

เครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง

An On Load Tap-change Automatic Voltage Regulator



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง





ปีการศึกษา - ๒๕๒๖

แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์

สำหรับนักศึกษาปริญญาโท

ชื่อนักศึกษา นาย ประภาส ไพรสุวรรณ

ชื่อหัวข้อเรื่องวิทยานิพนธ์ " เครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติแบบค่อเนื่อง "

ชื่ออาจารย์ผู้สอบสัมภาษณ์	ลายเซ็น	ผลการสอบ
๑. ผศ.ดร.พิรศักดิ์ วรสุนทรโรต		ผ่าน
๒. รศ.ดร.ลลิตชัย โภคโยฤตม		ผ่าน
๓. รศ.ดร.สุขุมวิท ภูมาฉิสาร		ผ่าน
๔. ผศ.ดร.พันธ์เทพ เลาทชัย		ผ่าน

วัน, เดือน, ปี ที่สอบ ..... 31 / สิงหาคม 2526 ..... เวลา ..... 11.30 น. ....

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	V
บทคัดย่อ	VI
Abstract	VII
บทที่ ๑ บทนำ	๑
๑.๑ บทนำ	๑
๑.๒ การวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Literature Survey)	๒
๑.๒.๑ Moving Coil Regulator	๒
๑.๒.๒ Induction Voltage Regulator	๓
๑.๒.๓ Transformer Tap-Changing	๓
๑.๒.๔ Auto Transformer Voltage Regulator	๓
๑.๓ การวิเคราะห์ผลงานที่พัฒนาขึ้น	๔
๑.๓.๑ รูปร่างลักษณะของสัปดาห์ไฟฟ้าทางออก	๔
๑.๓.๒ ช่วงระยะเวลาในการให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับสัปดาห์ทางเข้า	๕
๑.๓.๓ คุณสมบัติของความเที่ยงตรงในการรักษาระดับสัปดาห์ไฟฟ้าทางออก	๕
๑.๓.๔ ช่วงกว้างในการทำงาน	๕
๑.๓.๕ ความคงทนแข็งแรงของโครงสร้างและการบำรุงรักษา	๖
๑.๓.๖ ประสิทธิภาพในการใช้งาน	๖
บทที่ ๒ ส่วน Main Power Circuit	๘
๒.๑ ความนำ	๘

๒.๒ หลักการทำงาน	๙
๒.๒.๑ ส่วน Tap Change Transformer	๑๐
๒.๒.๒ ส่วน Power Switching	๑๐
๒.๒.๓ ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแส	๑๓
๒.๓ หลักการออกแบบ Main Power Circuit	๑๓
๒.๓.๑ ส่วน Tap Change Transformer	๑๓
๒.๓.๑.๑ การคำนวณจำนวนรอบของขดลวด	๑๔
๒.๓.๑.๒ การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็ก	๑๔
๒.๓.๑.๓ การคำนวณหาค่าความสูญเสียและ กระแสกระตุ้นในแกนเหล็ก	๑๕
๒.๓.๒ ส่วน Power Switching	๑๕
๒.๓.๓ ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแส	๒๐
๒.๔ การทดสอบ	๒๗
๒.๔.๑ การทดสอบหม้อแปลง	๒๗
๒.๔.๒ การทดสอบหม้อแปลงขณะ เปลี่ยนแท็ป	๓๐
๒.๔.๓ การทดสอบส่วน เบี่ยงถ่ายกระแส	๔๐
๒.๔.๔ การทดสอบส่วนป้องกันระบบ	๔๑
๒.๕ การแก้ไขปัญหาระดับคักตาไฟฟ้าเลี้ยงคอยล์ของคอนแทคแม่เหล็ก	๔๑
๒.๕.๑ หลักการออกแบบ	๔๒
๒.๕.๒ ลักษณะการทำงาน	๔๔
บทที่ ๓ ส่วนวงจรควบคุม	๔๖
๓.๑ ความนำ	๔๖

๓.๒ หลักการทำงานของวงจรส่วนควบคุม	๕๖
๓.๒.๑ หลักลระดับคักดา	๕๗
๓.๒.๒ ส่วนเปลี่ยนคักดาไฟฟ้ากระแสสลับเป็น คักดาไฟฟ้ากระแสตรง	๕๘
๓.๒.๓ ส่วนสร้างคักดาเปรียบเทียบ (Reference Voltage)	๕๑
๓.๒.๔ ส่วนแบ่งระดับคักดา (Voltage Divider)	๕๒
๓.๒.๕ ส่วนเปรียบเทียบคักดาไฟฟ้าทางเข้ากับคักดาอ้างอิง (comparator)	๕๓
๓.๒.๖ ส่วนแปลงสัญญาณลอจิก	๕๕
๓.๒.๗ ส่วนควบคุมวงจรเบี่ยงถ่ายกระแส	๕๕
๓.๒.๘ ส่วนหน่วงเวลา (Delay time)	๕๖
๓.๒.๙ ส่วนวงจรสวิตซ์ (Switching Circuit)	๕๗
๓.๒.๑๐ วงจรตรวจสอบความผิดปกติของคักดา	๕๘
๓.๓ หลักการออกแบบวงจรส่วนควบคุม	๕๙
๓.๓.๑ ส่วนลระดับคักดา	๕๙
๓.๓.๒ ส่วน เปลี่ยนคักดาไฟฟ้ากระแสสลับเป็น คักดาไฟฟ้ากระแสตรง	๖๐
๓.๓.๓ ส่วนสร้างคักดาเปรียบเทียบ (Reference Voltage)	๖๐
๓.๓.๔ ส่วนแบ่งระดับคักดา (Voltage Divider)	
๓.๓.๕ ส่วน เปรียบเทียบคักดาไฟฟ้า (comparator)	๖๑
๓.๓.๖ ส่วนแปลงสัญญาณลอจิก	๖๑
๓.๓.๗ ส่วนควบคุมวงจร เบี่ยงถ่ายกระแส	๖๒
๓.๓.๘ ส่วนหน่วง เวลา	๖๔
๓.๓.๙ ส่วนวงจรสวิตซ์ (Switching Circuit)	๖๕

๓.๔ การทดสอบ	๖๖
๓.๔.๑ ส่วนลระดับศึกษา	๖๖
๓.๔.๒ ส่วน เปลี่ยนศึกษาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็น ศึกษาไฟฟ้ากระแสตรง	๖๗
๓.๔.๓ ส่วนสร้างศึกษาเปรียบเทียบและแบ่งระดับศึกษา	๖๘
๓.๔.๔ ส่วนเปรียบเทียบศึกษาไฟฟ้า	๖๘
๓.๔.๕ ส่วนแปลงสัญญาณลอจิก	๖๘
๓.๔.๖ ส่วนควบคุมวงจร เบี่ยงถ่ายกระแส	๖๘
๓.๔.๗ ส่วนหน่วง เวลาและส่วนวงจรสวิตซ์	๗๐
บทที่ ๔ ผลการทดลอง	๗๑
๔.๑ บทนำ	๗๑
๔.๒ การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ส่วนรวม	๗๑
๔.๒.๑ การทดสอบขณะไร้โหลด	๗๑
๔.๒.๒ การทดสอบขณะมีโหลด	๗๓
๔.๒.๓ การทดสอบขณะ ๑๒๕ เปอร์เซ็นต์ พิกัด	๗๔
๔.๓ การทดสอบหาประสิทธิภาพรวมของระบบ	๗๕
๔.๔ การทดสอบหาความแน่นอนในการทำงานของอุปกรณ์	๗๕
บทที่ ๕ บทสรุป	๘๑
หนังสืออ้างอิง	๘๓
ภาคผนวก	๘๔
ผ.๑ แสดงคุณสมบัติและวิธีการเลือกใช้งานของคอนแทกแม่เหล็ก	๘๕
ผ.๒ ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะและ ตารางเปลี่ยนแปลงหน่วยที่ใช้ในการคำนวณ	๘๕
ผ.๓ แสดงคุณสมบัติและวิธีการเลือกใช้งานของโอเวอร์โวลต์รีเลย์ ๑๐๔	
ผ.๔ ตารางค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรรองความถี่	๑๐๘

กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ  
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา  
 ชี้แนะแนวทางความรู้ตลอดจนกำลังใจตั้งแต่เริ่มต้น และขอขอบคุณ คุณวีระศักดิ์  
 วงศ์วิวัฒน์ คุณนพรัตน์ อมรกุล คุณศิริวิวัฒน์ โปธิเวชกุล คุณพิชิต ล้ายอง  
 คุณชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย คุณสว่างซ์ โสมวงศ์ คุณวีระเชษฐ์ ชันเงิน ที่ได้ให้  
 ความอนุเคราะห์บางประการแก่ผู้เขียน

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณผู้อำนวยการสร้างอาคารกองทัพบกที่ได้สนับสนุน  
 ด้านทุนการวิจัยและพัฒนา เครื่องต้นแบบดังกล่าวจนประสบผลสำเร็จ



หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติแบบต่อเฟือง
โดย	ประภาช ไพรสวรรณา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	๒๕๒๖

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้รายงานถึงการพัฒนาต้นแบบเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติแบบต่อเฟืองขนาดพิกัด ๕๐ KVA ๓ เฟส ๖๑ แอมป์ ส่วนของวงจรกำลังประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสชนิดคอร์เปลี่ยนแท็ปได้ ๑๐ แท็ป ส่วนวงจรตัดต่อใช้คอนแทกแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการของเปลี่ยนแท็ป ขณะมีโหลดโดยมีส่วนวงจรเบี่ยงถ่ายกระแสและส่วนของวงจรควบคุมและป้องกันโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เนื้อหาสาระส่วนใหญ่จะรายงานถึงปรัชญาในการพัฒนา การแก้ไขปัญหาต่างๆ และการทดสอบเครื่องต้นแบบจนสามารถทำงานได้โดยมีความแน่นอนสูง มีประสิทธิภาพดี ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์ในประเทศที่มีการเพิ่มของความต้องการทางพลังงานไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ สูง โดยเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นได้เป็นที่ยอมรับเพื่อติดตั้งใช้ในอุตสาหกรรม

Thesis Title           An On Load Tap-change Automatic Voltage Regulator  
 Name                   Prapart Prisuwanna  
 Thesis Advisor       Dr.Birasak Varasundharosoth  
 Level of study       Master of Engineering in Electrical Engineering  
 Department           Electrical Engineering  
 Academic Year       1983

Abstract

This thesis reports the development of an on-load tap change automatic voltage regulator. The 40 KVA three phase prototype consists of a 10 taps core type transformer, magnetic switching circuits, power diverter circuit during switching, electronics control circuits, and power protection circuits.

