



ปีการศึกษา 2530

ลิเชียร์ มอเตอร์

โดย

เทพจักร เกตุแก้ว

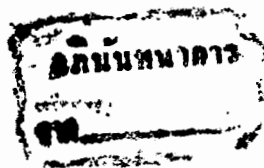
นิพนธ์ แสงเขียว

นพ พุทธวิบูลย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีรศักดิ์ วรสุเมทโรสด

อาจารย์ผู้วางฯ โสมพงศ์



ปริญญาโท ศึกษาศาสตร์ 2530

ภาควิชา..... ศึกษาศาสตร์

คณะศึกษาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง..... ศึกษาศาสตร์

ผู้จัดทำ.....

1. นาย เทพจักร เกตุแก้ว เลขทะเบียน 27.1067

2. นาย นิพนธ์ แสงเขียว เลขทะเบียน 27.1094

3. นาย นพ พุทธิวิมล เลขทะเบียน 27.1096

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(..... รศ.ดร. หิรัญศักดิ์ วรสุนทรโรตถ))

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(..... อาจารย์บวรพงษ์ ไสยมงคล))



ลิเนียร์มอเตอร์

เทพจักร เกตุแก้ว

นิพนธ์ แสงเขียว

นพ พุทธวิบูลย์

รศ.ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สุวัฒน์ โสมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2530

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นรายละเอียดของโครงการเกี่ยวกับลิเนียร์มอเตอร์ ที่ไฮยก
วัตถุ โดยจะเน้นทางด้านเสถียรภาพของงานเซคคัน์คาร์ (Secondary) ซึ่งเป็นส่วนเคลื่อนที่
ลักษณะพิเศษของลิเนียร์มอเตอร์ตัวนี้คือ เมื่อเรากำลังงานเซคคัน์คาร์ ให้เบนออกจากสมมาตรของ
ชดลวพรามาร์ (i Primary) มันจะสามารถดึงตัวเองเข้าสู่สมมาตรได้เอง การเข้าสู่จุดสมมาตร
ด้วยตัวเองนั้นมีผลมาจากทราเวลลิ่งฟิลด์ (Travelling Field) ที่วิ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของชด
ลวพรามาร์ตลอดเวลา ซึ่งเกิดจากการเรียงลำดับขั้วขั้วขั้ว 3 เฟสให้ชดลวพรามาร์ กิ่งที่จะ
ได้แสดงในรายละเอียดต่อไป การคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการคำนวณขั้นต้น คือจะคิดเป็น
แรงสูงสุดที่เครื่องให้ออกมาได้ ซึ่งจะเกิดขณะที่ชดลวพรามาร์และงานเซคคัน์คาร์กำลังจะแยก
จากกัน ส่วนเรื่องการประยุกต์ใช้งานนั้นยังไม่ชื่อนามากแล้ว เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่อง
ต่ำมาก และต้องมีการกันค่อไปในโครงการอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LINEAR MOTOR

Theppajit, Kadakaew

Nipon Sangkiew

Nop Puttavibul

Dr. Birasak Varasundharosoth Advisor

Suwong Sompok Advisor

1987

Abstract.

This thesis contains the detail of project about Linear - Motor in the use of levitation and particular in stability for the secondary disc that is the moving part. Special characteristic of this Linear Motor is, when we pull secondary disc in order to make it out the symmetrical of primary coils, it can put it self to the original symmetrical point. this ability is the effect of travelling field that run inward to the center of primary coils by the supply of sequential 3 phase voltage that will be shown in detail in next following chapter. Lifting force is calculated by first degree calculation, it is the maximum force that be occurred when primary coils and secondary disc begin to be separated form each other. Application part of this Linear Motor will not be shown here because of low efficiency of this machine that must be researched next.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	11
บทที่ 1 บทนำ	1
★บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
✓ 2.1 การยกलयโดยการเหนี่ยวนำ	3
✓ 2.2 โครงสร้างส่วนพหามารีและเซคชันคาร์	10
2.3 ไทริสเตอร์	14
2.3.1 เจ็อนโซการนำกระแส	15
2.3.2 เจ็อนโซการค้างการนำกระแส	15
2.3.3 เจ็อนโซการหยุดการนำกระแส	15
2.4 วิธีการควบคุมเฟส	16
2.4.1 การเร็คติไฟเยม 1 เฟส ฮาล์ฟเวฟ	16
2.4.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้า เอซี	18
★บทที่ 3 การออกแบบและสร้าง	20
✓ 3.1 การออกแบบแกนเหล็กและชกlovak	20
3.2 การออกแบบสัญญาณจกขนวนไทริสเตอร์	25
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	32
บทที่ 5 บทวิจารณ์ และสรุป	34
★ภาคผนวก	
✓ผ.1 ค่าปัจจัยที่คี่สำหรับเครื่องจักรกลแม่เหล็กไฟฟ้า	35
✓ผ.2 ความเร็วของคลื่นแไอเหล็กไฟฟ้า	36
✓ผ.3 แรงยกทางแม่เหล็ก	36
กิติกรรมประกาศ	39
เอกสารอ้างอิง	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ รูปภาพ กราฟและตาราง

รูปที่	หน้า
1 ผลของแรงคามการหักคองของ แอมแปร์ และบีโอดีซาวาร์ท	3
2 การผลิตขั้ว ซึ่งเป็นผลจากการไหลกลับทิศของกระแส	4
3 การเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์ จากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก	4
4 การเสริมกันของเส้นแรงจากการพันขลวด	5
5 การเกิดทราเวลลิ่งฟลักซ์วิ่งเข้าสู่ศูนย์กลาง	5
6 การกระจายของสนามแม่เหล็ก	5
7 การเกิดแรงในแนวราบของการยกจานวงกลม	6
8 การพันลวดใน 1-เฟสเพื่อสร้างทราเวลลิ่งฟลักซ์โดยการม้วนขั้ว	7
9 การพันลวดใน 1-เฟสเพื่อสร้างทราเวลลิ่งฟลักซ์โดยการค่อตัวเก็บประจุ	7
10 การเสริมกันของเส้นแรงจากการพันขลวด	8
11 ลักษณะของการเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก	9
12 ลักษณะของไฟ 3- เฟสปรกติ	9
13 ลักษณะของการเกิดการพันขลวด	9
14 การเกิดแรงในแนวราบของการยกจานวงกลม	10
15 การวัดเส้นแรงแม่เหล็กของสารต่าง ๆ	10
16 ตาราง ค่าความขีบซาบแม่เหล็ก ของสารต่าง ๆ	12
17 กราฟ ความสัมพันธ์ของสารต่าง ๆ ระหว่างแมกนีโตเซชั่น กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก และซิลเซตลิสตี กับอุณหภูมิ	12
18 ความต้านทานของจานเนื่องจาก ความหนาของจาน	13
19 ลักษณะภายนอกโครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรินสเตอร์	14
20 กราฟ ศักกา-กระแสของทรินสเตอร์	14
21 กราฟ ผลของกระแสเกทโในการลคคาของ V_{BO}	15
22 วงจรและกราฟ 1 เฟสฮาล์ฟเวทเว็คติฟลาย	16

•กรณีไหลคเป็นความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
23	
วงจรและกราฟ 1 เฟสฮาล์ฟเวฟเร็คติไฟาย กรณีโหลดเป็นอินดักทีฟ	17
24	
วงจรและกราฟ การควบคุม เอชซี 1 เฟส กรณีโหลดเป็นความต้านทาน	18
25	
กราฟ การควบคุม เอชซี 1 เฟส กรณีโหลดเป็นอินดักทีฟ	19
26	
แสดงพื้นที่หน้าคัทแกนเหล็กและชวลลวค	20
27	
ลิเนียร์มอเทออร์ท่าในโครงการงาน	21
28	
แผนผังตัวทำงานของวงจรจุกชนวน	25
29	
แผนผังสัญญาณต่าง ๆ ในการควบคุมการจุกชนวนไทรซิสเตอร์	26
30	
วงจร เปรียบเทียบขั้วกาศสัญญาณ	28
31	
วงจรผสมสัญญาณ โดย 555	28
32	
วงจรขยายสัญญาณไม่กลับขั้วกาศ	29
33	
วงจรขยายขั้วกาศสัญญาณผลบวก	29
34	
วงจรขยายขั้วกาศสัญญาณผลต่าง	29
35	
วงจรการจุกชนวนไทรซิสเตอร์ในโครงการงานนี้วงจรที่ 1	30
36	
วงจรการจุกชนวนไทรซิสเตอร์ในโครงการงานนี้วงจรที่ 2	31
37	
การต่อวงจรในการทดลอง	32
38	
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับน้ำหนัก (หรือแรงยก)	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

- H : ความเข้มของสนามแม่เหล็ก หน่วย แอมป์/เมตร
B : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย เทสลา
R : ความต้านทาน หน่วย โอห์ม
 ρ : ความต้านทานจำเพาะของขดลวดทองแดง หน่วย โอห์ม/เมตร
N : จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ
A : พื้นที่หน้าตัด หน่วย ตารางเมตร
 ϕ : เส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย เวเบอร์
I : กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมป์
 μ : ความซึมซาบแม่เหล็ก หน่วย เฮนรี/เมตร
V : แรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำ หน่วย โวลต์
f : ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ หน่วย เฮิรตซ์
 α : มุมจุกขนวน หน่วย องศา
 θ : ช่วงมุมนำกระแส หน่วย องศา
t : ความยาว หน่วย เมตร
m : มวล หน่วย กิโลกรัม
P : พลังงาน หน่วย จูล
 σ : สภาพนำไฟฟ้า หน่วย ซีเมน/เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

หลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดลิเนียร์มอเตอร์ เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานานแล้ว แต่เดิรนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ๆ นั้นยังมีน้อยมาก แต่ที่มีการวิจัยทดลองทำกันจะเน้นไปทางการสร้างรถไฟขนส่งชนิดยกลอยความเร็วสูง. ซึ่งการทดลองกันว่าจะต้องใช้เงินลงทุนสูง และเทคโนโลยีบางอย่าง เช่น การเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กโคซฮาตีย์ สารตัวนำยิ่งยวด (Super Conductor) ซึ่งในปัจจุบันมีการทดลองสารตัวนำยิ่งยวดนี้อย่างแพร่หลาย สารพวกนี้สามารถให้ความเข้มสนามแม่เหล็กทางทฤษฎีได้หลายสิบเท่าของจุกอิมตัวในอความเข้มสนามแม่เหล็กของสารพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Materials) ธรรมดา ในระยะเวลาอันใกล้นี้อาจเป็น 5 ปี 10 ปีหรือมากกว่า เราอาจจะได้เห็นเครื่องจักรกลชนิดนี้ใช้งานจริง ๆ ทางวิศวกรรมก็ได้

เหตุผลหนึ่งของการวิจัยทดลองนั้นล่าช้าไป ทั้งที่รู้จักกันมานานแล้วก็ตามคือประสิทธิภาพ (Efficiency) นั้นต่ำ ซึ่งการใช้งานทางวิศวกรรมนั้นเป็นข้อเสียอย่างร้ายแรง แต่ขณะผู้จัดทำมีความเห็นว่าเราไม่ควรจะให้ค่าประสิทธิภาพนี้มาเป็นตัวบิคบัง หรือสกักกันทางปัญญา ในสารที่จะแสวงหาความรู้การประคัมรู้กติกกัน สร้างสรรฯ และการพัฒนาความถึกต่าง ๆ

จากค่าปัจจัยที่ดี (Goodness Factor) ของเครื่องจักรกลแม่เหล็กไฟฟ้า (Eletro-magnetic Machine) คือ

$$= (\sigma \mu \omega) \frac{A_e A_m}{l_e l_m} \quad (\text{ดูจากภาคผนวก})$$

ซึ่งสมการด้านบนจะเห็นว่าสมการไม่ได้บอกถึงค่าประสิทธิภาพ หรือค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor) เลย เพราะเชื่อว่าทั้งสองอย่างนี้ไม่ใช่ค่าวิกฤตของเครื่องจักรกลแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสามารถพัฒนาปรับปรุงได้ แต่ค่าวิกฤตที่นำมาพิจารณาคือ ค่ากำลังงานต่อน้ำหนัก , ค่าใช้จ่าย , การบำรุงรักษา และความเชื่อถือได้ของเครื่องจักรกลเหล่านี้จึงเป็นค่าวิกฤต

ข้อได้เปรียบของลิเนียร์มอเตอร์คือสามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วทางทฤษฎี $V_s = 2 \text{ pf}$ โดยที่ p คือระยะพิซซึ่งเป็น 1/2 ของความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ f คือความถี่ของกระแสสลับ:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่าสามารถออกแบบให้ลิเนียร์มอเตอร์วิ่งได้ด้วยความเร็วสูง แต่เมื่อหันมามองรถยนต์ซึ่งวิ่งด้วยความเร็ว 300 กม./ชม. นั้นจะต้องใช้เทคโนโลยีพิเศษ ค่าใช้จ่ายสูงการสึกหรอก็มีมาก แต่ส่วนลิเนียร์มอเตอร์นี้มีการส่งกำลังในแนวเส้นตรง มีการยก ลอยขึ้นจึงไม่ประสบปัญหาการสึกหรอ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การออกแบบเกียร์ การบำรุง รักษา และที่สำคัญคือการไม่จำกัดความเร็วในทางทฤษฎีดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติคือถ้าวิ่งด้วยความเร็ว V พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะเท่ากับพลังงานจลน์ซึ่งเท่ากับ $\frac{1}{2}mv^2$ จะเป็นตัวจำกัด ความเร็วลิเนียร์มอเตอร์คือสารที่ใช้ทำตัวลิเนียร์มอเตอร์ในส่วนที่เคลื่อนที่จะต้องทนความร้อน เท่ากับค่าพลังงานจลน์นี้ได้เมื่อวิ่งด้วยความเร็วดังกล่าว

จากที่ผ่านมากการใช้งานทางอุตสาหกรรมสามารถทำได้หลายชนิด เช่น การสูบของเหลว คำนวณโดยอัตโนมัติต้องสัมผัส เครื่องเร่งมวลสารเพื่อการศึกษา ฯลฯ ลักษณะบางประการเครื่องจักรกลอื่นอาจทำไม่ได้แต่ลิเนียร์มอเตอร์สามารถทำได้ และสามารถทำให้มีคชโคโดยไม่มีฝุ่น ตัวส่งกำลังไม่มีส่วนเคลื่อนที่ให้การสึกหรอเกือบไม่มี ข้อดีต่าง ๆ ดังกล่าวทำให้เครื่องจักรกลประเภทนี้น่าสนใจ และทำการศึกษ

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงหลักการที่ลิเนียร์มอเตอร์นั้นยกลอยขึ้นได้ของลิเนียร์มอเตอร์ทั่วไป สูตรการคำนวณแรงยกทางแม่เหล็ก (Magnetic Levitation) เบื้องต้นโดยมิได้เน้นถึงการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองของเครื่องจักรกลในโครงการนี้ และยังเสนอในเรื่องของการควบคุมเฟส (Phase control) ซึ่งในความคิดครั้งแรกของโครงการนี้ก็จะใช้การควบคุมเฟสนี้เป็นตัวควบคุมพลังงานให้แดลิเนียร์มอเตอร์ แต่เนื่องจากลิเนียร์มอเตอร์ตัวนี้ใช้กระแสสูงมาก ไทริสเตอร์ (Thyristor) ซึ่งใช้ในการควบคุมเฟสทนกระแสขนาดนี้ไม่ได้ จึงมิได้นำมาใช้ แต่ที่นำมาเสนอเพราะคณะผู้จัดทำเองเห็นว่าปัจจุบันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) เป็นสิ่งสำคัญในวงการอุตสาหกรรมมาก จึงนำมาเสนอไว้เพื่อเป็นการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ และการใช้งานของไทริสเตอร์ และคณะผู้จัดทำคาดหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้สนใจได้บ้าง

