชิงแผ่นกระจายตามทิศทางการเคลื่อนที่ กระแสค่านี้อาจจะเปลี่ยนรูปไปอยู่ทางเซคคันดารีโดยให้ $\partial/\partial x = j\omega\tau$ ดังนั้น B_y ที่ผิวเซคคันดารีจากสมการ (15) จะได้ว่า

$$(j\beta)^2 B_y - \frac{1}{2}(j\omega_s \mu_o \sigma') B_y = \frac{1}{g} \mu_o (-j\beta) Jm \quad (18)$$

นั่นคือเราจะได้

$$B_y = \frac{(j\mu_o \beta / g) Jm}{\beta^2 + j\omega_s \mu_o \sigma' / g} = \frac{\mu_o Jm}{g\beta (sG - j)} \quad (19)$$

ซึ่ง

$$G = \frac{\omega \mu_o \sigma'}{g\beta^2} \quad (20)$$

เราจะนิยามอัตราส่วนที่ได้จากสมการ (20) ว่าเป็นค่าปรับปรุงที่ดี เพราะว่า มีความสัมพันธ์กับส่วนจริงของสนามแม่เหล็ก B_y และแสดงความหมายถึง ส่วนแอกทีฟหรือส่วนที่สร้างแรงขึ้นมาจริงๆต่อส่วนรีแอกทีฟของสนามแม่เหล็ก

คำนิยามในสมการ (20) อาจเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$G = \frac{2f\mu_o \sigma' \tau^2}{\pi g} \quad (21)$$

เมื่อ τ คือ pole pitch ในที่สุดเราก็จะได้ คำนิยามของค่าปรับปรุงที่ดี ที่พื้นคาเมนทอลสำหรับเซคคันดารี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน (22) ใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ X_m คือ magnetizing reactance และ R_2 คือ ความต้านทาน ทางเซคชั่น คาร์ ค่าปรับปรุงที่คี่นี้ จะเป็นคี่ที่มีประโยชน์ ในการออกแบบ LIM เบื้องต้น

3.3 การพิจารณาตามหลักความเป็นจริง

จากที่ผ่านมาซึ่งเป็นการวิเคราะห์ลิเนียร์อินคักชั่นมอเตอร์มอเตอร์ทางอุดมคติทั้งสองแบบ ในการทำงานตามความเป็นจริงแล้ว LIM จะต่างจากมอเตอร์แบบโรตารี ด้วยเหตุผล คือ แอร์แก๊ป มีค่ามาก ด้านเซคชั่นคาร์เป็นแผ่นตัวนำ ผลกระทบเนื่องจากขอบขวาง ผลกระทบจากส่วนปลาย และแรงในแนวตั้งฉาก ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของ LIM ทั้งสิ้น

3.3.1 การรั่วไหลของฟลักที่แอร์แก๊ปเนื่องจากแอร์แก๊ปมีค่ามาก

ลิเนียร์อินคักชั่นมอเตอร์ส่วนใหญ่แล้วจะมีข้อมูลอยู่ในช่วงนี้คือ

แอร์แก๊ปทางกล $g_m \sim 2$ ถึง 15 mm.

$g_m / \tau \sim 0.04$ ($\tau = \text{pole-pitch}$)

ความหนาแผ่นเพลทด้านเซคชั่นคาร์ $d \sim 2$ ถึง 6 mm.

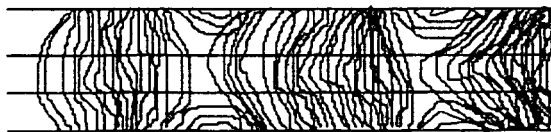
แอร์แก๊ปทางแม่เหล็ก $g_0 = g_m + d$ (23)

กระแศความเข้มฟลักที่แอร์แก๊ป ทางด้านเซคชั่นคาร์จะมีลักษณะรูปร่างดังรูป 3.7 เมื่อทางเดินของฟลักผ่านแอร์แก๊ปอย่างไม่สมบูรณ์ ภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการรั่วไหลบางส่วนขึ้นที่แอร์แก๊ป ในกรณีเช่นนี้ จึงต้องมีสมการสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาอีกสมการหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าคงที่ เรียกว่า “ค่าปรับปรุงความถูกต้อง” (correction factor : h_1) ดังนั้น

$$h_1 = \frac{\sin h \left(\frac{\pi}{\tau} g_0 \right)}{\frac{\pi}{\tau} g_0} \quad (24)$$

และค่าแอร์แก๊ปใช้งานได้ g_u จะกลายเป็น

$$g_u = k_1 g_0 \quad (25)$$



รูปที่ 3.7 การกระจายความเข้มฟลักแม่เหล็กทางเซคชั่นคาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ผลกระทบเชิงผิวเนื่องจากความหนาของแผ่นเพลททางเซคชั่นคาร์มีค่าจำกัด

การกระจายความเข้มกระแสในกรณีของผลกระทบเชิงผิว (skin effect) เมื่อแผ่นเพลทด้านเซคชั่นคาร์มีแกนเหล็กตามอุดมคติซ้อนอยู่ด้านหลัง (Back Iron) ดังแสดงในรูป 3.8 เพราะเหตุนี้เองจึงทำให้ค่าความนำจริงของแผ่นเพลท σ ถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็น ค่าความนำใช้งาน ได้ σ_c นั่นคือ

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{k_{sk}} \quad (26)$$

เมื่อ k_{sk} คือค่าตัวประกอบความถูกต้อง (correction factor) หาได้โดย

$$k_{sk} = \frac{2d \left[\sin h(2d/d_s) + \sin(2d/d_s) \right]}{d_s \left[\cos h(2d/d_s) - \cos(2d/d_s) \right]} \quad (27)$$

เมื่อ d คือความหนาแน่นของแผ่นเพลท และ d_s คือความลึกหยั่งเห็น (the Depth of Penetration) หาได้จาก

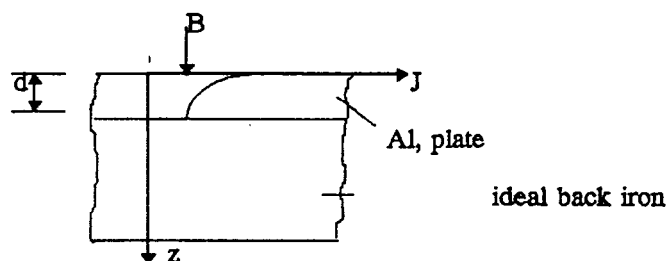
$$d_s \cong \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \pi f_1 \sigma + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2}} \quad (28)$$

เมื่อ f_1 = ความถี่ที่สเตเตอร์

s = สลิป

τ = pole pitch

สำหรับ DSLIM ในสมการที่ (27) จะเปลี่ยน d เป็น $d/2$

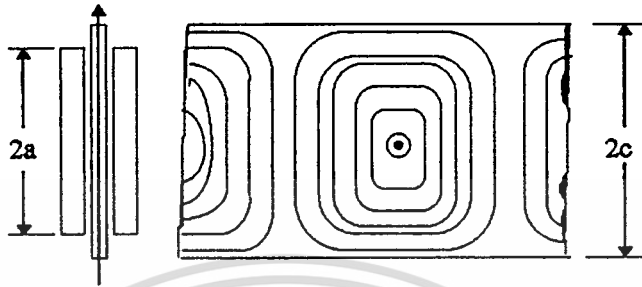


รูปที่ 3.8 ผลกระทบเชิงผิวของเพลททางเซคชั่นคาร์

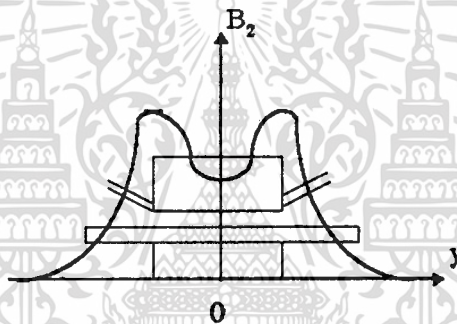
ซึ่งมีแกนเหล็กทางอุดมคติอยู่ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ผลกระทบจากค่าขอบเนื่องจากเซคชั่นคาร์รี่ยื่นออก



รูป 3.9 แบบแผนผลลัพท์ของกระแส



รูป 3.10 ผลลัพท์การกระจายสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บในแนวขวาง

โดยทั่วไปแล้ว ความกว้างชุดโพรมาร์รี่ของดีเนียร์มอเตอร์จะน้อยกว่าความกว้างของแผ่นเพลททางเซคชั่นคาร์รี่ ซึ่งจะได้อุปแบบของกระแสดังรูปที่ 3.9 ดังนั้น จึงมีการกระจายความเข้มของกระแสในส่วนประกอบตามแนวขวางและแนวยาว และผลเนื่องจากการกระจายกระแสในแนวขวางจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บมีลักษณะตามรูปที่ 3.10 กระแสส่วนนี้จะก่อให้เกิดความต้านทานทางเซคชั่นคาร์รี่เพิ่มขึ้นด้วยแฟคเตอร์ K_{tr} และทำให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetizing reactance) ลดลงด้วยแฟคเตอร์ K_{tm} ซึ่ง

$$K_{tr} = \frac{K_x^2}{K_R} \frac{1 + \left(\frac{SGK_R}{K_x}\right)^2}{1 + S^2G^2} \geq 1 \tag{29}$$

$$K_{tm} = \frac{K_R}{K_x} K_{tr} \geq 1 \tag{30}$$

$$K_{im} = 1 - \operatorname{Re}[(1 - jSG) \frac{\lambda}{\alpha a_e} \tanh \alpha a_e] \quad (31)$$

$$K_x = 1 + \operatorname{Re}[(SG + j) \frac{SG\lambda}{\alpha a_e} \tan \alpha a_e] \quad (32)$$

$$\lambda = \frac{1}{[1 + \sqrt{1 + jSG} \tan \alpha a_e \tanh \frac{\pi}{\tau}(c - a_e)]} \quad (33)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau} \sqrt{1 + jSG} \quad (34)$$

$$G = \frac{2\mu_0 f_1 \sigma_e \tau^2 d}{\pi g_0 K_1 K_{sk} K_c (1 + K_p)} \quad (35)$$

เมื่อ

τ = pole pitch

f_1 = ความถี่ทางไพรมารี

g_0 = $g_m + d$ = แอร์เก็บทางแม่เหล็ก

g_m = แอร์เก็บทางกล

d = ความหนาของเพลต

K_{sk} = แฟคเตอร์ที่ได้จากสมการที่ (27)

K_c = สัมประสิทธิ์คาร์เตอร์ (สำหรับการทำสลีต)

G = goodness factor

$2a_e \sim 2a + g_0$ = ความหนาสมมูลย์ของสแต็ก

$2a$ = ความหนาของสแต็ก

$$K_p \cong \frac{\mu_0 \tau^2}{\pi^2} \left(\frac{1}{\mu_i \delta_i g_0 K_c} \right) \quad (36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_i = ค่าความซึมซาบของแกนเหล็กค้ำหลัง

$$\delta_i = \text{Re} \left\{ \frac{1}{\left[\frac{\pi^2}{\tau^2} + j2\pi f_1 \mu_i \frac{3\sigma_i}{K_{tr}} \right]^{1/2}} \right\} \quad (37)$$

$$K_{tr} \sim \frac{1}{1 - \frac{\pi}{\tau} \tanh \frac{\pi a_e}{\tau}} \quad (38)$$

σ_i = ค่าความนำของแกนเหล็กค้ำข้าง

Re = ค่าจริงของ []

ถึงจุดนี้สรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ตามหัวข้อ 3.1 ถึง 3.3 ที่ผ่านมาสามารถแทนลิเนียร์มอเตอร์จริงด้วยลิเนียร์มอเตอร์ทางอุดมคติซึ่งจะสมมูลย์แอร์แก่ไปด้วย g_{ei} และสมมูลย์ค่าความนำด้วย σ_{ei} หาได้จาก

$$g_{ei} = \frac{K_1 K_c}{K_{tr}} (1 + K_p) g_0 \quad (39)$$

$$\sigma_{ei} = \frac{\sigma}{K_{st} K_{tr}} + \frac{\sigma_i \delta_i}{K_{tr} d} \quad (40)$$

ค่าการปรับปรุงที่คิดจะกลายเป็น

$$G_{ei} = \frac{2\mu_0 f_1 \tau^2 \sigma_{ei} d}{\pi g_{ei}} \quad (41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า μ_1 นั้นจะอาศัยวิธีการทำซ้ำซึ่งในที่นี้จะไม่แสดงถึง คำนวณในขั้นตอนนี้ลิเนียร์ มอเตอร์จึงเป็นกึ่งอุดมคติกเว้นในเรื่องเกี่ยวกับผลกระทบจากปลายสุด

3.3.4 ผลกระทบจากส่วนปลาย (End Effects)

ผลกระทบจากส่วนปลายแบ่งออกเป็นผลกระทบจากส่วนปลายแบบอยู่กับที่ (Static) และแบบเคลื่อนที่ (Dynamic) ผลกระทบจากส่วนปลายแบบอยู่กับที่สืบเนื่องมาจากคุณสมบัติ การเปิดวงจรทางแม่เหล็กของของ LTM นั่นคือ เราไม่อาจหลีกเลี่ยงลักษณะการวางตัวอย่าง ไม่สมมาตรของระบบสามเฟสเมื่อเทียบกับปลายเข้า-ออกของแกนเหล็ก ผลที่ตามมาคือ ความเหนี่ยวนำตัวเองและความเหนี่ยวนำร่วมต่อเฟสทางไพรมารีก็จะไม่สมมาตรด้วย อย่างไรก็ตาม จะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งสามารถละทิ้งได้ เมื่อจำนวนขั้ว มากกว่า 6 ขั้วขึ้นไป ซึ่งจะเป็นเงื่อนไขที่ดีต่อการออกแบบอีกอย่างหนึ่ง ผลกระทบ จากส่วนปลายแบบเคลื่อนที่นั้นสืบเนื่องมาจากความสัมพันธ์ขั้วเคลื่อนที่ เมื่อไพรมารีสั้นกว่า เซคคันดารี

สำหรับลิเนียร์อินคักชันมอเตอร์กึ่งอุดมคติ สามารถแสดงสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บ อ้างอิงได้สามลักษณะคือ

$$H = C_1 e^{\gamma_1(x-2p\tau)} + C_2 e^{\gamma_2 x} + C_3 e^{-j(\pi x/\tau)} \quad (42)$$

เมื่อ

$$C_3 = \frac{jJ_m}{\frac{\mu_0}{\tau} (1 + jsG_{ei})} \quad (43)$$

และเทอมที่สามใน (42) หมายถึงคลื่นนำหน้าตามแบบเคิม ส่วนเทอมแรกและเทอมที่สอง จะขึ้นอยู่กับคลื่นกระทบจากส่วนปลาย ดังนั้น

$$\gamma = \gamma_r + j\gamma_i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\alpha_1}{2} \left[\sqrt{\frac{1}{2}(b_1+1)+1+j\sqrt{\frac{1}{2}(b_1-1)}} \right] \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \gamma_2 - j\gamma_1 \\ &= -\frac{\alpha_1}{2} \left[\sqrt{\frac{1}{2}(b_1+1)-1+j\sqrt{\frac{1}{2}(b_1-1)}} \right] \end{aligned} \quad (45)$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi G_{ei}(1-s)}{\tau}; b_1 = \sqrt{1 + \frac{16}{G_{ei}^2(1-s)^4}} \quad (46)$$

$$C_1 = -j \frac{J_m \left(\frac{\tau}{\pi} \gamma_2 + sG_{ei} \right)}{\frac{\pi}{\tau} (\gamma_2 - \gamma_1)(1 + jsG_{ei})} \quad (47)$$

$$C_2 = j \frac{J_m \left(\frac{\tau}{\pi} \gamma_1 + sG_{ei} \right)}{\frac{\pi}{\tau} (\gamma_2 - \gamma_1)(1 + jsG_{ei})} \quad (48)$$

ความหนาแน่นของฟลักที่แอร์เก็บตาม (42) มีส่วนประกอบอยู่สามส่วน (การเคลื่อนที่ของคลื่นสามส่วน) ส่วนแรกคือ จะเป็นคลื่นเคลื่อนที่แบบเคมที่ไม่มีการลดทอนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตรงไปข้างหน้าด้วยระยะ pole pitch τ และความเร็ว $U_s = 2\tau f_1$ ส่วนคลื่นเคลื่อนที่ทั้งสองแบบที่เหลือ จะเป็นคลื่นที่ถูกลดทอนสำหรับผลตอบสนองจากผลกระทบส่วนปลาย ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและย้อนกลับ โดยมีระยะ pole pitch $\tau_e = \pi / \gamma_i$ และความเร็วคือ $U_e = 2\tau_e f_1$ คลื่นกระทบย้อนกลับจากส่วนปลายในทอมแรกของสมการที่ (42) นั้นจะลดทอนได้รวดเร็วกว่าคลื่นกระทบเค้นหน้าจากส่วนปลาย เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\gamma_r \gg |\gamma_{2r}|$ และ $\tau_e \geq 2$ สำหรับทุกเงื่อนไข ดังนั้นจึงมีเฉพาะคลื่นกระทบแบบเดินทางจากส่วนปลายเท่านั้นที่มีผลตามความเป็นจริง ดังนั้นจึงสมมติว่าผลกระทบจากส่วนปลายอาจไม่ต้องนำมาคิดก็ได้ ถ้าหากว่าคลื่นกระทบเดินทางจากส่วนปลายลดลงด้วยแฟคเตอร์ (1 / e) ภายใน 10 % ของความยาวมอดเตอร์ นั่นคือ

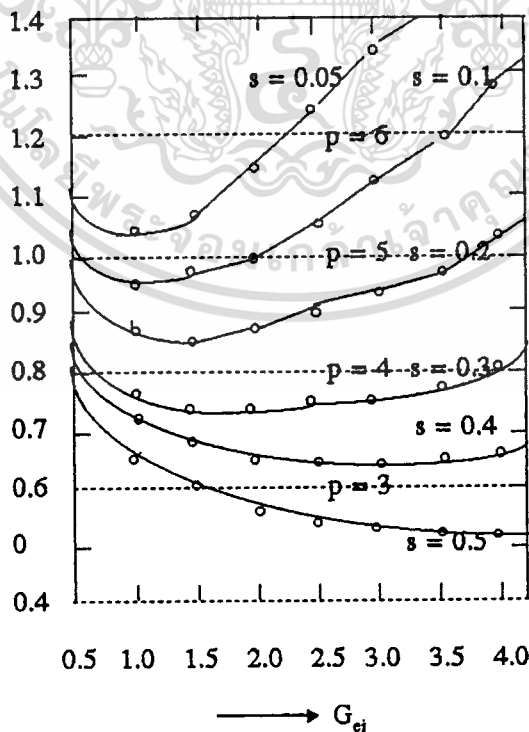
$$\frac{1}{|\gamma_{2r}|} \leq 2p\tau/10 \tag{49}$$

จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถพล็อตค่าโดยประมาณดังรูป 3.11 ในเทอมของความยาวมอดเตอร์ และ (49) ต่อให้เห็นว่า

$$\text{ความยาวของมอดเตอร์} \geq \frac{10 \text{ to } 20}{|\gamma_{2r}|} \tag{50}$$

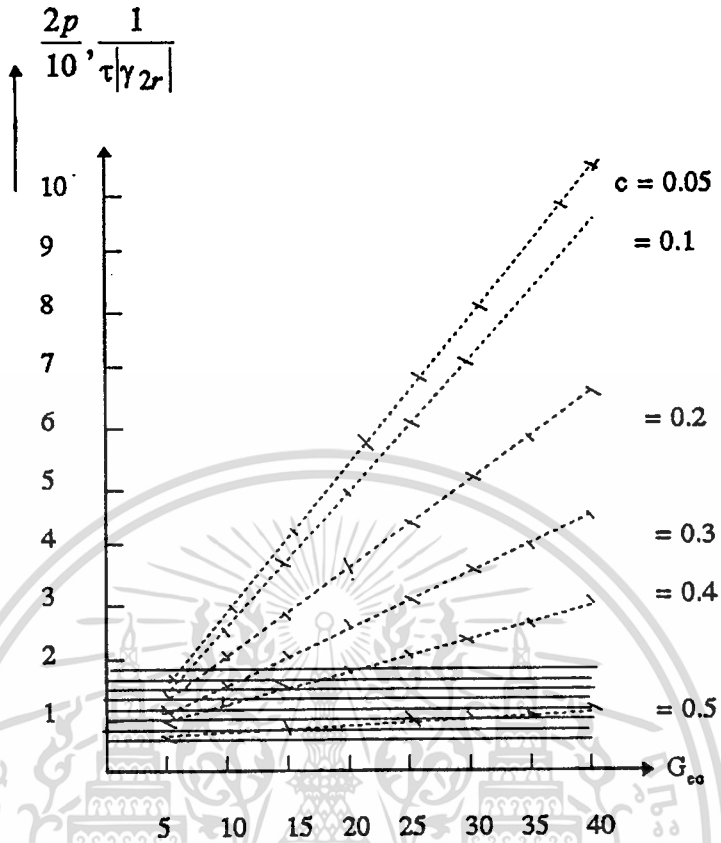
สำหรับผลกระทบจากปลายสุดไม่น่ามาคิด ซึ่งก็ยังสามารถใช้เป็นสูตรปรับปรุงจากมอดเตอร์แบบโรตารีเพื่อหาจรรยาสมมูลของลิเนียร์มอดเตอร์ออกมา

$$\frac{1}{\tau|\gamma_{2r}|} \leq \frac{2p}{10}$$



รูปที่ 3.11 ผลที่ได้จากการพล็อตสมการที่ (49)