Design philosophy, developments, alterations and test results of the model are illustrated in details. Final model inherits high performance features of high efficiency, excellent accuracy and completely free from fluctuation of power source., The model has already been accepted for local industrial usage.

## บทที่ ๑

### บทนำ

#### ๑.๑ บทนำ

โดยทั่วไปอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดจำเป็นต้องการระดับศักดาไฟฟ้าที่คงที่พอสมควรจากแหล่งจ่ายไฟขณะที่ระดับศักดาไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงมากๆ อาจจะทำให้อุปกรณ์เหล่านี้เกิดการชำรุดเสียหายหรืออายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง ซึ่งปัญหานี้เป็นปัญหาใหญ่โดยเฉพาะกับประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งนี้เนื่องจากประเทศเหล่านี้มักพึ่งมีการตื่นตัวในด้านอุตสาหกรรม มีการชักจูงให้ลงทุนจัดตั้งโรงงาน-อุตสาหกรรมมากขึ้น ตลอดจนปัจจุบันมีการวิวัฒนาการของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อที่จะอำนวยความสะดวกให้ใช้กันมากขึ้นอย่างกว้างขวาง จึงทำให้โหลดทางไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยขณะที่การขยายกำลังผลิตของแหล่งจ่ายไฟไม่สามารถเพิ่มได้ตามความต้องการของการใช้ไฟ ดังนั้นในขณะที่มีความต้องการใช้ไฟพร้อมกันมากๆ เกิดขึ้นมักจะทำให้ระดับศักดาไฟฟ้าลดลงจากปกติมาก ทั้งๆที่ขณะเดียวกันทางแหล่งผลิตก็จะจ่ายกำลังไฟออกมาเต็มตามที่ตามกำลังผลิตที่จะทำได้ แต่ในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟที่น้อยลงอย่างรวดเร็ว เช่นในกรณีของโรงงานต่างๆ หยุดเครื่องลงพร้อมกัน เมื่อถึงเวลาพักงานหรือเลิกงานก็จะทำให้ระดับศักดาไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นกว่าปกติ ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายและการเสื่อมคุณภาพ-เร็วของอุปกรณ์ไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องหาวิธีควบคุมรักษาระดับศักดาไฟฟ้าที่จะจ่ายให้แก่ระบบให้สม่ำเสมอ แม้ว่าระดับศักดาไฟฟ้าที่จ่ายจากโรงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ซึ่งการควบคุมระดับศักดาไฟฟ้านี้ได้มีการคิดค้นขึ้นมานานหลายปีโดยมีวิธีการที่แตกต่างกันอยู่หลายวิธีด้วยกัน โดยการคิดค้นได้เริ่มจากหลายประเทศที่เคยเจอปัญหาดังกล่าว ดังนั้นจนถึงปัจจุบันจึงมีอุปกรณ์ชนิดนี้เกิดขึ้นหลายแบบอย่าง ซึ่งแต่ละแบบต่างมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันโดยอาจแตกต่างกันบ้างตรงโครงสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ ตั้งแต่ส่วนต้นกำลังในการจ่ายไฟจนถึงวงจรควบคุมต่างๆ สำหรับภายในประเทศอุปกรณ์ขนาดใหญ่ที่มีใช้อยู่ส่วนใหญ่มักจะลวนสั่งมาจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมากและสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของระดับศักดาไฟฟ้าได้ไม่กว้างนักประมาณ  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องที่สั่งจากต่างประเทศนั้นได้ออกแบบไว้ใช้งานภายในประเทศของผู้ผลิตเอง ซึ่งมีปัญหาของการขึ้นลงของระดับศักดาไฟฟ้าอยู่ในขั้นต่ำไม่มากเท่าประเทศที่กำลังพัฒนา เพราะประเทศผู้ผลิตเครื่องเหล่านั้น-

มักเป็นประเทศที่พัฒนาแล้ว ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีกำลังมากพอที่จะจ่ายให้แก่โหลดที่จะมีเพิ่มจึงทำให้ระดับศักดาที่มีความเที่ยงตรงพอควร จึงเป็นเหตุให้เครื่องที่สั่งเข้ามาบางครั้งทำงานอาจไม่ได้ผลทั้งนี้ เพราะการออกแบบที่กล่าวข้างต้นไม่ได้ออกแบบไว้ใช้กับในประเทศซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของระดับศักดาไฟฟ้าอยู่ในช่วงกว้างถึงประมาณ  $\pm 20$  เปรี่เซ็นต์ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่ประเทศที่มีปัญหาดังกล่าวควรจะพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้ขึ้นใช้เอง เพื่อให้เข้าได้กับสภาวะของไฟที่เกิดขึ้นภายในประเทศและเป็นการลดการขาดดุลการค้าอีกทางหนึ่ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบและการทำงานของเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติชนิดต่อเนื่องที่ได้พัฒนาขึ้น โดยเครื่องที่ได้สร้างขึ้นนั้นประกอบด้วยส่วนใหญ่ๆ ๓ ส่วนด้วยกัน คือมีส่วนจ่ายต้นกำลังซึ่งเป็นหม้อแปลงที่มีแท็ปอยู่ ๑๐ แท็ปส่วนตัดต่อการจ่ายไฟของเครื่องโดยส่วนนี้ได้ใช้คอนแทคแม่เหล็ก และส่วนสุดท้ายก็คือ ส่วนวงจรควบคุม ซึ่งประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนใหญ่ สำหรับเครื่องที่ได้สร้างขึ้นจนสำเร็จและใช้งานได้ผลดีนี้เลือกออกแบบให้สามารถปรับช่วงของการเปลี่ยนแปลงของระดับศักดาไฟฟ้าอยู่ในช่วงกว้างคือ  $\pm 10$  ถึง  $-20$  เปรี่เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนของศักดาที่ได้ออกมาอยู่ในช่วง  $\pm 0.5$  เปรี่เซ็นต์ ขนาดพิกัด ๕๐ KVA ๖๑Amp โดยเครื่องจะมีระบบเตือนภัยเมื่อระดับศักดาไฟฟ้าด้านเข้าต่ำกว่า ๓๒๐ โวลท์หรือสูงกว่า ๕๒๐ โวลท์ ซึ่งเกินขีดความสามารถของเครื่องที่ได้ออกแบบไว้ หรือในกรณีที่มีการขาดหายของศักดาไฟฟ้าเฟลโคเฟลหนึ่งมีระบบตัดไฟเองโดยอัตโนมัติเมื่อมีการใช้ไฟเกินหรือเกิดภาวะผิดปกติของโหลด และการเปลี่ยนปรับค่าศักดาไฟฟ้ามีลักษณะกระแสดต่อเนื่องโดยไม่มีการขาดช่วง

## ๑.๒ การวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Literature Survey)

### ๑.๒.๑ Moving Coil Regulator

โครงสร้างของเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นหม้อแปลงชนิดพิเศษที่มีคอยล์ลวดวงจรขดหนึ่งซึ่งสามารถปรับเลื่อนไปมาได้ เพื่อทำการเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำร่วมซึ่งทำให้ศักดาขาออกสามารถปรับค่าได้โดยต่อเนื่องและราบเรียบซึ่งเป็นข้อดีของเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดนี้ ซึ่งยังมีข้อดีที่ระบบจ่ายไฟเข้าออกนั้นสามารถต่อตรงกับระบบของโหลดโดยไม่ต้องผ่านหน้าสัมผัสต่างๆ ด้วย

แต่ก็มีข้อเสียตรงที่โครงสร้างมีส่วนยุ่งยาก มีข้อจำกัดของขนาด ประสิทธิภาพต่ำ และกรรมวิธีในการควบคุมการปรับแบบอัตโนมัติทำให้เพียงตรงได้ยาก

#### ๑.๒.๒ Induction Voltage Regulator (I.R.)

โครงสร้างของอุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพันโรเตอร์เป็นหลัก ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงโดยทั่วไป แต่จะมีขดลวดที่หมุนไปได้โดยขดลวดที่หมุนไปนี้จะทำหน้าที่ในการเสริมหรือหักล้างเส้นแรงแม่เหล็กทำให้ค่าของศักดาทางออกเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ราบเรียบและอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นข้อดีของเครื่องชนิดนี้ อีกทั้งค่าของศักดาสามารถออกแบบให้มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่กว้าง ง่ายต่อการควบคุมให้ทำงานอัตโนมัติ แต่มีข้อเสียตรงที่มีโครงสร้างที่ยาก , ต่อการขยายขนาดทั้งนี้เนื่องจากถูกจำกัดด้วยขนาดของแปรงถ่านที่จะเป็นตัวให้กระแสไหลผ่าน อีกทั้งมีความยากลำบากในการบำรุงรักษา และมีประสิทธิภาพต่ำทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้าง ซึ่งทำให้มีส่วนสูญเสียไปในช่องอากาศระหว่างตัวอยู่กับที่และตัวหมุน

#### ๑.๒.๓ Transformer Tap-Changing

อุปกรณ์ชนิดนี้การปรับแรงดันทำได้โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนแท็บของหม้อแปลง ทำให้สามารถปรับแรงดันได้ในช่วงที่กว้างตามความต้องการได้ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบ การปรับรักษาแรงดันจะปรับเป็นช่วงๆ ตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป มีการพัฒนาขึ้น ๒ ชนิดคือ On-load Tap Change และ Off-load Tap Change ซึ่งทั้ง ๒ ชนิดนี้มีโครงสร้างที่คล้ายกัน แต่มีคุณสมบัติต่างกัน คือ On-load Tap Change ในขณะที่เปลี่ยนแท็บจะไม่มีการขาดช่วงไปของศักดา ทั้งนี้เนื่องจากจะมีส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสต่อคร่อมแท็บที่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วน Off-load Tap Change ในขณะที่เปลี่ยนแท็บไปจะมีส่วนขาดหายไปของศักดา ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแท็บใหม่จะทำได้เมื่อแท็บซึ่งทำงานอยู่นั้นถูกตัดออกเสียก่อน ซึ่งที่กล่าวมาแล้วทั้ง ๒ ชนิด มีข้อดีที่มีโครงสร้างที่ง่าย-แข็งแรงการขยายขนาดพิกัด และช่วงกว้างในการทำงานสามารถทำได้ง่าย ประสิทธิภาพของระบบสูง