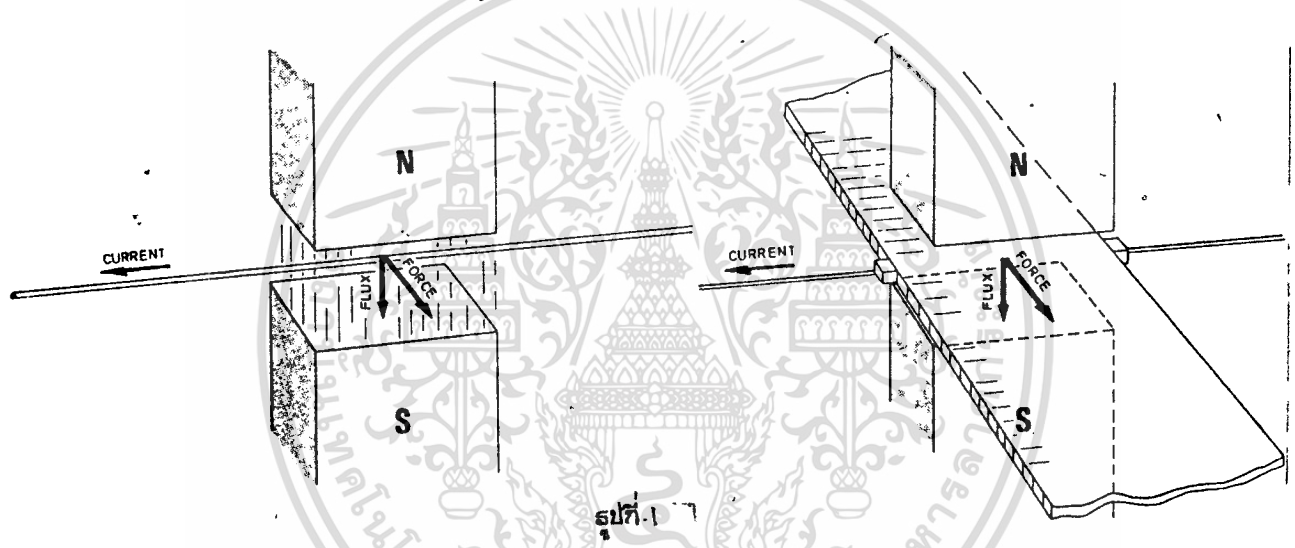
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การยกลอยโดยการเหนี่ยวนำ

ในการเกิดแรงผลักดันระหว่าง ขดลวดที่ป้อนไฟกับ แผ่นจานอคูมิเนียมเราจะค่อย ๆ พิจารณา การเกิดของแรงไปตามลำดับ ในขั้นแรกจะพิจารณาผลจากการทดลอง ที่แอมแปร์ และ บีโอท์ ซาวาร์ท ทำเอาไว้และสรุปออกมาว่า เมื่อมีกระแส ไหลในความยาว วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะมีผลให้เกิดแรง dF ขึ้น ตามสูตร $dF = I \times B dl \sin\theta$ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1

สำหรับในโครงการนี้ เราใช้ขดลวดเป็นตัวเริ่มสร้างสนามแม่เหล็ก ขึ้นไปเหนี่ยวนำ จาน อคูมิเนียมซึ่งคล้ายกับเป็นขดลวดที่พันไว้ 1 รอบ จะมีผลให้เกิด โวลต์เทจ ตามกฎของฟาราเดย์ และเกิดกระแสไหลวนในจาน ในทิศทางข้ามกับทิศของกระแสในขดลวดที่สร้างสนาม เพราะ ฉะนั้นเราอาจพิจารณาต่อได้ว่าจะเกิดแรงผลักดันขึ้นระหว่างจานกับขดลวด เนื่องจากผลของกระแส ในตัวมันทั้งสองตัว แรงเนื่องจากกระแสสองกระแสนั้นเราอาจพิจารณาได้ ในรูปของสูตร

$$dF = I \times B dl \sin\theta$$

โดยให้ ขดลวดหรือจาน ตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวสร้างสนาม และตัวที่เหลือเป็นตัวนำกระแส โดยสนาม

จะมีค่า $B = \frac{\mu_0 I_1}{2 \pi r}$

เพราะฉะนั้นแรงที่เกิดคือ $F = I_2 \times \frac{\mu_0 I_1}{2 \pi r} \times l \sin$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่กระแส I_1 และ I_2 ไหลกลับทิศทางกันมีผลทำให้ขั้วแม่เหล็กที่ใกล้กันของกระแส I_1 และ I_2 เป็นขั้วเดียวกันซึ่งจะทำให้เกิดการผลักของขั้ว ดังรูปที่ 2

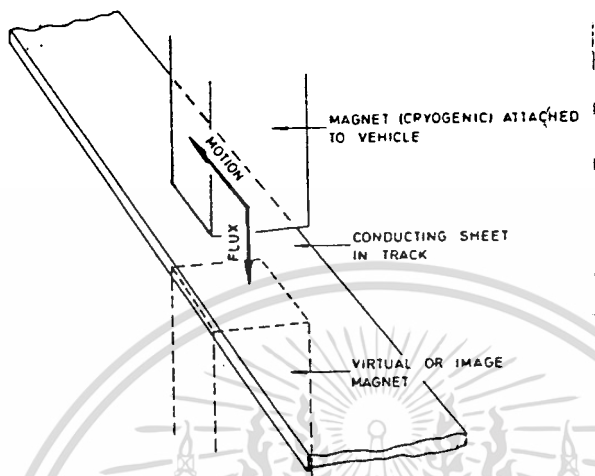
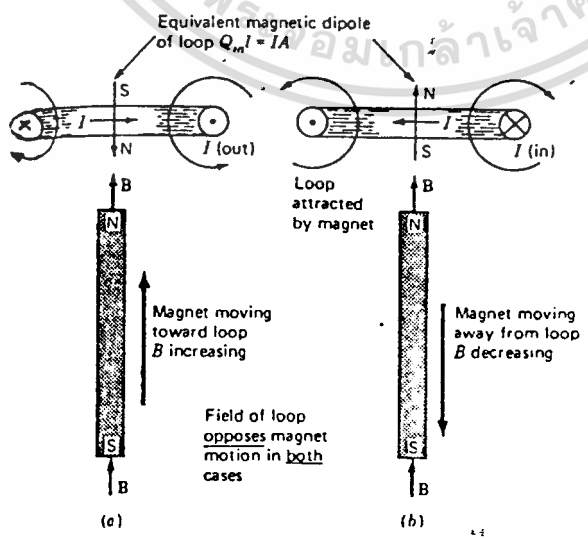


Figure 2. Principle of magnetic levitation.

แต่สูตรการหาค่าแรงนี้ เวลาทำการออกแบบเราจะใช้สูตร $F = \frac{B^2}{2\mu_0}$ แทน ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

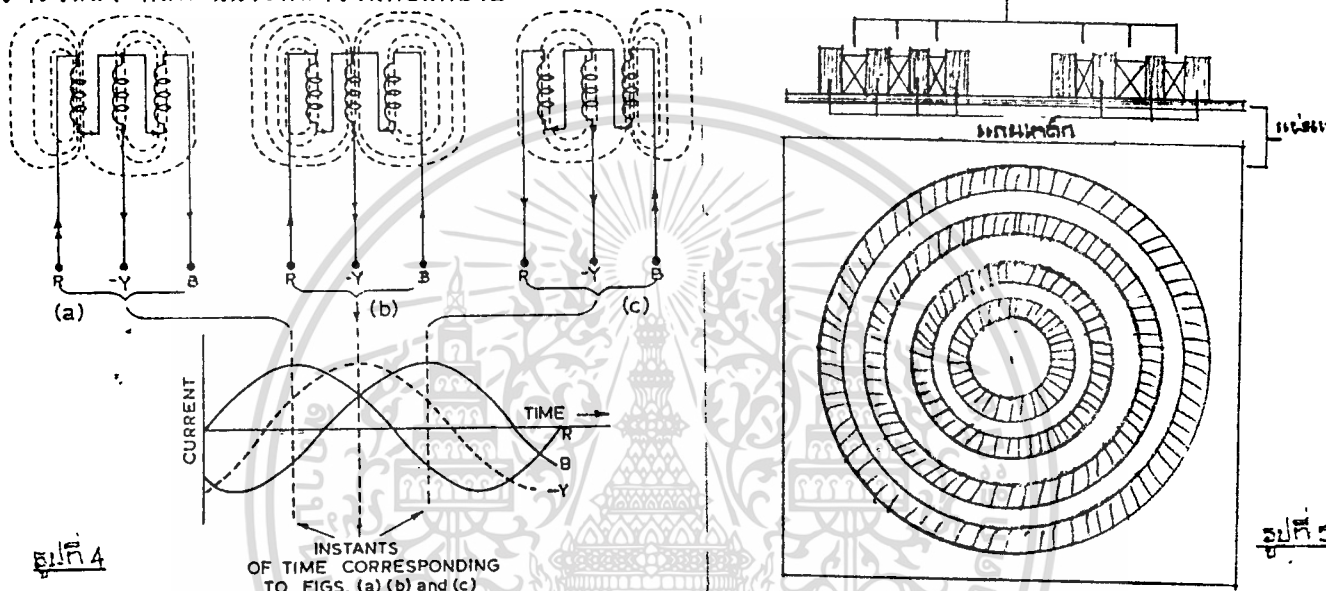
การใช้สนามแม่เหล็กทำให้วัตถุลอยได้นี้ เราจำเป็นต้องให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามสนามที่กระทำต่อวัตถุตลอดเวลา เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำโวลต์ที่เพิ่มขึ้น ตามสมการ $V = -N \frac{d\phi}{dt}$ โดยค่า จะเปลี่ยนตลอดเวลา ซึ่งดูได้จาก การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กในรูปที่ 3



รูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

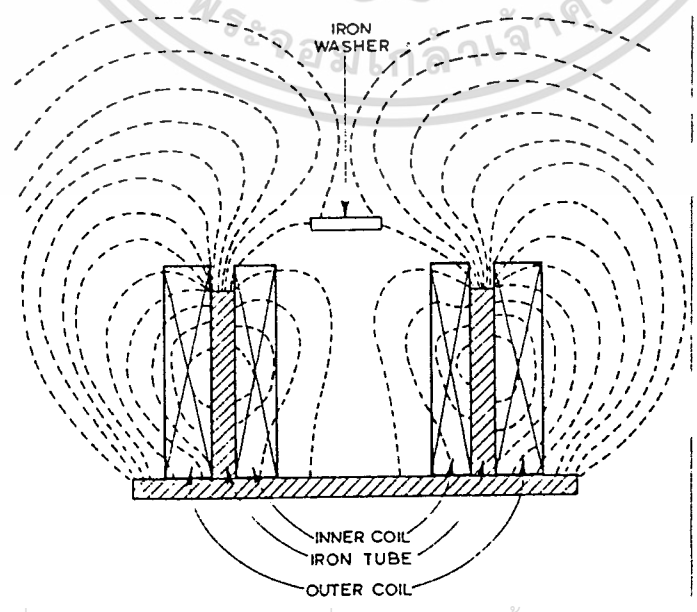
ในโครงการนี้ เราจะสร้างสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาด้วย การใช้ขดลวด 3 ชุด และป้อน ไฟเฟส 3 เฟส เข้าไปทำให้เกิดสนามเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4 และนอกจากนี้ ยังจะทำให้เกิด ทราเวลลิ่งฟิลด์ (Travelling Field) วิ่งเข้าสู่ศูนย์กลางของ ขดลวด 3 เฟส อีกด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 ส่วนเหตุผลของการใช้ ไฟ 3 เฟส เพื่อให้เกิด ทราเวลลิ่งฟิลด์ นั้นจะกล่าวในในตอนต่อไป



รูปที่ 4

รูปที่ 5

การพันขดลวดจะเห็นให้เกิดสนามแม่เหล็กกระทำต่อจาน อลูมิเนียม ดังรูปที่ 6 ซึ่ง วิธีการ พันจะกล่าวไว้ในเรื่องการออกแบบในบทหลัง

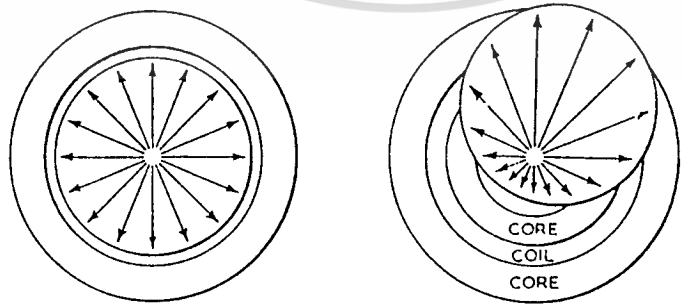


รูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามปรกติ การที่เราจะใช้ ไฟเอมิเฟสเกือบอนให้ชดลวด เพื่อเหนี่ยวนำให้เซคชันการลดยชั้นนั้น เราสามารถทำได้ แต่พอลดยชั้นแล้วตัว เซคชันการจะมีเสถียรภาพในการลดยหรือไม่ว่าจะเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ค่อนข้างมาคิด ทั้งนี้เนื่องจาก

ถ้าเราคิดว่ามีแรงในแนวตั้ง แนวเดียวที่กระทำกับจาน เราจะเห็นได้ว่าถ้าเราวางจานไม่สมมาตรกับชดลวด เส้นแรงจากชดลวดจะผ่านจานในแต่ละจุด ไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้โวลต์เตจและกระแสบนจานที่จุดต่าง ๆ เปลี่ยนไปจากเดิมและทำให้เกิดแรงในแนวราบ เนื่องจากความไม่สมมูลย์ของแรงในแนวนั้น ดังรูปที่ 7 การไหลออกจากสมมูลย์ ก็จะเกิดขึ้นแล้วจานจะกระเด็นหรือไหลออกมาจากบริเวณ ชดลวด ตามความจริงแล้วกระแสเหนี่ยวนำซึ่งเกิดในจานแต่ละชั้น ความหนา และแต่ละวงรัศมีจะแตกต่างกันทั้งขนาดของกระแส และมุมเฟส เช่น เราแบ่งความหนาของจานออกเป็นหลาย ๆ ชั้น ชั้นที่อยู่ใกล้ชดลวดมากที่สุดจะถูกเหนี่ยวนำ เนื่องจากกระแสในชดลวดค่านล่างของมันอย่างเคียว ส่วนชั้นที่เหนือมันขึ้นไปจะถูกเหนี่ยวนำมาจากชดลวดและจากกระแสในชั้นที่ต่ำกว่าลงไป ในแคร์รัศมีของจานก็จะมีกระแสเหนี่ยวนำที่ไม่เท่ากันด้วย เนื่องจากความหนาแน่นอนของ เส้นแรง และมุมของเส้นแรงแตกต่างกันไป ผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้เกิดเป็นทราเวลลิ่งฟีลด์ วิ่งในแนวราบในทิศทางพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางอีกด้วย สิ่งต่าง ๆ นี้ ล้วนจะเกิดการทำให้เสียสมมูลย์ใ้กายทั้งนั้น ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องแก้ผลของแรงในแนวราบ เพื่อให้เกิดแรงลัพธ์ ที่จะดึงจานไว้ที่จุดศูนย์กลาง เมื่อเรารู้ปัญหาของความไม่สมมูลย์แล้วว่าเกิดจากแรงในแนวราบที่พุ่งออกจากจุดศูนย์กลาง วิธีแก้ของมันก็คือ เราสร้างทราเวลลิ่งฟีลด์ ที่ทิศทางเข้าสู่จุดศูนย์กลางเพื่อต้านแรงที่พุ่งออกและเป็นการ เพิ่มแรงดึงจานเข้าสู่จุดศูนย์กลางของชดลวดด้วย



(a) PLATE CONCENTRIC (b) PLATE ECCENTRIC

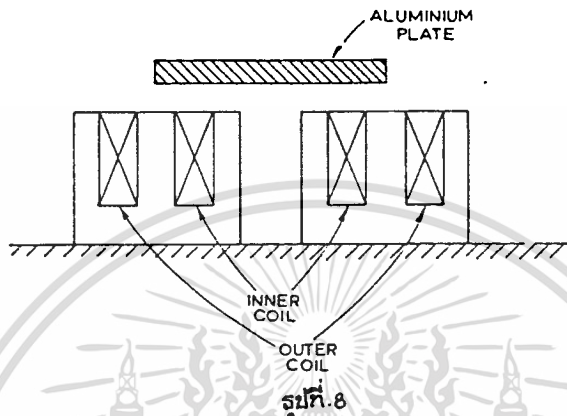
รูปที่ 7 Horizontal forces produced by a circular plate levitator.