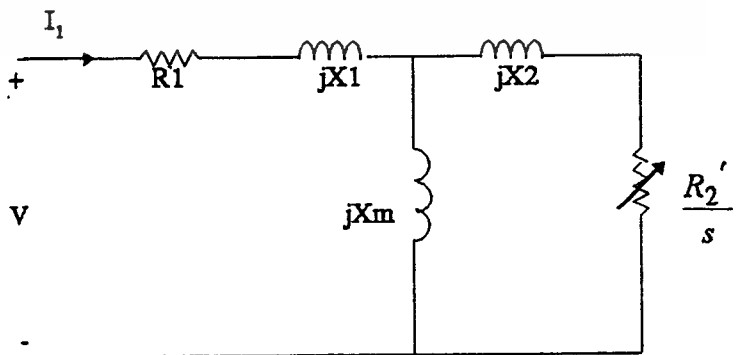
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 (ต่อ)

3.4 วงจรสมมูลของ LIM

สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบ LIM ที่มีการละทิ้งผลกระทบจากส่วนปลาย เราสามารถแสดงวงจรสมมูลค่าต่อเฟสตามแบบเดิมได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลของ LIM ตามแบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับลิเนียร์มอเตอร์แบบ Flat LIM

ค่ารีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็ก X_m และความต้านทานด้านเซกชั่นคาร์รี R_2' ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยสัมประสิทธิ์ความถูกต้องแล้ว คือ

$$X_m = \frac{12 \mu_0 \omega_1 a_e k_w W_1^2 \tau}{\pi^2 p g_{ei}} = K_m W_1^2 \quad (51)$$

$$R_2' = \frac{X_m}{G_{ei}} = \frac{12 a_e k_w W_1^2}{d \tau p \sigma_{ei}} = K_{R_2'} W_1^2 \quad (52)$$

สำหรับเซกชั่นคาร์รีแผ่นบางๆ $X_2' \approx 0$

ความต้านทานต่อเฟสด้านไพรมารี R_1 และ ลีคเกจรีแอกแตนซ์ X_1 หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_1 = \frac{1}{\sigma_e} \left(\frac{14a + 2I_{ce}}{W_1 I_1} \right) J_c W_1^2 = K_{R_1} W_1^2 \quad (53)$$

$$X_1 = \frac{2\mu_0 W_1}{p} \left[\left(\lambda_s \left(1 + \frac{3}{2p} \right) + \lambda_d \right) \frac{2a}{q} + \lambda_e I_{ce} \right] W_1^2 = K_1 W_1^2 \quad (54)$$

$$\lambda_s \approx \frac{1}{12} \frac{h_s}{W_s} (1 + 3\beta_1); \quad \lambda_d = \frac{5(g_{ei}/W_s)}{5 + 4(g_a/W_s)}; \quad (55)$$

$$\lambda_e = 0.3(3\beta_1 - 1) \quad (56)$$

สัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในสมการที่ (51) - (56) คือ

$$\beta_1 = \text{Pitch Factor} \leq 1, m^{-1}$$

$$\tau = \text{Pole Pitch}, m$$

$$I_{ce} = \text{ความยาวของคอยล์ที่ปลายจุดต่อ}$$

$$\sigma_e = \text{ค่าความนำของทองแดง}, S/m$$

$$J_c = \text{ความเข้มกระแสค่าออกแบบ}, A/m$$

$$W_1 = \text{จำนวนรอบ / เฟส}$$

$$g_{ei} = \text{แอร์เก็บค่าที่ถูกต้อง}, m$$

$$W_s = \text{ความกว้างของสลีต}, m$$

$$h_s = \text{ความลึกของสลีต}, m$$

$$q = \text{slot/pole/phase}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอินเวอเตอร์แบบ Flat LIM

ค่ารีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็ก X_m และความต้านทานด้านเซคคันดารี R_2' ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยสัมประสิทธิ์ความถูกต้องแล้ว คือ

$$X_m = \frac{12\mu_0\omega_1 a_e k_w W_1^2 \tau}{\pi^2 p g_{ei}} = K_m W_1^2 \quad (51)$$

$$R_2' = \frac{X_m}{G_{ei}} = \frac{12a_e k_w W_1^2}{\pi p \sigma_{ei}} = K_{R_2'} W_1^2 \quad (52)$$

สำหรับเซคคันดารีแผ่นบางๆ $X_2' \approx 0$

ความต้านทานต่อเฟสด้านไพรมารี R_1 และ ลิกเกจรีแอกแตนซ์ X_1 หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_1 = \frac{1}{\sigma_e} \left(\frac{14a + 2I_{ce}}{W_1 I_1} \right) J_c W_1^2 = K_{R_1} W_1^2 \quad (53)$$

$$X_1 = \frac{2\mu_0 W_1}{p} \left[\left(\lambda_s \left(1 + \frac{3}{2p} \right) + \lambda_d \right) \frac{2a}{q} + \lambda_e I_{ce} \right] W_1^2 = K_1 W_1^2 \quad (54)$$

$$\lambda_s \approx \frac{1}{12} \frac{h_s}{W_s} (1 + 3\beta_1); \quad \lambda_d = \frac{5(g_{ei}/W_s)}{5 + 4(g_a/W_s)}; \quad (55)$$

$$\lambda_e = 0.3(3\beta_1 - 1) \quad (56)$$

สัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในสมการที่ (51) - (56) คือ

β_1 = Pitch Factor ≤ 1 , m

τ = Pole Pitch, m

I_{ce} = ความยาวของคอยล์ที่ปลายจุดต่อ

σ_e = ค่าความนำของทองแดง, S/m

J_c = ความเข้มกระแสค่าออกแบบ, A/m

W_1 = จำนวนรอบ / เฟส

g_{ei} = แอร์เก็บค่าที่ถูกต้อง, m

W_s = ความกว้างของสลีต, m

h_s = ความลึกของสลีต, m

q = slot/pole/phase

p = คู่ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k_{w1} = แฟกเตอร์การพันขดลวดทางไพรมารี

I_1 = กระแสไพรมารี , A

สำหรับ LIM ความเร็วต่ำ สามารถหาแรงผลักดันและแรงในแนวตั้งฉากได้โดยง่าย นั่นคือ แรงผลักดันทั้งหมดที่เกิดขึ้นคือ

$$F_x = \frac{3I_1'^2 R_2'}{s2\tau f_1} = \frac{3I_1^2 R_2'}{s2\tau f_1 \left[\left(\frac{1}{sG_{ei}} \right)^2 + 1 \right]} \quad (57)$$

ถ้าไม่คิดการสูญเสียที่แกนเหล็ก , ค่าประสิทธิภาพ η_1 และเพาเวอร์แฟกเตอร์ $\cos \phi_1$ คือ

$$\eta_1 = \frac{F_x 2\tau f_1 (1-s)}{F_x 2\tau f_1 + 3R_1 I_1^2}; \quad \cos \phi_1 = \frac{F_x 2\tau f_1 + 3R_1 I_1^2}{3V_1 I_1} \quad (58)$$

แรงในแนวตั้งฉาก F_n จะประกอบไปด้วยส่วนของแรงดึงดูดและแรงผลักคือ

$$F_n = 2a_e \frac{p\tau^3}{\pi^2} \frac{\mu_0 J_m^2}{g_{ei}^2 (1+s^2 G_{ei})} \left[1 - \left(\frac{\pi}{\tau} g_{es} G_{ei} \right)^2 \right] \quad (59)$$

จากการคาดการณ์ในย่านความเร็วต่ำๆ แรงตั้งฉาก F_n จะเป็นชนิดการดึงดูด (ทางบวก) แต่สำหรับพวกความเร็วสูง F_n จะเป็นชนิดแรงผลัก (ทางลบ)

$$\text{กำลังอินพุต} = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (60)$$

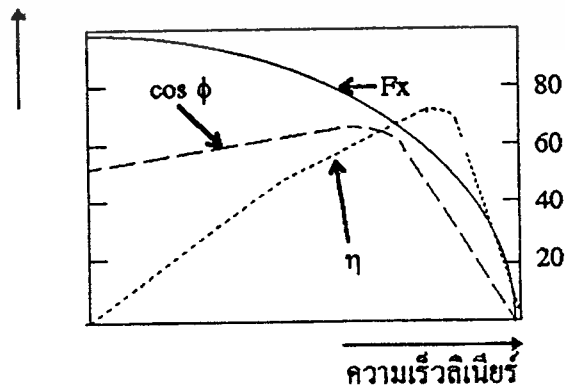
$$\text{การสูญเสียของทองแดงทางไพรมารี} = I_1^2 R_1 \quad (61)$$

$$\text{กำลังที่สร้างขึ้น} = (1-s)(V_1 I_1 \cos \phi_1 - I_1^2 R_1) \quad (62)$$

$$\text{แรงที่สร้างขึ้น} = (1/U)(\text{กำลังที่สร้างขึ้น}) \quad (63)$$

$$\text{การสูญเสียในตัวนำด้านเรคคันดารี} = s(V_1 I_1 \cos \phi_1 - I_1^2 R_1) \quad (64)$$

แรงถาก (trast)



รูปที่ 3.13 คุณสมบัติที่คำนวณได้จากวงจรสมมูลของ LIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและพัฒนาปรับปรุง

กล่าวอ้างอิงถึงปริญญาบัตรเกี่ยวกับการทำโครงการเรื่อง“เครื่องกลไฟฟ้าในแนวระนาบ” ฉบับปีการศึกษา 2537 ซึ่งได้ทำการออกแบบและสร้างเป็นเครื่องกลไฟฟ้าง่ายๆชนิดหนึ่ง ซึ่งมีตัวโรเตอร์เป็นตัวเคลื่อนที่ไปตามรางไม้อัด โดยมีขอบประคองทั้งสองข้าง ลักษณะของรางที่กล่าวถึงนี้จะวางอยู่กับพื้นลักษณะวงกลมคล้ายสนามฟุตบอล ความยาวเฉลี่ย 16 เมตร การทำงานจะอาศัยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งวางกระจายอยู่ภายใต้รางโดยตลอด ส่วนตัวโรเตอร์ หรือตัวเคลื่อนที่นั้นทำจากแผ่นอะลูมิเนียมตัดและพับด้านข้างขึ้น ลักษณะรูปตัว“ยู” และจะเคลื่อนที่ไปตามกรอบรางนั้น การควบคุมโดยอาศัยพลังงานจากคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมแม่เหล็กคอนแทคเตอร์ในการตัดต่อกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz เฉพาะช่วงที่โรเตอร์เคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น โดยมีขอบเขตการดำเนินงานสิ้นสุดที่การเคลื่อนที่ได้ของวัตถุในแนวระนาบ เป็นการจำลองรูปแบบการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกลไฟฟ้าแนวระนาบ เพื่อทำการศึกษาและทำให้เกิดภาพทงนที่ดีในการนำไปพัฒนาปรับปรุงและประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนต่อไป

จากหลักการเดียวกันนี้ จึงได้ทำการพัฒนาปรับปรุงขึ้นมาในเชิงการประยุกต์ใช้งานมากขึ้น ในครั้งนี้ภายใต้การดำเนินงานในหัวข้อเรื่อง“ลิเนียร์มอเตอร์” ตามหลักการทำงานแบบ SLIM เนื่องจากเป็นการดำเนินงานที่ต่อเนื่องและสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถยึดถือตามข้อมูลเดิมได้ในส่วนหนึ่ง โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการออกแบบและพัฒนาปรับปรุงเพิ่มเติมแทบทั้งสิ้น กล่าวคือ จะมีเพียงข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างสเตเตอร์เท่านั้นที่สามารถยึดถือตามแบบเดิมดังแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก. สำหรับในส่วนที่จะทำการพัฒนาปรับปรุงเพิ่มเติมหลักๆนั้นแบ่งเป็นขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- การออกแบบและสร้างชุดทรักกระแสสลับ 3 เฟสแบบโซลิตสเตทรีเธย์
- การออกแบบและพัฒนาปรับปรุงรูปแบบราง
- การออกแบบและพัฒนาตัวโรเตอร์
- การแก้ไขคำสั่งเพื่อเพิ่มเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม

4.1 การออกแบบและสร้างชุดทรักกระแสสลับ 3 เฟสแบบโซลิตสเตทรีเธย์

เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าขดลวดสเตเตอร์ครั้งเดียวพร้อมกันทั้งหมดได้ ด้วยเหตุผลหลักๆคือ กระแสเม้นท์ที่ไหลผ่านเครื่องป้องกันจะสูงเกินไป เพราะเป็นอัตราต่อขนานขดลวดสเตเตอร์ทั้งหมด 32 ชุด (สเตเตอร์ช่วงในช่วง 1 เมตร จะมีขดลวดต่อขนานกัน 2 ชุด) และจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ขณะที่โรเตอร์ไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

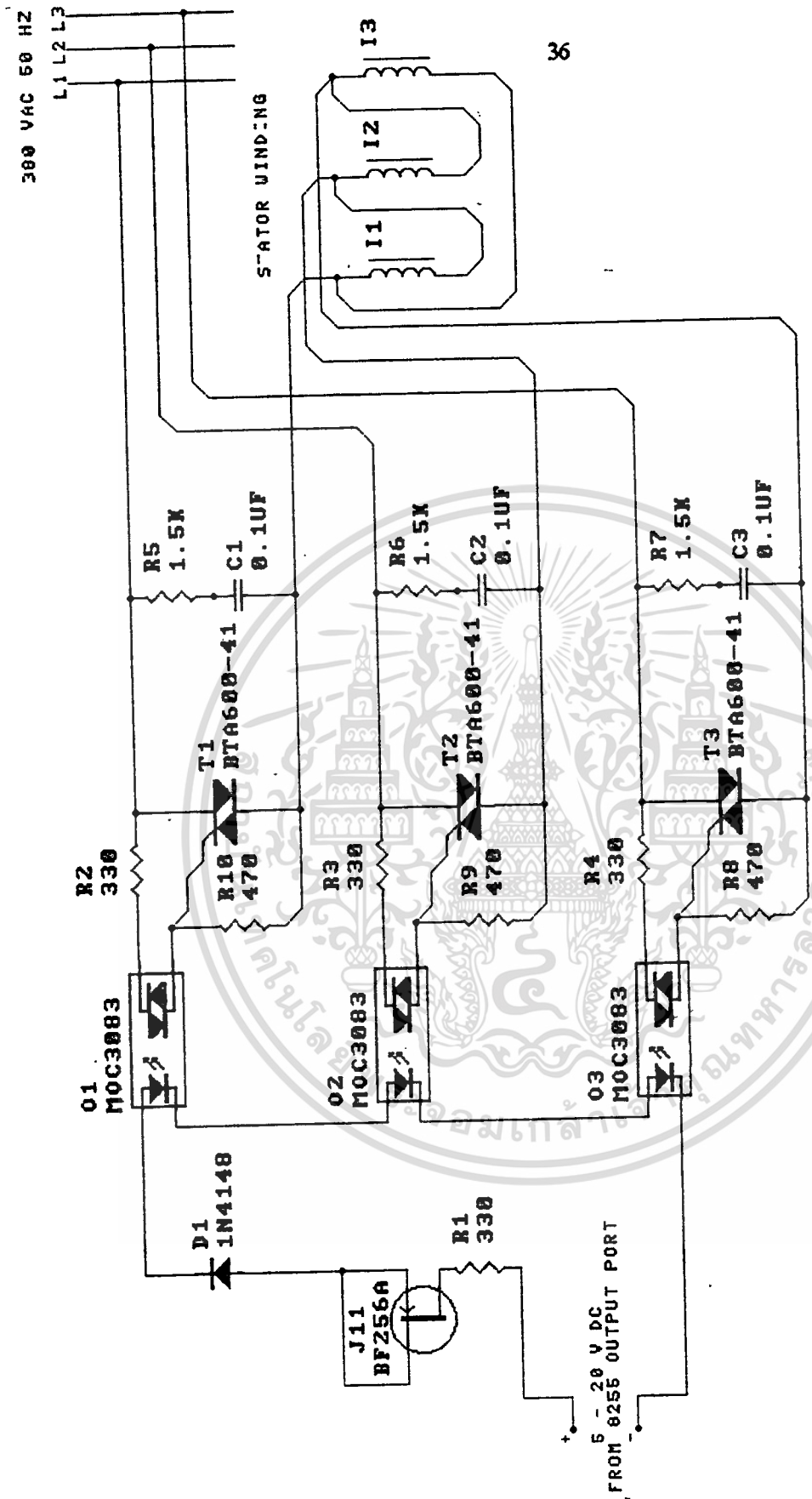
เคลื่อนที่ผ่านในช่วงนั้นๆ จึงมีความจำเป็นต้องทำการจ่ายไฟฟ้าเข้าขดลวดสเตเตอร์เป็นช่วงๆ เฉพาะในช่วงที่โรเตอร์เคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น ซึ่งจะสามารถลดกระแสเมนลงได้มากและเกิดประโยชน์สูงสุด

จากหลักการดังกล่าว เมื่อพิจารณาถึงความเร็วรอบสูงสุดในการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ซึ่งก็คือ ความถี่สูงสุดในการสวิตชิงของอุปกรณ์ตัดต่อกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าขดลวดสเตเตอร์นั่นเอง สำหรับโครงการนี้ได้ออกแบบให้มีการจ่ายไฟเป็นช่วงๆ โดยรอบความยาววง 16 เมตร โดยมีความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 6.25 รอบต่อนาที ดังนั้นอุปกรณ์ที่จะนำมาทำหน้าที่ตัดต่อกำลังไฟฟ้าเข้าสเตเตอร์นี้ จะต้องสามารถสวิตชิงได้ที่มีความเร็วไม่น้อยกว่านี้

พิจารณาการใช้แม่เหล็กคอนแทคเตอร์ จะเห็นว่าไม่มีความเหมาะสม เพราะอายุการใช้งานส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการตัดต่อของหน้าสัมผัส กล่าวคือ สมมติว่าแม่เหล็กคอนแทคเตอร์ตัวหนึ่ง มีอายุการใช้งานของคอนแทค 1 ล้านครั้ง นั่นคือ เมื่อนำมาใช้ทำหน้าที่สวิตชิงดังกล่าว จะพบว่า ถ้าหากมีการสวิตชิงอย่างต่อเนื่องแล้วจะสามารถใช้งานได้เต็มที่ เท่ากับ $10^6 / (6.25 * 3600) = 45$ ชั่วโมง หรือประมาณ 2 วันเท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว ยังมีข้อเสียเกี่ยวกับการทำงานที่อาศัยการเคลื่อนที่ทางกล ทำให้เกิดเสียงดังรบกวน ตลอดจนมีการอาร์คที่หน้าสัมผัส

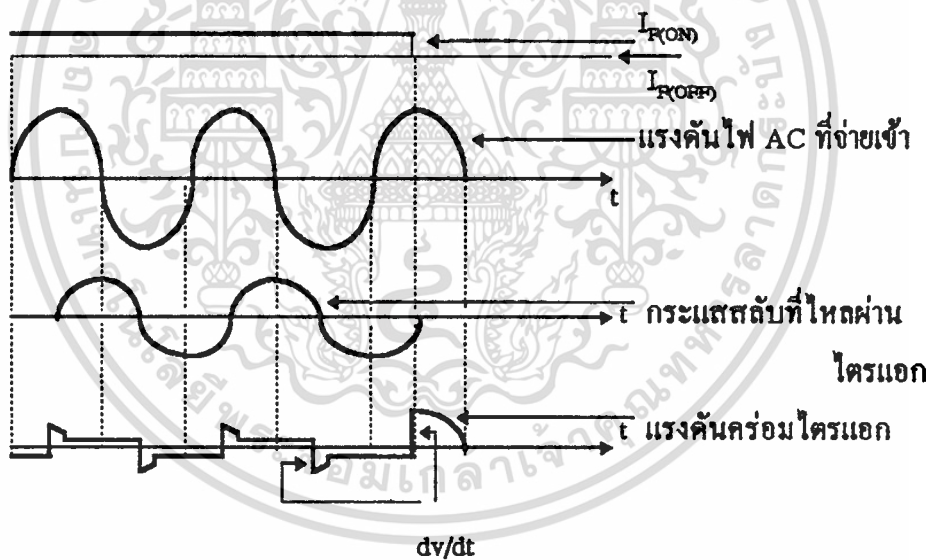
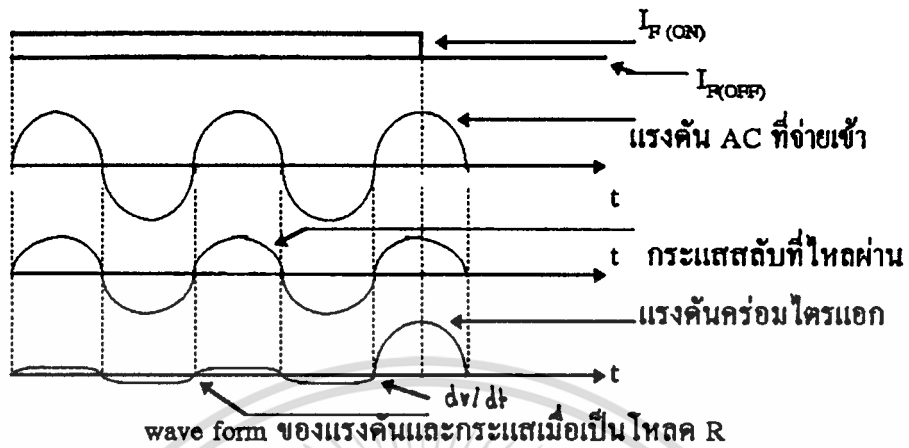
ทางเลือกอีกทางหนึ่งที่มีความเหมาะสมกว่า คือ การใช้ตัวตัดต่อทางอิเล็กทรอนิกส์แบบโซลิดสเตตริเลย์คังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีการควบคุมง่าย ปลอดภัย เนื่องจากต้องการสัญญาณควบคุมเพียงแรงดันกระแสตรง +5v เท่านั้น ซึ่งสัญญาณควบคุมในโครงการนี้จะรับมาจากคำสั่งคอมพิวเตอร์อีกทีหนึ่ง หลังจากนั้นก็จะนำสัญญาณควบคุมกระแสตรงนี้มาผ่านตัวเชื่อมโยงแสง เพื่อแยกกันโดยเด็ดขาด (Isolated) กับสัญญาณควบคุมกระแสสลับ และเราก็จะสามารถนำสัญญาณควบคุมกระแสสลับนี้ไปทริกให้กับเพาเวอร์ไครเอก ให้นำกระแสผ่านขดลวดสเตเตอร์แต่ละขดได้ และเนื่องจากชุดสวิตชิงนี้ต้องจ่ายกระแสให้กับโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำ จากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำซึ่งรูปคลื่นของกระแสจะล่าหลังแรงดันเป็นมุมเกือบ 90° ทางไฟฟ้า นั่นคือ ในขณะที่กระแสตกลงเป็นศูนย์ (รูปคลื่นไซน์) ขณะนั้นแรงดันจะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด ในสถานะเช่นนี้จะทำให้ไครเอกหยุดนำกระแส เนื่องจากกระแสไหลผ่านตัวมันมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสโวลติจ์ของตัวมันนั่นเอง เพื่อที่จะทำให้ไครเอกนำกระแสต่อไปอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องอย่างยั้งที่ชุดทริกเกอร์ จะต้องสามารถตรวจจับสัญญาณกระแสที่ตกลงผ่านแกนศูนย์นี้ได้ และสร้างสัญญาณทริกขึ้นมาทันทีเพื่อทริกให้ไครเอกมางานในครึ่งไซเคิลต่อไป ดังรูปที่ 4.2