#### ๑.๒.๔ Auto-Transformer Voltage Regulator

อุปกรณ์ชนิดนี้มีโครงสร้างหลักเป็น Auto-Transformer ซึ่งสามารถควบคุมรักษา

ระดับศักดาไฟฟ้าโดยอาศัยการปรับตำแหน่งของแปร่งถ่านที่กดลงบนขดลวด โดยวิธีการนี้สามารถปรับแรงดันได้ในช่วงที่กว้างตามความต้องการและสามารถทำการปรับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง แต่มีข้อเสียที่โครงสร้างตัว Auto-Transformer ต้องมีแปร่งถ่านกดลงบนขดลวด ซึ่งหน้าแปร่งถ่านที่กดนั้นจะลัดวงจรขดลวดที่ถูกแปร่งถ่านสัมผัสอยู่ ทำให้เกิดประกายไฟขณะเปลี่ยนตำแหน่งของแปร่งถ่านและยังทำให้เกิดการกระชากของศักดาไฟฟ้าทางออกขึ้นเป็นสาเหตุให้ยากต่อการขยายให้มีขนาดใหญ่ และยังต้องมีการบำรุงรักษาอยู่เสมอและมีราคาสูง

### ๑.๓ การวิเคราะห์ผลงานที่พัฒนาขึ้น

เมื่อวิเคราะห์จากผลงานต่างๆ ที่ได้เคยพัฒนาขึ้นมาจึงได้ทำการพัฒนาเครื่องต้นแบบ ๓ เฟส ขนาด ๔๐ KVA ๓๘๐ โวลท์ ๖๑ แอมป์ขึ้นและได้แนวความคิดในการพัฒนาคุณสมบัติของเครื่องต้นแบบ ดังนี้

#### ๑.๓.๑ รูปร่างลักษณะของศักดาไฟฟ้าทางออก

สำหรับรูปร่างลักษณะของศักดาไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายมาตามสายส่งจะเป็นรูปคลื่นขายน (Sine wave) ที่มีความต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นมาจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นภายในสายส่งกำลัง และในขณะเดียวกันเพื่อป้องกันผลที่จะเกิดขึ้นในกรณีโหลดเป็นพวกรีแอคทีฟโหลด (reactive load) ในกรณีถ้ารูปร่างของศักดาไฟฟ้าเป็นรูปอื่นจะมีผลให้ขนาดของศักดาไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไป และยังมีผลทำให้เกิดการกระชากของศักดาไฟรบกวนการทำงานของวงจรในระบบข้างเดียวได้ ซึ่งในกรณีสำหรับศักดาไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นขายนแล้ว จะมีผลที่เกิดขึ้นในลักษณะของขนาดของศักดาเปลี่ยนแปลงไป หรือเกิดความแตกต่างระหว่างเฟสของศักดาและเฟสของกระแสในระบบเท่านั้น

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะให้เครื่อง รักษาระดับแรงดัน มีขีดความสามารถในการรักษาระดับศักดาทางออกให้คงรักษาลักษณะของรูปคลื่นขายนในคงรูปเดิม และมีความต่อเนื่องไม่ขาดช่วงเหมือนศักดาไฟฟ้าที่จ่ายจากแหล่งกำเนิด

### ๑.๓.๒ ช่วงระยะเวลาในการให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับศักดาทางเข้า

การทำงานของเครื่องรักษาระดับศักดาไฟฟ้าที่จะทำหน้าที่แก้ไขความผิดพลาดของระดับศักดาไฟฟ้าที่คลาดเคลื่อนไปจากศักดาปกติ โดยให้ระดับศักดาไฟฟ้าทางออกของวงจรมีค่าคงที่ในช่วงที่กำหนดไว้เสมอซึ่งก็จำเป็นต้องอาศัยช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อทำการปรับให้ได้ค่าระดับศักดาทางออกกลับเข้าสู่ภาวะปกติที่กำหนด เมื่อเกิดภาวะการเปลี่ยนแปลงไปของระดับศักดาไฟฟ้าทางเข้าขึ้น ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวนี้ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ก็จะต้องมีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรด้วย

### ๑.๓.๓ คุณสมบัติของความเที่ยงตรงในการรักษาระดับศักดาไฟฟ้าทางออก

คุณสมบัติข้อนี้เป็นการกำหนดขึ้นเองตามความละเอียดของการใช้งาน ซึ่งกำหนดขึ้นโดยมีจุดคงที่ที่ระดับศักดาเฟสเท่ากับ ๒๒๐ โวลท์ และยอมให้คลาดเคลื่อนไปจากค่าปกติมากน้อยเท่าใด

ในวงจรที่สร้างถูกกำหนดจากระดับศักดาของจุดแตะของทรานส์ฟอร์มเมอร์ทางเข้า และยอมให้ค่าคลาดเคลื่อนไปจากค่าปกติ  $\pm ๑.๕$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้ยังสามารถทำให้น้อยลงได้ แต่เมื่อเทียบถึงขนาดของความจำเป็นในการต้องใช้ศักดาที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่านี้กับราคาที่จะต้องเพิ่มในการสร้างแล้วคิดว่าไม่จำเป็นและไม่เหมาะสม เพราะจะทำให้ราคาสูงและอุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีจำนวนเพิ่มสูงขึ้น โอกาสที่เกิดความเสียหายก็จะมากขึ้นและทำให้ยากต่อการตรวจสอบและบำรุงรักษา

### ๑.๓.๔ ช่วงกว้างในการทำงาน

คุณสมบัติข้อนี้ เป็นคุณสมบัติที่จะต้องกำหนดขึ้นเองเช่นกัน ซึ่งช่วงกว้างในการทำงานมักจะต้องกำหนดจากการเปลี่ยนแปลงไปของระดับศักดาที่เกิดขึ้นตามสภาวะของไฟในท้องถิ่นที่ใช้งาน ซึ่งในประเทศไทยมีระดับศักดาเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงกว้าง การออกแบบจึงควรคำนึงถึงด้านนี้ให้มาก จึงจะทำให้เครื่องสามารถใช้งานได้ดี

ดังนั้นในการออกแบบจึงได้กำหนดช่วงการทำงานอยู่ในระหว่าง ๓๒๐ โวลท์ ถึง ๔๒๐ โวลท์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีช่วงกว้างในการทำงานถึง ๑๐๐ โวลท์ ซึ่งใกล้เคียงกับภาวะ-

การเปลี่ยนแปลงของศักดาที่เกิดขึ้นภายในประเทศ อนึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นการออกแบบเฉพาะเครื่อง-  
ต้นแบบที่ช่วงค่าการทำงานของศักดาไฟฟ้าสามารถออกแบบปรับให้มีช่วงค่าที่สูงขึ้นหรือต่ำลงกว่าจุด-  
สูงสุด-ต่ำสุด ใดๆ ได้ตามความต้องการเฉพาะตัวของแต่ละระบบ

#### ๑.๓.๕ ความคงทนแข็งแรงของโครงสร้างและการบำรุงรักษา

คุณสมบัติข้อนี้มีความจำเป็นอย่างมากในการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องใช้  
โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอุปกรณ์ขนาดใหญ่ ด้วยแล้วจะต้องมีโครงสร้างที่คงทนแข็งแรงเพื่อให้ง่าย  
ต่อการขนย้ายติดตั้ง และในขณะเดียวกันโครงสร้างดังกล่าวต้องง่ายต่อการบำรุงรักษาด้วย

ดังนั้นในการออกแบบจึงได้ใช้ทรานสฟอर्मเมอร์ชนิดคอร์ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายและแข็งแรง  
เป็นตัวต้นกำลังในการจ่ายไฟ และใช้คอนแทคแม่เหล็กเป็นตัวใช้ในการตัดต่อไฟ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว  
มีความแน่นอนในการงานสูง และง่ายต่อการควบคุมตรวจสอบบำรุงรักษา

#### ๑.๓.๖ ประสิทธิภาพในการใช้งาน

คุณสมบัติข้อนี้เป็นการบอกรับถึงค่าความสูญเสียในส่วนต่างๆ ของระบบทั้งหมด ซึ่ง  
เมื่อพิจารณาแล้วมีส่วนสำคัญมากสำหรับอุปกรณ์ใหญ่ที่ใช้กำลังไฟสูงๆ ทั้งนี้เนื่องจากหากเครื่องมือ-  
ประสิทธิภาพต่ำ ก็จะทำให้ต้องมีสูญเสียของกำลังงานในเครื่องสูง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองในการ  
ที่จะต้องจ่ายค่าไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย ซึ่งเครื่องที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมีส่วนของตัวต้นกำลังในการจ่ายไฟเป็น  
ทรานสฟอर्मเมอร์ซึ่งมีส่วนของค่าความสูญเสียต่ำ และมีคอนแทคแม่เหล็กในการถ่ายเทกำลังไฟฟ้า  
จึงทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่สูง

จากคุณสมบัติที่กล่าวข้างต้นเป็นหลักการและแนวคิดในการพัฒนาเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า  
อัตโนมัติแบบต่อเนื่องต้นแบบขึ้น ซึ่งเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญออกเป็น ๓ ส่วน  
ด้วยกันดังนี้ ส่วนแรกคือส่วนจ่ายกำลังหรือต้นกำลังของเครื่อง ส่วนที่สอง คือส่วนที่เปลี่ยนแปลง  
ระดับศักดาหรือส่วนตัดต่อการเปลี่ยนแท็บ ส่วนที่สาม คือส่วนควบคุม หรือวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

-ส่วนจ่ายกำลังหรือต้นกำลังของเครื่อง

ในส่วนนี้ของเครื่องใช้หม้อแปลงเป็นต้นกำลังของเครื่อง ซึ่งออกแบบไว้เป็นแบบ 3- $\phi$  natural air cooling, core type interleaved Joint transformer ใช้แกนเหล็กชนิด Grain-Oriented Silicon steel ซึ่งออกแบบให้ขดลวดคิกตาไฟฟ้าเข้ามีเพิ่ม ๑๐ แท็บด้วยกัน แต่ละแท็บมีช่วงกว้าง line to line voltage ๑๐ โวลท์ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทต่อไป