วิธีการสร้างทราเวลลิ่งฟีลด์ วิ่งเข้านั้นก็มีหลายวิธีซึ่งในแต่ละวิธีก็เหมาะสมกับระบบไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

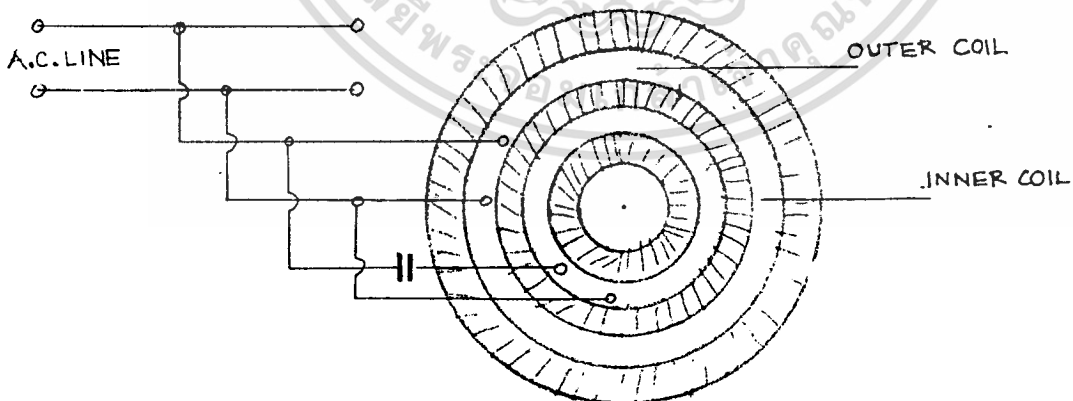
แต่ละอย่าง ทั้งการยกตัวอย่างของ ไฟเอซีเฟสเกี่ยวกับต่อไปนี้

- ใช้การบังชัว (Shaded- pole) ซึ่งคล้ายกับที่ใช้ในการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่เราเปลี่ยนเป็นการพันขดลวดช่วยไว้เป็นขดใน ดังรูปที่ 8



ทั้งนี้ เพื่อให้ลวดขดในสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาช้ากว่า ลวดขดนอกประมาณ 90° ทำให้เหมือนกับว่าเราใช้ไฟสองเฟส โดยเฟสที่สองที่เกิดจากการบังชัว และมีผลให้เกิดสนามแม่เหล็ก วิ่งเข้าเนื่องจากมันเกิดช้ากว่าไฟเฟสแรก 90°

- การพันขดลวดแยกเป็นขดในและขดนอก โดยป้อนไฟเอซีเฟสเดียว เข้าทั้งสองขดโดยที่ขดหนึ่งมีตัวเก็บประจุอนุกรมอยู่ ที่ทำเช่นนั้นจะทำให้เกิดลักษณะไฟวงจร เฟสคล้ายกับการบังชัวได้เหมือนกัน ดังรูปที่ 9



สำหรับการออกแบบลิเนียร์มอเตอร์ในโปรเจกต์นี้ ได้กำหนดให้ไพรมารี รับไฟเอซีจากระบบ 3 เฟส ดังนั้นการสร้างทราเวลลิ่ง ฟิสิกส์จึงแตกต่างไปจากระบบ 1 เฟสบ้าง แต่ก็ยังอาศัยหลักการที่จะสร้างสนามวิ่งเข้าอยู่เหมือนเดิม ในระบบไฟเอซี 3 เฟสนี้ ไฟแต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีมุมต่างกันอยู่ 180° ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่เราจะนำคุณลักษณะข้างนี้มาใช้ เพื่อรักษาเสถียรภาพของงาน จากรูปที่ 5 เห็นได้ว่าเรามีขดลวด 3 ขดพันอยู่รอบแกนเหล็กซึ่งซ้อนกันเป็นวง ขดลวดแต่ละขดจะได้รับการป้อนไฟแต่ละเฟส เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กวิ่งเข้าเราจึงต้องเรียงลำดับเฟสที่จะป้อนให้แต่ละขด เพื่อที่แต่ละขดของขดลวดมีความต่างเฟสเท่ากัน วิธีการเรียงเฟสจะแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. แต่ละขดต่างเฟสกัน 60°
2. แต่ละขดต่างเฟสกัน 120°

สำหรับวิธีแรกคือให้แต่ละเฟสต่างกัน 60° เราจะป้อนไฟดังนี้ ขดนอกป้อนเฟส A ขดกลางป้อนเฟส -C ขดในป้อนเฟส B ด้วยวิธีนี้ จะทำให้มีการเสริมเส้นแรงอย่างมาก ในแต่ละครึ่งบวกและครึ่งลบ แต่จากการทดลองเมื่อใช้การป้อนไฟแบบนี้ จะทำให้งานไม่มีเสถียรภาพในการล้อย โดยเมื่อสับสวิทช์ป้อนไฟเข้าไปงานจะลอยสูงมาก แต่มันจะไหลไปด้านใดด้านหนึ่งอย่างรวดเร็วพอประมาณ และกระเด็นออกไป การที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ คิดว่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการเสริมของเส้นแรงเร็วเกินไปจนถึงรับสภาพการเปลี่ยนไม่ทันและเสียสมดุขยในที่สุด ลักษณะการเรียงเฟส และการเสริมของเส้นแรงสามารถดูได้จากรูปที่ 10

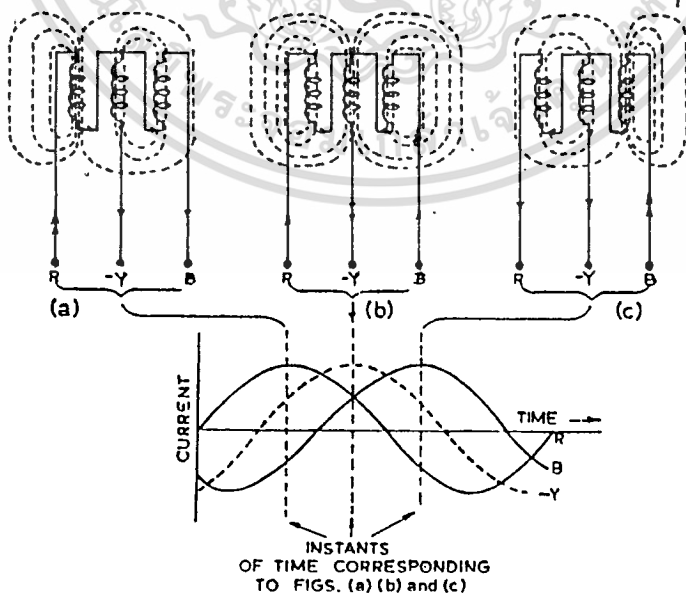
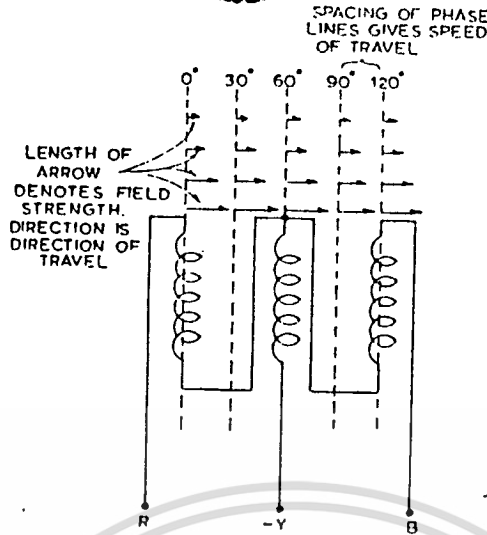


Fig. 10.

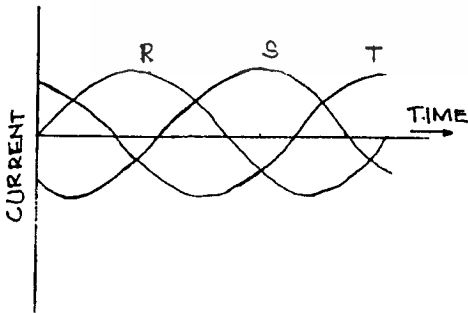
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11

วิธีคือไปที่ใดตกลง คือให้แต่ละขดมีความต่างเฟสกัน 120° โดยเราจะป้อนเฟสนี้
 ขดนอกป้อนเฟส A ขดกลางป้อนเฟส B ขดในป้อนเฟส C วิธีนี้ เมื่อรูปคลื่นจากรูปที่ 12, 13
 แล้วเทียบกับรูปคลื่นจากรูปที่ 10, 11. จะเห็นว่า การเสริมของเส้นแรงและความเร็วของทรา-
 เวลถึงพิกัดน้อยกว่า แต่มันสามารถทำให้จานลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และที่ก็ไปกว่านั้นคือ
 เมื่อเรากิ่งจานให้มันไม่สมมาตรกับขดลวด ทราเวลถึงพิกัดจะสามารถถึงจานถัดไปสูงที่
 สมมาตรได้ นั้นหมายความว่า จะมีแรงดึงของสนามแม่เหล็กวิ่งเข้าสู่ศูนย์กลางของขดลวดตลอด
 เวลาถึงรูปที่ 14

นอกจากนี้แล้วยังมีการทดลองป้อนไฟในแบบต่าง ๆ อีกหลายแบบ เช่น B, C, A,
 -C, A, B A, B, C เป็นต้น ซึ่งแต่ละแบบทำให้ออกจากจุดสมมาตรทั้งสิ้น



รูปที่ 12

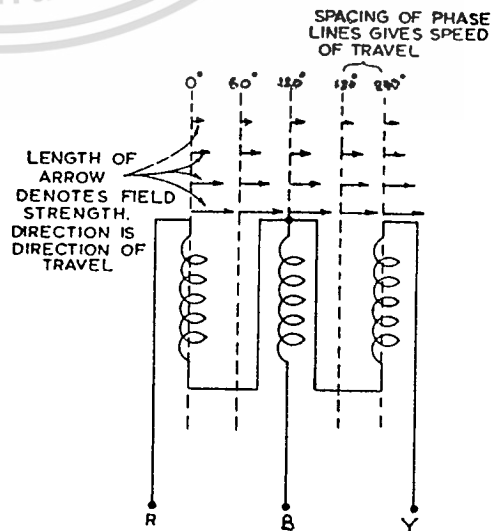


Fig. 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้าง ส่วนโพรมารี และเซคชันคาร์

สำหรับลิเนียร์มอเตอร์ ที่ออกแบบส่วนโพรมารีเป็นส่วนที่มีการพันขดลวดสร้างสนาม และเป็นส่วนที่อยู่กับห้องประกอบของมันเหมือนกับที่แสดงในรูปที่ 5 คือเป็นแกนเหล็กเฟอร์โรแมกเนติก สลับกันกับขดลวดและตรงกลางเป็นช่องอากาศที่ตรงกลางเป็นช่องอากาศเนื่องจากเราไม่สามารถนำแกนเหล็กแผ่นให้มีช่องเล็กลงกว่านี้ได้ วงนอกสุดและวงในสุดของโพรมารีนี้เป็นเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งเราใช้ครอบลงไปเพื่อ ลดค่ารีลัคแทนซ์ ของวงจรแม่เหล็กส่วนที่ฐานของโพรมารีก็ยังมีแผ่นเหล็กหนาวางอยู่อีก หนึ่งแผ่นด้วยเหตุผลที่จะลดค่ารีลัคแทนซ์เหมือนกัน

ทางก้านเซคชันคาร์ที่เราเลือกใช้ อลูมิเนียมมาทำเป็นจานเนื่องจากมันมีน้ำหนักเบา นำกระแสได้ดี และถูกเห็นยวนำให้เนื้อสารมีสภาพเป็นแม่เหล็กโคโยก ปัญหาที่มีคนถามมากเมื่อเห็นโปรเจกต์คือ นอกจากอลูมิเนียมแล้วยังมีโลหะอื่นที่ไร้อาไรกันโคโยกหรือไม่ กังนั้นจึงจะบรรยายไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลย เกี่ยวกับโลหะที่ไร้อาไรกัน โดยทั่วไป สารแม่เหล็กถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ

1. สารไดอะแมกเนติก (Diamagnetic material)
2. สารพาราแมกเนติก (Paramagnetic material)
3. สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material)

การแบ่งสารพวกนี้เป็น 3 กลุ่ม ก็อาศัยหลักที่ว่าถ้าเรามีโซลินอยด์ (Solenoid) กัง

รูปที่ 15

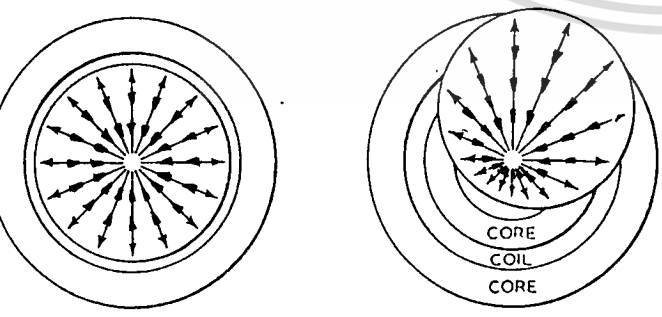


Fig. 14. Horizontal forces produced by a circular plate levitator.

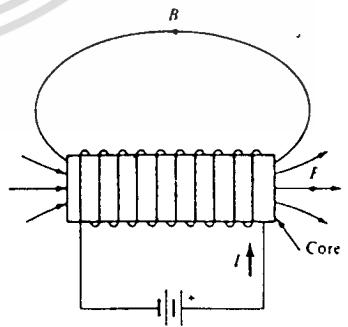


Figure 15 The B field at the point P of a solenoid depends on the core material. The field at P can be measured by a pick-up loop whose induced voltage (when it is switched on) is proportional to B. It can also be measured by the deflection of a compass needle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราใช้แกนอากาศเราจะสมมุติให้จุด มีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ B_0 แต่เมื่อเราใส่สารชนิดอื่นเข้าไปเป็นแกนของโซลินอยด์ แทนที่อากาศ: ถ้าสารใดทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด P น้อยกว่า B_0 เราจะเรียกว่า สารไดอะแมกเนติก

: ถ้าสารใดทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด P เท่ากับหรือมากกว่า B_0 นิดหน่อย เราจะเรียกว่า สารพาราแมกเนติก

: ถ้าสารใดทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด P สูงกว่าค่า B_0 มาก ๆ เรา จะเรียกว่า สารเฟอร์โรแมกเนติก

คุณสมบัติการสั่นไหวของสารเหล่านี้เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก จะแตกต่างกันไป ดังนี้

- สารไดอะแมกเนติก เมื่อมีสนามแม่เหล็กผ่านตัวมัน จึงทำให้เกิดเนกาทีฟ แมกนีโตเซชัน (Negative magnetization) ขึ้น ในเนื้อสารและจะทำให้ค่าที่ใกล้เคียงค่าโบนิสนามมีตัวเดียวกับสนามนั้น ผลก็คือจะเกิดการผลักกันขึ้น

- สารพาราแมกเนติก เมื่อมีสนามผ่านตัวมันจะเกิดการ แมกนีโตเซชันและ เนื้อสาร ส่วนที่ใกล้เคียงค่าโบนิสนามจะกลายเป็น แม่เหล็กอ่อน ๆ ที่มีขั้วตรงข้ามกับสนามนั้น ผลก็คือ จะเกิดการดูดกันขึ้น

- สารเฟอร์โรแมกเนติก จะเกิดการแมกนีโตเซชัน เกิดขั้วตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดซึ่งขั้วที่สร้างนี้จะมีพลังที่แรงกว่าที่เกิดในสารพาราแมกเนติกมาก

ตารางแสดงการแบ่งชนิดของสาร ได้แสดงให้อูฟอเป็นตัวอย่าง ดังรูปที่ 16 และกราฟ ของการ แมกนีโตเซชัน M เทียบกับค่า H และกราฟที่ ซัสเซปทิลิตี (Susceptibility, X_m) เทียบกับ อุณหภูมิ แสดงอยู่ในรูปที่ 17

จกตารางในรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิต่ำเป็นสารพาราแมกเนติก ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กจะถูกกับตัวแหล่งกำเนิดสนาม แต่ที่นำมาทำเป็นงานเซคชันคาร์ แล้วมันลอยขึ้นมาได้ เนื่องจากผลของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในงาน เนื่องจากโวลต์เตจเหนี่ยวนำจากไพรมารี มาสู่เซคชันคาร์จากที่กล่าวมาแล้วในตอนก่อนหน้าที 2 นี้ว่าจะมีแรงเกิดขึ้นระหว่างตัวนำสองอันที่ต่างก็มีกระแสไหล เพราะฉะนั้นเมื่อมีกระแสไหลในขดลวดไพรมารี และมีกระแสเหนี่ยวนำในงานเซคชันคาร์ ซึ่งเกิดขึ้นตรงกันกับกระแสในขดลวด เพราะฉะนั้นจึงเกิดการผลักกันขึ้น และงาน เซคชันคาร์จึงลอยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 16 Relative permeability μ_r and susceptibility χ_m of some substances

Substance	Relative permeability, $\mu_r = 1 + \chi_m$	Susceptibility, χ_m	
Bismuth	0.99983	-1.66×10^{-4}	Diamagnetic
Mercury	0.999968	-3.20×10^{-5}	
Gold	0.999964	-3.60×10^{-5}	
Silver	0.99998	-2.60×10^{-5}	
Lead	0.999983	-1.7×10^{-5}	
Copper	0.999991	-0.98×10^{-5}	
Water	0.999991	-0.88×10^{-5}	
Vacuum	1	0	
Air	1.0000036	3.6×10^{-7}	Paramagnetic
Aluminum	1.000021	2.5×10^{-5}	
Palladium	1.00082	8.2×10^{-4}	
Cobalt	250		Ferromagnetic; nonlinear μ_r
Nickel	600		
Commercial iron (0.2 impurity)	6000		
High-purity iron (0.05 impurity)	2×10^5		
Supermalloy (79% Ni, 5% Mo)	1×10^6		