เมื่อสามารถสั่งให้ไครเอกนำกระแสได้แล้ว ปัญหาตามมาที่สำคัญคือ เมื่อเราตัดสัญญาณควบคุมออกแล้วโดยมีเจตนาดีที่จะทำให้ไครเอกหยุดนำกระแส นั้น แต่กลับไม่เป็นเช่นดังที่คิด



รูปที่ 4.1 วงจรโซลิตสเคริเตอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

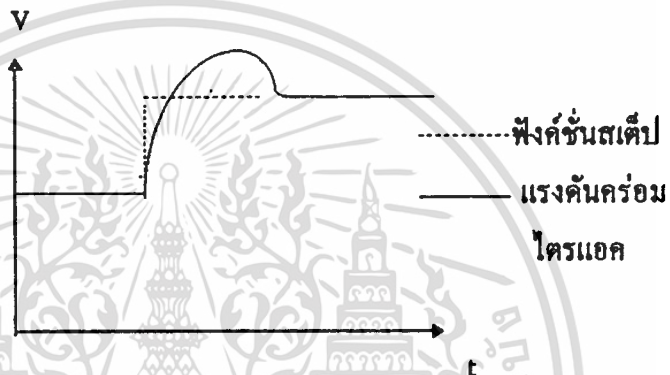


รูปที่ 4.2 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันและกระแสเมื่อเป็นโหลด R และ L

กล่าวคือ ไครแอกจะยังคงนำกระแสต่อเนื่องไปเรื่อยๆ แม้ว่าจะตัดสัญญาณควบคุมออกแล้วก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน dv/dt ที่คิกคร่อมไครแอกมีค่าสูงมาก ในขณะที่กระแสไหลผ่านไครแอกเป็นศูนย์ อัตราการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดของ dv/dt ค่าสูงๆจะทำให้ไครแอกกลับมานำกระแสได้เนื่องจาก โครงสร้างภายในของทรินสเตอร์ส่วนใหญ่แล้วจะประกอบไปด้วย R และ C ดังนั้น ค่า dv/dt ค่าสูงๆที่เปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถส่งผ่านค่า C ภายใน กลายเป็นสัญญาณควบคุมกระแสกลับภายในตัวโดยไม่พึ่งสัญญาณแรงดันกระแสตรงเหมือนเดิม จึงทำให้ไครแอกนำกระแสต่อไปได้

การแก้ปัญหาการนำกระแสได้เองของไครแอกที่นอกเหนือคำสั่งควบคุมนี้ สามารถแก้ไขได้ โดยการต่อวงจร snubber (smubber) คร่อมไครแอก ซึ่งประกอบด้วย R และ C ต่ออนุกรมกัน จุดประสงค์หลักๆของวงจร snubber นี้ ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด dv/dt เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด หากแต่ให้ค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆหรือเพิ่มขึ้นแบบคิเลียออกไป ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งคาปาซิเตอร์ภายในก็จะไม่สามารถรับรู้ได้ นั่นคือเราก็จะสามารถควบคุมให้ไครแอกหยุดนำกระแสได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.3 ลักษณะการหน่วง dv/dt ที่เป็น unit step

การออกแบบวงจร snubber นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของโหลดที่ใช้ เช่นถ้าเป็นโหลด R อาจจะไม่ต้องใช่วงจร snubber ก็ได้ แต่สำหรับโหลดความเหนี่ยวนำต้องมีแน่นอน ส่วนค่าอุปกรณ์ R และ C นั้นขึ้นอยู่กับ dv/dt ของไครแอก และค่าความเหนี่ยวนำของโหลด ซึ่งสามารถหาได้หลายวิธีแต่วิธีที่ง่ายและใช้ได้ผล อีกวิธีหนึ่งมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

การออกแบบวงจร snubber โดยวิธีแบบรีโซแนนซ์

เมื่อ R, L และ C อยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์ ดังนั้นเราจะได้รูปคลื่นของแรงดันจาก dv/dt มีลักษณะดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการออสซิลเลทแบบการหน่วงเสี้ยวหนึ่งของไซเคิล (damped quarter - cycle of oscillation) เพื่อที่จะคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในวงจร snubber ค่า dv/dt จะต้องมีความสัมพันธ์กับความถี่ด้วย สำหรับรูปคลื่นไซน์

$$V(t) = V_p \sin \omega t$$

$$dv/dt = V_p \omega \cos \omega t$$

$$\begin{aligned} dv/dt_{(\max)} &= V_p \omega \\ &= V_p 2\pi f \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } f = \frac{dv/dt(\max)}{2\pi VA(\max)} \quad \text{หรือ } 2\pi f = \omega = \frac{dv/dt(\max)}{VA(\max)}$$

เมื่อ dv/dt เป็นค่าสูงสุด ที่สภาวะหยุดนำกระแส (off state) ที่ระบุจากบริษัทผู้ผลิต ที่สภาวะรีโซแนนซ์

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{(\text{spec. } dv/dt)}{(dv/dt)_p E}$$

เมื่อ $(dv/dt)_p$ = ค่าออร์มอลโตซ์ของ dv/dt ที่อ่านได้จากกราฟรูปที่ 4.5

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$$

$$R_s = 2\rho\sqrt{\frac{L}{C}}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R, L และ C จะพิจารณาในรูปของ “แคมป์แฟคเตอร์” ซึ่งแปรผันกับค่าสูญเสียในวงจร และอิมพีแดนซ์กระเพื่อม (surge impedance) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 1.0 ซึ่งมีสูตรการคำนวณคือ

$$p = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

R คือความต้านทานสำหรับการหน่วงในวงจรสลับเบอร์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า dv/dt สามารถพิจารณาได้ว่า

เมื่อ $p < 0.5$ ความต้านทานสลับเบอร์จะมีค่าต่ำ และ dv/dt ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับการรีโซแนนซ์ ถ้าแคมป์แฟคเตอร์ต่ำกว่า 0.3 แล้วจะสามารถปรับปรุงค่า dv/dt ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่แรงดันสูงสุดและกระแสคายประจุของวงจรสลับเบอร์จะเพิ่มขึ้น รูปคลื่นแรงดันจะมีรูปร่างเป็น $1 - \cos \theta$ พร้อมด้วยโอเวอร์ชูทและ ringing (เป็นคลื่นระลอก) ค่าสูงสุด dv/dt ช่วงขณะนั้นหลังจาก $t = 0$ ซึ่งเป็นเวลาหน่วงก่อนที่แรงดันจะเพิ่มขึ้น แรงดันสูงสุดจะเป็น 2 เท่า

เมื่อ $p > 0.5$ ลักษณะรูปคลื่นจะเป็นเอกซ์โปเนนเชียล ค่าสูงสุดของ dv/dt ช่วงขณะ เกิดขึ้นที่ $t = 0$ ซึ่งมีเวลาหน่วงได้นิดหน่อยและมีโอเวอร์ชูทบ้างเล็กน้อย ไม่รุนแรง

เมื่อ $p > 1$ ความต้านทานสลับเบอร์มีค่าสูง และ dv/dt ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าของมัน ซึ่งมักจะเกิดโอเวอร์ชูทผ่านวงจรแบบโอเวอร์แคมป์

โพลอินคัลทิฟค่าสูงๆ จำเป็นต้องมีความต้านทานสลับเบอร์ค่าสูงด้วยและค่า C น้อยๆ ส่วนโพลอินคัลทิฟค่าต่ำๆก็จะกลับกันคือ R น้อยและ C มาก

ขั้นตอนในการออกแบบวงจรป้องกัน dv/dt ของไครแอก

1. พิจารณารูปที่ 4.5 และเลือกค่าแคมป์แฟคเตอร์ p ตามดุลยพินิจ = 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่านค่าอิมพีแดนซ์ของแรงดันสูงสุด (ที่ $\rho = 0.6$) = 1.25

อ่านค่าอิมพีแดนซ์ของแรงดัน dv/dt (ที่ $\rho = 0.6$) = 1.0

จากข้อมูลที่สภาวะการใช้งาน

dv/dt จากสเปคของไดรแอก = 600 V / μ s

แรงดัน โลต์ - ทุ - โลต์ = 380 V

กระแสโลต์ = 11.9 A

ความต้านทานของโหลดมีค่าน้อยมาก $\approx 0 \Omega$, ต้องจรแบบเคลด้า

$$\text{ดังนั้น } XL \cong Z = \frac{V_{rms}}{I_{rms/ph}} = \frac{380}{11.9/\sqrt{3}} = 55.31\Omega$$

ที่ความถี่ใช้งาน $f = 50$ Hz

$$E = \sqrt{2} * V_{rms} = \sqrt{2} * 380 = 537.4V$$

$$L = \frac{XL}{2\pi f} = \frac{55.31}{2\pi * 50} = 0.716H$$

2.9 ตามกฎเกณฑ์การรีโซแนนซ์

$$\omega_0 = \frac{\left(\text{spec} \frac{dv}{dt} \right)}{\frac{dv}{dt(p)} E} = \frac{600 * 10^6 \text{ v/s}}{1 * 537.4} = 1116486.8 \text{ v/s}$$

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L} = \frac{1}{(1116486)^2 * 0.716} = 4.56 \text{ nF}$$

เพื่อความเหมาะสมต่อการใช้งาน จึงเลือกค่า $C = 0.1 \mu\text{F}$

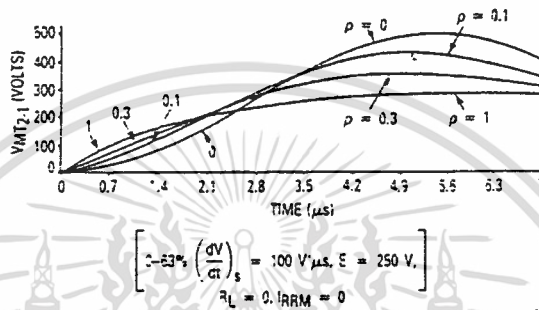
ดังนั้น

$$R_s = 2\rho \sqrt{\frac{L}{C}} = 2 * 0.6 * \sqrt{\frac{0.716}{0.1 * 10^{-6}}} \cong 1.5K\Omega$$

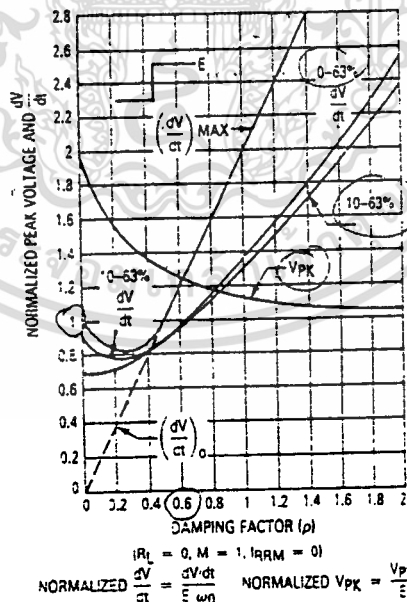
ซึ่งเป็นค่าของอุปกรณ์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป

คุณสมบัติทางรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของไดรแอก

แอมป์แฟคเตอร์และกระแสชดเชยย้อนกลับ (reverse recovery current) จะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของคลื่นแรงดันไฟฟ้า มันจะไม่เปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลเมื่อค่าสับบิงแฟคเตอร์ต่ำกว่า 0.5 (ดังรูปที่ 4.4) หรือเมื่อมีกระแสชดเชยย้อนกลับเกิดขึ้น



รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่แอมป์แฟคเตอร์ค่าต่างๆ



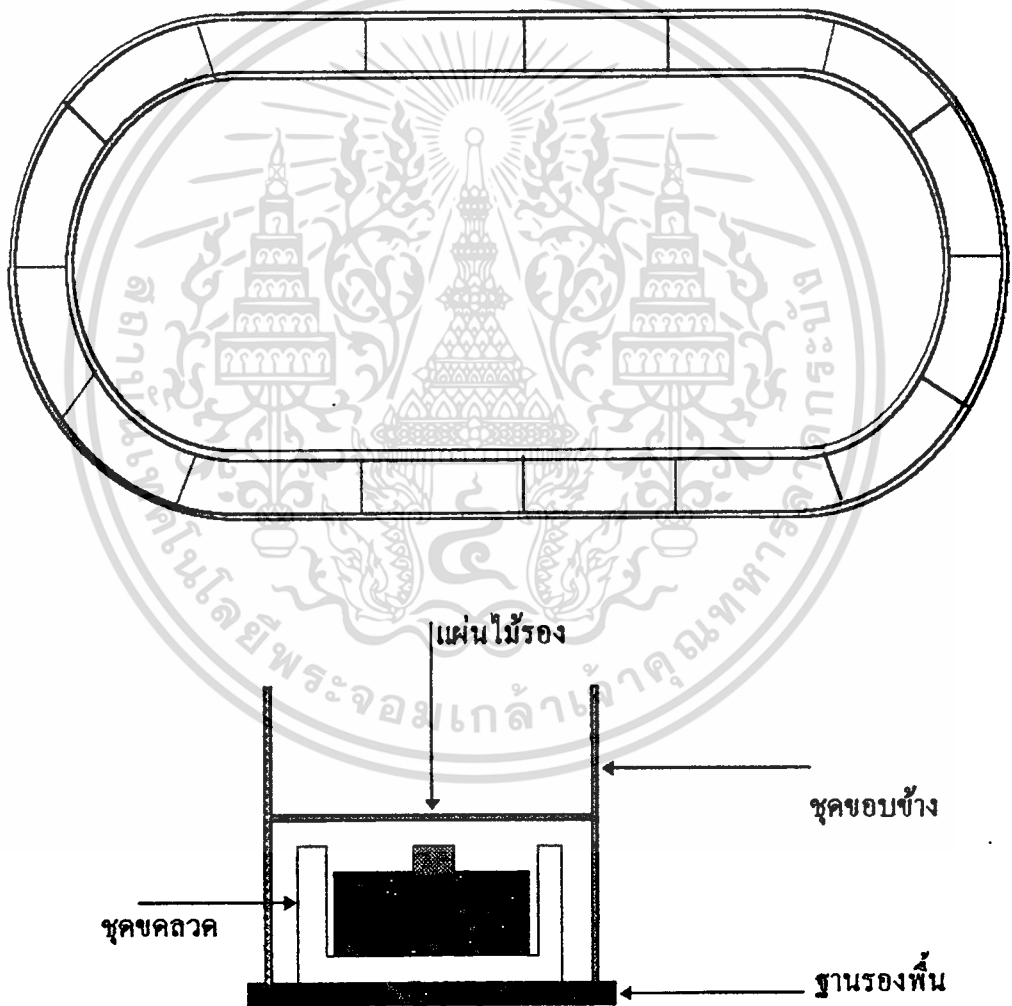
รูปที่ 4.5 การหาค่าแฟคเตอร์เทียบเคียงระหว่าง V_{pk} และ dv/dt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวราง

ลักษณะของตัวรางเดิมก่อนที่จะทำการปรับปรุง

จากลักษณะของตัวรางเดิมนั้น มีลักษณะคล้ายสนามฟุตบอล ซึ่งมีความยาวทั้งหมด 16 เมตรแบ่งเป็น 16 ช่วงๆละ 1 เมตร แต่ละช่วงมีอินเตอร์คเตอร์ 12 ตัว ดังนั้นจะมีทั้งหมด 192 ตัว ลักษณะการทำรางนั้น จะใช้ไม้อัดสร้างเป็นรูปแบบ โดยไม้อัดมีขนาด 5 มิลลิเมตร ตัดและประกอบให้มีลักษณะคล้ายราง โดยมีขอบข้างทั้งสองด้าน ขอบข้างนั้นมีความสูงประมาณ 15 เซนติเมตร ส่วนฐานของขอบข้างก็ใช้ไม้อัดรองที่นอนอยู่เหนือขดลวด แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะรูปแบบรางเดิม

จากลักษณะของตัวรางนั้นทำให้ทราบถึงข้อดี - ข้อเสีย ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี

1. การลอบตัวของโรเตอร์ ลอบตัวได้อย่างอิสระ ลักษณะการเคลื่อนที่จะเคลื่อนที่ไปตามแนวไม้แฉกที่ปิดขอบข้าง ตัวโรเตอร์ไม่หลุดโค้งเนื่องจากมีขอบข้างกัน ไม่ว่าจะมีความเร็วมากน้อยเพียงใดก็ตามเนื่องจากแรงยกของขดลวดที่กระทำต่อโรเตอร์ ไม่สามารถยกตัวโรเตอร์ให้สูงกว่าขอบข้างได้และมีแรงยกน้อย
2. ค่าใช้จ่ายในการทำตัวราง ราคาถูกและประหยัด เพราะไม้แฉกราคาไม่แพงมากนัก
3. การประกอบโครงสร้างของตัวรางทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก และรวดเร็วในการประกอบ

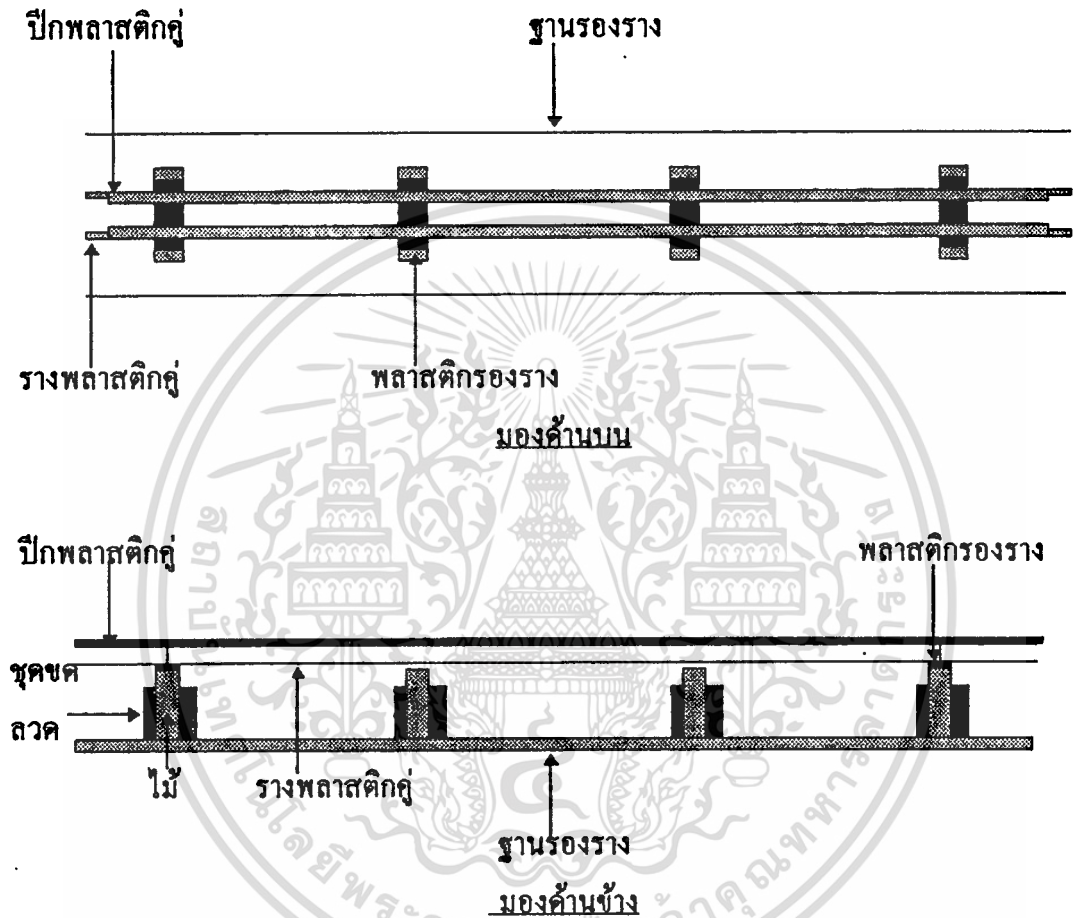
ข้อเสีย

1. เนื่องจากมีพื้นไม้ปิดกันอยู่บนขดลวด ทำให้เกิดแรงยกไม่มากนัก จึงทำให้ไม่สามารถออกแบบลักษณะของตัวโรเตอร์ให้มีลักษณะทันสมัยได้ เพราะจะทำให้มีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ตัวรถจะเสียดสีกับพื้นของตัวราง เกิดเสียงดังและความร้อน
2. จากลักษณะของตัวรางที่มีขอบข้างเป็นไม้แฉก เมื่อตัวโรเตอร์วิ่งด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ตัวโรเตอร์จะเสียดสีกับขอบข้าง ทำให้ต้องทำการลดแรงเสียดทานระหว่างขอบข้างกับตัวโรเตอร์โดยใช้ล้อเลื่อนประคองไว้ระหว่างตัวโรเตอร์กับขอบข้าง ทำให้การออกแบบตัวโรเตอร์ออกแบบได้ไม่สวยงามและไม่ทันสมัย พร้อมกันนั้นจะเกิดเสียงดังเมื่อตัวโรเตอร์วิ่ง
3. อายุการใช้งานของตัวรางที่ใช้ไม้แฉกจะสั้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ไม่มีความคงทนเท่าที่ควร และสึกหรอเร็วขึ้น เพราะเกิดแรงเสียดทานระหว่างตัวโรเตอร์กับตัวราง
4. ลักษณะของตัวรางที่ใช้ไม้แฉกไม่มีความสวยงาม เนื่องจากการประกอบไม่ประณีตโดยประกอบขึ้นอย่างง่าย ๆ