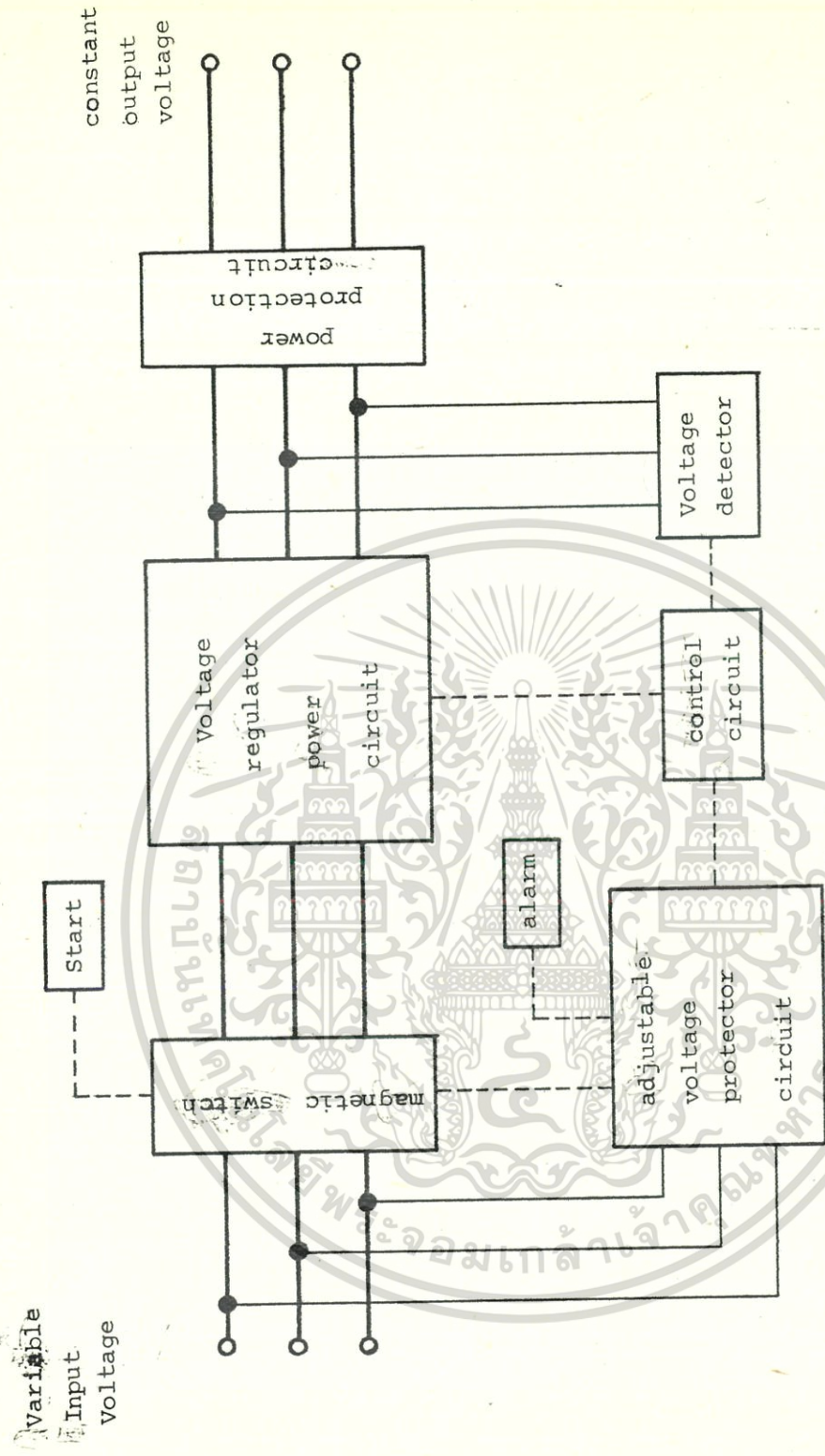
-ส่วน เปลี่ยนแปลงระดับคิกตาหรือส่วนตัดต่อการเปลี่ยนแท็บ

ในส่วนนี้ได้ออกแบบโดยใช้คอนแทกแม่เหล็กเป็นตัวตัดต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ดังกล่าวสามารถหาซื้อได้ง่ายในประเทศ และง่ายต่อการควบคุมมีความแน่นอนสูง ทั้งยังง่ายต่อการบำรุงรักษาและมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย ส่วนเบี่ยงเบนกระแสขณะตัดต่อใช้คาร์บอนแอคเตนส์หรือคาร์บอนแท่งเป็นอิมพีแดนส์เพื่อความต่อเนื่องของคิกตาไฟฟ้าขณะมีการเปลี่ยนแปลงแท็บ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

-ส่วนควบคุมหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนนี้ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนต่างๆตั้งแต่ส่วนตรวจสอบคิกตา ส่วนหน่วงเวลา ส่วนตรวจสอบความเปลี่ยนแปลง ส่วนสวิชที่จะควบคุมการให้มีการเปลี่ยนแปลงแท็บ ส่วนเปรียบเทียบคิกตา ส่วนเปลี่ยนคิกตากระแสสลับเป็นคิกตากระแสตรงเป็นต้น โดยรวมเอาส่วนต่างๆ เหล่านี้ประกอบเข้าด้วยกันเพื่อควบคุมระบบการทำงานทั้งหมด ซึ่งการปรับแต่งส่วนนี้มีความยุ่งยากพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากเวลาในการเริ่มต้นทำงานของส่วนทั้งหมดนี้กับส่วน Power มีความแตกต่างกันอยู่มาก ซึ่งจะได้อีกกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

ซึ่งเมื่อรวมทั้ง ๓ ส่วนเข้าด้วยกันแล้ว สามารถแสดงแผนผังการทำงานคร่าวๆ ของเครื่องได้ดังรูปที่ ๑.๑



รูปที่ ๑.๑ แสดงแผนผังการทำงานจากระบบทั้งหมดภายในเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ ๒

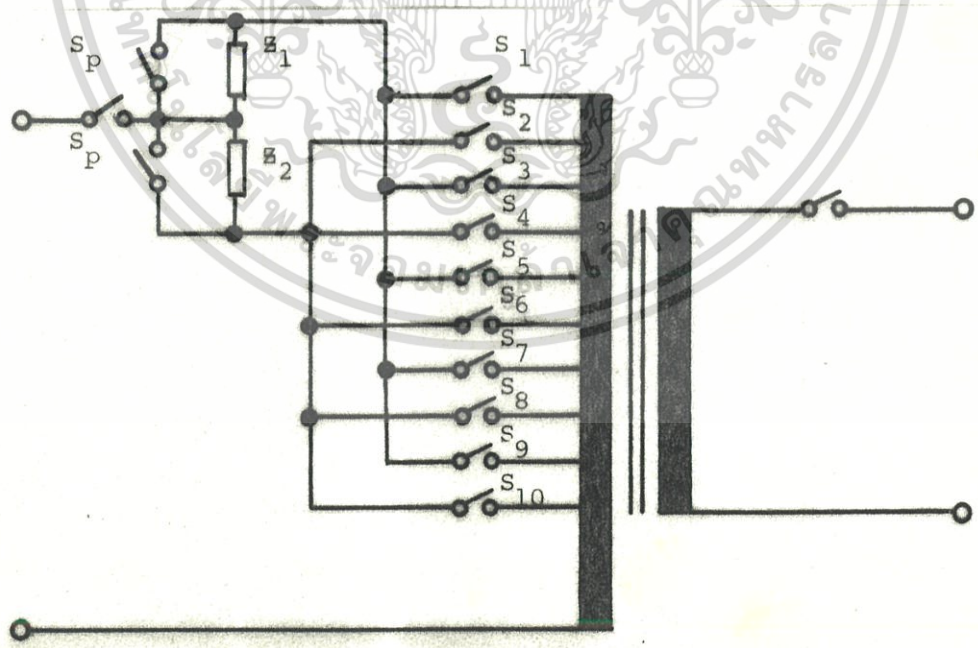
ส่วน Main Power Circuit

๒.๑ ความนำ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดส่วน Main Power Circuit ส่วนต้นกำลังของเครื่องที่สร้างขึ้น ซึ่งใช้หม้อแปลงแบบ 3-Ø natural air cooling core type interleaved Joint transformer ใช้แกนเหล็กชนิด Grain-Oriented Silicon steel ซึ่งออกแบบให้ขดลวดศีกดาไฟฟ้าเข้ามีขดลวดเพิ่ม ๑๐ แทป ขนาด ๔๐ KVA ๖๑Amp และส่วนสวิชในการตัดต่อเปลี่ยนแปลงศีกดา ซึ่งใช้คอนแทกแม่เหล็กซึ่งรวมทั้งวงจรเบี่ยงถ่ายกระแส โดยส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสนี้ได้ใช้ค่าความต้านทาน และคาร์แอคแทนส์ เป็นตัวเบี่ยงถ่ายกระแสขณะมีการเปลี่ยนแทปเพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง

๒.๒ หลักการทำงาน

การทำงานของส่วน Main Power Circuit สามารถอธิบายจากรูปที่ ๒.๑ ซึ่งเป็นส่วน Main Power Circuit ของเครื่องปรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (AVR)



รูปที่ ๒.๑ แสดง Main Power Circuit ของเครื่อง

จากรูปที่ ๒.๑ ซึ่งเป็น Main Power Circuit จะเห็นว่าประกอบด้วย ๓ ส่วนด้วยกัน คือ

๑. ส่วน Tap Change Transformer
๒. ส่วน Power Switching
๓. ส่วน เบี่ยงถ่ายกระแส

ซึ่งจะทำการแยกอธิบายออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

#### ๒.๒.๑ ส่วน Tap Change Transformer

จากรูปที่ ๒.๑ ในส่วนนี้จะเห็นว่ามีโครงสร้างหลักเป็นหม้อแปลงซึ่งได้ออกแบบไว้ให้ทางด้านปฐมภูมิมีขดลวดเพิ่มเติมขึ้น ๑๐ แทป ซึ่ง Tap Change Transformer นี้จะเป็นตัวเปลี่ยนแปลง อัตราส่วน จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิไป ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราส่วนของระดับศักดาปฐมภูมิเปลี่ยนไปด้วยตามความสัมพันธ์