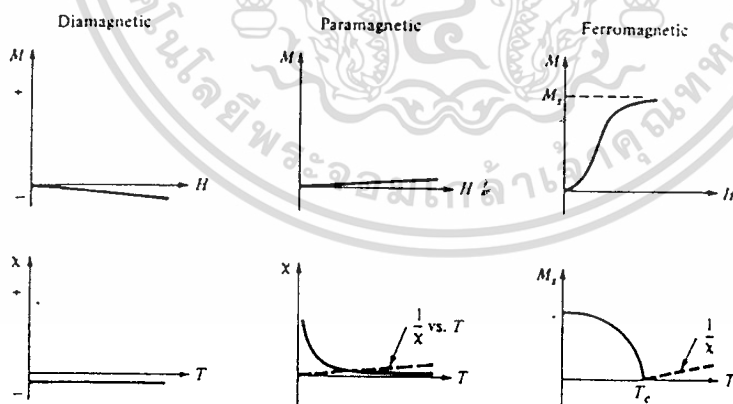
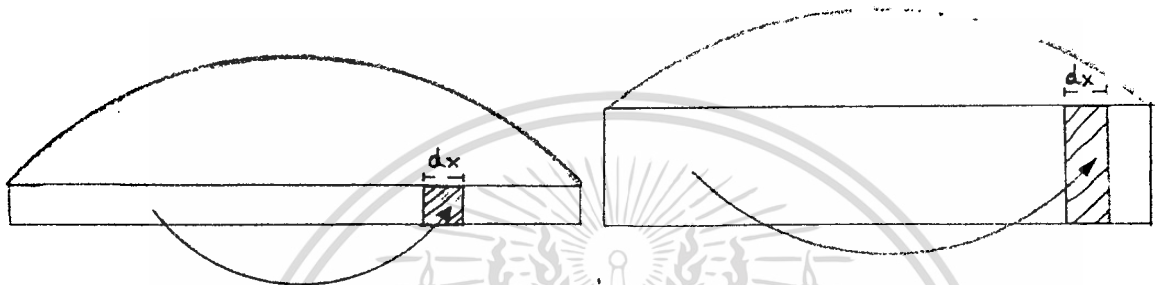


Figure 17. Magnetization M versus H curves for the three classes of materials are shown in the top three figures (M_s = saturation magnetization). The lower figures show temperature dependence. The negative diamagnetic susceptibility χ is approximately independent of temperature. T_c is the Curie temperature at which ferromagnetic materials lose their magnetism. Above T_c these substances exhibit paramagnetism.

ความสูงของการลอยของจานอคูมิเนียมยังขึ้นอยู่กับ ความหนาของจานอีกด้วย เพราะความหนาของจานจะลดลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่กระแสจะไหลมีเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 18

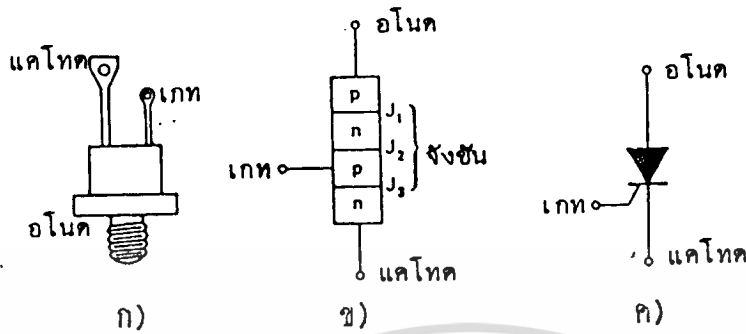


รูปที่ 18

แต่ในขณะที่ความหนาของจานเพิ่มขึ้น น้ำหนักของจานก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เพราะฉะนั้นการที่เราจะเพิ่มความสูงของการลอยตัว โดยเพิ่มความหนาของจานจึงมีขีดจำกัดก็คือ เราจะเพิ่มได้จนถึงขีดที่แรงที่เพิ่มจากการความหนาแน่นเท่ากับ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของจาน นอกจากนี้แล้วมักมีคนถามกันมากกว่าสมมุติ เราหาโลหะที่เบากว่าอคูมิเนียมหรือไม่ คำตอบคือ ไม่น่า เพราะแต่ละโวลต์เตจ ที่ความสูงระดับหนึ่งค่า B จะไม่เป็นเชิงเส้นและเริ่มโค้งลง เพื่อให้ครบรูป (Loop) ดังนั้น ความสูงจะอยู่ที่ ไม่เพิ่มขึ้นแม้จะเพิ่มความหนาของจานโดยที่น้ำหนัก เพิ่มขึ้นน้อยมาก ณ จุดนี้การเพิ่มความหนาของจานจะมีผลที่ค่อนข้างหนักที่จะใส่เพิ่มเป็นโพลก เพราะ ที่โวลต์เตจเดียวกัน ไพรมารี่จะให้รูปร่างลักษณะ และการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน เวลาวางจานที่มีความหนาต่างกันลงไป ถึงแม้ว่าในขณะที่บนจานไร โพลก จะมีความสูงจากไพรมารี่เท่ากัน เมื่อเราใส่โพลกที่เท่ากันลงบนจานทั้งสองใบ จานทั้งคู่จะลอยต่ำลงและตกเส้นแรงมากขึ้นคือ เพิ่มขึ้นนั่นเองซึ่งจะทำให้มีการเหนี่ยวนำโวลต์เตจ เพิ่มขึ้นในจานที่ตรงที่เท่ากัน ถ้าจานไหนมีความหนามากกว่าจานนั้นก็มีความต้านทานน้อยกว่า และมีกระแสไหลมาก มีผลให้ มีแรงระหว่างไพรมารี่กับเซคชั่นคาร์มากด้วย เพราะฉะนั้นที่น้ำหนักเท่ากัน จานที่หนากว่าจะรับโพลกได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

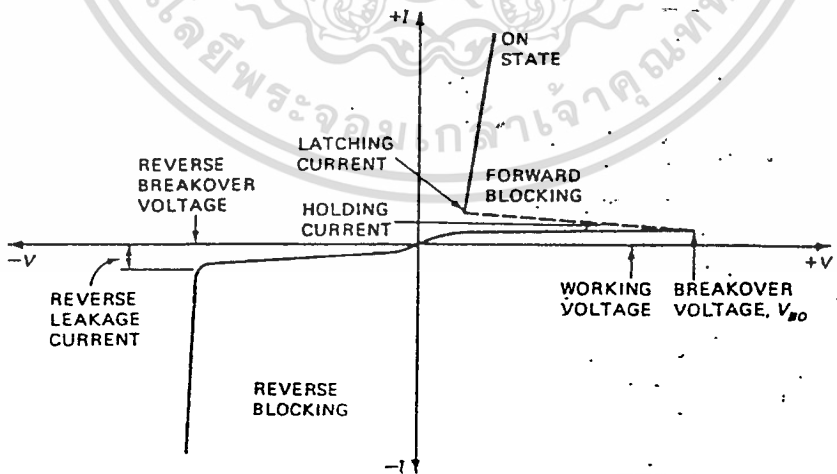
2. ไทริสเทออร์



รูปที่ 19 แสดงลักษณะภายนอก โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไทริสเทออร์

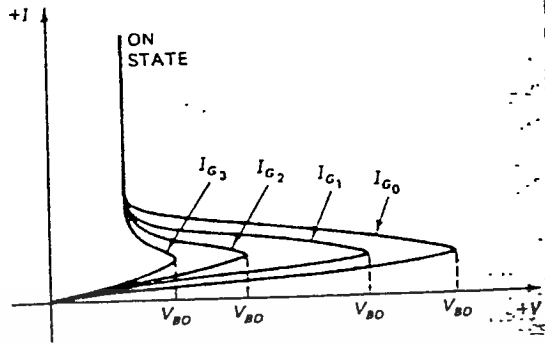
ไทริสเทออร์หรือ SCR (Silicon Controlled Rectifier) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์แบบสแตติก โดยจะสวิตช์การทำงานจากสภาวะกั้นกระแสให้อยู่ในสภาวะการนำกระแส ด้วยการป้อนสัญญาณจุดชนวน (Trig) เข้าขาเกต โดยจะให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียวจาก อนโอดไปแคโทด ในรูปที่ 19 ก) เป็นรูปร่าง SCR ที่ใช้งานขนาดเล็กหนึ่ง รูปที่ 19 ข) แสดงถึงโครงสร้างสารกึ่งตัวนำสี่ชั้นของ SCR ส่วนในรูปที่ 19 ค) เป็นสัญลักษณ์ของ SCR ซึ่งคล้ายกับไดโอดแต่มีขาเกตเพิ่มขึ้นมา

ลักษณะของ ศักยภาพและกระแส ของแอโนดกับแคโทด กรณีกระแสเกตเป็นศูนย์นั้นแสดงในรูปที่ 20 ผลที่เกิดขึ้นจากการจุดชนวนด้วยกระแสเกตแสดงไว้ในรูปที่ 21



รูปที่ 20 เส้นกราฟแสดง ศักยภาพ - กระแส ของ แอโนดกับแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 แสดงผลของกระแสเกตในการลดค่าของ V_{BO}

2.3.1 เงื่อนไขการนำกระแส

- SCR ต้องมีศักย์ไฟฟ้าที่ อโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับ แคโทด
- ที่ขาเกตจะต้องมีกระแสไหลเข้ามาที่ขาเกตด้วยขนาดโคมากพอโดยทำให้ที่ขาเกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับ แคโทดเป็นเวลามากกว่า t_{on} ของ SCR

2.3.2 เงื่อนไขการค้างการนำกระแส

- เมื่อ SCR ถูกจุดชนวนให้นำกระแสได้แล้ว กระแสที่ไหลจาก อโนดไปแคโทด จะต้องมามีค่ามากกว่า กระแสแลตช์ (Latching Current) จึงจะค้างการนำกระแสได้เมื่อนำกระแสที่ขาเกตออก

2.3.3 เงื่อนไขการหยุดการนำกระแส

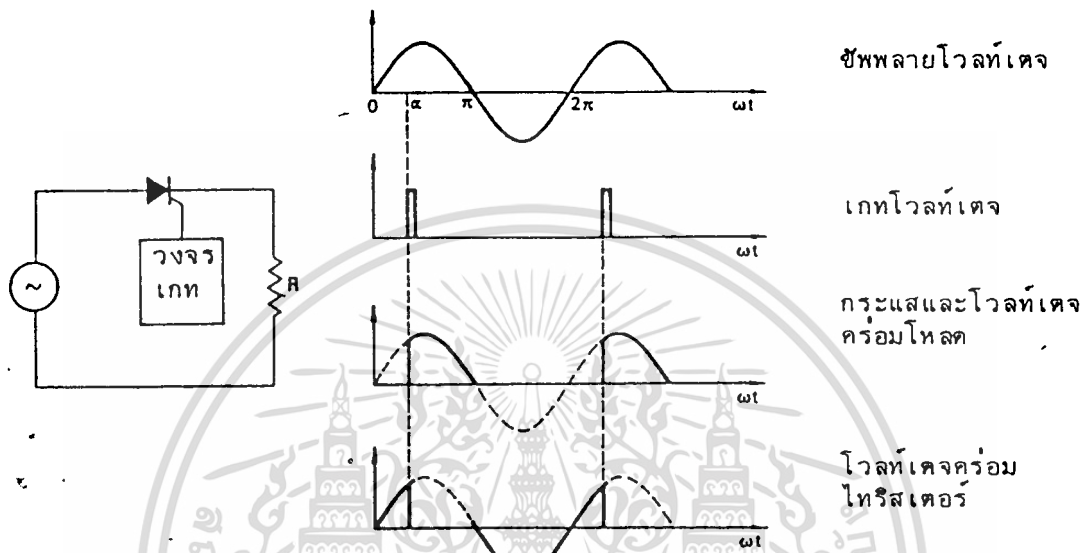
- ขณะที่ SCR ค้างการนำกระแสอยู่ ในตอนที่เราลดกระแสเกตแล้ว จะหยุดนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อกระแสจากอโนดไปแคโทด มีค่าต่ำกว่า กระแสโฮลดิ้ง (Holding current)

ซึ่งกรรมวิธีในการทำให้กระแสซึ่งไหลผ่านไทริสเตอร์ในสภาวะนำกระแสให้หยุดไหลนี้เรียกว่า " การคอมมิวเทท " (Commutate) และวิธีการที่ใช้ในการคอมมิวเททแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ การคอมมิวเททในเชิงธรรมชาติ (Natural Commutate) หรือการคอมมิวเททในเชิงเฟส (Phase Commutate) ซึ่งใช้ในวงจรกระแสสลับ และในโครงการนี้ใช้การคอมมิวเททวิธีนี้ ส่วนอีกวิธีของการคอมมิวเททคือ " การคอมมิวเททในเชิงบังคับ " (Force Commutate) ซึ่งเป็นการทำงานด้วยไฟกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.4 วิธีการควบคุมเฟส

2.4.1 การเร็คติไฟเออร์แบบ 1-เฟสฮาล์ฟเวฟ



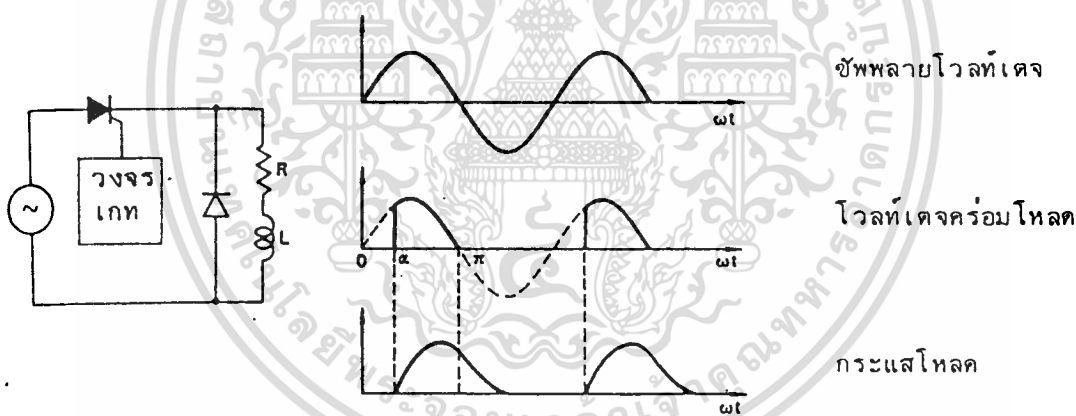
รูป 22 1-เฟสฮาล์ฟเวฟเร็คติไฟเออร์กรณัโหลดเป็นความต้านทานล้วน ๆ

วงจรรีไซเคิลซึ่งทำงานด้วยวิธีการคอมมิวเตชันเฟสที่นับว่าง่ายที่สุดคือแกว่งจร 1-เฟสฮาล์ฟเวฟเร็คติไฟเออร์ดังแสดงในรูป 24. ซึ่งโหลดเป็นความต้านทานล้วน ๆ ไทรสเตอร์จะกันไม่ให้กระแสไหลทั้งสองทิศทางจนกว่าจะมีการป้อนสัญญาณเกท ถ้าป้อนเกทพัลส์ในระหว่างที่สัปดาห์ของอโนดเป็นบวกไทรสเตอร์จะนำกระแสทันทีและตัดจากแหล่งจ่ายเฉพาะส่วนที่เหลือของครึ่งซีกบวกจะปรากฏคร่อมไทรสเตอร์ ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานล้วน ๆ สัปดาห์และกระแสจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการและที่ตำแหน่งปลายของครึ่งไซเกิดบวกกระแสผ่านไทรสเตอร์จะมีค่าลดลงเป็น 0 จากนั้นสัปดาห์แหล่งจ่ายจะกลับทิศ ซึ่งเป็นการป้อนรีเวอร์สไบอัสคร่อมไทรสเตอร์จะหยุดนำกระแสอย่างรวดเร็ว ในตลอดช่วงครึ่งไซเกิดลบของแหล่งจ่ายไทรสเตอร์ใช้ในการปรับเข้าสู่สภาวะที่สามารถกลับถอยกลับในทิศทางสอร์วาร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้ไคโอดแบบทั่วไปในวงจร ตักถวจากแหล่งจ่ายจะปรากฏคร่อมโหลดเต็มครึ่งซีกบวก มุมที่ไทริสเตอร์เริ่มนำกระแสจะออกไปกว่านี้เรียกว่า "มุมไฟร์" หรือ "มุมจุดชนวน" ซึ่งกำหนดให้เป็น α เมื่อปรับมุม α จาก 0° ถึง 180° ก็.ซี. โวลต์เฉลี่ยที่เอาต์พุตจะลดลงจากค่าสูงสุดจนเป็น 0 การควบคุมโดยวิธีนี้คือ "การควบคุมเฟส"