ลักษณะของตัวรางเมื่อทำการปรับปรุงเสร็จเรียบร้อยแล้ว

ลักษณะของการวางขดลวดนั้น ยังคงยึดแบบเดิมคือ มีลักษณะคล้ายสนามฟุตบอล แบ่งเป็น 16 ช่วง แต่ละช่วงมีขดลวด 12 ตัว ในการทำการปรับปรุงตัวรางนั้น จะใช้วัสดุที่มีความเสียดทานน้อยเพื่อให้เกิดการสั่นไถลของตัวโรเตอร์กับตัวรางมากยิ่งขึ้น ซึ่งวัสดุที่ใช้นั้นคือพลาสติกโดยมิให้เลือกใช้ด้วยกันหลายขนาดและหลายสี ตลอดจนสามารถดัดโค้งงอให้เป็นรูปโค้งโค้งง่าย

ลักษณะของตัวรางที่ทำการปรับปรุงนั้น เพื่อต้องการลดข้อเสียดของตัวรางเก่า โดยคำนึงถึงความสวยงามด้วย และเพื่อเพิ่มแรงยกของขดลวดกับตัวโรเตอร์เพราะฉะนั้น จึงต้องยกเลิกการใช้พื้นที่ทำด้วยไม้อัด แต่จะใช้พลาสติกแผ่นบางๆวางเป็นช่วงๆ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะของรางที่พัฒนาขึ้น

และใช้พลาสติกหนา 1 เซ็นติเมตร กว้าง 2 เซ็นติเมตรจำนวน 2 ชุด วางเป็นลักษณะคล้ายๆรางรถไฟจริงๆโดยที่พลาสติกคู่นี้จะเป็นที่รองรับตัวโรเตอร์ที่จัดทำขึ้น พร้อมทั้งเป็นตัวที่จะประคองให้ตัวโรเตอร์เคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการด้วย เพื่อความปลอดภัยและป้องกันตัวโรเตอร์จะหลุดโผล่จึงทำปีกกระหว่างพลาสติกคู่นี้เพื่อเป็นตัวป้องกันและยึดให้ตัวโรเตอร์วิ่งอยู่บนรางไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วมากเท่าไรก็ตาม

จากลักษณะของตัวรางที่ปรับปรุงนั้นทำให้เกิดข้อดี-ข้อเสียดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี

1. การถอดตัวของตัวโรเตอร์ก็จะถอดตัวอิสระด้วยเหมือนกันกับแบบที่ยังไม่ได้ปรับปรุง แต่ตัวโรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปตามแนวรางคู่พลาสติกและปีกซึ่งจะเป็นตัวบังคับทิศทางของตัวโรเตอร์ พร้อมทั้งยังป้องกันการหลุดโค้งของตัวโรเตอร์ด้วย
2. มีความสวยงามมากกว่าแบบเดิมและยังมีลักษณะที่สามารถตกแต่งให้สวยงามได้อีก
3. มีความทนทานมากกว่าแบบเดิม เนื่องจากว่าการติดตั้งตัวรางทุกชั้นตอนมีการยึดติดด้วยสกรูและพลาสติกก็เป็นแบบที่ยึดหุ่่นได้ แข็งแรง ไม่ผุ่กร่อนเมื่อเจออากาศชื้นเหมือนคังไม้อัดที่ใช้ทำตัวรางในแบบเดิม
4. สามารถทำให้มองเห็นลักษณะของโครงสร้างตัวโรเตอร์ได้อย่างถนัด ซึ่งทำให้เกิดความสวยงามขึ้น และยังมองเห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ได้อย่างชัดเจน
5. ง่ายต่อการออกแบบตัวโรเตอร์หรือตัวรถ เพราะไม่มีขอบข้าง คังนั้นจึงไม่ต้องทำล้อเลื่อนที่ข้างตัวรถ ตัวรถจะไม่กระทบกับฝาขอบข้าง จึงทำให้มีเสียงคังน้อยนั่นเอง
6. มีการเก็บสายไฟที่ใช้ในการต่อวงจรไว้อย่างดี จึงดูสวยงาม และสามารถตรวจการต่อได้ง่ายขึ้น เมื่อเกิดปัญหาของการต่อวงจร
7. มีความปลอดภัยเนื่องจากมีปีกติดอยู่บนรางพลาสติกคู่ ตัวโรเตอร์ไม่สามารถหลุดโค้งซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้แก่ผู้ทดลองและผู้ชมการทดลอง
8. ทุกส่วนสามารถประกอบเข้าด้วยกัน คังนั้นการเคลื่อนย้ายจึงสะดวกขึ้น

ข้อเสีย

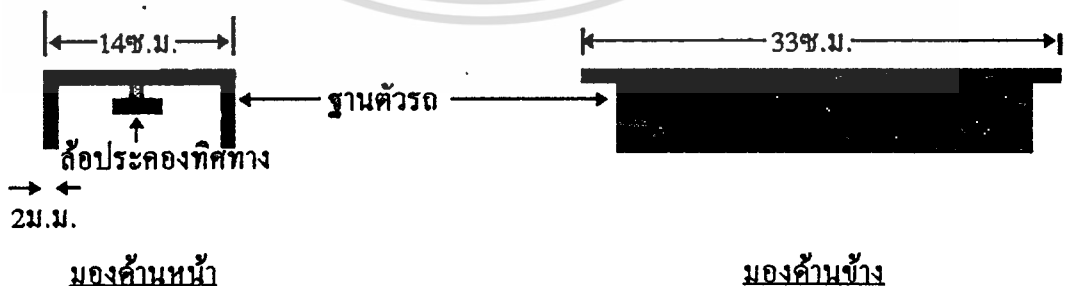
1. ค่าใช้จ่ายในการทำตัวรางมีค่ามากพอสมควร เนื่องจากราคาพลาสติกแพงกว่าไม้อัด
2. การประกอบต้องใช้เวลาานาน เนื่องจากการประกอบทุกๆส่วนต้องทำอย่างประณีตเพื่อความสวยงามและความปลอดภัย คังนั้นจึงต้องใช้เวลาานานกว่าแบบเดิม

การออกแบบตัวรถหรือตัวโรเตอร์

ตัวรถหรือตัวโรเตอร์นั้น จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆคือ ตัวฐานและหลังการด มีรายละเอียดดังนี้

1. ตัวฐานของตัวรถหรือตัวโรเตอร์

จากการทดสอบหลายๆครั้งโดยใช้แผ่นอลูมิเนียม สังกะสี จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ สังกะสี จะถูกแรงจากขดลวดดึงดูดจึงสรุปได้ว่า ใช้ไม่ได้ ส่วนแผ่นอลูมิเนียมจะถูกแรงจากขดลวดผลักไปข้างหน้าและมีแรงยก ซึ่งแรงยกจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของแผ่นอลูมิเนียม จากการทดสอบหลายๆครั้ง และหลายๆขนาดของแผ่นอลูมิเนียม จะสรุปได้ว่า แผ่นอลูมิเนียม ขนาดที่เหมาะสมที่มีแรงยกพอดีและมีขนาดเบาที่สุดคือ หนา 2 เซ็นติเมตร มีความกว้าง 14 เซ็นติเมตร ความยาว 33 เซ็นติเมตร ซึ่งเหตุผลของการใช้ขนาดความกว้าง ความยาวขนาดนี้คือ ความกว้างขนาด 14 เซ็นติเมตรจะครอบคลุมเส้นแรงแม่เหล็ก ที่เกิดจากขดลวดมากที่สุด และความยาว 14 เซ็นติเมตร จะมีความยาวที่พอเหมาะในการเข้าโค้ง เพราะตัวรางจะมีลักษณะการโค้งที่มีลักษณะเหมือนสนามฟุตบอล ถ้าความยาวมากกว่านี้จะไม่สามารถเข้าโค้งได้ดีเท่าที่ควร และถ้าขนาดสั้นกว่านี้ก็ไม่สามารถคลุมเส้นแรงที่เกิดขึ้นจากขดลวดได้มากนั่นเอง ส่วนล้อประกอบทิศทางนั้นจะใส่เข้าไป เพื่อประกอบทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวรถหรือตัวโรเตอร์และลดการเสียดสีได้ด้วย ลักษณะของฐานตัวรถสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ระบบประกอบตัวรถ

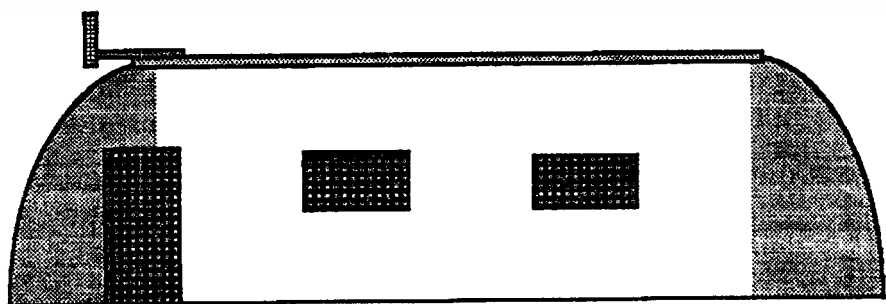
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลังคารถหรือฝาครอบ

เหตุผลของการใส่หลังคาคือต้องการความสวยงามของตัวรถ โดยต้องยึดถือน้ำหนักของตัวรถจะต้องเบาที่สุด วัสดุที่ใช้ต้องใช้พลาสติก ซึ่งมีน้ำหนักเบา นำมาตกแต่งให้มีลักษณะของตัวรถไฟ ดังรูปที่ 4.10 โดยจะนำแต่ละช่วงจำนวน 3 ชิ้นมาต่อกันเป็นรถไฟฟ้าขบวนเดียว



มองด้านหน้า



มองด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบ

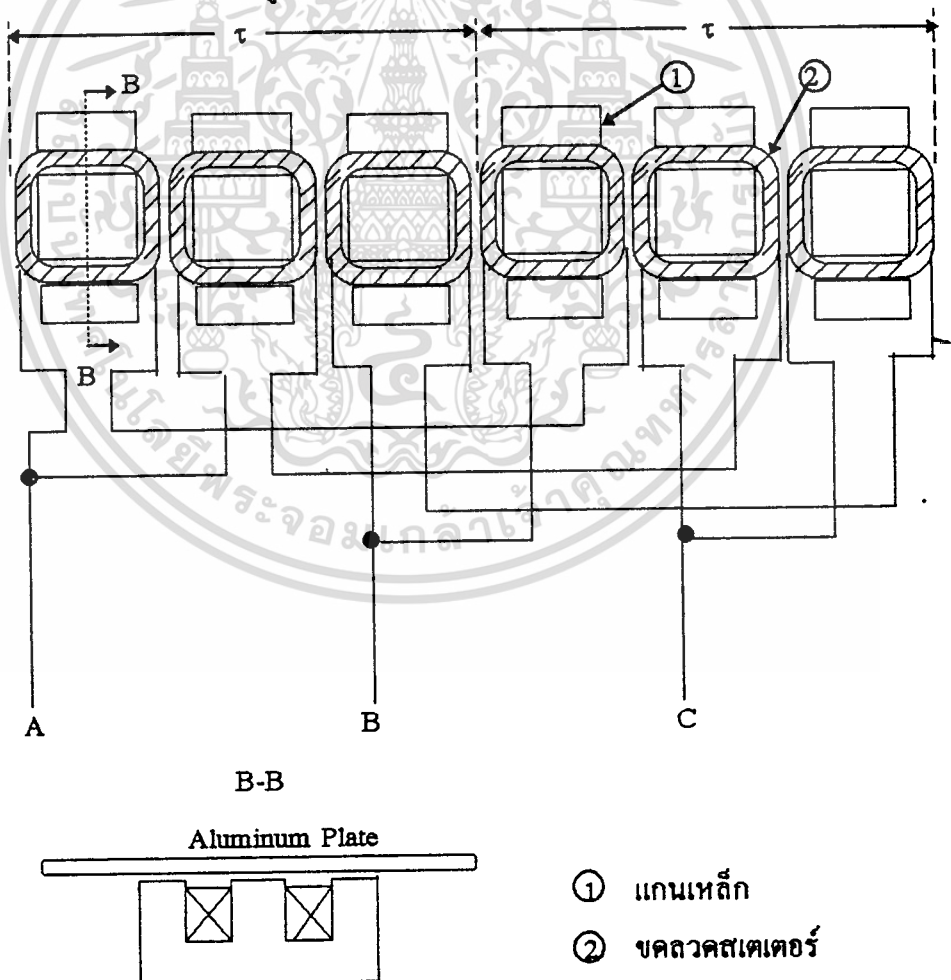
5.1 การทดสอบการลยตัวของตัวรถ

จุดประสงค์

เพื่อความต้องการทดสอบว่าแผ่นอลูมิเนียมหรือโรเตอร์ที่ความหนาแตกต่างกันจะมีการลยตัวอย่างไรบ้างและนาระยะการลยตัวไปออกแบบตัวรางด้วย

ลักษณะการทดลอง

การทดลองโดยการนำเอาชุดขดลวด มาต่อเรียงกันในลักษณะของการวางต่อกันทีละตัว ในแนวเส้นตรงซึ่งจะใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นตัวรถและจะเปลี่ยนตามความหนาของอลูมิเนียมขนาดต่างๆป้อนแรงดัน 380 โวลต์ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะการต่อวงจรขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.1 ผลการทดสอบการลอยตัวของแผ่นอลูมิเนียม

แรงดัน (V)	กระแส (A)	ความหนาของแผ่น อลูมิเนียม (mm)	ความสูงที่ยกขึ้น (cm)
380	11	1	4
380	11	2	4.5
380	11.2	5	5
380	11.4	10	6

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองระยะความสูงของการลอยตัวของแผ่นอลูมิเนียมหรือตัวรถ พอดีสรุปได้ว่า ระยะความสูงขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นอลูมิเนียม คือถ้าแผ่นอลูมิเนียมยังมีความหนามากขึ้นระยะความสูงก็ยิ่งสูงขึ้นตาม และจากข้อมูลที่ได้จะนำมาเป็นหลักการ ในการออกแบบตัวรางด้วย

5.2 การทดสอบการออกตัวของตัวรถ

1. เมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียม ขนาด 2 มิลลิเมตร 1 แผ่น

ตาราง 5.2 ผลการทดสอบการออกตัวของตัวรถ 1 คัน

การจ่ายไฟเข้าสู่ชุดขดลวด	เมื่อไม่ติดยานพาหนะ	เมื่อติดยานพาหนะ
จ่ายเข้าที่ละ 2 ชุด	ออกตัวได้	ไม่สามารถออกตัวได้
จ่ายเข้าที่ละ 3 ชุด	ออกตัวได้	ไม่สามารถออกตัวได้
จ่ายเข้าที่ละ 4 ชุด	ออกตัวได้	ไม่สามารถออกตัวได้

2. เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นอลูมิเนียม เป็น 2 แผ่น

ตาราง 5.3 ผลการทดสอบการออกตัวของตัวรถ 2 คัน

การจ่ายไฟเข้าสู่ชุดขดลวด	เมื่อไม่ติดยานพาหนะ	เมื่อติดยานพาหนะ
จ่ายเข้าที่ละ 2 ชุด	ออกตัวไม่ได้	ออกตัวไม่ได้
จ่ายเข้าที่ละ 3 ชุด	ออกตัวได้	ออกตัวไม่ได้
จ่ายเข้าที่ละ 4 ชุด	ออกตัวได้	ออกตัวไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียม 1 แผ่น ต่อพ่วงกัน 3 ชุด

ตาราง 5.3 ผลการทดสอบการออกตัวของตัวรถ 3 คัน

การจ่ายไฟเข้าสู่ชุดขดลวด	เมื่อไม่คิดยานพาหนะ	เมื่อคิดยานพาหนะ
จ่ายเข้าที่ละ 2 ชุด	ออกตัวได้	ออกตัวไม่ได้
จ่ายเข้าที่ละ 3 ชุด	ออกตัวได้	ออกตัวไม่ได้
จ่ายเข้าที่ละ 4 ชุด	ออกตัวได้	ออกตัวไม่ได้

สรุปผลการทดลอง

จะเห็นว่าไม่ว่าจะจ่ายไฟเข้าสู่ชุดขดลวดที่ละกี่ชุด การออกตัวเมื่อไม่คิดยานพาหนะสามารถออกตัวได้อย่างไม่มีปัญหา แต่เมื่อคิดยานพาหนะเข้าไป การออกตัวเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียม 1 แผ่น และ 2 แผ่นซ้อนกันก็ไม่สามารถออกตัวได้เลย แต่เมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียม 1 แผ่น ต่อพ่วงกัน 2 ชุด แล้วจ่ายไฟเข้าที่ละ 4 ชุด สามารถออกตัวได้ จึงนำหลักการนี้ไปแก้ไขโปรแกรมใหม่ โดยค่อยๆเพิ่มความเร็วจากช่วงออกตัวให้ช้าลง ซึ่งจะทำให้มันออกตัวไปได้ เมื่อออกตัวไปได้แล้วจะไม่มีปัญหาอีก

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับลิเธียมไอออนมอเตอร์ซึ่งจะพบว่า มีจุดเด่นอยู่ตรงที่ สามารถเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงได้อย่างอิสระ เป็นเชิงเส้นตรง และรวดเร็ว เนื่องจากในขณะที่เคลื่อนที่ จะไม่ก่อให้เกิดการเสียดสีหรือสัมผัสกันใดๆระหว่างส่วนของโรเตอร์กับส่วนของสเตเตอร์ เพราะในขณะที่ โรเตอร์จะถูกยกลอยขึ้นบนอากาศเหนือรางหรือสเตเตอร์ด้วยระยะแก็บค่าหนึ่ง