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

โดย  $E_1 =$  ระดับศักดาทางด้านปฐมภูมิ

$E_2 =$  ระดับศักดาทางด้านทุติยภูมิ

$N_1 =$  จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

$N_2 =$  จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

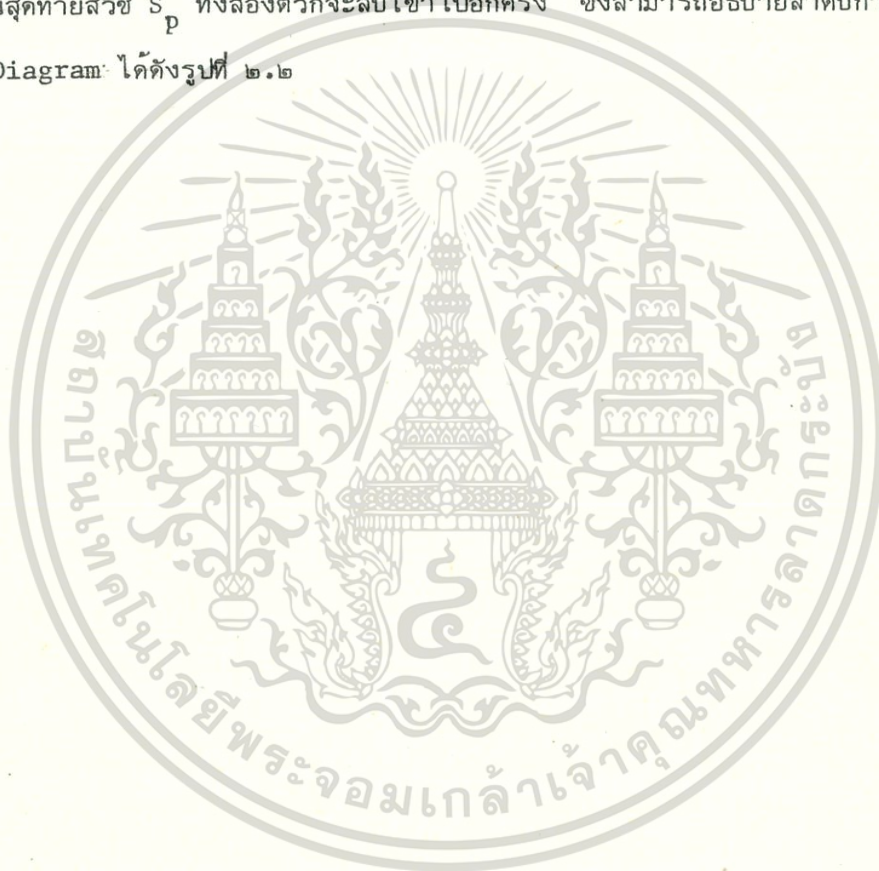
ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นค่าทางอุดมคติโดยคิดว่าไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นหรือหม้อแปลงมีประสิทธิภาพ ๑๐๐ เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางปฏิบัติอาจแตกต่างกันออกไปบ้างแต่ไม่มากนัก

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับศักดาทางด้านขาเข้าของหม้อแปลงขึ้น จะสามารถรักษาระดับศักดาทางขาออกให้คงที่ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งในการนี้ก็โดยอาศัยวงจรควบคุมทำการติดต่อเปลี่ยนจุดแทปของหม้อแปลง

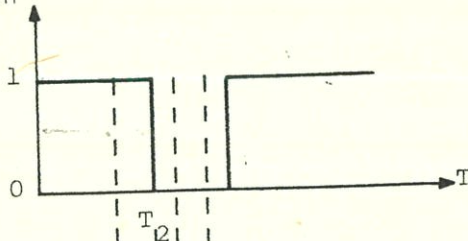
#### ๒.๒.๒ ส่วน Power Switching

ในส่วน Power Switching นี้โครงสร้างหลักที่ใช้เป็นคอนแทกแม่เหล็ก ซึ่งมีหน้าที่ในส่วนแรก ( $S_1-S_{10}$ ) ทำการติดต่อเปลี่ยนแทปของไฟที่จะจ่ายแก่หม้อแปลง โดยสวิชจะทำงานเมื่อมีไฟป้อน เข้าคอยล์ของตัวคอนแทกแม่เหล็ก และจะตัด เมื่อไม่มีไฟป้อน เข้าคอยล์ของตัวคอนแทก

แม่เหล็กตามทิศทางซึ่งในการตัดต่อเปลี่ยนแท็บนี้ก็จะอาศัยวงจรควบคุมทำการควบคุมไฟเลี้ยง เข้าคอยส์ของคอนแทกแม่เหล็กแต่ละตัว ในส่วนที่สองคือสวิช  $S_p$  จะทำหน้าที่ในการตัดต่อส่วน เบี่ยงถ่ายกระแสเพื่อกันการ short circuit ของแท็บ ซึ่งการทำงานของสวิชทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กันดังนี้ คือ เมื่อวงจรควบคุมตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของศักดา สวิชส่วนที่สองคือ สวิช  $S_p$  ทั้งสองตัวก็จะคายออก จากนั้นสวิชส่วนที่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแท็บจึงจะต่อคอนแทกแม่เหล็ก เข้าอีกตัวหนึ่งตามการเปลี่ยนแปลงไฟของศักดา ในช่วง เวลาต่อมาคอนแทกแม่เหล็กที่ต่อแท็บอยู่ตัว เดิมก็จะคายออก หลังจากนั้นสุดท้ายสวิช  $S_p$  ทั้งสองตัวก็จะสับเข้าไปอีกครั้ง ซึ่งสามารถอธิบายลำดับการทำงานได้จาก Timing Diagram ได้ดังรูปที่ ๒.๒



สัญญาณแสดงลอจิก



การทำงานของสวิช

สัญญาณแสดงลอจิก



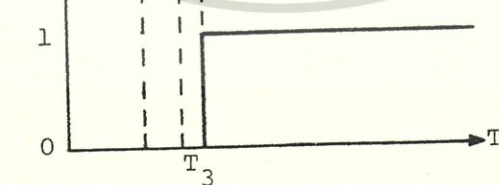
สัญญาณตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่ส่วนวงจรควบคุม

สัญญาณแสดงลอจิก



การทำงานของสวิช ติดต่อTapเดิมที่ทำงาน ขณะยังไม่เปลี่ยนแปลง

สัญญาณแสดงลอจิก



การทำงานของสวิช ติดต่อTapที่จะอยู่ในภาวะของสัปดาห์ที่เปลี่ยนแปลงใหม่

รูปที่ ๒.๒ แสดงถึง Timing Diagram ของวงจรสวิชติดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ๒.๒.๓ ส่วน เบี่ยงถ่ายกระแส

ส่วนนี้มีหน้าที่ในการป้องกันการลัดวงจรระหว่างแท็บในช่วงขณะของ เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงแท็บของหม้อแปลง ซึ่งในส่วนนี้อาจจะใช้ค่าความต้านทานหรือค่ารีแอกแตนซ์เป็นตัว เบี่ยงถ่ายกระแสแล้วแต่ความเหมาะสม ซึ่งค่าที่ใช้เท่ากับ ๒๐๐ เพอร์เซ็นต์ของกระแสสูงสุด เพื่อจำกัดค่าทาง mechanical shock ที่จะมีขึ้นในตัว เข้ากับแท็บที่เปลี่ยน และยังรักษาความต่อเนื่องของศักดาไฟฟ้า โดยคลื่นรูปขายนจะไม่ขาดตอนมีความราบเรียบ ทั้งนี้โดยคำนึงถึงลักษณะของศักดาไฟฟ้าตกคร่อมส่วน เบี่ยงถ่ายกระแสขณะทำงานให้อยู่ในระดับต่ำสุด เท่าที่จะทำได้

### ๒.๓ หลักการออกแบบ Main Power Circuit

หลักการออกแบบส่วนของ Main Power Circuit นี้ สามารถแยกการอธิบายออกเป็น หัวข้อๆ ตามส่วนประกอบต่างๆ ที่ต้องการใช้ดังนี้

#### ๒.๓.๑ ส่วน Tap change Transformer

การออกแบบในส่วนของ Tap change Transformer นี้มีหลักการคล้ายกับการออกแบบหม้อแปลงทั่วไป แต่ต่างกันตรงที่จะต้องมีขลวด เพิ่ม เต็มออกมาหลายแท็บ ซึ่งขลวดเพิ่ม เต็มนี้ จะมีจำนวนแท็บเล็กน้อย เพียงใดก็ได้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การใช้งานและการออกแบบวงจรควบคุมด้วย ในเครื่องต้นแบบมีแนวความคิดในการขยายให้สามารถปรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของระดับศักดาไฟฟ้าอยู่ในช่วงกว้างคือ  $+๑๐$  ถึง  $-๒๐$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดจาก line to line Voltage ก็จะได้ช่วงกว้างการทำงานจะต้องอยู่ระหว่าง ๓๒๐ - ๔๒๐ โวลท์ โดยมีความแตกต่างกันจากค่าสูงสุดถึงค่าต่ำสุดของ ช่วงกว้างในการทำงานมีค่าประมาณ ๑๐๐ โวลท์ การออกแบบจึงเลือกให้หม้อแปลงมีขลวดเพิ่ม ๑๐ - แท็บด้วยกันทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งก็จะได้ว่าแต่ละแท็บจะต้องมีค่า line to line voltage ๑๐ โวลท์ และเมื่อคิดความคลาดเคลื่อนของระดับศักดาไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นมีค่าประมาณ  $\pm ๑.๕$  เปอร์เซ็นต์ โดย ศักดาไฟฟ้าเมื่อภาวะปกติจะมีค่าเป็น ๓๘๐ โวลท์ เลือกอยู่ที่แท็บ ๗ ซึ่งตรงกับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนคงที่ที่ ๑.๒ เทสลา ขนาดพิกัดของหม้อแปลงได้กำหนดไว้ให้มีขนาด 40 KVA 61 Amp

3. เฟส

๒.๓.๑.๑ การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด

การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลงนั้นได้อาศัยจากลักษณะหม้อแปลงต้องมีขดลวดเพิ่มเติม ๑๐ แท็บ ซึ่งแต่ละแท็บต้องมีศักดาทางไฟฟ้าเท่ากับ ๖ โวลต์ต่อเฟส ดังนั้นถ้ากำหนดแต่ละแท็บให้มีจำนวนขดลวดเท่ากับ ๓ รอบ

$$\therefore \text{จะได้ } \frac{\text{ศักดาไฟฟ้า}}{\text{จำนวนรอบ}} = \frac{๖}{๓} = ๒ \text{ โวลต์/รอบ}$$