เมื่อโหลดเป็นอินดักทีฟ กระแสจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ นับตั้งแต่ค่าที่ไทริสเตอร์เริ่มนำกระแส และในช่วงที่กระแสซึ่งไหลผ่านอินดักทีฟโหลดค่อย ๆ ลดลงนั้นจะทำให้ไทริสเตอร์ยังคงนำกระแสต่อไปอีกแม้จะเลยค่าแห่ง $\omega t = \pi$ ซึ่งอยู่ในซีกลบของแหล่งจ่ายแล้วก็ตาม ตักถวลบจากแหล่งจ่ายจะพยายามต้านการไหลของกระแสอินดักทีฟนั้นและจะทำให้มีค่าเป็น 0 ในที่สุด จากนั้นไทริสเตอร์ จะนำหยุดนำกระแสและถูกรีเวอส์ไบอัสไว้ในช่วงที่เหลือของครึ่งไซเคิลลบ เกทพัลซ์จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในช่วง $\omega t = \alpha$ ถึง π การทำให้เกทพัลซ์คงค่าไว้ตลอดช่วงนี้ก็เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสอินดักทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นจนเลยค่าแห่ง "กระแสแล็ทซ์" ไปแล้ว



รูป 23 1 เฟสซัลฟเวฟเร็คติฟายเออร์กรณโหลดเป็นอินดักทีฟและมีฟรีวิลลิงไคโอดต่อคร่อม

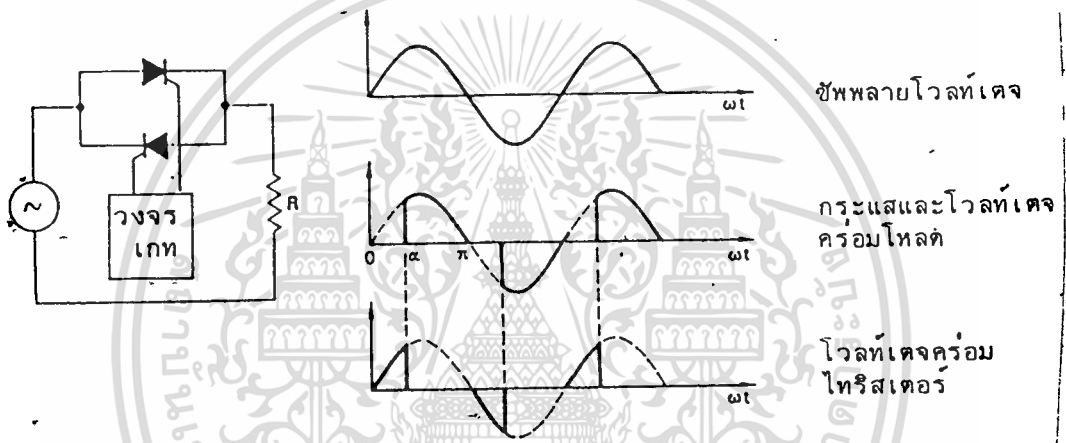
ในทางปฏิบัติวงจรซัลฟเวฟจะมีการ คักแปลงแก้ไขเล็กน้อย สำหรับกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟ โดยการคือ "ฟรีวิลลิงไคโอด" คร่อมโหลดดังรูป 23 เมื่อทริกไทริสเตอร์ให้นำกระแส กระแสจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในลักษณะเช่น เคิมแต่ที่ค่าแห่งปลายครึ่งไซเคิลบวก โวลต์เตจลบจากแหล่งจ่ายจะเริ่มปรากฏคร่อมไทริสเตอร์และกระแสซึ่งไหลผ่านอินดักทีฟโหลดจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ ตามธรรมชาติโดยจะไหลผ่านฟรีวิลลิงไคโอด สำหรับตักถวคร่อมโหลดที่มุมคงที่หนึ่ง ๆ ของ นั้นจะมีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นกับไหม้คอนสแตนต์ของโหลด

โดยปกติฟรีฮิลลิง ไดโอดจะถูกนำไปต่อรวมไว้กับอินคัทที่ฟโหลดในวงจรสวิตซิงทั้งกรณีที่ใช้ทรานซิสเตอร์และไทรสเตอร์ การที่กระแสอินคัทที่ฟค่อย ๆ ลดลงตามค่าไหม้คอนสแตนต์ของโหลดจะเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายจากศักดาสูงเกิน (Over Voltage) ซึ่งเกิดขึ้นทุกครั้งที่กระแสอินคัทที่ฟหยุดไหลลงอย่างกระทันหัน

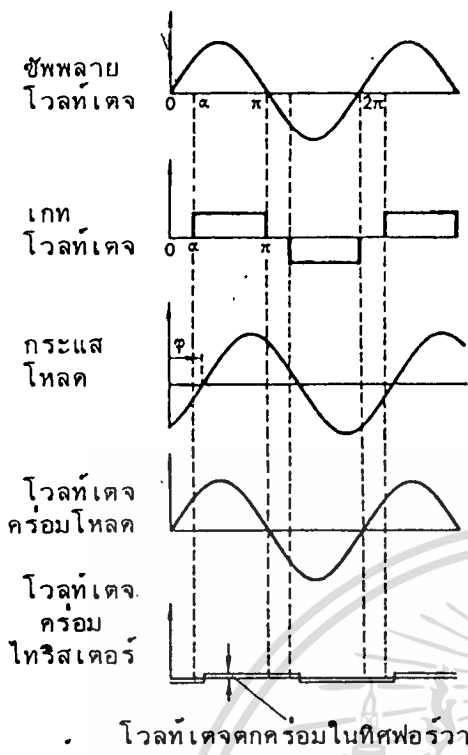
2.4.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าเอ.ซี



รูป 24. การควบคุม เอ.ซี. โวลต์เตจ 1 เฟส (กรณีโหลดเป็นความต้านทานล้วน ๆ)

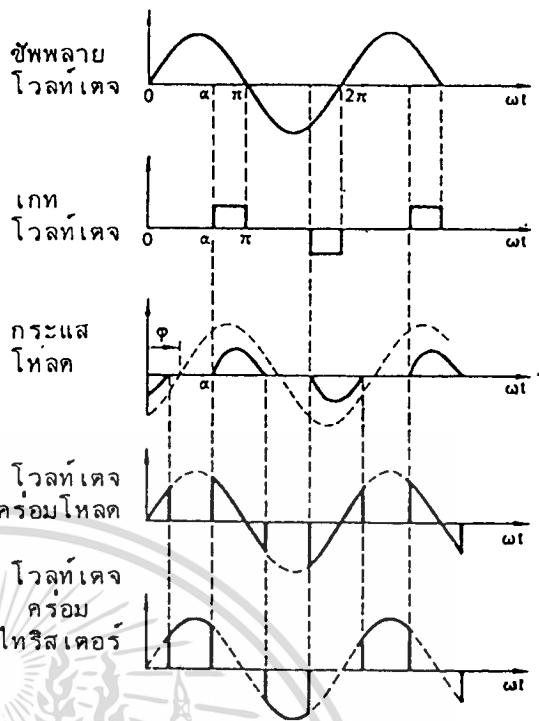
การควบคุมเฟสแบบพูลเวฟสามารถทำได้โดยการต่อไทรสเตอร์อีกตัวในวงจรฮาล์ฟเวฟดังรูป 24 ไทรสเตอร์ทั้งสองจะต่อไว้ด้วยกันในลักษณะขนานกลับทิศทางกันและจะถูกทริกให้เข้ากระแสสลับกันไปที่ตำแหน่งเดียวกันในไซเคิลของโวลต์เตจที่เป็นพอร์วารค์ให้แก่โหนดแคโทด ดังนั้นศักดาเอาท์พุทที่ได้จะมีลักษณะของคลื่นเอ.ซี. ที่สมมูลกันระหว่างซีกบวกและลบ และจะไม่มีองค์ประกอบของศักดา คี.ซี.ปนอยู่เลย สำหรับโหลดที่เป็นความต้านทานล้วน ๆ จะได้อินโวลต์เตจและกระแสดังรูป 24 และสำหรับกรณีของอินคัทที่ฟโหลดแรงเคลื่อนไฟเหนี่ยวนำจะพยายามรักษาให้กระแสไหลอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาหนึ่งภายหลังจากที่แหล่งจ่ายได้กลับทิศทางของศักดาไปแล้วชั่วระยะเวลาสั้น ๆ จะขึ้นกับเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลดและตัวอย่างรูปคลื่นได้แสดงในรูป 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โวลต์ เตจ ครอบ ไทริสเตอร์

(a) กรณี $\alpha < \phi$



(b) กรณี $\alpha > \phi$

รูป 25 ลักษณะโวลต์ เตจและกระแส 1 เฟส (กรณีโหลดเป็นอินดักทีฟ)

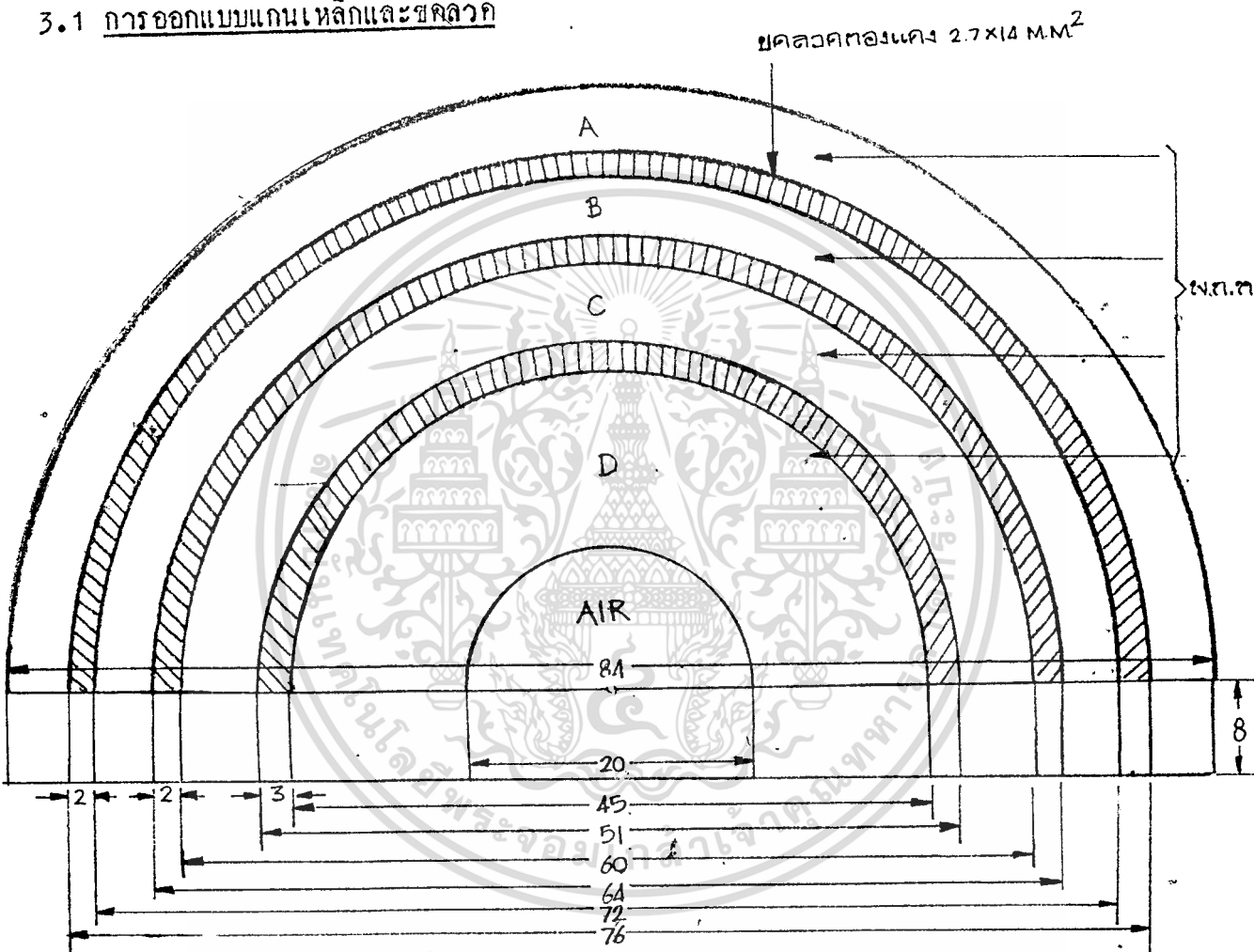
สำหรับวงจรที่ทำงานด้วยคลื่นขายนแบบปกติทั่วไปถ้าอินดักทีฟ โหลดมีมุมเฟสเป็น ϕ กระแสและ ศักย์โหลดจะมีรูปคลื่นเป็นขายนค้ยสำหรับมุมหน่วง α ซึ่งมีค่า $< \phi$ ทั้งนี้เพราะ ไทริสเตอร์ซึ่งนำกระแสในอันดับต่อไปจะถูกทริกให้น่ากระแสส่ก่อนหน่วงที่การ โหลดล้บทิศทางใ้เองของกระแสจะเกิดขึ้น ในกรณีที่มีมุม $\alpha > \phi$ กระแสจะไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง (รูป 25.) และกระแสซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นพัลส์จะมีรูปไม่่เป็นขายนแ่็มปลิฐูของพัลส์กระแสนี้จะต่ำลงเมื่อมุม เพิ่มขึ้นและกระแสไหลจะเป็น 0 เมื่อมุม $\alpha = \pi$ สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถเขียนแทนลักษณะคลื่นของกระแสได้้อย่างถูกต้องนั้นสามารถ เขียนขึ้นได้ง่าย ๆ ด้วยการแกสมการดิฟเฟอเรนเชียลของวงจรอินดักทีฟและแทนเงื่อนไขที่เหมาะสมลงในสมการ

การปรับเปลี่ยนมุมหน่วง α ของ ไทริสเตอร์ จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เอ.ซี. ซัพพลายจ่ายให้โหลดได้ ไทริสเตอร์ประเภทที่ทำงาน 2 ทิศทางหรือไทรแ่็คอาจนำมาใช้ทำหน้าที่แทน ไทริสเตอร์ทั้งสองได้

บทที่ 3

การออกแบบและสร้าง

3.1 การออกแบบแกนเหล็กและชคลาวค



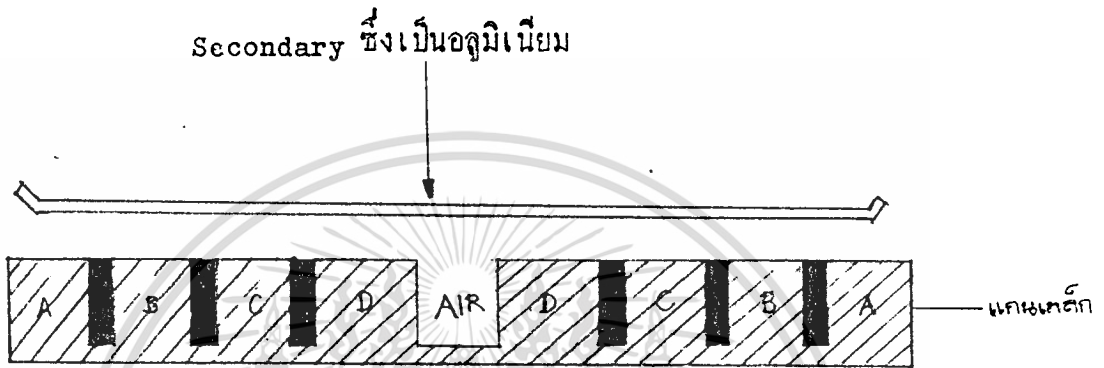
รูปที่ 26 แสดงพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กและชคลาวค

กำหนด $A = B + C = D$

$B = C$

จากรูปที่ 25 แบ่งพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กออกเป็น 4 ส่วนคล้ายกัน โดยกำหนดให้ส่วนนอกและส่วนในเท่ากัน และส่วนกลาง 2 ส่วนรวมกันก็เท่ากับส่วนนอกและส่วนในด้วย เพื่อเหตุผลในการพยายามทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก (ที่เกิดจากชคลาวค) สม่าเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนเหล็ก ซึ่งในส่วนของแกนเหล็กวงในสุดที่ตรงกลางเป็นรูว่างไว้ เพราะไม่สามารถชกแกนเหล็กที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ (เหมือนแกนเหล็กหม้อแปลง) จนเต็มไม่มีช่องว่างได้เลยได้ จึงจำเป็นต้องปล่อยให้ว่างไว้ นอกจากนั้น ในส่วนใดแกนเหล็ก A, B, C, D ก็ยังมีแผ่นเหล็กบางรองไว้ เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กเดินทางเป็น Magnetic Path