สำหรับการจำลองหลักการการทำงานของลิเธียมไอออนมอเตอร์ชนิด SLIM มาประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติเป็นรถไฟฟ้าขนาดเล็กนั้น ในกรณีที่ ไม่ประกอบด้วยยานพาหนะ ก็จะสามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างรวดเร็วและไม่ผิดเป้าหมายจากการควบคุมแต่ประการใดและการออกตัวขณะเริ่มวิ่งดีมาก แต่ ถ้าประกอบด้วยยานบนโรเตอร์แล้ว การออกตัวเริ่มแรกจะไม่ค่อยประสบผลสำเร็จตามที่คาดหมาย กล่าวคือถ้าหากมีแรงกกลงในแนวตั้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากมวลของยานพาหนะที่ประกอบเข้าไป นั้น จึงเท่ากับว่าเป็นการเพิ่มค่าสลิปขึ้นไปอีก ซึ่งสลิปค่าเดิมนั้นเป็นค่าที่วิกฤตอยู่แล้ว ดังนั้นจึงทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ตามความเร็วเชิงโรนัสไม่ทันในช่วงเริ่มต้น ยกเว้นถ้าหากมีการออกแรงผลักช่วยขณะเริ่มต้น หรือการหน่วงเวลาขณะเริ่มต้นออกตัวอย่างช้าๆ จึงจะสามารถวิ่งต่อไปได้ จะเห็นได้ว่า SLIM นั้นจะให้แรงลากต่ำลงขณะเคลื่อนที่ ตลอดจนมีค่าสลิปสูง เนื่องจากอาศัยหลักการ ทำงานแบบแรงผลักคันซึ่งไม่มีการดึงคู่กันไว้ในขณะเคลื่อนที่ การยกลอยตัวได้จะอาศัยการ ค่อด้านกันระหว่างสนามแม่เหล็กหลักกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในแผ่นตัวนำ เซกคันคาร์หรือโรเตอร์ และในการเคลื่อนที่ไปได้นั้นเนื่องจากการวางขดลวดสเตเตอร์ตาม แนวเส้นตรงเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตามแนวยาวได้ ลักษณะเช่นนี้เองจึงมีโอกาสที่โร เตอร์จะหยุดเองได้เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้าเป็นช่วงๆ แต่ถ้าจ่ายไฟฟ้าพร้อมกันครั้งเดียวปัญหานี้ก็จะไม่ เกิด ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเกี่ยวกับการลากจูง แต่จะเหมาะสำหรับงานทางด้านการ เคลื่อนย้ายของวัตถุที่ความเร็วต่ำ ซึ่งวัตถุดังกล่าวหมายถึงโรเตอร์ตัวเปล่ามันเอง ดังจะเห็นในการ ใช้งานเกี่ยวกับระบบคอนเวเยอร์ เคน หรืองานทางด้านอุตสาหกรรมอื่นๆ ส่วนใหญ่จะเป็นขนาดเล็ก โดยในความเป็นจริงแล้ว สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่นั้นจะมีลักษณะที่ไม่สมมาตรอันเนื่องมาจาก ผลกระทบต่างๆ และลักษณะการวางขดลวดสเตเตอร์ สิ่งเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงต่อการทรงตัว ของโรเตอร์ ดังนั้นเพื่อที่จะให้มีการรักษาการทรงตัวที่ดีของโรเตอร์ขณะเคลื่อนที่นั้น อาจมีความ จำเป็นที่จะยอมให้มีการสัมผัสกันบ้างระหว่างตัวโรเตอร์กับรางหรือแนวการเคลื่อนที่ ในลักษณะที่ เป็นขอบประคองค้ำข้าง หรืออาจจะเป็นล้อประคองเพื่อไม่ให้โรเตอร์เคลื่อนที่เฉียงเบนออกไป จากเป้าหมาย โดยคุณลักษณะประจำตัวของอินคัทชันมอเตอร์ จะต้องมีค่าสลิปเกิดขึ้นแน่นอน การที่ลิเธียมไอออนมอเตอร์มีความเสียดทานก็ยอมทำให้ค่าสลิปสูงขึ้นไปอีก ดังที่จะพิสูจน์ให้เห็นโดยผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบเขียวจะเขียนต้นฉบับไว้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้จากการทดสอบคือ วัคความเร็วเฉลี่ยของโรเตอร์ขณะที่ไม่ติดคังยานพาหนะได้เท่ากับ 6.25 เมตรต่อวินาทีหรือ ประมาณ 23 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 17 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเมื่อติดคังยานพาหนะ ในขณะที่ความเร็วเชิงโรนัสที่ความถี่ กระแสสลับ 50 Hz มีขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว และระยะ pole pitch $\tau = 0.25$ เมตร จะได้ความเร็วเชิงโรนัสคือ

$$\begin{aligned} U_s &= 2\tau f \\ &= 2 \times 0.25 \times 50 \\ &= 25 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad &= 25 \times 3600 / 1000 \\ &= 90 \text{ กิโลเมตรต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเร็วทั้งสองจะพบว่า โรเตอร์เคลื่อนที่ได้ช้ากว่าความเร็วเชิงโรนัสมาก อันเนื่องมาจากความไม่สามารถที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสเตเตอร์ได้พร้อมกันทั้งระบบนั่นเอง ดังนั้นในการคิดแปลงการควบคุมการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสเตเตอร์นั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าสั่งควบคุมให้มีการหน่วงเวลาในการตัด-ต่อแต่ละครั้งไว้จำนวนหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า โรเตอร์สามารถออกตัวหรือเคลื่อนที่ไปได้แน่นอน ซึ่งเป็นเหตุผลสำหรับการอธิบายว่าเพราะอะไรสลิปสำหรับการทดสอบในครั้งนี้จึงมีค่ามาก อย่างไรก็ตาม จากการคิดแปลงเลียนแบบการทำงานจริงตามหลักทฤษฎีนั้น สามารถให้ผลออกมาเป็นที่น่าพอใจมากระดับหนึ่ง โดยเฉพาะในด้านการเคลื่อนที่ได้อย่างลิเนียร์และรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียอยู่บ้างในด้านการแรงลากซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าในช่วงออกตัวจะมีแรงลากสูง แต่พอออกตัวไปได้แล้วแรงลากจะตกลงจึงเป็นปัญหาสำหรับการจ่ายไฟฟ้าเข้าสเตเตอร์เป็นช่วงๆดังกล่าว

จากการศึกษาการทำงานของ SLIM ที่ผ่านมา พบว่ายังมีจุดอ่อนในด้านการประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานเกี่ยวกับแรงลาก ขณะที่โหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้สลิปเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากมันสามารถสร้างขึ้นได้ด้วยหลักการที่ไม่ยุ่งยากมากนัก ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการควบคุม จึงเป็นแนวทางที่ดีสำหรับใช้เป็นต้นแบบการศึกษาการทำงาน ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานของลิเนียร์มอเตอร์ ในอีกทางหนึ่ง ที่นับวันจะเริ่มเข้ามามีบทบาทสำหรับการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบันนี้ แนวทางการศึกษาลิเนียร์มอเตอร์ที่น่าสนใจต่อไปได้แก่ ลิเนียร์เชิงโรนัสมอเตอร์ หรือแบบลิวิตซ์แมนซิน ซึ่งอาจจะมีควมซับซ้อนมากขึ้น แต่ก็ก็คาดว่าน่าจะนำไปสู่ผลที่น่าพอใจในระดับสูงขึ้นไป ดังที่จะเห็นในการนำไปใช้งานทางด้านการขนส่งมวลชนทางบกความเร็วสูง

จากการคิดแปลงการทำงานดังกล่าว จะเห็นว่า สามารถขับเคลื่อนยานพาหนะได้ตามคำสั่งควบคุม แต่จากการวิเคราะห์จะพบว่า การเคลื่อนที่นั้นจะไม่ลิเนียร์ตามความเป็นจริง แต่จะเคลื่อนที่เป็นช่วงๆ ในช่วงออกตัวโปรแกรมสั่งงานจะหน่วงเวลาในการจ่ายไฟฟ้าเข้าขดลวดนานขึ้น ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโรเตอร์มีโอกาสเคลื่อนที่น้ำหนักคำสั่งได้ ในขณะที่การรัน โรเตอร์มีโอกาสเคลื่อนที่ช้ากว่าคำสั่ง แนวทางสำหรับการพัฒนาปรับปรุงต่อไปจะต้องทำให้โรเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างลิเนียร์ยิ่งขึ้น พอสสรุปข้อเสนอแนะเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนา ดังต่อไปนี้

1. ปัญหาเกี่ยวกับความไม่เสถียรภาพในการเคลื่อนที่ เนื่องจากการการจ่ายไฟฟ้าเข้าขดลวดเป็นช่วงๆ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้หลายวิธี โดยอาจจะสร้างวงจรตรวจับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ขึ้นมา เพื่อตรวจสอบและสั่งงานให้มีการตัดต่อไฟฟ้าเข้าสเตเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติตามสถานะต่างๆอย่างเหมาะสม

2. การปรับปรุงรูปแบบรางและระบบรองรับ โดยที่สามารถลดระยะเก็บให้สั้นลงได้อีก

3. การพัฒนารูปร่างยานพาหนะให้มีลักษณะที่แอโรไดนามิกยิ่งขึ้น หรือการประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆ

4. การพัฒนาคำสั่งควบคุมให้สามารถเริ่มต้นหรือหยุดการเคลื่อนที่ได้ทุกๆตำแหน่ง

5. การกลับทางหมุนได้

6. การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ในฟังก์ชันของความเร็วลิเนียร์

ภาคผนวก ก
การวางขดลวดสเตเตอร์

ในการคำนวณออกแบบขดลวดสเตเตอร์นั้น เราสามารถที่จะพิจารณาได้ดังนี้คือ เนื่องจากว่าในโครงการนี้ เราจะใช้ขดลวดสเตเตอร์เป็นตัวอยู่กับที่แล้วจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และเกิดแรงในการผลักตัวรถหรือตัวโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปได้ ในการสร้างขดลวดสเตเตอร์เราจะต้องทราบถึงจำนวนรอบที่จะพัน เบอร์ของขดลวด ขนาดของบอบบิ้น หรือขนาดของแรง และ ระยะลอยตัวของตัวรถ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่จะต้องคำนวณหาค่าออกมาให้ได้ก่อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดที่จะพันสามารถคำนวณหาได้จาก

$$E = 4.44NfBA$$

ดังนั้น $N = E / (4.44fBA)$

และในการออกแบบเราจะเลือกใช้แกนตัว อี ขนาด 1.5×1.5 นิ้ว ซึ่งมีขายอยู่ตามท้องตลาดมาเป็นแกนที่ใช้พัน เนื่องจากว่าสามารถหาซื้อได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย โดยคำนวณที่ค่า $B = 1$

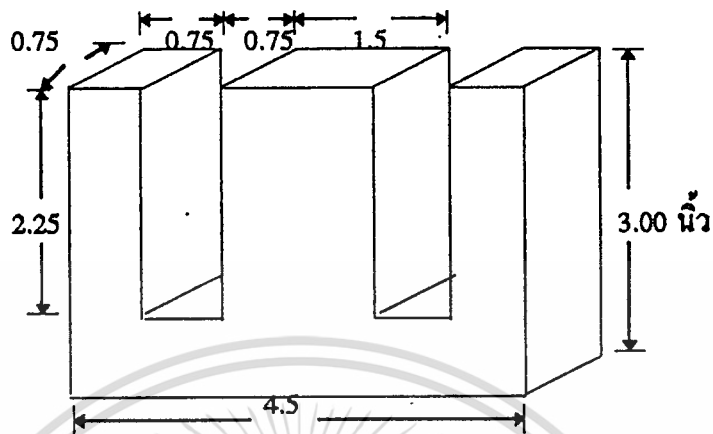
เทสลา

ดังนั้นจำนวนรอบที่ใช้ในการพัน

$$N = 220 / (4.44 \times 50 \times 1.2 \times 1.5 \times 1.5 \times 2.54 \times 2.5 \times 10^{-4})$$

$$= 570 \text{ รอบ}$$

ส่วนในการเลือกหาขนาดเบอร์ลวดทองแดงที่จะใช้ในการพันสามารถหาได้ดังนี้คือ จากการที่เราเลือกใช้แกนตัวอีขนาด 1.5×1.5 นิ้ว เราสามารถคำนวณหาวินโดว์ในการพัน ซึ่งแสดงในรูป ผ.1



รูป ผ.1 แสดงพื้นที่ในการพันขดลวดในแกนเหล็ก

จากรูป หาพื้นที่ของวินโดว์ในการพันได้คือ

$$\begin{aligned}
 &= 2.25 \times 0.75 \times 2.54^2 \times 10^2 \\
 &= 1,088.71 \text{ ตร. มม}
 \end{aligned}$$

จากรอบในการพัน (N) มีค่าเท่ากับ 570 รอบ ซึ่งเราจะคำนวณโดยการให้พื้นที่ของขดลวดทองแดงที่จะนำมาพันมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่วินโดว์ที่จะพัน และจากการพิจารณาเปิดตารางขดลวดทองแดงเพื่อหาขนาดของขดลวดทองแดงที่จะนำมาพัน เราเลือกที่เบอร์ 18 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 1.21 ตร.มม และเบอร์ 19 มีพื้นที่หน้าตัด 1.06 ตร.มม มาทำการคำนวณเพื่อที่จะได้ทราบว่าสามารถที่จะพันลงในวินโดว์ จำนวน 570 รอบได้หรือไม่ ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้

การคำนวณโดยใช้ ลวดเบอร์ 18

$$\begin{aligned}
 \text{ความสูงของวินโดว์} &= 2.25 \times 2.54 \times 10 \\
 &= 57.15 \text{ ตร.มม}
 \end{aligned}$$

หักส่วนที่สูญเสียในขอบบิ้นเนื่องจากความหนา จะเหลือประมาณ 50 ตร.มม

เพราะฉะนั้นทางด้านความยาวจะสามารถหาจำนวนรอบได้ = $50 / (1.21 \times 1.1)$
 = 37 รอบ

แต่ถ้าพิจารณาทางด้านกว้างจะได้ = $0.75 \times 2.54 \times 10$
 = 19 มม.

หักส่วนที่จะสูญเสียในบอบบีนออกจะเหลือประมาณ 14 มม.

ดังนั้นจะสามารถหาจำนวนชั้นของขดลวดที่จะพันได้ = $14 / 1.21$
 = 11 ชั้น

จำนวนรอบทั้งหมดที่จะพัน = 37×11
 = 407 รอบ

ซึ่งจากการคำนวณจะได้จำนวนรอบเท่ากับ 407 รอบ และจำนวนรอบที่จะต้องพันจริงๆ นั้นคือ 570 รอบ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าจำนวนรอบที่คำนวณได้ จึงไม่สามารถใช้ตัวเบอร์ 18 มาพันได้

การคำนวณโดยใช้ตัวเบอร์ 10

จากข้อมูลในหัวข้อที่ผ่านมา ความสูงของวินโดว์เมื่อหักความหนาของบอบบีนออกแล้วจะเหลือประมาณ 50 มม.

ดังนั้นทางด้านยาวที่จะพันได้ = $50 / (1.06 \times 1.1)$
 = 43 รอบ

ส่วนทางด้านความกว้างของบอบบีนจะเหลือประมาณ 14 มม.

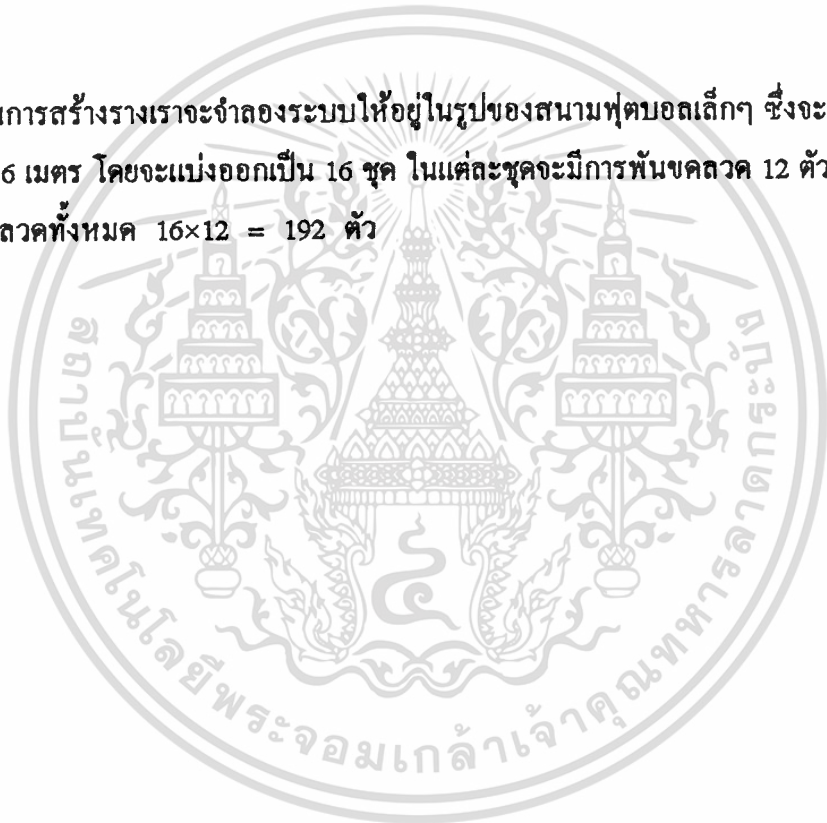
ดังนั้นจำนวนชั้นที่จะพันจะได้ = $14 / 1.06$
 = 13 ชั้น

จำนวนรอบที่พันได้คือ = 43×13

= 559 รอบ

จากจำนวนรอบที่ใช้ในการพันทั้งหมด คือ 570 รอบซึ่งจะแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ถ้าเลือกใช้ขดลวดสูงขึ้นอีกเบอร์คือ เบอร์ 20 ก็จะทำให้เนื้อที่ในการพันในวินโดว์เหลื่อมมากขึ้นไป และลวดก็จะเล็กลง ทำให้ความสามารถในการทนกระแสได้ต่ำลง ซึ่งจะมีผลต่อสนามแม่เหล็ก ระยะลอยตัวและแรงผลักต่อตัวรถ จึงเลือกใช้ขดลวดเบอร์ 19 เนื่องจากจำนวนรอบแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ในการสร้างรางเราจะจำลองระบบให้อยู่ในรูปของสนามฟุตบอลเล็กๆ ซึ่งจะมีความยาวประมาณ 16 เมตร โดยจะแบ่งออกเป็น 16 ชุด ในแต่ละชุดจะมีการพันขดลวด 12 ตัว ดังนั้นจะต้องการขดลวดทั้งหมด $16 \times 12 = 192$ ตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
โปรแกรมคำสั่งการควบคุม

```
#include <dos.h>
#include <graphics.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <conio.h>

#define LNEqual(value,low,nequal) ((value<low)&&(value!=nequal))
#define BTW(value,low,high) ((value>low)&&(value<high))
#define CharLong 20
#define CharWidth 8
#define UP 0x4800
#define DOWN 0x5000
#define LEFT 0x4B00
#define RIGHT 0x4D00
#define ENTER 0x1C0D
#define ESC 0x011B
#define SPBAR 0x3920
#define MOUSE 0x0000
#define Time_Speed 2000
#define PI 3.1416
#define Ratio 17.2727

void Initial_graph(void);
void PrintEg(int x,int y,int color,char *ch,int size,int fon);
void PrintTh(int x,int y,int color,char *ch,int size);
void Load_Font(void);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void PrintThai(int x,int y,int color,char *str,int size);
void Time_Delay(float sec);
void Window(int x,int y,int x1,int y1,int hin,int wh,int bk);
void Init_Menu(void);
void Init_mouse(void);
void Mouse_on(void);
void Mouse_active(void);
void Mouse_off(void);
void Memu(void);
void Title(void);
void Print_Title(int pages);
void Show_VI(void);
void Train(void);
void Show_Value(int i);
void Loon(int number);
void Loon_Run(int number,int cp);
void Close(int r,int c);
unsigned float Import_ADC(void);
void ADC_line(int line);
void volt(int vi);
void Clock();
int Isalpha(unsigned char temp);

unsigned char AlphN[256][CharLong];
char *Sh_menu[4]={"1. INTRODUCTION  ", "2. SIMULATE SIGNALS",
                 "3. CONTROL RAILWAY  ", "4. EXIT PROGRAM  "};
char *Sh_VI[4]={"Vab", "Vbc", "Vca", "I L"};
char *S_VI[4]={"Vab", "Vbc", "Vca", "I L"};
int pos,St,AAA,BBB,CCC;

int mouse,m_x,m_y,kis_m;

```

```
int O_port,FORMAT,GZ,ROUND;
```

```
float st_velo,en_velo;
```

```
union REGS inregs,outregs;
```

```
main()
```

```
{ Load_Font();
```

```
Initial_graph();
```

```
Init_mouse();
```

```
Menu();
```

```
Mouse_off();
```

```
closegraph();
```

```
printf("Good Bye !");
```

```
}
```

```
/* Initial Graph Mode */
```

```
void Initial_graph()
```

```
{ int GraphDriver = DETECT;
```

```
int ErrorCode =0;
```

```
int GraphMode;
```

```
initgraph(&GraphDriver,&GraphMode,"");
```

```
ErrorCode = graphresult();
```

```
if (ErrorCode != grOk)
```

```
{ printf("\n\nGraphics error \n %s",grapherrormsg(ErrorCode));
```

```
exit(1); }
```

```
outportb(0x0303,0x0080);
```

```
}
```

```
/* Prints English Character */
```

```
void PrintEg(int x,int y,int color,char *ch,int size,int fon)
```

```
{ int a,b,c;
```

```
if(size>4)size=4;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(b=1;b<=3;b++)
{ if(b==1){a=0;c=1;}
  if(b==2){a=15;c=3;}
  if(b==3){a=color;c=2;}
  setcolor(a);
  settxtjustify(1,1);
  settxtstyle(fon,0,size);
  outtextxy(x-c,y-c,ch);
}
}
/* Load font bit map of character */
void Load_Font()
{
FILE *fp;
char *filename = "normal.fon";
if((fp=fopen(filename,"rb"))==NULL)
{
printf(" Font not found"); exit(1);
}
fread(AlphN,3,sizeof AlphN,fp);
fclose(fp);
}
/* Print string to graphic mode */
void PrintThai(int x,int y,int color,char *str,int size)
{
register int l,i,j,ASCII;
unsigned char code;
int a,b,c,d,l_chr,shift;
int StrL; shift=-1;
StrL = strlen(str);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(l=0;l<StrL;l++)
    { ASCII=str[l];
      if(ASCII<1) ASCII=256+ASCII;
      if(Isalpha(ASCII)) shift++;
if(size==1||size==2)
for(i=0;i<CharLong;i++)
    {
code=AlphN[ASCII][i]; a=code;
for(j=CharWidth;j>=0;j--)
    { b=a%2; if(b==1)
      { a=(a-1)/2;
        putpixel(x+j+shift*CharWidth,y+i,color);
if(size==2) putpixel(x+j+shift*CharWidth+1,y+i,color);
      }
      else a=a/2;
    }
    }
}

/* Check argument is alpha or not */
int Isalpha(unsigned char temp)
{
int bol1,bol2;
bol1 = LNEqual(temp,0xD4,0xD1);
bol2 = BTW(temp,0xD9,0xE7)&&(temp!=0xDB);
return((bol1||bol2||temp>0xED));
}

/* Time Delay Second Unit */
void Time_Delay(float sec)

```

```

start_Time = clock();
do
{
end_Time = clock();
rel_Time = ( end_Time - start_Time ) / CLK_TCK ;
}
while(rel_Time<sec);
}

void Window(int x,int y,int x1,int y1,int hin,int wh,int bk)
{
int l,c1,c2,c3;
if(bk==0){c1=1;c2=11;c3=9;}
if(bk==1){c1=8;c2=15;c3=7;}
setlinestyle(0,0,1);
for(l=0;l<=hin;l++)
{
if(wh==1) setcolor(c1); else setcolor(c2);
line(x+l,y+l,x+l,y1-l);
line(x1-l,y+l,x+l,y+l);
if(wh==0) setcolor(c1); else setcolor(c2);
line(x1-l,y1-l,x1-l,y+l);
line(x+l,y1-l,x1-l,y1-l);
}
setfillstyle(1,c3);
bar(x+hin,y+hin,x1-hin,y1-hin);
setcolor(0);
rectangle(x,y,x1,y1);
if(bk==1&&wh==1)
{
setcolor(15);
line(x,y,x,y1-1); line(x,y,x1-1,y);
}
}

/* Initail Memu */