ดังนั้นจะได้ว่าแท็บแรกของหม้อแปลงซึ่งมีศักดาไฟฟ้าทางเข้าต่อเฟสอยู่ที่ ๑๕๐ โวลต์ ซึ่งก็จะเท่ากับ ๕๐ รอบ และแท็บต่อไปก็จะเพิ่มขึ้นแท็บละ ๓ รอบ

๒.๓.๑.๒ การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็ก

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $V_{rms}$  กับค่า  $B_{max}$  เท่ากับ

$$V_{rms} = 4.44 B_{max} fNA$$

โดย  $V_{rms}$  = ค่าศักดาของทางไฟฟ้าขาเข้า  
 $B_{max}$  = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรมแม่เหล็ก  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก  
 $N$  = จำนวนรอบของขดลวด  
 $f$  = ความถี่ของไฟฟ้าใช้

แทนค่า  $V_{rms}$  ด้วย ๒๒๐V และค่าจำนวนรอบที่ได้จากหัวข้อ ๒.๓.๑.๑ ที่แท็บ ๗

ซึ่งจะได้ค่า = ๕๐ + (๓ x ๗) = ๑๑๑ รอบ กำหนดให้ค่า  $B = ๑.๒$  เทสลา ตามคุณสมบัติ

ของเหล็กที่ใช้ที่ความถี่ (f) ๕๐ Hz จะได้ค่าขนาดของพื้นที่หน้าตัดวงจรมแม่เหล็ก

$$A = \frac{๒๒๐}{๔.๔๔ \times ๑.๒ \times ๑๑๑ \times ๕๐} \text{ ตร. เมตร}$$

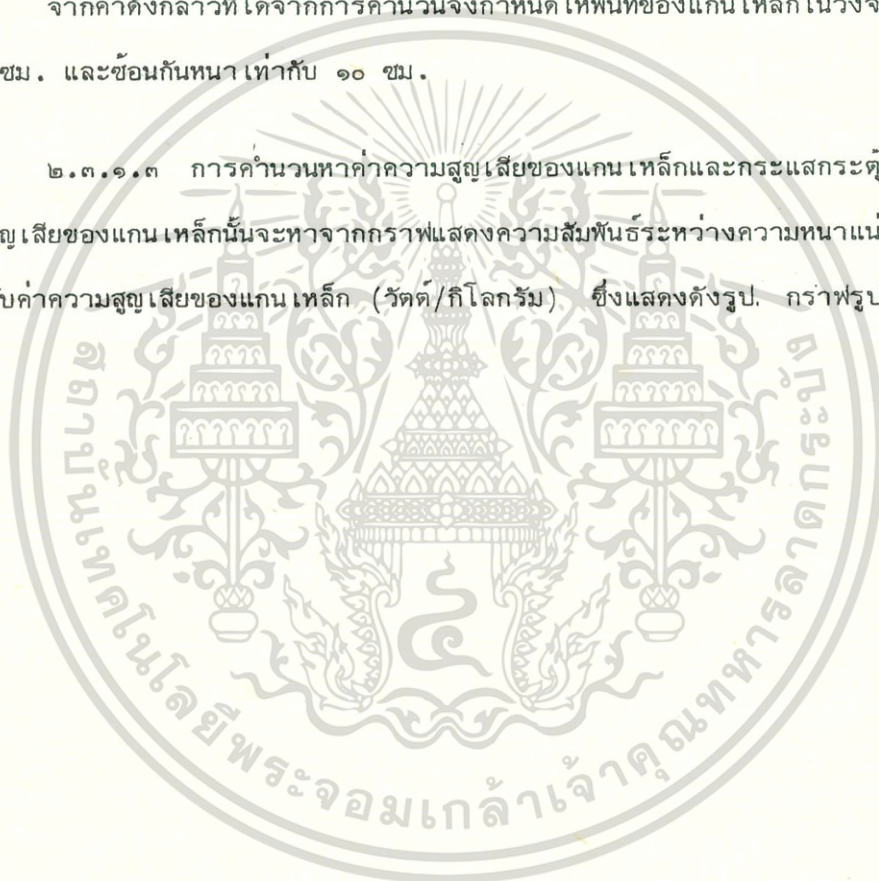
$$= ๐.๐๐๗๔ \text{ ตร. เมตร}$$

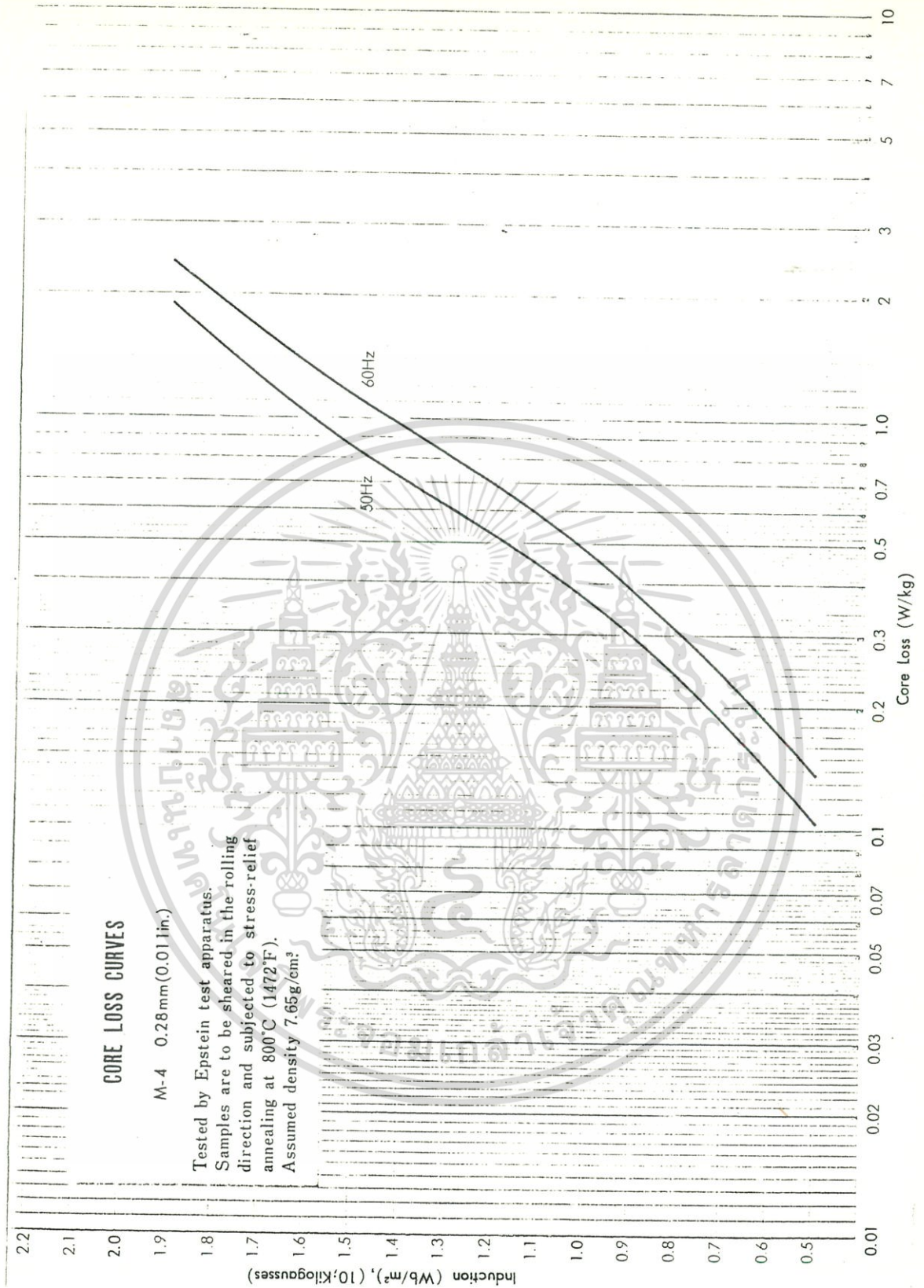
ซึ่งค่า A ที่ได้นี้เป็นค่าที่ยังไม่สมบูรณ์ทั้งนี้เนื่องจากแกนเหล็กในวงจรมแม่เหล็กนั้นเป็นเหล็กแผ่นบางๆซึ่งนำมาซ้อนกัน ดังนั้นจึงต้องมีค่า Staggering factor เป็นตัวกำหนด Area ซึ่ง Staggering factor ตามเครื่องต้นแบบกำหนดให้ ๐.๘

$$\begin{aligned} \therefore \text{Area ที่แท้จริงของแกนเหล็กในวงจร} &= ๐.๐๗๕ \times ๑.๑ \text{ ตร.เมตร} \\ &= ๐.๐๘๒๖ \text{ ตร.เมตร} \end{aligned}$$

จากค่าดังกล่าวที่ได้จากการคำนวณจึงกำหนดให้พื้นที่ของแกนเหล็กในวงจรมีขนาดเท่ากับ ๑๐๐ ตร.ซม. และซ้อนกันหนาเท่ากับ ๑๐ ซม.

๒.๓.๑.๓ การคำนวณหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กและกระแสกระตุ้นการคำนวณค่าความสูญเสียของแกนเหล็กนั้นจะหาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (วัตต์/กิโลกรัม) ซึ่งแสดงดังรูป. กราฟรูปที่ ๒.๓