รูปที่ ๒๗ แสดงสปีเรียมอเทอร์ ที่ทำในโรงงาน

- ประกอบด้วย
1. แกนเหล็ก Silicon Steel
 2. ขดลวดทองแดง (ขนาด $2.7 \times 14 \text{ m.m.}^2$) จำนวน 3 ขด
 3. โขยพันแยกกันเฟสละ 1 ขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นแรก

กำหนดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$$A = \pi R^2$$
$$= \pi (0.36)^2 \quad \text{ม}^2$$

โดยออกแบบว่าจะยกน้ำหนักเท่ากับ 200 ก.ก

ชั้นที่ 2

เป็นการหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B)

จากสูตรแรงยก $F = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$

$$200 \times 9.81 = \frac{B^2 \pi (0.36)^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}}$$

$$B = 0.11 \quad \text{เทสลา}$$

ชั้นที่ 3

เป็นการหาจำนวนรอบของขดลวด

$$E = 4.44 f N B A$$

โดยที่ $E = 220$ โวลต์

$$f = 50$$
 เฮิรตซ์

$$B = 0.11$$
 เทสลา

$$A = \pi (0.36)^2 \quad \text{ม}^2$$

$$200 = 4.44 \times 50 \times N \times 0.11 \times \pi (0.36)^2$$

$$N = 22.12$$

$$\approx 23 \quad \text{รอบ}$$

ซึ่งก็คือ จำนวนรอบของขดลวดวงนอกสุดนั่นเอง (รัศมี = 0.36 ม)

แต่ปรากฏว่าในการปฏิบัติจริง ๆ เราไม่สามารถลงขดลวดทั้ง 23 รอบลงในช่องว่างที่เว้นไว้จนหมดได้ เพราะแกนเหล็กต้องสั่งจากโรงงานมา และเขาเว้นช่องว่างมาเล็กน้อยไป จึงจำเป็นต้องลดจำนวนรอบของขดลวดเหลือเพียง 15 รอบ (ซึ่งสามารถใส่ลงในช่องว่างได้พอดี)

$$\therefore N = 15 \quad \text{รอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 4

หาจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดที่เหลือ

เพื่อให้ลักษณะโพลสมดุลย์ 3 เฟสความต้านทานในลวดทั้ง 3 ขด จะคงเท่ากัน

$$R_1 = R_2 = R_3$$

$$\text{แต่ } R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\rho \frac{l_1}{A_1} = \rho \frac{l_2}{A_2} = \rho \frac{l_3}{A_3}$$

แต่ค่า ρ จะเท่ากันและค่า A ก็เท่ากันด้วย เนื่องจากใช้ขดลวดชนิดเดียวกัน

$$l_1 = l_2 = l_3$$

สรุปได้ว่า ความยาวของขดลวดทั้ง 3 ขด ต้องเท่ากัน

$$l_1 = \text{เส้นรอบวง} \times \text{จำนวนรอบ}$$

$$= 2\pi (0.36) \times 15 \text{ ม.}$$

$$l_2 = 2\pi (0.36) \times 15 = 2\pi (0.30) \times N_2, \quad N_2 = 18 \text{ รอบ}$$

$$l_3 = 2\pi (0.36) \times 15 = 2\pi (0.255) \times N_3, \quad N_3 = 23 \text{ รอบ}$$

เราจะได้จำนวนรอบของขดลวด 3 ขด ดังนี้

$$N_1 = 15 \text{ รอบ}$$

$$N_2 = 18 \text{ รอบ}$$

$$N_3 = 23 \text{ รอบ}$$

ขั้นที่ 5

คำนวณกลับไปหาแรงยกจากจำนวนรอบที่คำนวณได้

เราจะป้อน $v = 40$ โวลต์ เท่านั้นเพื่อเอาไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ๆ ซึ่งเราป้อน $v = 40$ โวลต์ เท่านั้น เพราะถ้าหากป้อนมากกว่านี้จะเกิดกระแสไหลในลวดทองแดงมากเกินไปถึงขั้นไหม้ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและอาจเป็นอันตรายได้

$$E = 4.44 fNBA$$

$$40 = 4.44 \times 50 \times 15 \times B \times \pi (0.36)^2$$

$$B = 0.0295 \text{ เทสลา}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอา B ที่หาได้ไปแทนค่าในสูตรแรงยก

$$\begin{aligned} F &= \frac{B^2 A}{2\mu_0} \\ &= \frac{(0.0295)^2 \times 11 (0.36)^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}} \\ &= 141 \end{aligned}$$

นิวตัน

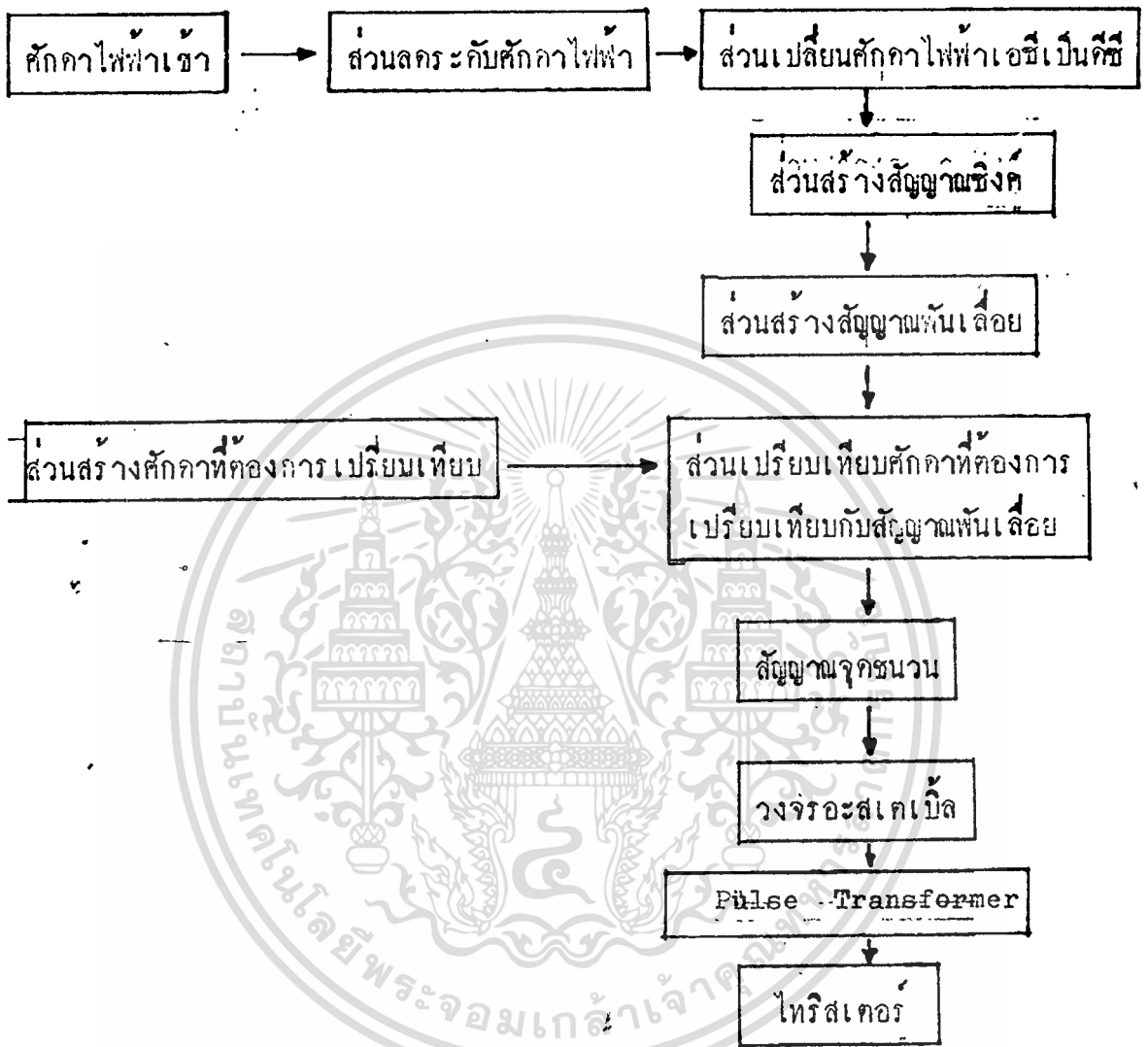
แรงยกคามทฤษฎี ≈ 14.3

กก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น.อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

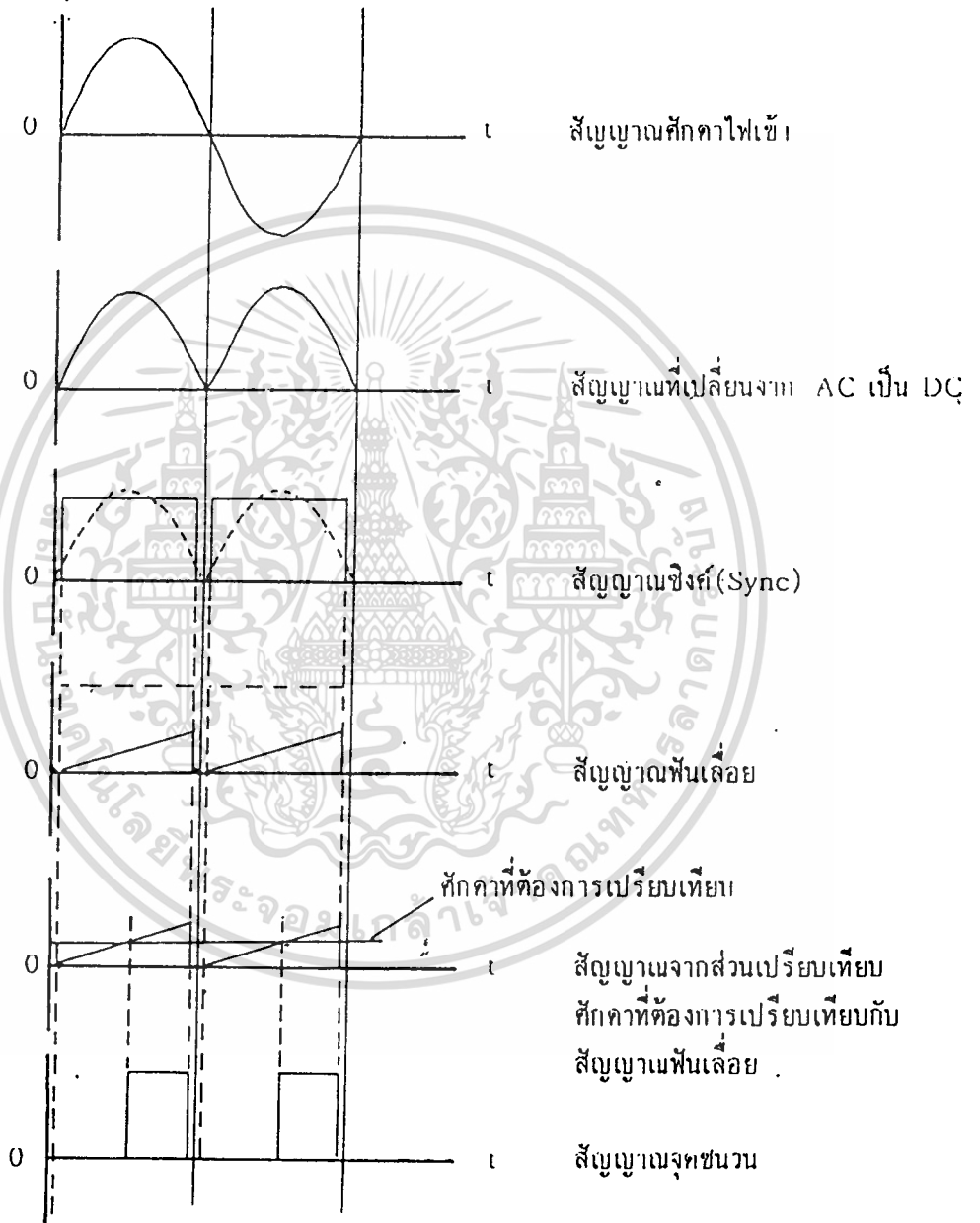
3.2 การออกแบบสัญญาณจุกชนวนโทริสเทอร์



รูปที่ 28 แผนผังแสดงการทำงานของวงจรจุกชนวน

หลักการทำงานของวงจรจากแผนผังในรูปที่ 27 และ 28 อธิบายไ้ดังนี้ คือ คิกคาไฟฟ้าเข้าจะ ถูกลดระกับคิกคาให้มีขนาดเล็กลง ทั้งนี้เพื่อให้คิกคาที่เหมาะสมไปใช้กับวงจรอื่น คิกคาไฟฟ้าที่ถูกลดระกับนี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นคิกคาไฟฟ้ากระแสตรงโดยการผ่าน วงจรเรคตีฟายกัวยโคโอด ซึ่งสัญญาณนี้จะถูกนำไปสร้างสัญญาณซิงค์ เพื่อให้สัญญาณที่นำไปควบคุมชิงโครนัสกับลายน์ ซึ่งจะมีความถี่เป็น 2 เท่าของคิกคาไฟฟ้าเข้า โดยอาศัยวงจร เปรียบเทียบคิกคาไฟฟ้า (Comparator) จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับคิกคาที่กองการเปรียบเทียบ เพื่อนำไปสร้าง

เอกลีตเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



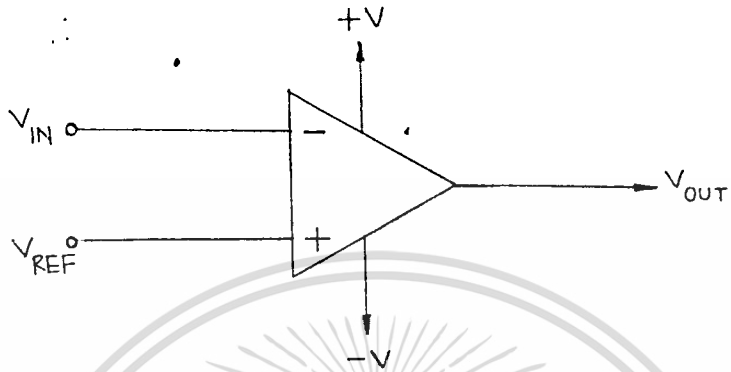
รูปที่ 29 แผนผังแสดงสัญญาณต่าง ๆ ในวงจรควบคุมการจุกชนวนโทรทัศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

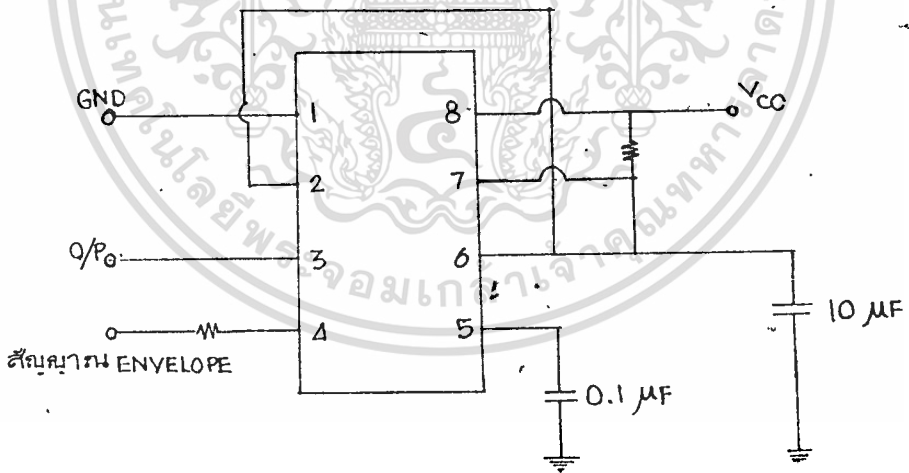
สัญญาณจุกชนวนออกมา แต่เนื่องจากโหลดเป็นลักษณะอินคักทีฟ โหลด จึงต้องนำสัญญาณจุกชนวนนี้ ไปสร้างเป็นสัญญาณพัลส์อยู่ภายในสัญญาณจุกชนวนนี้ แล้วจึงนำสัญญาณนี้ส่งต่อไปให้ Pulse Transformer เพื่อนำไปจุกชนวนไทรซิสเตอร์

เราสามารถเปลี่ยนมุมของการจุกชนวนนี้ได้ด้วยการปรับค่าศักดาที่ต้องการ เปรียบเทียบ ซึ่งจะเป็นการกำหนดมุมการนำกระแสของไทรซิสเตอร์ Pulse Transformer นั้นไว้เพื่อแยกสัญญาณการจุกชนวนออกจาก เอชอีลายน