```

```
void Init_Menu()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{ int i;
  setfillstyle(1,7);
  bar(0,0,getmaxx(),getmaxy());
  Window(5,5,getmaxx()-5,getmaxy()-5,2,0,1);
  setfillstyle(1,5);
  bar(15,15,getmaxx()-15,getmaxy()-15);
  Window(150,getmaxy()/5-10,490,getmaxy()*4/5+10,2,0,1);
  Window(getmaxx()/4,getmaxy()/5,getmaxx()*3/4,getmaxy()*4/5,3,1,1);
  PrintEg(getmaxx()/2,125,13,"MENU",6,1);
  for(i=0;i<4;i++)
  { Window(190,170+i*50,450,210+i*50,2,0,1);
    PrintEg(getmaxx()/2,i*50+190,6,Sh_memu[i],1,1);
  }
  setcolor(10);
  rectangle(189,169+pos*50,451,211+pos*50);
  PrintEg(getmaxx()/2,50,5,"Linear Machine",2,1);
}
/* Show Main Menu for select function */
void Memu()
{ int i,key,m_act; m_act=0;
  Init_Menu();
  setcolor(10);
  rectangle(189,169,451,211);
  do
  { while(!kbhit()){ Clock(); if(mouse==0) Mouse_on();
    /* mouse active */
    if(m_x>190&& m_x<448&& m_y>170&& m_y<210&& kls_m==1)
  { key=MOUSE;pos=0;if(m_act==pos)key=ENTER; goto mm;}
    if(m_x>190&& m_x<448&& m_y>220&& m_y<260&& kls_m==1)
  { key=MOUSE;pos=1;if(m_act==pos)key=ENTER; goto mm;}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(m_x>190&& m_x<448&& m_y>270&& m_y<310&& kls_m==1)
{ key=MOUSE; pos=2; if(m_act==pos) key=ENTER; goto mm; }

if(m_x>190&& m_x<448&& m_y>320&& m_y<360&& kls_m==1)
{ key=MOUSE; pos=3; if(m_act==pos) key=ENTER; goto mm; }

}

key=bioskey(0); mm: Mouse_off();

switch(key)
{ case UP: setcolor(7);

rectangle(189,169+pos*50,451,211+pos*50);

pos = (pos==0) ? 3 :--pos; delay(300);

setcolor(10);

rectangle(189,169+pos*50,451,211+pos*50);

break;

case DOWN: setcolor(7);

rectangle(189,169+pos*50,451,211+pos*50);

pos = (pos==3) ? 0 :++pos; delay(300);

setcolor(10);

rectangle(189,169+pos*50,451,211+pos*50);

break;

case MOUSE: setcolor(7); for(i=0;i<4;i++)

rectangle(189,169+i*50,451,211+i*50);

setcolor(10); m_act=pos;

rectangle(189,169+pos*50,451,211+pos*50);

break;

case ENTER:

Window(190,170+pos*50,450,210+pos*50,2,1,1);

PrintEg(getmaxx()/2,pos*50+190,6,Sh_memu[pos],1,1);

Time_Delay(0.3);

Window(190,170+pos*50,450,210+pos*50,2,0,1);

PrintEg(getmaxx()/2,pos*50+190,6,Sh_memu[pos],1,1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเบไซประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        Time_Delay(0.5);
        if(pos==0){ Close(0,0); Title(); }
        if(pos==1){ Close(1,9); Show_VIO; }
        if(pos==2){ Close(0,3); Train(); }
        if(pos==3){ key = ESC; goto Exit;}
    Init_Menu(); Exit:
        break;
        default: break;
    }
} while(key!=ESC);
Close(0,0);
}
void Close(int r,int cp)
{ int i;
  setcolor(cp); setlinestyle(0,0,1);
  if(r==1)
  for(i=320;i>0;i--)
  { rectangle(i,i/1.3,getmaxx()-i,getmaxy()-i/1.3);
    delay(10); }
  if(r==0)
  for(i=0;i<=320;i++)
  { rectangle(i,i/1.3,getmaxx()-i,getmaxy()-i/1.3);
    delay(10); }
}
/* Show Title Introduction */
void Title()
{ int start,end,rel;
  int key0,page; page=1; St=0;
  setfillstyle(1,9);
  bar(0,0,getmaxx(),getmaxy());

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Window(3,3,getmaxx()-3,getmaxy()-3,3,0,1);
Window(8,8,getmaxx()-8,getmaxy()-8,2,1,0);
    Window(540,425,620,455,4,0,1);
        PrintEg(580,440,9,"Close",1,1);
do
    { while(!kbhit()) { Clock();
        if(St==0){ start = clock(); Print_Title(page); }
            end = clock(); if(mouse==0) Mouse_on();
        rel = ( end - start ) / CLK_TCK ;
        if(rel>60){ page = (page==4) ? 1 : ++page; St=0; }
            /* mouse active */
        if(m_x>540&& m_x<615&& m_y>425&& m_y<450&& kis_m==1){key0=ESC; goto mm1;}
        if(kis_m==1&& key0!=ESC){Time_Delay(0.25); key0=ENTER; kis_m=0; goto mm1;}
            }
        key0=bioskey(0); mm1: Mouse_off();
        switch(key0)
    {
        case ENTER:
            page = (page==4) ? 1 : ++page; St=0;
            break;
            default: break;
        }
    } while(key0!=ESC);
        Window(540,425,620,455,4,1,1);
        PrintEg(580,440,9,"Close",1,1);
        Time_Delay(0.3);
        Window(540,425,620,455,4,0,1);
        PrintEg(580,440,9,"Close",1,1);
    Close(0,5);
}

```

/* Print Title */

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void Print_Title(int pages)
{ int i;
  setfillstyle(1,9);
  bar(11,11,getmaxx()-11,getmaxy()-11);
  setcolor(15);
  line(getmaxx()-8,getmaxy()-8,getmaxx()-8,8);
  line(getmaxx()-8,getmaxy()-8,getmaxy()-8);
  Window(540,425,620,455,4,0,1);
  PrintBg(580,440,9,"Close",1,1);
  /* Show Name Surname No. */
  if(pages==1)
  { PrintThai(315,450,14,"Page 1",2);
  PrintThai(220,0*25+30,15,"โครงการ Linear Machine ",2);
  PrintThai(20,1*25+30,15,"",1);
  PrintThai(250,2*25+25,15,"คณะผู้จัดทำ",1);
  PrintThai(160,3*25+30,15,"นายกัมปนาท มโนรัตน์ ( กัม ) รหัส 36013050",1);
  PrintThai(160,4*25+30,15,"นายคำนวณ ค้างคุด ( แตน ) รหัส 36013052",1);
  PrintThai(160,5*25+30,15,"นายจรรยา คะตะวงค์ ( รุญ ) รหัส 36013054",1);
  PrintThai(160,6*25+30,15,"นายธรรยา เย็นอารมณ์ ( ป้อม ) รหัส 35103086",1);
  PrintThai(20,9*25+30,15,"",1);
  PrintThai(230,10*25+30,15,"อาจารย์ที่ปรึกษา",1);
  PrintThai(160,11*25+30,15,"ผศ.ประภาส ไพโรสุวรรณ ",1);
  PrintThai(160,12*25+30,15,"ดร.ชัยวุฒิ นิตรฤทัย ",1);
  PrintThai(20,12*25+30,15,"",1);
  PrintThai(230,13*25+30,15,"สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า",1);
  PrintThai(140,14*25+30,15,"สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง",1);
  PrintThai(160,15*25+30,15,"ห้อง 3W รุ่นที่ 5 ....",1);
  PrintThai(20,16*25+30,15,"",1);
  }
  if(pages==2)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{ PrintThai(315,450,14,"Page 2",2);
PrintThai(30,0*25+30,15,"",2);
PrintThai(280,1*25+30,15,"คำนำ ",2);
PrintThai(30,2*25+30,15," ติเนียร์มอเตอร์นับว่าเป็นเรื่องที่น่าสนใจมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง
สำหรับประชาชนชาวไทย เพราะเป็นช่วงที่มี",2);
PrintThai(30,3*25+30,15,"การนำเอารถไฟฟ้าเข้ามาใช้งานกันมากขึ้น เนื่องจากว่าเป็นรถที่มี
ความเร็วสูง ไม่เสียเวลามากในการเดินทาง อีกทั้งการเดินทาง",2);
PrintThai(30,4*25+30,15,"ในปัจจุบันนั้นมีปัญหาในเรื่องของการจราจรติดขัดเป็นอย่างมาก",2);
PrintThai(30,5*25+30,15," รถไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่กับการสร้างจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ การใช้
ตัวสเตเตอร์(Stator)",2);
PrintThai(30,6*25+30,15,"เป็นตัวรถและเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวรถหรือผู้โดยสาร และตัวโรเตอร์
(Rotor)เป็นตัวอยู่กับที่",2);
PrintThai(30,7*25+30,15,"อีกแบบก็คือการ ให้ตัวสเตเตอร์อยู่กับที่ และตัวรถหรือ โรเตอร์เคลื่อนที่
",2);
PrintThai(30,8*25+30,15," ชนิดของรถไฟฟ้ายังสามารถที่จะแบ่งออกได้หลายแบบ คือ แบบ
Induction ,แบบ DC",2);
PrintThai(30,9*25+30,15,"และแบบ Synchronous Motor เป็นต้น ทั้งยังสามารถที่จะแบ่งได้ตามทิศ
ทางการเคลื่อนที่ของ",2);
PrintThai(30,10*25+30,15,"สนามแม่เหล็กอีกด้วย",2);
PrintThai(30,11*25+30,15," สำหรับในโครงการนี้ เป็นการทำให้เป็นแบบจำลองรถไฟฟ้าขนาด
เล็กมีหลักการทำงานแบบ SLIM โดยตัวสเตเตอร์",2);
PrintThai(30,12*25+30,15,"(Stator or Primary) เป็นส่วนที่อยู่กับที่ และตัวโรเตอร์ (Rotor or
Secondary)",2);
PrintThai(30,13*25+30,15,"เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ ซึ่งก็พอจะเป็นหลักการและรูปแบบที่เราพอจะเห็น
การทำงาน รูปลักษณะของ",2);
PrintThai(30,14*25+30,15,"รถไฟฟ้าพลังงานสนามแม่เหล็กกันบ้าง",2);
PrintThai(430,15*25+30,15,"คณะผู้จัดทำ",2);
PrintThai(30,16*25+30,15,"",2);
}

if(pages==3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    { PrintThai(315,450,14,"Page 3",2);
PrintThai(20,0*25+30,15,"",2);
PrintThai(230,1*25+30,15,"ประวัติ มอเตอร์เชิงเส้น",2);
PrintThai(30,2*25+30,15," Linear machine เป็น Electrical Machine ซึ่ง Dr. Eric R.
Laitwaite",2);
PrintThai(30,3*25+30,15,"วิศวกรไฟฟ้าชาวอังกฤษเป็นผู้ค้นคว้า โดยดัดแปลงมาจากหลักการ
ทำงานของ Rotating Machine",2);
PrintThai(30,4*25+30,15,"ซึ่งมีการเคลื่อนที่ในเชิงมุม และในการใช้งานมีการสูญเสียมากเนื่องจาก
Losses ต่างๆ เช่น",2);
PrintThai(30,5*25+30,15,"การนำเอาไปใช้ขับเคลื่อน ขั้วเคลื่อนถ้อ จะเกิดการสูญเสียเนื่องจาก
ความเสียด (Friction)",2);
PrintThai(30,6*25+30,15,"การสูญเสียเนื่องจากความเฉื่อย(Inertia Loss) แต่เมื่อเกิดการคิดสร้าง
Linear Machine",2);
PrintThai(30,7*25+30,15,"ขึ้นมาซึ่งสามารถเคลื่อนที่ทางแนวราบได้โดยไม่มีการเสียดสีกัน
ระหว่างตัวรถและตัวราง จึงทำให้ลดอุปสรรค",2);
PrintThai(30,8*25+30,15,"บางส่วน และการสูญเสียลงไค้นนอกจากนี้จุดที่น่าสนใจยิ่งกว่านี้ก็คือ
การนำเอา Linear Machine",2);
PrintThai(30,9*25+30,15,"มาใช้ในด้านการขนส่งมวลขนทางบกความเร็วสูงเนื่องจากคุณสมบัติ
ของมันเคลื่อนที่ได้เร็วมาก และจากการค้นคว้าเรื่อง",2);
PrintThai(30,10*25+30,15,"Magnetic Substance และวิธีการของ Super Conductor สามารถทำให้
Machine มีน้ำหนัก",2);
PrintThai(30,11*25+30,15,"ลดลงมาก",2);
PrintThai(30,12*25+30,15,"",2);
PrintThai(30,13*25+30,15,"",2);
PrintThai(30,14*25+30,15,"",2);
PrintThai(30,15*25+30,15,"",2);
PrintThai(30,16*25+30,15,"",2);
}
if(pages==4)

```

```

    { PrintThai(315,450,14,"Page 4",2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
setcolor(14);line(320,55,320,425);
```

```
line(15,75,625,75); rectangle(15,55,625,425);
```

```
PrintThai(230,0*25+30,15,"ตารางเปรียบเทียบลักษณะทางโครงสร้าง",2);
```

```
PrintThai(110,1*25+30,15,"Rotating Machine Linear Machine",2);
```

```
PrintThai(20,2*25+30,15,"1. Frame เป็นรูป Cylindrical 1. Frame ที่สร้าง Stator จะเป็น  
เชิงเส้น",2);
```

```
PrintThai(20,3*25+30,15,"2. สนามแม่เหล็กเป็น Rotating Field 2. สนามแม่เหล็กเป็น  
Travelling Filed",2);
```

```
PrintThai(20,4*25+30,15,"3. Primary Core และ Winding จะเป็น 3. Primary Core และ  
Winding จะเป็นส่วน",2);
```

```
PrintThai(20,5*25+30,15," ส่วนเคลื่อนที่ อยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ก็ได้",2);
```

```
PrintThai(20,6*25+30,15,"4. Secondary จะเป็นแบบ Squirrel cage 4. Secondary จะเป็นแบบ  
Conductor Plate",2);
```

```
PrintThai(20,7*25+30,15," Rotor คือมี Aluminium Barฝังอยู่ใต้ผิว ซึ่งอาจจะเรียกว่า  
Reaction Plate โดยจะ",2);
```

```
PrintThai(20,8*25+30,15," ของ Rotor และมี Ending ring Short เป็นส่วนที่อยู่กับที่หรือ  
เคลื่อนที่ก็ได้",2);
```

```
PrintThai(20,9*25+30,15," Circuit หัวท้ายของ Aluminium Bar",2);
```

```
PrintThai(20,10*25+30,15," โดยจะเคลื่อนที่หรืออยู่กับที่ก็ได้",2);
```

```
PrintThai(20,11*25+30,15,"5. เคลื่อนที่โดยการมี Shaft ฝังอยู่เป็นแกน 5. เคลื่อนที่เป็นร่องนำ  
ร่องและให้ Primary or",2);
```

```
PrintThai(20,12*25+30,15," กตางของ Rotor Secondary เป็นตัวเคลื่อนที่  
",2);
```

```
PrintThai(20,13*25+30,15,"6. มี Bearing รองรับ Rotor Shaft ที่ 6. มีล้อที่จับยึด Primary ให้  
วางอยู่บนร่อง",2);
```

```
PrintThai(20,14*25+30,15," End-Plate ทั้งสองข้างเพื่อให้ Shaft",2);
```

```
PrintThai(20,15*25+30,15," หมุนได้คล่อง",2);
```

```
}
```

```
St=1;
```

```
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* Show Voltage 3 Phase & Current */
void Show_VI()
{
    register k;
    int sect,fa1,fa2,fa3,fa4,c_v;
    int i,j,key1,pos1,m_act; m_act=pos1=4,sect=1;c_v=0;
    setfillstyle(1,15);
    bar(0,0,getmaxx(),getmaxy());
    setfillstyle(1,9);
    bar(2,2,getmaxx()-2,getmaxy()-2);
    Window(8,8,getmaxx()-8,getmaxy()-8,2,1,0);
    Window(25,25,385,325,7,0,0);
    Window(45,45,365,305,4,1,0);
    PrintEg(getmaxx()/3,20,12,"SIMULATE SIGNALS",3,1);
    setfillstyle(1,0); bar(50,50,360,300);
    setcolor(15); setlinestyle(1,1,1);
    for(i=0;i<=8;i++)
    line(55,55+30*i,353,55+30*i);
        for(i=0;i<=10;i++)
    line(55+30*i,55,55+30*i,295);
        setlinestyle(0,0,1); setcolor(14);
        rectangle(479,349,581,391);
    for(i=0;i<4;i++)
    {
        Window(500,65+i*70,600,95+i*70,2,1,0);
        Window(410,61+i*70,470,99+i*70,4,0,1);
        PrintEg(440,i*70+80,9,Sh_VI[i],3,1);
        PrintThai(120+i*60,277,15,S_VI[i],2);
        setcolor(10+i); setlinestyle(0,0,3);
        line(90+i*60,288,115+i*60,288); }
        PrintThai(140,370,15,"Time/Div 2.5ms",2);
        PrintThai(60,340,15,"Volt/Div 200 v",2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PrintThai(220,340,15,"Amp/Div 40 amp",2);
    Window(270,400,370,440,4,0,1);
        PrintEg(320,420,9,"Close",3,1);
            Window(480,350,580,390,4,0,1);
                PrintEg(530,370,9,"CLEAR",2,1);
                    Window(467,425,593,466,2,1,0);
                        Window(470,428,498,462,2,1,1);
                            Window(501,428,529,462,2,0,1);
                                Window(532,428,560,462,2,0,1);
                                    Window(563,428,590,462,2,0,1);
                                        PrintThai(478,435,6,"1 2 3 4",2);
                                            Window(490,400,570,420,2,1,1);
                                                PrintThai(497,400,12,"Sections",2);
                                                    do
                                                        { while(!kbhit()){ Clock();if(mouse==0) Mouse_on();
                                                            /* mouse active */
                                                                if(m_x>410&& m_x<465&& m_y>60&& m_y<95&& kism==1)
                                                                    { key1=MOUSE;pos1=0;if(m_act==pos1)key1=ENTER; goto mm2;}
                                                                if(m_x>410&& m_x<465&& m_y>130&& m_y<165&& kism==1)
                                                                    { key1=MOUSE;pos1=1;if(m_act==pos1)key1=ENTER; goto mm2;}
                                                                if(m_x>410&& m_x<465&& m_y>200&& m_y<235&& kism==1)
                                                                    { key1=MOUSE;pos1=2;if(m_act==pos1)key1=ENTER; goto mm2;}
                                                                if(m_x>410&& m_x<465&& m_y>270&& m_y<305&& kism==1)
                                                                    { key1=MOUSE;pos1=3;if(m_act==pos1)key1=ENTER; goto mm2;}
                                                                if(m_x>480&& m_x<575&& m_y>350&& m_y<385&& kism==1)
                                                                    { key1=MOUSE;pos1=4;if(m_act==pos1)key1=ENTER; goto mm2;}
                                                                if(m_x>470&& m_x<498&& m_y>428&& m_y<462&& kism==1)
                                                                    { key1=MOUSE;pos1=5;if(m_act==pos1)key1=ENTER;sect=0; goto mm2;}
                                                                if(m_x>501&& m_x<529&& m_y>428&& m_y<462&& kism==1)

```

เอกสาร { key1=MOUSE;pos1=5;if(m_act==pos1)key1=ENTER;sect=1; goto mm2;} ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        if(m_x>532&&m_x<560&&m_y>428&&m_y<462&&kis_m==1)
    { key1=MOUSE;pos1=5;if(m_act==pos1)key1=ENTER;sect=2; goto mm2;}

        if(m_x>563&&m_x<590&&m_y>428&&m_y<462&&kis_m==1)
    { key1=MOUSE;pos1=5;if(m_act==pos1)key1=ENTER;sect=3; goto mm2;}

    if(m_x>270&&m_x<365&&m_y>400&&m_y<435&&kis_m==1){key1=ESC; goto
mm2;}

}

key1=bioskey(0); mm2: Mouse_off();
    switch(key1)
{
    case UP: setcolor(9);
        if(pos1==5) rectangle(487,398,572,421);
        if(pos1==4) rectangle(479,349,581,391);
        if(pos1<4) rectangle(409,59+pos1*70,471,101+pos1*70);
        pos1 = (pos1==0) ? 5 :--pos1; delay(100);
        setcolor(14);
        if(pos1==5) rectangle(487,398,572,421);
        if(pos1==4) rectangle(479,349,581,391);
        if(pos1<4) rectangle(409,59+pos1*70,471,101+pos1*70);
        break;
    case DOWN: setcolor(9);
        if(pos1==5) rectangle(487,398,572,421);
        if(pos1==4) rectangle(479,349,581,391);
        if(pos1<4) rectangle(409,59+pos1*70,471,101+pos1*70);
        pos1 = (pos1==5) ? 0 :++pos1; delay(100);
        setcolor(14);
        if(pos1==5) rectangle(487,398,572,421);
        if(pos1==4) rectangle(479,349,581,391);
        if(pos1<4) rectangle(409,59+pos1*70,471,101+pos1*70);
        break;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

case MOUSE: setcolor(9);
            rectangle(487,398,572,421);
            rectangle(479,349,581,391); for(i=0;i<4;i++)
            rectangle(409,59+i*70,471,101+i*70);
            m_act=pos1; setcolor(14);
            if(pos1==5) rectangle(487,398,572,421);
            if(pos1==4) rectangle(479,349,581,391);
            if(pos1<4) rectangle(409,59+pos1*70,471,101+pos1*70);
            break;
case ENTER: if(pos1<4)
{ Window(410,60+pos1*70,470,100+pos1*70,4,1,1);
  PrintEg(440,pos1*70+80,9,Sh_VI[pos1],3,1);
          Time_Delay(0.3);   FORMAT=sect;
if(sect==1)c_v=1;if(sect==2)c_v=3;if(sect==3)c_v=7;if(sect==4)c_v=15;
  if(pos1==0){ outportb(0x0300,c_v); volt(1); outportb(0x300,0x0000); }
  if(pos1==1){ outportb(0x0300,c_v); volt(2); outportb(0x300,0x0000); }
  if(pos1==2){ outportb(0x0300,c_v); volt(3); outportb(0x300,0x0000); }
  if(pos1==3){ outportb(0x0300,c_v); volt(4); outportb(0x300,0x0000); }
  Window(410,60+pos1*70,470,100+pos1*70,4,0,1);
  PrintEg(440,pos1*70+80,9,Sh_VI[pos1],3,1);
}
          if(pos1==4)
{ Window(480,350,580,390,4,1,1);
  PrintEg(530,370,9,"CLEAR",2,1);
  Time_Delay(0.3);
  setfillstyle(1,0); bar(50,50,360,300);
setcolor(15); setlinestyle(1,1,1);
for(i=0;i<=8;i++)
line(55,55+30*i,353,55+30*i);
  for(i=0;i<=10;i++)
line(55+30*i,55,55+30*i,295);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=0;i<4;i++)
{ PrintThai(120+i*60,277,15,S_VI[i],2);
  setcolor(10+i); setlinestyle(0,0,3);
  line(90+i*60,288,115+i*60,288);
  Window(500,65+i*70,600,95+i*70,2,1,0); }
Window(480,350,580,390,5,0,1);

PrintEg(530,370,9,"CLEAR",2,1);
}
if(pos1==5)
{ fa1=fa2=fa3=fa4=0;
  sect = (sect==4) ? 1 : ++sect;
  if(sect==1)fa1=1; Window(470,428,498,462,2,fa1,1);
  if(sect==2)fa2=1; Window(501,428,529,462,2,fa2,1);
  if(sect==3)fa3=1; Window(532,428,560,462,2,fa3,1);
  if(sect==4)fa4=1; Window(563,428,590,462,2,fa4,1);
  PrintThai(478,435,6,"1 2 3 4",2);
  Time_Delay(0.3);
}
break;
default: break;
}
} while(key1!=ESC);

Window(270,400,370,440,4,1,1);
PrintEg(320,420,9,"Close",3,1);
Time_Delay(0.3);
Window(270,400,370,440,4,0,1);
PrintEg(320,420,9,"Close",3,1);
Close(0,0);
}
unsigned float Inport_ADC(void)