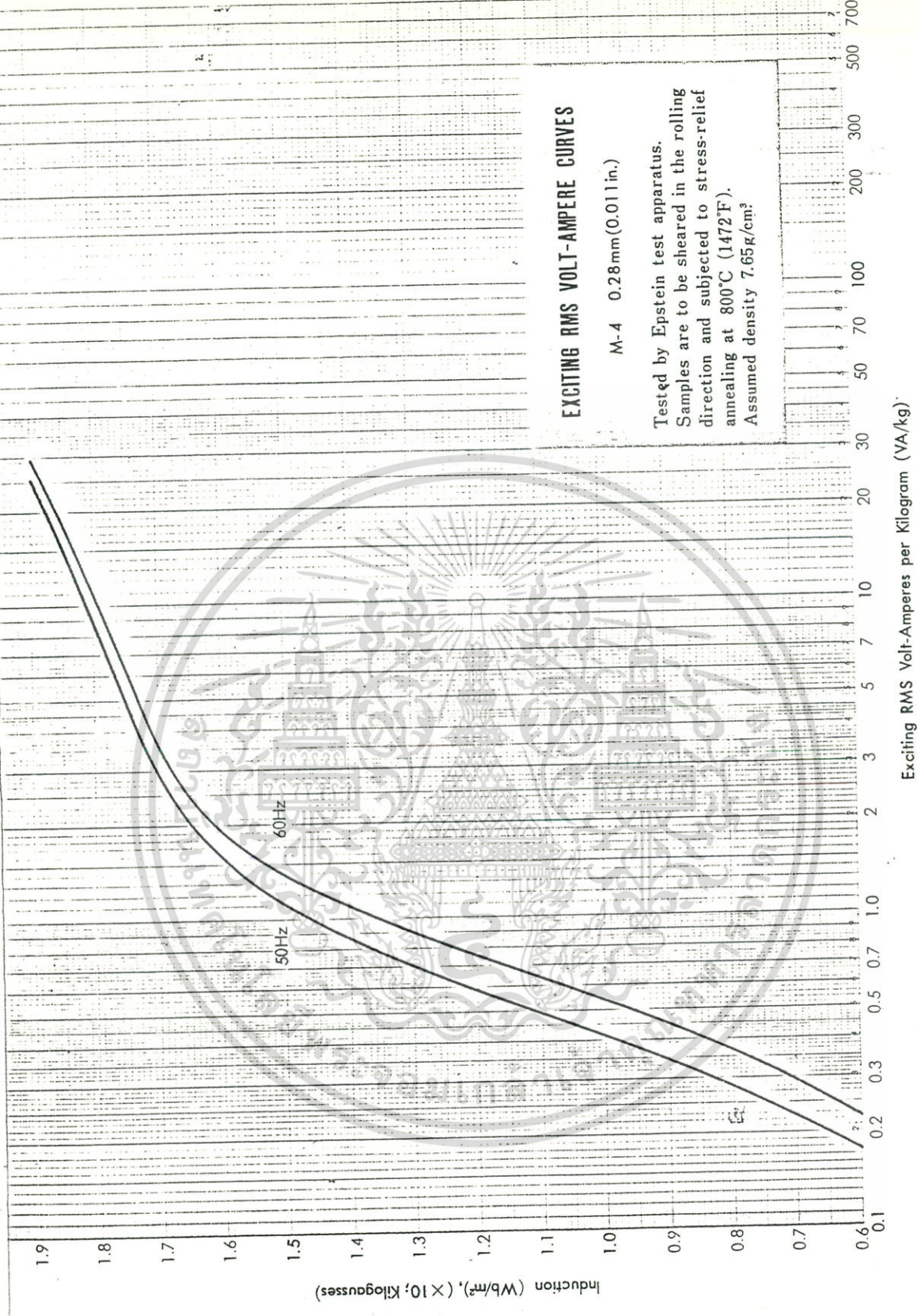


รูปที่ ๒.๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียของแกน เหล็ก กับความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็กในแกน เหล็ก

ซึ่งจากรูปที่ ๒.๓ จะเห็นได้ว่าที่  $50 \text{ H}_2$  ที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กเท่ากับ ๑.๒ นั้น จะมีค่าของความสูญเสียในแกนเหล็ก ๐.๕ โวลท์-แอมป์/กิโลกรัม ซึ่งเหล็กที่ใช้มีน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ ๑๓๐ กิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นจะได้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมด} &= ๑๓๐ \times ๐.๕ \quad \text{วัตต์} \\ &= ๖๕ \quad \text{วัตต์} \end{aligned}$$





รูปที่ ๒.๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Core loss กับ  
 Exciting RMS Volt-Amperes per Kilogram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป ที่ ๒.๔ จะเห็นว่าที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ๑.๒ เทสล่านั้นจะได้ค่า exciting RMS เท่ากับประมาณ ๐.๖ โวลต์-แอมป์/กิโลกรัม ดังนั้นในขณะไรโรลด์ที่ป้อนศักดาไฟฟ้าทางเข้าเท่ากับ ๒๒๐ โวลต์นั้นจะสามารถหาค่าของกระแสขณะไรโรลด์ดังนี้คือ

$$\text{นน.แกนเหล็กที่ใช้ทั้งหมด} = ๑๓๐ \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{ค่า Exciting RMS} = ๐.๖ \text{ โวลต์-แอมป์/กิโลกรัม}$$

$$\therefore \text{ค่า Exciting RMS ทั้งหมดของหม้อแปลง} = ๐.๖ \times ๑๓๐ \text{ โวลต์-แอมป์}$$

$$\text{ค่า Exciting โวลต์เตจทำการทดสอบที่} = ๒๒๐ \text{ โวลต์/เฟส}$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่ากระแสกระตุ้นได้

$$= \frac{๐.๖ \times ๑๓๐}{๒๒๐} \text{ แอมป์}$$

$$= ๐.๑๓ \text{ แอมป์}$$

ซึ่งจากการวัดขณะทำการทดสอบวัดค่ากระแสขณะไรโรลด์ได้ค่าเฉลี่ยประมาณ ๑แอมป์ที่มีศักดาไฟฟ้าของเฟสเท่ากับ ๒๒๐ โวลต์ ซึ่งขนาดค่าความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากรอยจุดเชื่อมต่อของแกนเหล็กซึ่งเป็นสภาพปกติทั่วไป ในการออกแบบใช้งานจริง

### ๒.๓.๒ ส่วน Power Switching

ในส่วนของ Power Switching นี้สามารถใช้ทั้ง Triac, Power Transistor และคอนแทคแม่เหล็ก แต่ในเครื่องต้นแบบเลือกใช้คอนแทคแม่เหล็กเพราะการควบคุมสามารถทำได้ง่าย ชิ้นส่วนอุปกรณ์สามารถทำการซ่อมแซมเปลี่ยนเมื่อเกิดความเสียหายและหาได้ง่าย การออกแบบในส่วนนี้จึงเป็นเพียงการเลือกขนาดของคอนแทคแม่เหล็กให้ถูกต้อง ซึ่งขนาดพิกัดของเครื่อง ๔๐ KVA ๖๑ Amp จึงได้เลือกใช้คอนแทคแม่เหล็กซึ่งสามารถทนกระแสต่อเนื่องได้ ๖๓ Amp จึงได้เลือกใช้คอนแทคแม่เหล็ก Model D๖๓ ตามตารางคุณสมบัติทั่วไปของคอนแทคแม่เหล็กซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ผ๑


### ๒.๓.๓ ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแส

ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสนี้สามารถใช้ทั้งค่าความต้านทานหรือค่ารีแอกแตนซ์เป็นตัวช่วยในการเบี่ยงถ่ายกระแส ซึ่งการเลือกใช้ทั้ง ๒ ชนิดนี้มีข้อแตกต่างกันอยู่บ้างแล้วแต่เหมาะสมกับงาน และการคำนวณออกแบบก็มีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะอธิบายแยกออกเป็น ๒ หัวข้อด้วยกัน คือ

๑. ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสที่เป็นค่ารีแอกแตนซ์
๒. ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสที่เป็นค่าความต้านทาน

#### ๒.๓.๓.๑ ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสที่เป็นค่ารีแอกแตนซ์

การคำนวณในส่วนนี้ได้อาศัยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กโดย



$E$	=	$4.44 fNBA$
โดย $E$	=	ศักดาไฟฟ้าที่คร่อมขดลวด (โวลต์)
$N$	=	จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
$f$	=	ความถี่ของไฟที่ใช้ (Hz )
$B$	=	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เทสลา)
$A$	=	พท. หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตร. เมตร)

จากรูปที่ ๒.๑ จะเห็นได้ว่าขณะที่ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสทำงานนั้นจะมีค่าประมาณ ๖ โวลต์ต่อเฟส คร่อมที่ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแส ๒ ตัว ดังนั้นตัวเบี่ยงถ่ายกระแสแต่ละตัวจะมีศักดาไฟฟ้าคร่อมอยู่เท่ากับ ๓ โวลต์ กำหนดให้ค่า  $B$  เท่ากับ ๑ เทสลา ดังนั้นเราจะได้

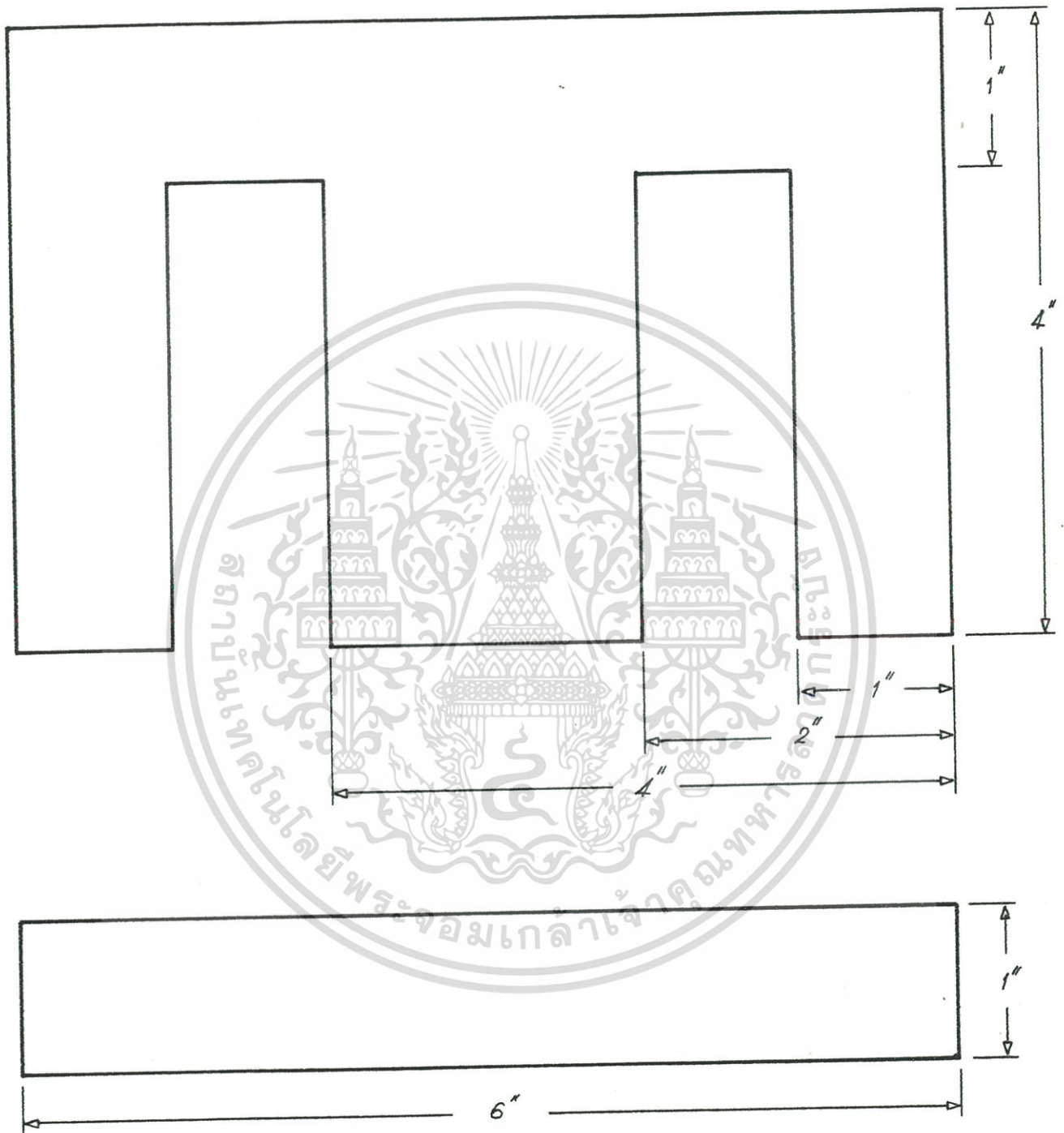
$$NA = \frac{3}{4.44 \times 60 \times 1}$$