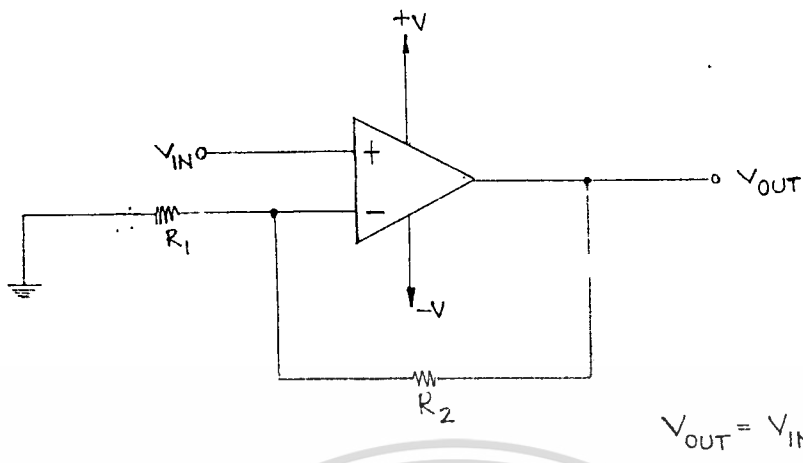


รูปที่ 30 แสดงวงจรเปรียบเทียบศักดาสัญญาณ



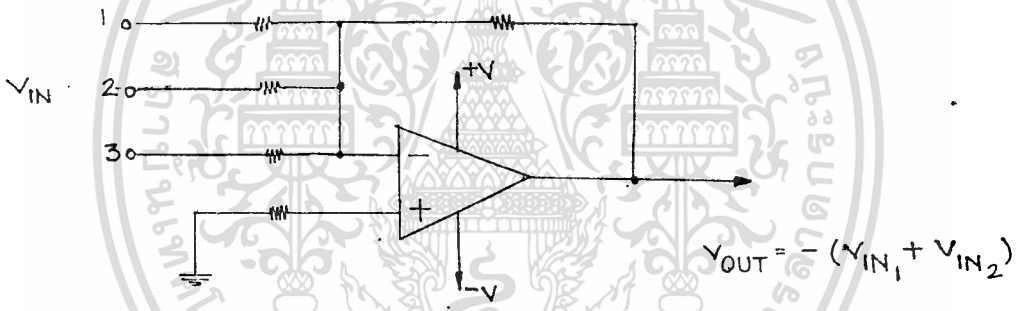
รูปที่ 31 แสดงวงจรผสมสัญญาณ โดย 555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



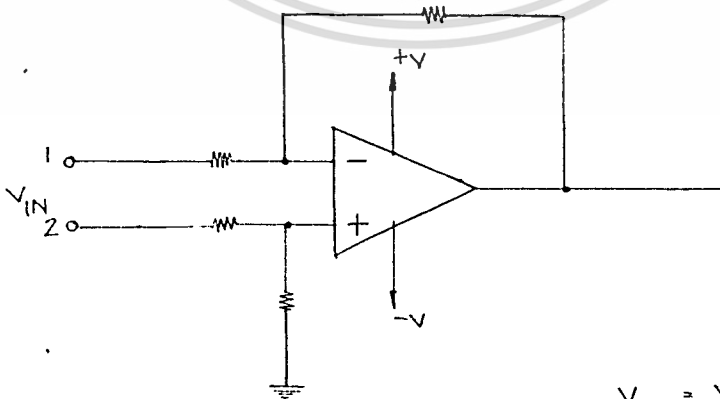
$$V_{OUT} = V_{IN} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

รูปที่ 32 แสดงวงจรขยายศักยาศัญญาณแบบไม่กลับศักยาศัญญาณ



$$V_{OUT} = -(V_{IN1} + V_{IN2})$$

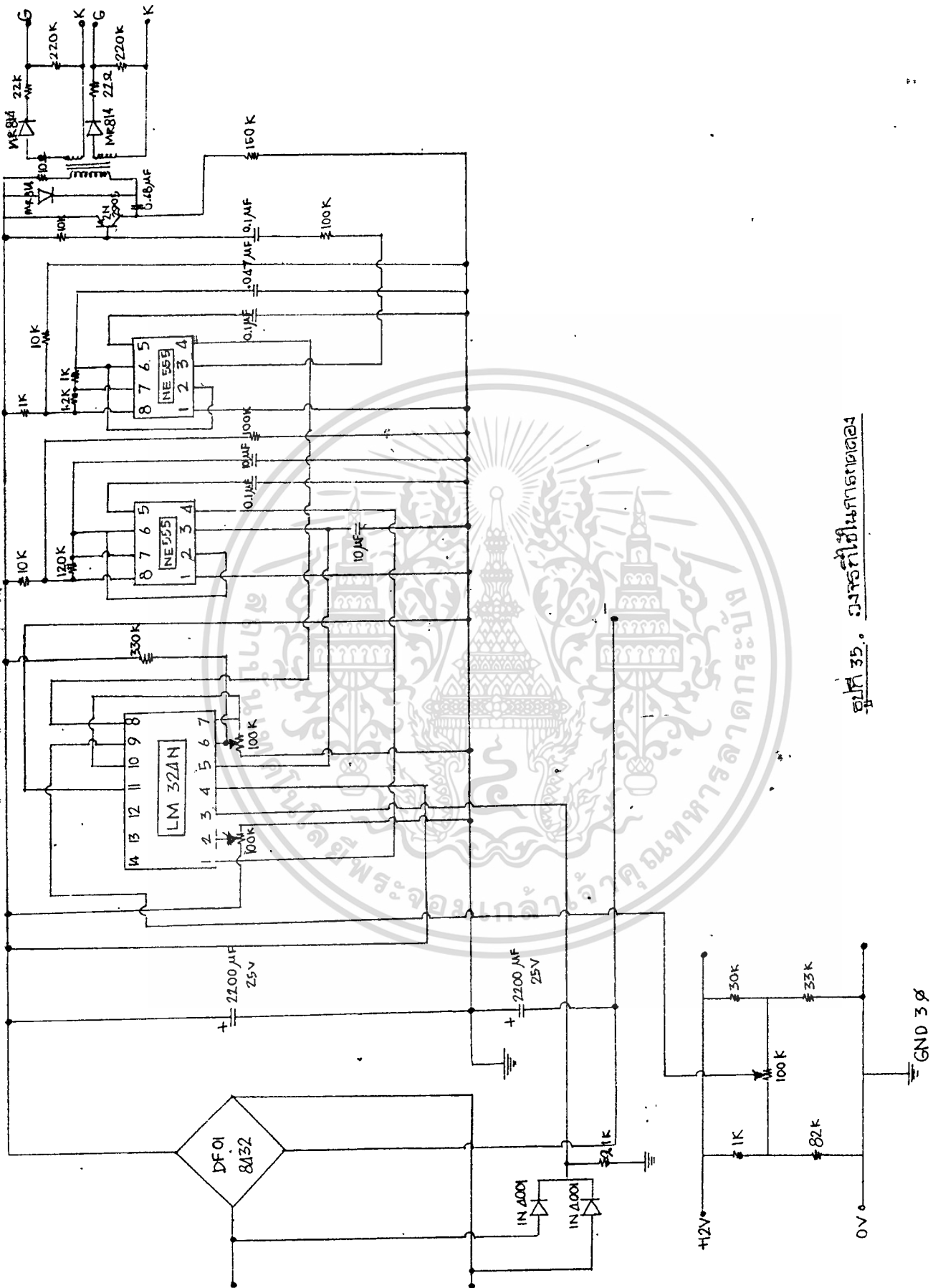
รูปที่ 33 แสดงวงจรขยายศักยาศัญญาณผลบวก



$$V_{OUT} = V_{IN2} - V_{IN1}$$

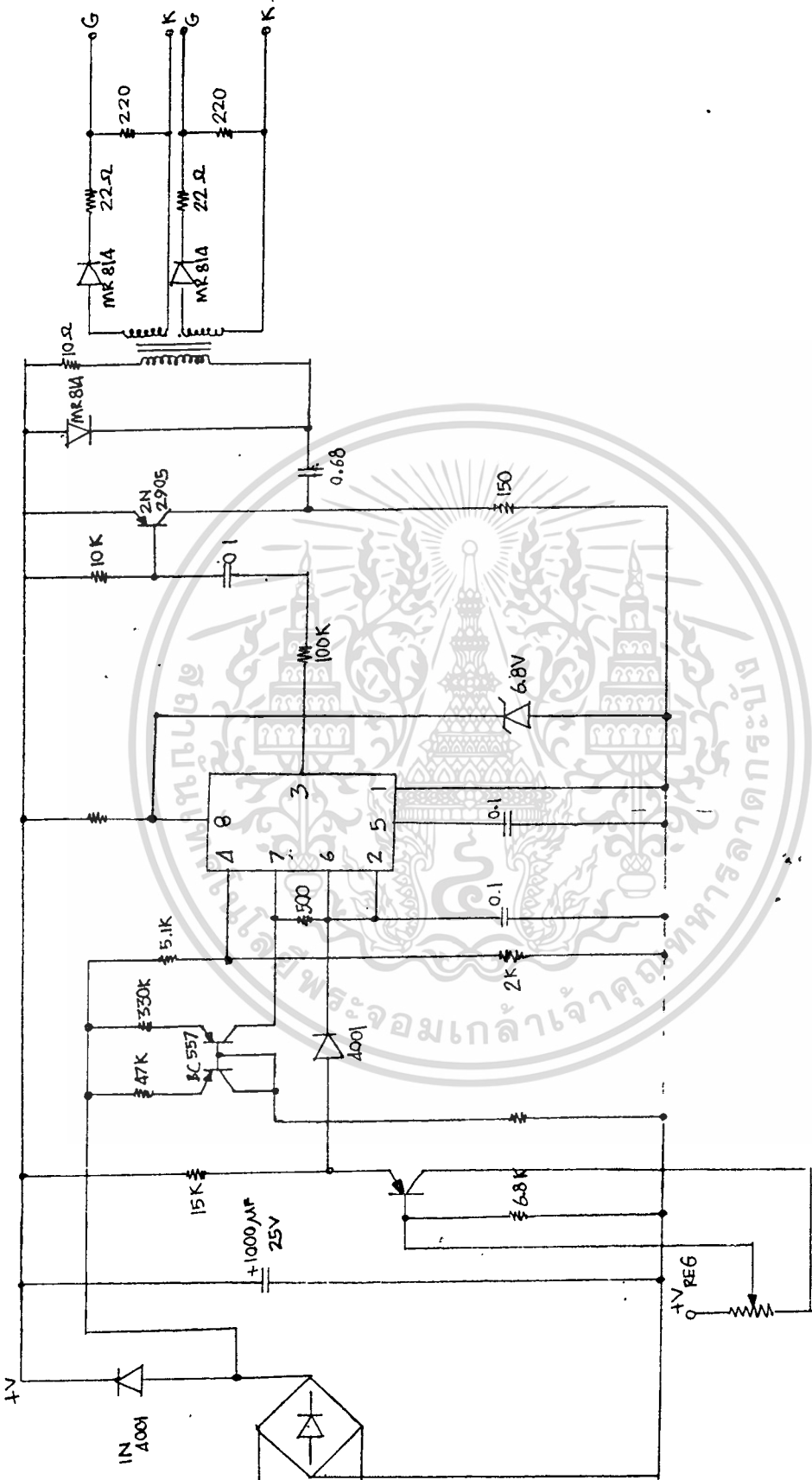
รูปที่ 34 วงจรขยายศักยาศัญญาณผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 35. วงจรที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

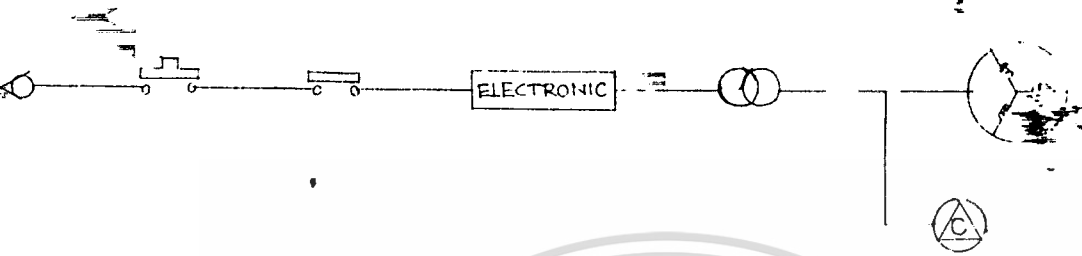


รูปที่ 36. วงจรที่โหมกรขาดอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง



รูปที่ 37 แสดงการต่อวงจรในการทดลอง

การทดลอง ป้อนไฟ 40 โวลต์ (โดยแปลงจากหม้อแปลงจาก 220 เป็น 40 โวลต์)

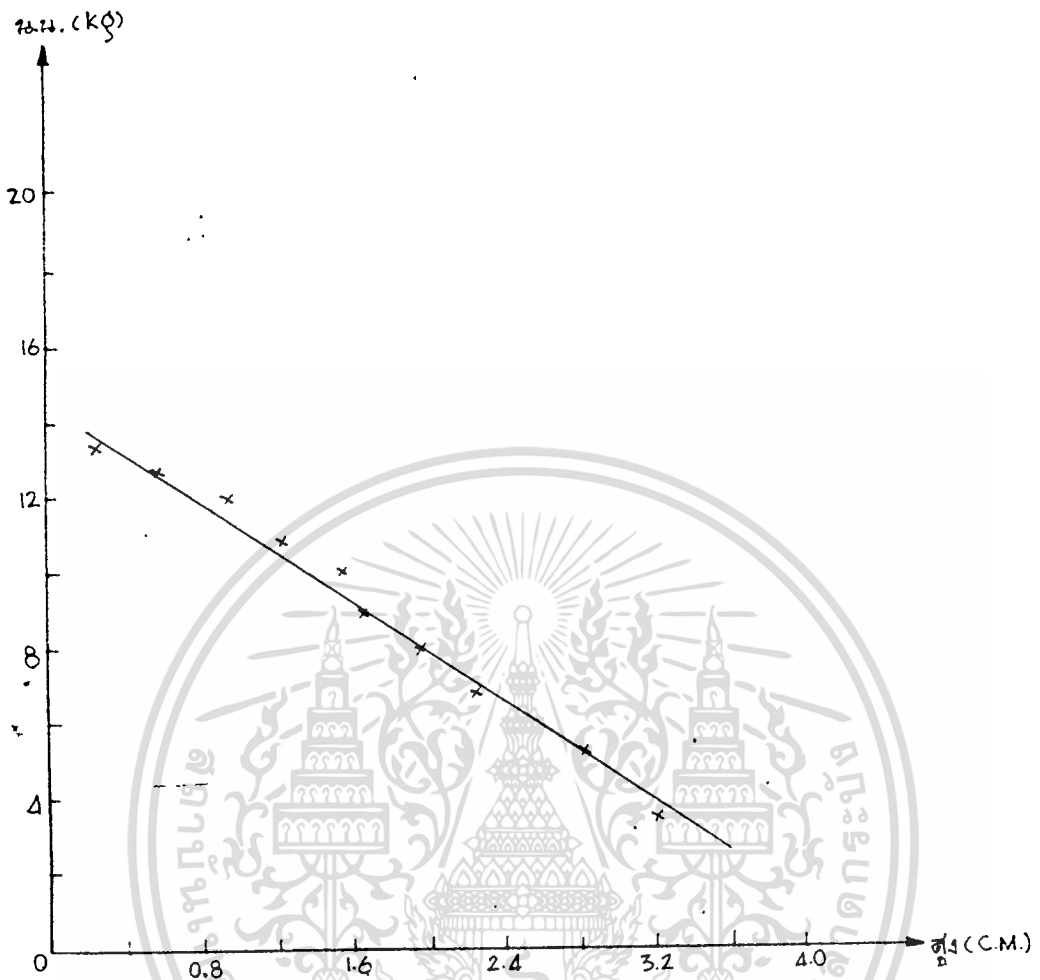
ผลการทดลอง

โวลต์ (ก.ก.)	ความสูง (ซ.ม.)
0	3.2
1	3.0
2	2.8
3	2.2
4	1.9
5	1.6
6	1.5
7	1.2
8	0.9
9	0.6
10	0.2
11	0.0

โดยที่น้ำหนักของงานอูมิเนียม = 3.6 ก.ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเขางานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแบบลงพิมพ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้



รูปที่ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับน้ำหนัก (หรือแรงยก)