```

```
{ int data1,data;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

data1=(float)(importb(0x0304)&0xFFFF);
data = (float)data1/256*50;
return(data);
}

```

```

void ADC_line(int line)
{ int xxx;
  if(line==4)line=1;
  if(line==1)xxx=0x0080;
  if(line==2)xxx=0x0090;
  if(line==3)xxx=0x00B0;
  outportb(0x0302,xxx); }

```

/ clock */*

```

void Clock()
{ inregs.h.ah=0x2C;
  intdos(&inregs,&outregs); gotoxy(71,2);
  printf("% .2d:% .2d:% .2d",outregs.h.ch,outregs.h.cl,outregs.h.dh);
  Mouse_active();
}

```

```
char *Volt;
```

/ Show wave form voltage */*

```

void volt(int vi)
{ int k;
  float Vin;
  ADC_line(vi); delay(500);
  Vin = (10*Import_ADC());
  setlinestyle(0,0,3);
  for(k=0;k<300;k++)
  { if(vi==1)

```

```
{ setcolor(10);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

line(55+k,175+(Vin/4.5)*sin((k*3.1416)/120+3.1416),55+k+1,175+(Vin/4.5)*sin(((k+1)*3.1416)
/120+3.1416)); }
    if(vi==2)
{   setcolor(11);
line(55+k,175+(Vin/4.5)*sin((k*3.1416)/120+5.231),55+k+1,175+(Vin/4.5)*sin(((k+1)*3.1416)
/120+5.231)); }
    if(vi==3)
{   setcolor(12);
line(55+k,175+(Vin/4.5)*sin((k*3.1416)/120+7.329),55+k+1,175+(Vin/4.5)*sin(((k+1)*3.1416)
/120+7.329)); }
    if(vi==4)
{   setcolor(13);
line(55+k,175+(Vin*FORMAT/Ratio)*sin((k*3.1416)/120+4.712),
    55+k+1,175+(Vin*FORMAT/Ratio)*sin(((k+1)*3.1416)/120+4.712)); }
}

if(vi==4)Vin=Vin*FORMAT/Ratio;
    gcvt(Vin,4,Volt);

Window(500,65+(vi-1)*70,600,95+(vi-1)*70,2,1,0);
PrintEg(550,80+(vi-1)*70,4,Volt,2,1);
if(vi<=3)PrintEg(585,80+(vi-1)*70,4,"V",1,3);
if(vi==4)PrintEg(585,80+(vi-1)*70,4,"A",1,3);

}

/* Show Train Control System */
void Train()
{   int key3, posi, posd, pos3, m_act;
    int format, fa1, fa2, fa3;
    int sp, inc, dec, seq;
    int Speed, Run_stop;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int i,ii,iii,iiii;   BBB=20;   m_act=0;
setfillstyle(1,7);
bar(0,0,getmaxx(),getmaxy());
Window(5,5,getmaxx()-5,getmaxy()-5,3,1,1);
setfillstyle(1,3);
bar(15,15,getmaxx()-15,getmaxy()-15);
for(i=1;i<=16;i++)
{ Loon(i);}
    Window(90,150,210,295,2,1,0);
    PrintThai(105,275,15,"Level Speed",2);
        setfillstyle(1,15);
        bar(120,170,180,270);
            Window(300,200,400,250,4,0,1);
            PrintEg(350,225,4,"RUN",5,1);
            Window(480,200,580,250,4,0,1);
            PrintEg(534,225,1,"STOP",5,1);
                /* Setting Speed Run */
                Window(300,290,400,330,3,0,1);
                PrintEg(350,310,5,"Speed",3,1);
                Window(300,340,400,380,2,1,0);
                Window(303,344,347,376,2,0,1);
                Window(351,344,395,376,2,0,1);
                PrintThai(312,350,8,"INC DEC",2);
                    /* Setting Format Run */
                    Window(480,290,580,330,3,0,1);
                    PrintEg(530,310,5,"Format",2,1);
                    Window(480,340,580,380,2,1,0);
                    Window(483,343,510,377,2,1,1);
                    Window(513,343,543,377,2,0,1);

```

```

Window(546,343,576,377,2,0,1);
PrintThai(490,350,6,"1 2 3",2);
/* Show Voltages & Currents */
PrintEg(445,50,3,"Show",2,1);
PrintThai(350,68,12,"Volt & Current & Velocity",2);
PrintThai(370,95,5,"Voltage Volt",2);
PrintThai(370,120,5,"Current Amp",2);
PrintThai(370,145,5,"Velocity m/s",2);
PrintThai(370,170,5,"Running round",2);
Window(390,425,490,455,4,0,1);
PrintEg(440,440,9,"Close",1,1);
/* Show Round */
Window(100,430,180,460,2,1,0);
Window(182,430,200,445,3,0,1);
Window(182,446,200,460,3,0,1);
gcvt(BBB,4,Volt);
PrintEg(140,445,13,Volt,1,1);
PrintEg(145,415,13,"Auto Stop",1,1);
setcolor(14);
rectangle(299,199,401,251);
posi=0; posd=0; format=0; i=ii=iii=iiii=0;
fa1=1; fa2=fa3=0;
ADC_line(1); sp=0; inc=0; dec=0; Speed=25; Run_stop=0; FORMAT=0;
do
{ while(!kbhit()){ Clock(); Mouse_on();
if(i==16)i=0; if(ii==16)ii=0; if(iii==16)iii=0; if(iiii==16)iiii=0;
if(Run_stop==1)
{ i++; ii++; iii++; iiii++; if(i==11||i%2==0)Show_Value(i);
if(fa1==1){ FORMAT=0; Loon_Run(i,12); FORMAT=1; Loon_Run(ii,12);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(fa2==1){ FORMAT=0; Loon_Run(i,12); Loon_Run(ii,12);
          FORMAT=2; Loon_Run(iii,12); }
if(fa3==1){ FORMAT=0; Loon_Run(i,12); Loon_Run(ii,12); Loon_Run
(iii,12);
          FORMAT=3; Loon_Run(iiii,12); }
delay(100); if(ROUND<=3)delay(1500-AAA*20); AAA++;
if(ROUND>3) { AAA=0;
for(seq=50;seq>Speed;seq--)&delay(20); /*Remark delay 20-50*/ }
          Loon_Run(i,14);
          if(ROUND==BBB){posd=1;posi=0;key3=ENTER;goto mm3;}
          }
          /* mouse active */
          if(m_x>300&&m_x<400&&m_y>200&&m_y<250&&kis_m==1)
{ key3=MOUSE;pos3=0;if(m_act==pos3)key3=ENTER;posd=0;posi=0; goto mm3;}
          if(m_x>480&&m_x<580&&m_y>200&&m_y<250&&kis_m==1)
{ key3=MOUSE;pos3=1;if(m_act==pos3)key3=ENTER;posd=1;posi=0; goto mm3;}
          if(m_x>300&&m_x<400&&m_y>290&&m_y<328&&kis_m==1)
{ key3=MOUSE;pos3=2;if(m_act==pos3)key3=ENTER;posd=0;posi=1; goto mm3;}
          if(m_x>480&&m_x<580&&m_y>290&&m_y<328&&kis_m==1)
{ key3=MOUSE;pos3=3;if(m_act==pos3)key3=ENTER;posd=1;posi=1; goto mm3;}
          if(m_x>90&&m_x<205&&m_y>150&&m_y<295&&kis_m==1){key3=SPBAR;goto
mm3;}
          if(m_x>390&&m_x<490&&m_y>425&&m_y<450&&kis_m==1){key3=ESC; goto mm3;}
          if(m_x>183&&m_x<196&&m_y>423&&m_y<441&&kis_m==1){key3=0x03;CCC=2;goto
mm3;}
          if(m_x>183&&m_x<196&&m_y>448&&m_y<456&&kis_m==1){key3=0x03;CCC=3;goto
mm3;}
}
key3=bioskey(0); mm3: Mouse_off();
switch(key3)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{ case LEFT: setcolor(14);posd=0;
    if(posi==0) rectangle(299,199,401,251);
    if(posi==1) rectangle(299,289,401,331);
    delay(300); setcolor(3);
    if(posi==0) rectangle(479,199,581,251);
    if(posi==1) rectangle(479,289,581,331);
break;
case RIGHT: setcolor(14); posd=1;
    if(posi==0) rectangle(479,199,581,251);
    if(posi==1) rectangle(479,289,581,331);
    delay(300); setcolor(3);
    if(posi==0) rectangle(299,199,401,251);
    if(posi==1) rectangle(299,289,401,331);
break;
case UP: setcolor(14); posi=0;
    if(posd==1) rectangle(479,199,581,251);
    if(posd==0) rectangle(299,199,401,251);
    delay(300); setcolor(3);
    if(posd==0) rectangle(299,289,401,331);
    if(posd==1) rectangle(479,289,581,331);
break;
case DOWN: setcolor(14); posi=1;
    if(posd==1) rectangle(479,289,581,331);
    if(posd==0) rectangle(299,289,401,331);
    delay(300); setcolor(3);
    if(posd==0) rectangle(299,199,401,251);
    if(posd==1) rectangle(479,199,581,251);
break;
case MOUSE: setcolor(3);
    rectangle(479,289,581,331);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rectangle(299,289,401,331);
rectangle(299,199,401,251);
rectangle(479,199,581,251);
        setcolor(14); m_act=pos3;
if(pos3==0)rectangle(299,199,401,251);
        if(pos3==1)rectangle(479,199,581,251);
        if(pos3==2)rectangle(299,289,401,331);
if(pos3==3)rectangle(479,289,581,331);
break;
case SPBAR: if(posd==0&&posi==1)
        { if(inc==1){ if(Speed==49)Speed--; Speed++;}
        if(dec==1){ if(Speed==1) Speed++; Speed--;}
        setfillstyle(1,13);
        bar(120,270,180,270-Speed*2);
        setfillstyle(1,15); delay(40);
        bar(120,170,180,270-Speed*2);
        }
break;
case 0x03: if(CCC==2&&Run_stop==0){
        Window(182,430,200,445,3,1,1); Time_Delay(0.2);
        Window(182,430,200,445,3,0,1); BBB++;}
        if(CCC==3&&Run_stop==0){
        Window(182,446,200,460,3,1,1); Time_Delay(0.2);
        Window(182,446,200,460,3,0,1); BBB--;}
        Window(100,430,180,460,2,1,0);
        gcvt(BBB,4,Volt);
        PrintEg(140,445,13,Volt,1,1);
break;
case ENTER:

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{ Window(300,200,400,250,4,1,1);
  PrintEg(350,225,4,"RUN",5,1);
Loon_Run(i+1,14);Loon_Run(i+2,14);Loon_Run(i+3,14);
  Time_Delay(0.3); Run_stop=1;
  ROUND=i=0; ii=i+1;iii=i+2;iiii=i+3;
  Window(300,200,400,250,4,0,1);
  PrintEg(350,225,4,"RUN",5,1);
  if(fa3==1)Loon_Run(iii+1,12);
    Loon_Run(i+1,12);
    setfillstyle(1,13);
    bar(120,270,180,270-Speed*2);
  }
if(posd==1&&posi==0)
{ Window(480,200,580,250,4,1,1);
  PrintEg(534,225,1,"STOP",5,1);
  if(i==16)i=0;
  outportb(0x0300,0x0000);
  outportb(0x0301,0x0000);
  Loon_Run(i+1,14);Loon_Run(i+2,14);Loon_Run(i+3,14);
  ROUND=i=ii=iii=iiii=0;
  Time_Delay(0.3); AAA=Run_stop=0;
  Window(480,200,580,250,4,0,1);
  PrintEg(534,225,1,"STOP",5,1); }
if(posd==0&&posi==1)
{ Window(300,290,400,330,3,1,1);
  PrintEg(350,310,5,"Speed",3,1);
  Time_Delay(0.2); inc=dec=0;
  sp = (sp==1) ? 0 : ++sp;
  if(sp==0)inc=1; Window(303,344,347,376,2,inc,1);
  if(sp==1)dec=1; Window(351,344,395,376,2,dec,1);

```

```

        PrintThai(312,350,8,"INC DEC",2);
        Window(300,290,400,330,3,0,1);
        PrintEg(350,310,5,"Speed",3,1); }
if(posd==1&&posi==1)
    { Window(480,290,580,330,3,1,1);
      PrintEg(530,310,5,"Format",2,1);
      Time_Delay(0.2); fa1=fa2=fa3=0;
      format = (format==2) ? 0 :++format;
if(format==0)fa1=1; Window(483,343,510,377,2,fa1,1);
if(format==1)fa2=1; Window(513,343,543,377,2,fa2,1);
if(format==2)fa3=1; Window(546,343,576,377,2,fa3,1);
        PrintThai(490,350,6,"1 2 3",2);
        Window(480,290,580,330,3,0,1);
        PrintEg(530,310,5,"Format",2,1); }
    break;
    default: break;
}
} while(key3!=ESC);
    outputb(0x0300,0x0000);
    outputb(0x0301,0x0000);
    Window(390,425,490,455,4,1,1);
    PrintEg(440,440,9,"Close",1,1);
    Time_Delay(0.3);
    Window(390,425,490,455,4,0,1);
    PrintEg(440,440,9,"Close",1,1);

    Close(0,0);
}
void Show_Value(int i)
{ float Value;
  setfillstyle(1,3);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

bar(440,85,485,140);

Value = (10*Inport_ADC()); /* Voltage */

gcvt(Value,4,Volt);

PrintThai(445,95,4,Volt,2);

Value = Value*(1+FORMAT)/Ratio; /* Current */

gcvt(Value,4,Volt);

PrintThai(445,120,4,Volt,2);

Value = 0; if(i==1) {
bar(440,140,485,195);

if(ROUND!=0) { en_velo = clock();
Value = 15.2*CLK_TCK/(en_velo - st_velo); /* Velocity */
} ROUND++;

gcvt(Value,4,Volt);
PrintThai(445,145,4,Volt,2);
gcvt(ROUND,4,Volt);
PrintThai(445,170,4,Volt,2);
st_velo =clock(); }
}

void Loon(int number)
{ int rad,ln,ang1,ang2;

Mouse_off();

setcolor(3);

if((number>3&&number<9)||(number>11&&number<17))
{
if(number>=12&&number<=16)
{ rad=number-12; ln=144; ang1=0; ang2=36;}
if(number>=4&&number<=8)
{ rad=number-4; ln=300; ang1=180; ang2=216;}

setfillstyle(1,14);

pieslice(150,ln,ang1+(rad*36),ang2+(rad*36),100);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        setfillstyle(1,3);
        pieslice(150,144,0,180,70);
        pieslice(150,300,180,360,70);
    }
if((number>0&&number<4)||(number>8&&number<12))
{
    setfillstyle(1,14);
    if(number>=1&&number<=3)
        { rad=number-1; ang1=51; ang2=145; }
    if(number>=9&&number<=11)
        { rad=9-number; ang1=221; ang2=249; }
        bar(ang1,ang2+(rad*52),ang1+28,ang2+(rad*52)+50);
    } Mouse_on();
}
void Loon_Run(int number,int cp)
{
    int rad,ln,ang1,ang2;
    Mouse_off();
    setcolor(14);
    if((number>3&&number<9)||(number>11&&number<17))
    {
        if(number>=12&&number<=16)
            { rad=number-12; ln=144;}
        if(number>=4&&number<=8)
            { rad=number-4; ln=300;}
            ang1=18+rad*36; ang2=18+rad*36;
            setfillstyle(1,cp);
            if(ln==300)
                fillellipse(150-85*cos(PI*ang1/180),ln+85*sin(PI*ang2/180),10,10);
            if(ln==144)
                fillellipse(150+85*cos(PI*ang1/180),ln-85*sin(PI*ang2/180),10,10);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if((number>0&&number<4)||(number>8&&number<12))
{
    setfillstyle(1,cp);
    if(number>=1&&number<=3)
        { rad=number-1; ang1=51; ang2=145; }
    if(number>=9&&number<=11)
        { rad=9-number; ang1=221; ang2=249; }
        fillellipse(ang1+15,ang2+(rad*52)+25,10,10);
    }
    out(number,cp); Mouse_on();
}

```

```

/* outport 8255 */
out(int num,int sw)
{
    int O_data;
    if(FORMAT==0);
    if(FORMAT==1&&sw==12)
    {
        if(num==16){ outportb(0x300,0x0003); outportb(0x301,0x0000); }
        if(num==15){ outportb(0x300,0x0006); outportb(0x301,0x0000); }
        if(num==14){ outportb(0x300,0x000C); outportb(0x301,0x0000); }
        if(num==13){ outportb(0x300,0x0018); outportb(0x301,0x0000); }
        if(num==12){ outportb(0x300,0x0030); outportb(0x301,0x0000); }
        if(num==11){ outportb(0x300,0x0060); outportb(0x301,0x0000); }
        if(num==10){ outportb(0x300,0x00C0); outportb(0x301,0x0000); }
        if(num==9){ outportb(0x300,0x0080); outportb(0x301,0x0001); }
        if(num==8){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0003); }
        if(num==7){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0006); }
        if(num==6){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x000C); }
        if(num==5){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0018); }
        if(num==4){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0030); }
        if(num==3){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0060); }
        if(num==2){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x00C0); }
    }
}

```

```

    if(num==1){ outportb(0x300,0x0001); outportb(0x301,0x0080); }
}
if(FORMAT==2&&sw==12)
{
    if(num==16){ outportb(0x300,0x0007); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==15){ outportb(0x300,0x000E); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==14){ outportb(0x300,0x001C); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==13){ outportb(0x300,0x0038); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==12){ outportb(0x300,0x0070); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==11){ outportb(0x300,0x00E0); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==10){ outportb(0x300,0x00C0); outportb(0x301,0x0001); }
    if(num==9){ outportb(0x300,0x0080); outportb(0x301,0x0003); }
    if(num==8){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0007); }
    if(num==7){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x000E); }
    if(num==6){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x001C); }
    if(num==5){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0038); }
    if(num==4){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0070); }
    if(num==3){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x00E0); }
    if(num==2){ outportb(0x300,0x0001); outportb(0x301,0x00C0); }
    if(num==1){ outportb(0x300,0x0003); outportb(0x301,0x0080); }
}

```

```

if(FORMAT==3&&sw==12)

```

```

{
    if(num==16){ outportb(0x300,0x000F); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==15){ outportb(0x300,0x001E); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==14){ outportb(0x300,0x003C); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==13){ outportb(0x300,0x0078); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==12){ outportb(0x300,0x00F0); outportb(0x301,0x0000); }
    if(num==11){ outportb(0x300,0x00E0); outportb(0x301,0x0001); }
    if(num==10){ outportb(0x300,0x00C0); outportb(0x301,0x0003); }