จะเห็นว่า ค่าแรงยกในการทดลองน้อยกว่าในทางทฤษฎี ที่คำนวณไว้ก่อนหน้านี้

บทวิจารณ์ และสรุป

จากการทดสอบวิเนียร์มอเตอร์ เครื่องนี้ในงานลากระมิ่งนิทรรค ปรากฏว่าพบข้อเสียอีกมาก ทั้งเรื่องประสิทธิภาพ, การระบายความร้อน, ขนาดของขดลวดที่ใช้ในไพรมารีคอยล์, ฉนวน และกรรมวิธีการสร้าง จึงดูเหมือนว่าจะยังเป็นไปไม่ได้ที่จะประยุกต์ใช้ ลานีร์มอเตอร์ ในการยกของ โดยตรง เพราะ เมื่อจามเซกคันคาร์ลอยสูงขึ้นไป ก็จะทำให้ช่องอากาศ (AIR-GAP) กว้างขึ้นซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก แก่งจรมีผลทำให้ทองเพิ่มกระแสขึ้นมากในการทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงเท่าเดิมกระแสที่เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้ขดลวดตัวนำร้อนขึ้นกว่าเดิม ถ้าใช้เครื่องเป็นเวลานาน ฉนวนของขดลวดจะเสื่อมสภาพและเกิดการลัดวงจรได้ เราออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดของลวดใหญ่ขึ้น ความต้านทานขดลวดจะลดลง และถ้าจะไค้ความเข้มสนามแม่เหล็กเท่าเดิม คือค่า $H = NI/l$ จะต้องเท่าเดิม กระแสจะทองมากขึ้นด้วย แต่ลักษณะของความต้านทานจะไม่ค่อยมีผลมากนักถ้ามองกันจริง เพราะลวดที่ใช้ก็ใหญ่อยู่แล้ว ส่วนใหญ่ควรจะเป็นค่าอินดักทีฟมากกว่า สำหรับถ้าต้องการให้แรงมากขึ้นก็ทองเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่จริง ๆ นั้น จะเพิ่มขึ้นไค้ที่ค่าจាក់ค่า หนึ่งเท่านั้น แต่ตามองในแง่อื่นจะเห็นว่าการทำงานวลดสามารถลดจขึ้นจากห้ตอนไค้ นั้นจะเป็นการลดแรงเสียดทานที่พื้น และลดปัญหาเรื่องการลัดหรือกับเรื่องความร้อนและความคงทนของส่วนที่สัมผัสพื้น มีผลให้เราสามารถเพิ่มความเร็วและลดแรงผลักดันจลจลงไค้ หลักการนี้จึงนำไปใช้สำหรับยานพาหนะรูปแบบใหม่ นอกจากนั้นแล้วยังมีการใช้แทนบิมปีที่ทองทนความร้อนสูง ๆ อีกด้วย สรุปแล้วโปรแจนนี้ควรเป็นแค่แนวความคิด ไม่ควรจะนำไปใช้งานจริง จนกว่าจะมีการพัฒนาตัวนำให้ดีขึ้นกว่าค่อนันมาก ๆ

สำหรับในส่วนของการควบคุมเฟส จะสามารถปรับแ่งจรให้ทำการควบคุมไค้สมดุยทั้ง 3 เฟส แต่ส่วนของคักคเปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด อาจต้องปรับแ่งจรบ้าง สำหรับในวงจรควบคุมเฟสทั่ว ๆ ไปนั้น จะมีลักษณะของการที่เวลาโหลดแล้ว จะไปโหลดที่เฟสใด เฟสหนึ่งมาก..เพียงเฟสเดียว เราจึงมีแนวคิดที่จะใช้การนำสัญญาณส่วนหนึ่งจาก หม้อแปลงกระแส

มาทำการเปรียบเทียบกันในแต่ละเฟส แล้วนำมาเป็นส่วนหนึ่งของคักคที่ต้องการจะเปรียบเทียบในแต่ละเฟส เพื่อจะทำให้ไทริสเตอร์นั้น เมื่อโหลดแล้ว จะรับโหลดสมดุยกันทั้ง 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าปัจจัยที่สำหรับเครื่องจักรกลแม่เหล็กไฟฟ้า

เริ่มจากความสัมพันธ์เชิงเส้นของ แรงเคลื่อนไฟฟ้า และแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ลากผลคูณของ กระแสกับความต้านทาน เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า ส่วนแรงเคลื่อนแม่เหล็ก นั้นเป็นผลคูณ ของฟลักซ์กับความต้านทานแม่เหล็ก แต่ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กนั้นเป็นผลคูณ ของกับจำนวนรอบของขดลวด และค่าจำนวนรอบของขดลวดคูณกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์ก็เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังรูปที่

ELECTRIC CIRCUIT E.M.F. = CURRENT × RESISTANCE

$$\frac{l}{A_e}$$

CURRENT TURN =

TURN

$$\frac{d(\text{FLUX})}{dt} = \frac{l_m}{A_m}$$

MAGNETIC CIRCUIT M.M.F. = FLUX × RELUCTANCE

ซึ่งจะเห็นว่าค่าทั้งสองนี้สามารถสร้างได้ด้วยตัวเอง โดยเปลี่ยนกลับไปมาระหว่าง แรงเคลื่อนไฟฟ้า กับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ถ้าไม่มีการจำกัดด้วยความต้านทานไฟฟ้าและความต้านทานแม่เหล็กนี้ ดังนั้นจึงถือว่าเป็นผลคูณของตัวนี้ถือเป็นค่าปัจจัยที่เลว (Badness Factor) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

ปัจจัยที่เลว

$$\frac{l_e l_m}{6 \mu A_e A_m}$$

และเราจะนิยามค่าปัจจัยที่ (G) ก็คือ ค่าคงที่ตัวหนึ่งหารด้วยปัจจัยที่เร็วคูณกับเวลา ซึ่งแสดงถึงกำลังสมการนี้

ปัจจัยที่ดี = $\frac{K}{\text{ปัจจัยที่เลว} \times \text{เวลา}}$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่ตัวหนึ่ง

ในเครื่องจักรกลกระแสสลับนี้ ค่า K / เวลา คือ ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่าย (ω) ดังนั้นจะได้

$$G = (\omega 6 \mu)^{-1} \frac{A_e A_m}{l_e l_m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โปรดอย่าเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

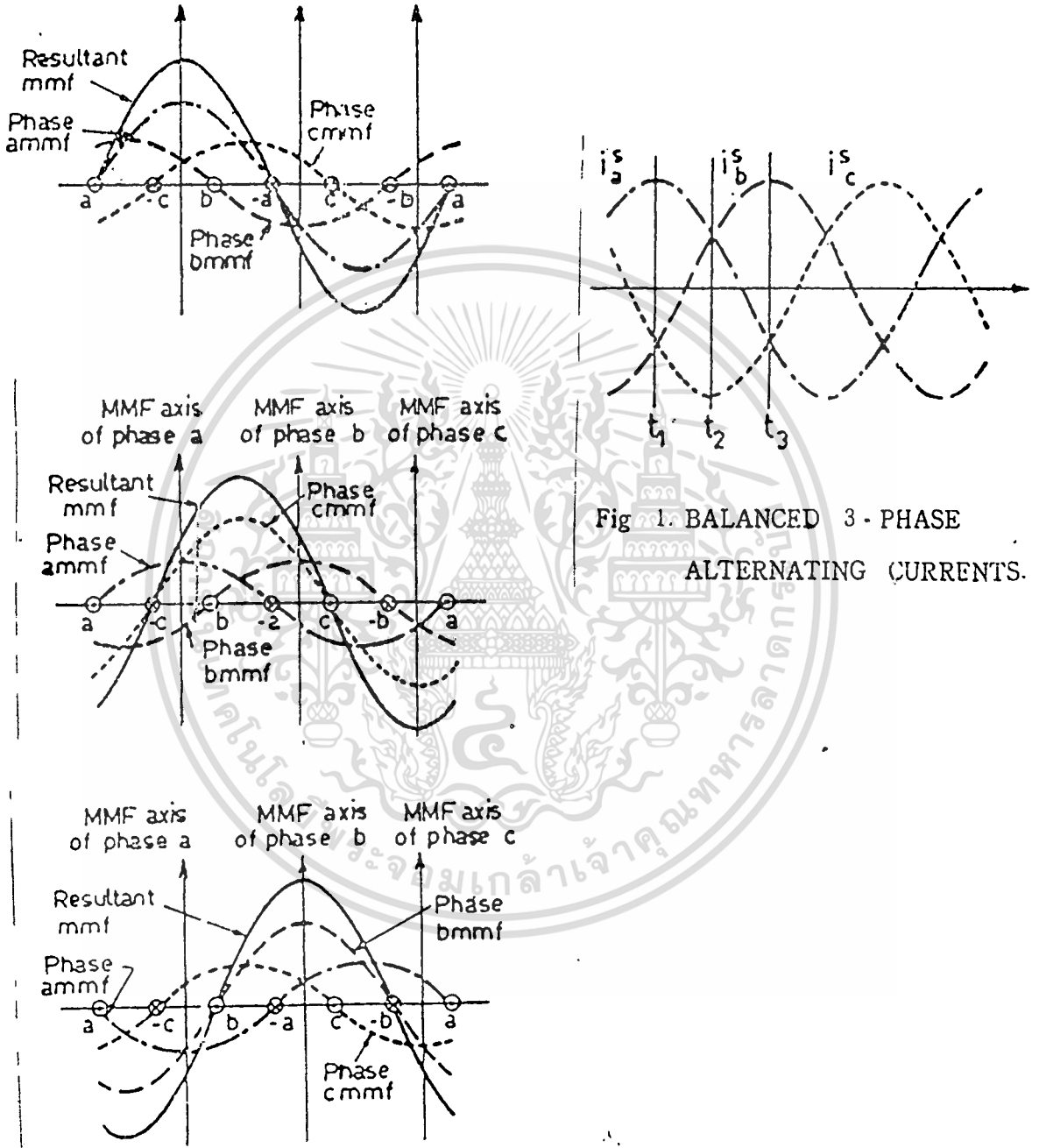


FIG. 2. COMPONENT AND RESULTANT mmf DISTRIBUTIONS CAUSED BY THE CURRENTS OF FIG. 1. IN THE 3. PHASE ARMATURE WINDING DIAGRAM (๓) IS FOR TIME t_1 ; (๒) FOR TIME t_2 ; (๑) FOR TIME t_3 ; OF FIG. 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา $T = t_1$ กระแสไฟฟ้าในเฟส เป็นค่าสูงสุดทางบวก กระแสไฟฟ้าในเฟส a และ จะมีค่าครึ่งของค่าสูงสุด แต่ในทางลบ ดังรูป 1
 ค่าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MMF) ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ได้เขียนแสดงไว้ดังรูป 2 ก และรวม
 ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MMF) ได้จากผลบวกของ MMF ทั้ง 3 เฟสดังเหตุผลรวมจะมี
 ขนาด 1.5 เท่าของ MMF ในเฟส a และทับกับเฟส a ค้วย

ที่เวลา $T = t_2$ เราจะได้นรวมของ MMF เคลื่อนที่ไปทับกับ MMF ในเฟส
 c โดยมีขนาดเท่ากับ 1.5 เท่าของ MMF ในเฟสนั้นค้วย ดังรูป 2 ข

ที่เวลา $T = t_3$ เราจะได้นรวมของ MMF เคลื่อนที่ไปทับกับ MMF ใน
 เฟส b และมีขนาดเท่ากับ 1.5 เท่าของ MMF ในเฟสนั้นค้วย ดังรูป 2 ค.

เราจะเห็นได้ว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีขั้วเท่าเดิม แต่เคลื่อนที่ไปทางก้านซ้ายค้วยความเร็ว
 เกี่ยวข้องกับความถี่ของไฟฟ้า กระแสสลับที่ใส่เข้าไปในวงจรและความกว้างของการวางขลวกตัวนำ
 โดยจะมีความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ

$$v_s = 2 pf$$

- โดย v_s เป็นความเร็วของคลื่นที่หน่วยเป็น เมตร/วินาที
- f เป็นความถี่ของกระแสสลับเป็น เฮิรตซ์
- p เป็นระยะพิช คือระยะทางเป็นความยาว $\frac{1}{2}$ ช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า MMF ที่
 ที่เกิดขึ้นเป็นเมตร

แรงยกทางแม่เหล็ก

ในกรณีของสนามไฟฟ้าเราโคค่าของพลังงานที่สะสมอยู่ในปริมาตร v เป็นดังนี้คือ

$$W_e = \frac{1}{2} \int_v D \cdot E \, dv$$

สำหรับในกรณีของสนามแม่เหล็กก็เช่นเดียวกันเราจะสามารถพิสูจน์ได้ว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในปริมาตร v มีนิพจน์คล้ายกับนิพจน์ของพลังงานที่สะสมในสนามแม่เหล็ก คือ

$$W_h = \frac{1}{2} \int_v B \cdot H \, dv$$

แต่เนื่องจาก $B = \mu H$ จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$W_h = \frac{1}{2} \int_v \mu H^2 \, dv = \frac{1}{2} \int_v \frac{B^2}{\mu} \, dv$$

เราคิดว่าพลังงานนี้จะกระจายอยู่ในปริมาตรนี้ด้วยความหนาแน่นของพลังงานเท่ากับ $\frac{1}{2} B \cdot H$ แต่เราไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายได้ ซึ่งลักษณะนี้จะเป็นจริงสำหรับตัวกลางแม่เหล็กที่เป็นลิเนียร์ แต่เราก็สามารถที่จะนำมาใช้เพื่อการคำนวณสำหรับตัวกลางที่ไม่เป็นลิเนียร์ก็ได้ ถ้าตอนนี้เรามาสันใจตัวกลางที่เป็นลิเนียร์ มักจะเป็นอากาศ ที่อยู่รอบ ๆ ตัวมัน ตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีขดลวดโซลินอยด์ยาว ๆ พันอยู่บนแกนซิลิกอน มีจำนวนรอบ N รอบ/เมตร มีกระแส I แอมแปร์ จะให้ความเข้มข้นแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่า $N I$ แอมแปร์/เมตร ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์กราฟ $B-H$ ของแกนเหล็กนั้น ซึ่งจะได้อ่า B ค่าหนึ่งให้เป็น B_{st} และถ้าเราออกแรง F ให้แกนเหล็กซึ่งสมมติให้เป็นลักษณะทรงกระบอกนี้เคลื่อนที่มาเป็นความยาว dl ดังนั้นเราจะต้องทำงาน $F \, dl$ เราถือว่างานที่ทำนั้นจะเป็นพลังงานที่เก็บสะสมอยู่ในแอร์แกนป ดังนั้นเราจะได้อีก

$$dW_h = F \, dl = \frac{1}{2} \frac{B_{st}^2}{\mu} A \, dl$$

โดยที่ A นี้เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ดังนั้น

$$F = \frac{B_{st}^2 A}{2 \mu}$$

เป็นสมการหาค่าแรงยกทางแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ.

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูงคือ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. นีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ และอาจารย์ สุวงษ์ โสมพงษ์ ที่ได้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง
ความรู้ และคำสั่งสอนต่อคณะผู้จัดทำ ทั่ว ๆ ไป ทุกคนที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ เพื่อน ๆ ที่
ให้กำลังใจ และบริษัท เอกอรั่ววิศวกรรม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แกนเหล็กสำหรับโครง
งานนี้

ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณ ทุกสิ่งทุกอย่างที่เป็น "วิชาวะ ลาดกระบัง"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. วิริยะ พิเชฐจำเริญ, "เอ.ซี. มอเตอร์คอล์โทรล", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 275 หน้า, 2529
2. พีระศักดิ์ วรสุนทรโรสด, "Linear Induction Motor", วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบังนิทรรศน์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2519, หน้า 4-9
3. Laithwaite E.R., "Linear Electric Machine-A Personal View", Proceedings of the IEEE Vol. 63, No 2, 1975, pp.250-290
4. Laithwaite E.R., "Induction machine for speicl purpose", George Newnes, 377 p., 1966.
5. Laithwaite E.R., "Propulsion without wheels", Hart Publis Co., 266p., 1968.
6. Laithwaite E.R., "Transport without wheels", Elek Science, 332 p., 1967.
7. D. Finney, "The Power Thyristor and its Application", McGraw - Hill Book company, 1980.
8. Haward N.Berlin, "Design of op-amp circuit, with experiment", Haward W. Sam & Co, 221 p., 1980.
9. Millman J, "Microeletronic Circuit: analong and discreat", synthesis and design", McGraw, Hill Inc., 625 p., 1980.
10. William H. Hayt, Jr., "Engineering electromagnetics", McGraw - Hill Inc., 527 p., 1981.
11. Martin A. Plonus, " Applied electromagnetic", McGraw - Hill Inc., 615 p., 1984.