```

```

        if(num==9){ outportb(0x300,0x0080); outportb(0x301,0x0007); }
        if(num==8){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x000F); }
        if(num==7){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x001E); }
        if(num==6){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x003C); }
        if(num==5){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x0078); }
        if(num==4){ outportb(0x300,0x0000); outportb(0x301,0x00F0); }
        if(num==3){ outportb(0x300,0x0001); outportb(0x301,0x00E0); }
        if(num==2){ outportb(0x300,0x0003); outportb(0x301,0x00C0); }
        if(num==1){ outportb(0x300,0x0007); outportb(0x301,0x0080); }
    }
}

void Init_mouse()
{ int x,y;
  union REGS regs;
  regs.x.ax=0;
  int86(0x33,&regs,&regs);
}

void Mouse_on()
{ union REGS regs;
  regs.x.ax=1;
  int86(0x33,&regs,&regs);
  mouse=1;
}

void Mouse_active()
{ union REGS regs;
  regs.x.ax=3;
  int86(0x33,&regs,&regs);
  kis_m=regs.x.bx & 3;
  m_x=regs.x.cx;
  m_y=regs.x.dx;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
}  
  
void Mouse_off()  
{ union REGS regs;  
  regs.x.ax=2;  
  int86(0x33,&regs,&regs);  
  mouse=0;  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ลำดับเหตุการณ์สำคัญรถไฟความเร็วสูงทั่วโลก

พ.ศ.

- 2446 เยอรมันสร้างรถไฟขบวนเคลื่อนด้วย ไฟฟ้า ความเร็ว 210กม./ชม.
- 2507 ญี่ปุ่นเปิดเดินรถไฟความเร็วสูง (ชิงกันเซ็น) สายแรกระหว่างโตเกียว-โอซาก้า
- 2510 ฝรั่งเศสเปิดเดินรถไฟความเร็วสูง สายแรกระหว่างปารีส-ตูรูส ด้วยความเร็วรถไฟ 200 กม./ชม.
- 2515 ฝรั่งเศสเริ่มทำการทดลองระบบรถไฟ TGV (Train a grande Vitesse)
- 2517 สหรัฐอเมริกาทำการวิจัยรถไฟ ซึ่งมีความเร็วสูงถึง 410กม./ชม.
- 2519 อังกฤษเริ่มเปิดบริการรถไฟความเร็วสูง (ชนิดขับเคลื่อนด้วยดีเซลที่เร็วที่สุดในโลก)
- 2520 อิตาลีเริ่มเปิดบริการรถไฟความเร็วสูง (Direttissima) อย่างเป็นทางการ
- 2520 เยอรมันเริ่มเปิดให้บริการรถไฟ ความเร็ว 200กม./ชม.อีกครั้งหนึ่ง
- 2521 ฝรั่งเศสก่อสร้างรถไฟ TGV ขบวนแรกสำเร็จ
- 2526 ฝรั่งเศสสามารถให้บริการรถไฟ TGV ได้ถึง 270กม./ชม.
- 2529 เยอรมันทดลองรถไฟ ที่มีความเร็ว 345กม./ชม.
- 2531 รถไฟความเร็วสูงของเยอรมัน (Intercity Express-ICE) ทดลองวิ่ง ได้ความเร็วสูง 406กม./ชม.
- 2531 อิตาลีเปิดเดินรถไฟ ด้วยความเร็ว 250กม./ชม. โดยใช้รถไฟปรับเอียงได้
- 2532 อังกฤษเริ่มเปิดเดินรถไฟ ความเร็ว 200กม./ชม. ระหว่างลอนดอนกับลิคส์
- 2533 รถไฟ TGV ทดลองวิ่ง ได้เร็ว 515กม./ชม. เป็นสถิติสูงสุดของโลก
- 2533 สวีเดนเริ่มเปิดเดินรถไฟปรับเอียงได้ (รถไฟ X 2,000) สายสต็อกโฮล์ม-โกเธนเบิร์ก ความเร็ว 200กม./ชม.
- 2534 เยอรมันเปิดบริการรถไฟ ICE ด้วยความเร็ว 250กม./ชม.
- 2535 รถไฟชิงกันเซ็นในญี่ปุ่นสายฮอกไกโด ใช้ความเร็วได้ถึง 270กม./ชม.
- 2535 สเปนเริ่มเปิดเดินรถไฟความเร็วสูง (ชนิดเดียวกับรถไฟ TGV) สายแมดริด-เซบิยา ความเร็ว 300กม./ชม.
- 2536 เกาหลีใต้เลือกใช้เทคโนโลยีรถไฟ TGV สำหรับสายโซล-ปูซาน

สภาพรถไฟไทยในปัจจุบัน

การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) เป็นหน่วยงานรับผิดชอบระบบการขนส่งทางรถไฟไปประเทศไทยโครงข่ายรถไฟทั่วประเทศเป็นรางขนาดกว้าง 1 เมตร ระยะความยาว 3,870 กิโลเมตร โดยเป็นระบบรางคู่ยาว 90 กิโลเมตร ในปี พ.ศ.2535 ให้บริการขนส่งผู้โดยสารจำนวน 87.8 ล้านคน และขนส่งสินค้าจำนวน 7.1 ล้านตัน และจากขบวนการรถไฟ 38 ล้านขบวน - กิโลเมตร สามารถแยกเป็นการขนส่งผู้โดยสารร้อยละ 76 ขนส่งสินค้าน้อยกว่าร้อยละ 22 และขนส่งทั้งผู้โดยสารและสินค้าในขบวนเดียวกันร้อยละ 2

ผู้โดยสารรถไฟส่วนใหญ่จะเดินทางระยะไกล (เฉลี่ย 161 กิโลเมตร) รฟท. เดินรถไฟเข้าและออกจากกรุงเทพมหานครจำนวน 207 ขบวนต่อวัน ปริมาณผู้โดยสารได้เพิ่มขึ้นโดยตลอด รฟท. มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้บริการแก่ผู้มีรายได้น้อย (ผู้โดยสารร้อยละ 95 เดินทางด้วยรถไฟชั้นสาม และน้อยกว่าร้อยละ 1 เดินทางด้วยรถไฟชั้น 1 หรือใช้รถด่วนพิเศษที่เรียกว่า “สปรีนเตอร์”)

การเดินทางของผู้โดยสารทางรถไฟ

	พ.ศ. 2529	พ.ศ. 2535
ผู้โดยสาร (พันคน)		
ชั้นหนึ่ง	65	53
ชั้นสอง	1,775	3,890
ชั้นสาม	73,913	83,077
ผู้รถไฟดีเซลด่วนพิเศษ	949	749
รวมจำนวนผู้โดยสาร	76,702	87,769
จำนวนผู้โดยสาร-กิโลเมตร(ล้าน)	9,274	14,136
เฉลี่ยระยะเดินทางต่อผู้โดยสาร(กิโลเมตร)	121	161

ปัจจุบันรถไฟโดยสารมีความเร็วเฉลี่ยเพียง 54 กม./ชม. เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการ เช่นทางรถไฟติดกับถนนที่ระดับเดียวกัน การมีรางรถไฟเพียงรางเดียวทำให้ล่าช้าเพื่อรอสับหลัก การไม่กันรั้วตลอดแนวเส้นทาง เพื่อป้องกันคนและสัตว์เข้ามาเขตทางรถไฟ ถึงแม้ว่ารถไฟจะมีผู้โดยสารเพิ่มขึ้นแต่ก็มีสัดส่วนการเดินทางของผู้โดยสารทางรถไฟลดลงเพราะผู้โดยสารหันไปใช้รถยนต์ ดังนั้นหากมีการปรับปรุงรถไฟให้ทันสมัย ไม่ว่าจะโดยการก่อสร้างเอกสารเป็นเอกสารให้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็ตาม เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราง (ขนาดรางกว้าง 1 เมตรอย่างที่ เป็นอยู่) การปรับปรุงสถานี และการจัดหาขบวนรถไฟที่ทันสมัย เพื่อให้บริการด้วยความเร็วที่สูงขึ้น จะช่วยปรับภาพพจน์การเดินทางด้วยรถไฟให้ดีขึ้น แต่การปรับปรุงดังกล่าวจากระบบราง 1 เมตร จะเป็นข้อจำกัดในอนาคตของรถไฟไทย ที่จะไม่เพิ่มขีดความสามารถบริการได้ทัดเทียมกับรถไฟอื่นๆทั่วโลก

การวิเคราะห์การพัฒนารถไฟความเร็วสูงและโครงข่ายทั่วประเทศ

การศึกษาได้พิจารณาเทคโนโลยีของรถไฟทุกประเภท แต่พบว่าไม่ควรนำเทคโนโลยีของระบบไฟที่ใช้ขับเคลื่อนด้วยแรงผลักดันของแม่เหล็ก (MAGLEV) มาพิจารณา เพราะมีค่าก่อสร้างสูงมาก ประกอบกับยังไม่มีประเทศใดใช้ระบบนี้ (ยังอยู่ในระหว่างการทดลองวิจัยในสนามทดลองเท่านั้น) การศึกษาจึงเน้นพิจารณาเฉพาะเทคโนโลยีรถไฟที่ใช้ล้อเหล็กวิ่งบนรางเหล็กอย่างที่ใช้กันทั่วโลกเท่านั้น

เทคโนโลยีของรถไฟ 3 รูปแบบที่นำมาศึกษา ได้แก่

- 1 .การปรับปรุงรถไฟขนาดรางกว้าง 1 เมตร(Modernised Metre Gauge-MMG)
- 2 .รถไฟรางมาตรฐานความเร็วสูงสุด 200กม./ชม. (High Speed Rail-HSR 200)
- 3 .รถไฟรางมาตรฐานความเร็วสูงสุด 300กม./ชม. (High Speed Rail-HSR 300)

ซึ่งความเร็วเฉลี่ยของแต่ละระบบเป็นดังนี้

เทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูงระบบต่างๆที่ใช้ในการศึกษา		
	ความเร็ว (กม./ชม.)	
	สูงสุด	เฉลี่ย
รถไฟปัจจุบัน	110	54
MMG	150	100
HSR200	200	140
HSR300	300	190

เทคโนโลยีรถไฟ MMG เป็นการปรับปรุงระบบรถไฟขนาดรางกว้าง 1 เมตรให้ทันสมัยขึ้น โดยก่อสร้างเป็นรางคู่ตลอด และใช้รถไฟที่มีความเร็วสูงมากขึ้นเท่าที่จะใช้กับรางขนาด 1 เมตรได้ใช้ระบบอาณัติสัญญาณสมัยใหม่ทั้งหมด มีรั้วกั้นตลอดเขตทางรถไฟ ทางรถไฟที่ตัดกับถนนต้องยกยกระดับต่างกันและต้องห้ามคนและสัตว์ผ่านเข้าไปในเขตทางรถไฟ

รถไฟ HSR 200 และ HSR 300 จะใช้เทคโนโลยีของรางขนาดมาตรฐาน (กว้าง 1.435 เมตร) ใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานขับเคลื่อนรถไฟ (สายไฟฟ้าจึงทอดอยู่เหนือขบวนรถไฟ) มี

ระบบอานัติสัญญาณทันสมัยตลอดสองข้างเขตทางรถไฟ และขบวนรถไฟจะมีขีดความสามารถวิ่งได้เร็วกว่าระบบรถไฟ MMG

ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้แบบตัวอย่างดังนี้

1. รถไฟ “สปรินเตอร์” ของอังกฤษเป็นแบบตัวอย่างของรถไฟ MMG
2. รถจักรดีเซลไฟฟ้า Intercity 125 ของอังกฤษจะเป็นตัวอย่างของรถไฟ HSR 200
3. รถไฟความเร็วสูง TGV ของฝรั่งเศสหรือรถไฟชิงกันเซินของญี่ปุ่นจะเป็นแบบตัวอย่างของรถไฟ HSR 300

โดยจะพิจารณาพร้อมกับโครงข่ายรถไฟด้วยซึ่งได้วิเคราะห์ตามหัวข้อต่างๆดังนี้

- เงินลงทุนโครงการ
- ค่าใช้จ่ายในการบริการเดินรถไฟ
- ความเป็นไปได้ของงานก่อสร้าง
- ศักยภาพของจำนวนผู้โดยสาร
- ผลตอบแทนทางการเงิน
- ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ
- ความเหมาะสมที่จะนำมาดำเนินการในประเทศไทย

จะเห็นว่ากรก่อสร้างรถไฟความเร็วสูงมีวงเงินการก่อสร้างสูงมาก โดยจะมีวงเงินลงทุนตั้งแต่ 15,000 ล้านบาท (สำหรับ MMG) จนถึง 112,000 ล้านบาท (สำหรับ HSR300) และในโครงข่ายแนวทางที่ใช้เงินลงทุนน้อยได้แก่ เส้นทางจากกรุงเทพมหานครไปมาบตาพุด (ชายฝั่งทะเลตะวันออก) และไปรัฐประเท เนื่องจากมีระยะทางสั้นส่วนในระบบรถไฟนั้น รถไฟเทคโนโลยีระบบ HSR 300 ก่อนข้างจะมีวงเงินลงทุนสูงมาก ซึ่งคงจะสูงเกินกว่าที่จะนำมาก่อสร้างในประเทศไทยในปัจจุบันได้เพราะฉะนั้นสำหรับเทคโนโลยีระบบ MMG และ HSR 200 น่าจะเหมาะสมกับประเทศไทยมากกว่า ซึ่งทั้งสองระบบนี้จะวิเคราะห์ในรายละเอียดของโครงข่ายสายชายฝั่งทะเลตะวันออกต่อไป

สรุปผลการศึกษาโครงข่ายทั้งประเทศ

สรุปผลการศึกษาที่สำคัญๆสำหรับโครงข่ายทั้งประเทศได้ดังนี้ :

1. เทคโนโลยีรถไฟ HSR 300 มีเงินลงทุนสูงมาก เปรียบเทียบกับปริมาณผู้โดยสารที่คาดคะเนว่าจะให้บริการรัฐบาลไทยจึงไม่สมควรนำเทคโนโลยีระบบนี้มาดำเนินการในขณะนี้
2. โครงข่ายที่คาดว่าจะมีความเหมาะสมในการลงทุนมีหลายโครงข่าย โดยโครงข่ายไปชายฝั่งทะเลตะวันออกมีความเหมาะสมมากที่สุด

3. รถไฟความเร็วสูงเป็นระบบขนส่งที่มีวงเงินลงทุนสูงจึงควรจะลงทุนเฉพาะในสายทางที่มีปริมาณผู้โดยสารเป็นจำนวนมากเท่านั้นจึงจะคุ้มทางเศรษฐกิจ

4. ผู้โดยสารที่จะใช้รถไฟความเร็วสูงได้แก่ นักธุรกิจที่ยินดีจ่ายค่าโดยสารราคาแพง โดยคาดว่าจะได้รับบริการที่คุ้มค่าต่อการเดินทางทำธุรกิจ

5. เพื่อจูงใจให้ผู้โดยสารใช้บริการรถไฟความเร็วสูงมากขึ้นจึงจำเป็นต้องจัดระบบขนส่งสาธารณะอื่นๆต่อเนื่องกับรถไฟความเร็วสูงในเขตกรุงเทพมหานครด้วย

6. ผู้บริหารโครงการรถไฟความเร็วสูง จะต้องเป็นผู้มีประสบการณ์และมีการบริหารที่เป็นอิสระในการวางแผนงานการก่อสร้าง และการบริหารระบบในเชิงธุรกิจ โดยจำเป็นจะต้องได้รับการสนับสนุนทุกรูปแบบจากรัฐบาลโดยไม่เข้าไปก้าวก่ายเรื่องการบริหารงาน

7. รถไฟความเร็วสูงก่อให้เกิดและช่วยสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ช่วยส่งเสริมการค้าขาย การท่องเที่ยว การอุตสาหกรรม และทำให้การเดินทางเป็นไปตามที่ประชาชนต้องการอย่างสมบูรณ์จึงนับได้ว่าเป็นระบบขนส่งที่เหมาะสมกับประชาชนที่มีความเจริญแล้ว

ประเด็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม - การเดินรถไฟต้องคำนึงเรื่องเสียงจากรถไฟ ซึ่งถือเป็นเรื่องสำคัญ แต่เนื่องจากรถไฟความเร็วสูงที่ศึกษานี้ ใช้พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนจึงก่อให้เกิดเสียงดังเพียงเล็กน้อยต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดคนออกนอกนี้จะช่วยให้อากาศปราศจากมลภาวะเพราะไม่มีการปล่อยไอเสียใดๆออกมา จะช่วยให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และการติดตั้งเครื่องปรับอากาศทั้งขบวนรถไฟทำให้ขบวนรถเก็บไว้ในรถไฟไม่หล่นออกมาภายนอก นอกจากนี้ปัญหาจากการแบ่งที่ดินเป็นสองข้างจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจะใช้แนวทางรถไฟที่มีอยู่เดิมเป็นหลัก สำหรับผลกระทบต่อภูมิทัศน์นั้นคาดว่าจะไม่เป็นปัญหาเพราะรางรถไฟจะก่อสร้างไว้ระดับพื้นดินเป็นส่วนใหญ่ กล่าวได้ว่ารถไฟความเร็วสูงสายชายฝั่งทะเลตะวันออกจะเป็นระบบขนส่งที่ช่วยส่งเสริมสภาพแวดล้อมความเป็นอยู่ให้ดีขึ้น

บทสรุปเทคโนโลยีและแนวเส้นทาง-รางมาตรฐานความเร็วสูงสุด 160 กม./ชม.

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเลือกเทคโนโลยีควรขึ้นอยู่กับข้อสรุป 2 ประการ ได้แก่

1. รถไฟความเร็วสูง 200กม./ชม. มีราคาแพงและเวลาที่ใช้เดินทางได้เร็วขึ้นเล็กน้อย จะไม่เกิดความคุ้มค่ามากนัก เนื่องจากสายชายฝั่งตะวันออกมีระยะทางค่อนข้างสั้น ดังนั้นการใช้รถไฟที่มีความเร็วต่ำเล็กน้อยแต่มีราคาถูกกว่าน่าจะเหมาะสมกว่า

2. รถไฟชานเมืองของ รฟท. จะเพิ่มขบวนรถไฟเพื่อให้บริการเพิ่มขึ้นในอนาคตทำให้ทางรถไฟยกระดับของโครงการไฮปเวสต์ (ขนาดราง 1 เมตร) เกิดข้อจำกัดด้านขีดความสามารถ หากให้เดินรถไฟความเร็วสูงร่วมกับรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย บนโครงการไฮปเวสต์

ย่อมจะเกิดปัญหาถ้าเป็นคั้งนี้การใช้รถไฟความเร็วสูงที่มีขนาดราง 1 เมตร จึงไม่สามารถกระทำ
ได้ และจำเป็นจะต้องก่อสร้างเป็นรางมาตรฐานไปยังสถานีที่ห้วยขวางเท่านั้น

ผลที่ได้จึงน่าจะเป็นรถไฟความเร็วสูงระดับ 160 กม./ชม.-บนรางมาตรฐาน (S160) ขับ
เคลื่อนด้วยไฟฟ้าชนิดที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพสามารถบรรทุกผู้โดยสารได้จำนวน 200
400 หรือ 600 คน แล้วแต่ว่าจะพ่วงตู้รถไฟกี่ตู้ในหนึ่งขบวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1ก. สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการวิเคราะห์

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_1	levitation force , N
F_n	normal force , N
g	airgap , m
G	goodness factor
J_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_1	airgap leakage coefficient
K_s	skin-effect coefficient
L	self-inductance , H
M	mutual inductance , H
p	number of pole pairs
R_1, R_2	primary , secondary resistance (per phase) , ohm
s	slip
W	number of turns per phase
X_m	magnetizing reactance (per phase) , ohm
$\beta = 2\pi / \lambda$	wave number , m^{-1}
$\lambda = 2\tau$	wave length , m
ω	angular frequency , rad / sec
ϕ	flux , weber
σ	conductivity , S / m
τ	pole pitch , m

ตารางที่ 2ก.คำย่อทางลิเนียร์มอเตอร์

DSLIM	double-sided linear induction motor
EMB	electro magnetic bearing
EML	electromagnetic launcher
HMTM	helical motion tubular motor
HPM-LSTM	hybrid permanent magnet linear stepper motor
HSGT	high-speed ground transportation
LEM	linear electric motor
LF	longitudinal flux
LHSM	linear synchronous homopolar motor
LIM	linear induction motor
LLM	linear levitation machine
LM	linear motor
LMO	linear oscillating motor
LRM	linear reluctance motor
LSHM	linear synchronous homopolar motor
LSM	linear synchronous motor
LSTM	linear stepper motor
PMLMO	permanent-magnet linear motion oscillator
PMLSM	permanent-magnet linear synchronous motor
PMLSTM	permanent-magnet linear stepper motor
TF	transverse flux
TLIM	tubular linear induction motor
SLIM	single-sided linear induction motor
VRLSTM	variable-reluctance linear stepper motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการนี้ นอกจากการร่วมมือในการทำงานของผู้ร่วมกลุ่มโครงการด้วยกันแล้ว ยังได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ คือ ผศ. ประภาย โพรสุวรรณา พร้อมทั้งคำแนะนำในบางส่วนจาก ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ซึ่งนำมาใช้ในการแก้ปัญหาระหว่างการทำให้โครงการสำเร็จลงไปด้วยดี พร้อมกันนั้นยังได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ในด้านการอำนวยความสะดวกของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการจาก ผศ. มณฑล ธีตาจินดาไกรฤกษ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนเพื่อนๆ และผู้มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือทุกท่าน

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

หนังสืออ้างอิง

- [1] Nasar, S.A. and Boldea, I., Linear Electric Motor . New Jersey : Prentice Hall, Inc., 1987
- [2] R M.PAI, Polyphase Linear Induction Motors With Non - Magnetic Secondaries : "A Review on Longitudinal - End Transverse - Edge Effects", Hemisphere Publishing Corporation. 1988
- [3] Eric R. Laithwaite, kil; Linear Linear Electric Machines, A personal View Proceedines of the IEEE, Vol, 63, no.2 pp.250-290

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้