$$= 0.0114 \quad \text{รอบ-ตร. เมตร}$$

ซึ่งจากค่าที่ได้นำมาพิจารณาแกนเหล็กรูปฮือไอที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด โดยพิจารณาจากช่องว่างที่จะสามารถพันขดลวดจำนวนรอบที่สัมพันธ์ขนาดของแกนเหล็ก ตัวอย่างการพิจารณาในเครื่องต้นแบบที่ออกแบบไว้สำหรับเครื่องปรับแรงดันเฟสเดียวขนาด ๓๓KVA ๑๕๐Amp ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเบี่ยงถ่ายขณะเต็มพิกัดแล้ว ประมาณว่าจะต้องใช้ลวดขนาด ๓๐ mm<sup>2</sup> ซึ่งเผื่อไว้ประมาณ ๒๐๐ เปอร์เซ็นต์ ขนาดลวดที่มีอยู่เป็นลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด ๓ x ๑๐ mm<sup>2</sup> และพิจารณาจากแกนเหล็กฮือไอ ซึ่งมีรูปร่างดังรูปที่ ๒.๕



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.๕ แสดงรูปร่างลักษณะแกนหลักที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ๒.๕ จะเห็นว่า Window ในการที่จะพันขดลวดจะมีขนาด ๑" x ๓" ซึ่งหักพื้นที่ที่จะต้องเสียไปสำหรับตัวบ๊อบบิน ฝัาฉนวนที่ใช้พันระหว่างชั้น และช่องว่างนอกสุดของขดลวดกับแกนไป ๖๐ เปอร์เซ็นต์ จะเลือกพื้นที่ในการพันลวดประมาณ ๑.๒ ตร.นิ้วซึ่งเท่ากับ ๗.๗ ตร.ซม. เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่าพื้นที่ที่เหลือสามารถพันขดลวดลงตามจำนวนที่สัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กได้

ซึ่งเมื่อแทนค่าขนาดของแกนเหล็กด้วยขนาดดังรูปคือ ๒" x ๒" แล้วจะได้จำนวนรอบของขดลวดที่จะต้องพันดังนี้

$$N = \frac{0.0175}{4 \times 2.54 \times 2.54 \times 10^{-4}}$$

$$= 5.23 \text{ รอบ}$$

เลือกใช้จำนวนรอบ = ๖ รอบ

#### ๒.๓.๓.๒ ส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสที่เป็นค่าความต้านทาน

ในการออกแบบส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสที่เป็นค่าความต้านทานนี้ ใช้ลักษณะการพิจารณาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวความต้านทาน โดยคิดค่าของกระแสสูงสุดที่จะผ่านตัวความต้านทานเป็น ๒๐๐ เปอร์เซ็นต์ของกระแสที่พิกัด ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานที่ใช้ในเครื่องต้นแบบซึ่งใช้กับเครื่องต้นแบบ ๓ เฟส ๔๐ KVA กระแสพิกัด ๖๑ แอมป์

$$\text{กระแสที่พิกัด} = 61 \text{ แอมป์}$$

$$\text{คิดค่ากระแสที่พิกัดเป็น } 200 \text{ เปอร์เซ็นต์} = 122 \text{ แอมป์}$$

$$\text{ศักดาที่คร่อมในตัวความต้านทาน } 2 \text{ ตัว} = 6 \text{ โวลท์}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทานที่ใช้} = \frac{6}{122} \text{ โอห์ม}$$

$$= 0.05 \text{ โอห์ม}$$

เมื่อคิดว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการนำการพาและการแผ่รังสีแล้วส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสนี้จะทำงานตั้งแต่เริ่มถึง เสร็จสิ้นจะไม่เกิน ๒ วินาที จะได้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น

ที่ตัวความต้านทาน เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น} &= i^2 R t \\ &= 122 \times 122 \times 0.04 \times 2 \\ &= 1488 \quad \text{จูล} \end{aligned}$$

ซึ่งปริมาณความร้อนดังกล่าวจะเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ที่จะทำให้ส่วน เบี่ยงถ่ายกระแส มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าปกติ

ซึ่งสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\Delta q = mc (t_2 - t_1)$$

โดย  $\Delta q =$  ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น

$m =$  มวลของสาร

$c =$  ความร้อนจำเพาะของสาร

$t_1 =$  อุณหภูมิขณะ เริ่มต้น เมื่อยังไม่มีการ เปลี่ยนแปลงความร้อน

$t_2 =$  อุณหภูมิภายหลัง เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงความร้อน

สารที่ใช้ตัวความต้านทานใช้ลวดนิโครม เมอร์ ๑๕SWG ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัด เท่ากับ

๒.๖๗ ตร.มม. และยาว ๕๐ ซม. ดังนั้นสามารถหามวลของลวดนิโครม เท่ากับ

$$m = pv$$

ซึ่งจากตารางภาคผนวกที่ ๒ ได้ค่า  $p$  ของนิโครม (๑๘Ni, ๑๕ Cr ) เท่ากับ

๕๓๒ lb/ft<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} m &= 572 \times 2.67 \times 10^{-2} \times 1.76 \times 10^{-3} \times 50 \times 3.29 \times 10^{-2} \\ &= 2.51 \times 10^{-2} \text{ ปอนด์} \end{aligned}$$

และจากรายภาคผนวกที่ ผ.๒ ได้ค่า c ของค่านิโครมเท่ากับ ๐.๑๑ บีทียู/ปอนด์-องศาฟาเรนไฮต์

∴ จะได้

$$1444 \times 4.44 \times 10^{-4} = 2051 \times 10^{-2} \times 0.11 \times (t_2 - t_1)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{1444 \times 4.44 \times 10^{-4}}{2.51 \times 10^{-2} \times 0.11}$$

$$= 510 \text{ องศาฟาเรนไฮต์}$$

$$= 283 \text{ องศาเซนติเกรด}$$

ซึ่ง  $t_1$  เป็นอุณหภูมิขณะเริ่มต้นซึ่งเท่ากับ ๘๖ องศาฟาเรนไฮต์

$$\therefore t_2 = 510 + 86 \text{ องศาฟาเรนไฮต์}$$

$$= 596 \text{ องศาฟาเรนไฮต์}$$

$$= 320 \text{ องศาเซนติเกรด}$$

ค่าที่คำนวณได้นี้ เป็นอุณหภูมิที่ยังไม่มีการคายความร้อน ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิที่สูงสุดที่จะเป็นไปได้ จากค่าอุณหภูมิดังกล่าวนี้สามารถคำนวณหาเวลาที่ตัวความต้านทานนี้จะหนึ่ได้โดยสามารถคำนวณได้จากค่าความสัมพันธ์ดังนี้

$$t = \frac{3.03 \times 10^{10} \times A^2 \log_{10} \left( \frac{234.5 + \theta}{234.5 + \theta_0} \right)}{I^2}$$

โดย  $t$  = เวลาที่ตัวความต้านทานจะหนึ่ได้ (วินาที)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของลวด (ตร.ฟุต)

$I$  = กระแสที่ไหลผ่าน (แอมป์)

$\theta$  = อุณหภูมิของลวดในเวลาที่ลวดจะหนึ่ได้ (องศาเซนติเกรด)

$\theta_0$  = อุณหภูมิขณะ เริ่มต้น (องศาเซนติเกรด)

ซึ่งแทนค่าแล้วจะได้

$$t = 3.03 \times 10^{90} \times \left( \frac{2.67 \times 10^{-2} \times 0.955}{922} \right)^2 \log_{10} \left( \frac{234.5 + 393}{234.5 + 30} \right)$$

$$= 75 \quad \text{วินาที}$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่าอุณหภูมิดังกล่าว เป็นอุณหภูมิที่ลวดสามารถทนได้นานถึง 75 วินาทีแสดงว่าลวดนิโครมที่ใช้ยังสามารถรักษาคุณสมบัติทางสถานะของสารไว้ได้

ลักษณะดังกล่าวในขณะที่เปลี่ยน Tap เครื่องจะสามารถทำการเปลี่ยน Tap ได้ตามความต้องการในจำนวนความถี่ที่ต้องการใช้ ลักษณะที่ต้องพิจารณาประกอบอีกประการหนึ่งได้แก่การขยายตัวและหดตัวตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อประกอบการออกแบบติดตั้ง

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงด้านมิติทางด้านยาวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \Delta l &= \alpha l \Delta T \\ \text{โดย} \quad \Delta l &= \text{ความยาวที่เพิ่มขึ้นจากเดิม} \\ \alpha &= \text{สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น} \\ l &= \text{ความยาวเดิม} \\ \Delta T &= \text{อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป} \\ \therefore \text{จะได้} \quad \Delta l &= 11 \times 10^{-6} \times 50 \times 243 \\ &= 0.14 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

จากค่าที่ได้จะเห็นว่าความยาวลวดเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ซึ่งไม่น่าจะมีผลในการติดตั้ง

เมื่อพิจารณาส่วนเพียงถ่ายกระแสที่ใช้ทั้ง ๒ ชนิดจะเห็นว่ามิชข้อได้เปรียบ เสียเปรียบกัน

ดังนี้คือ

๑. ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของการใช้ค่าความต้านทานเป็นส่วนเพียงถ่ายกระแส

-ข้อได้เปรียบของการใช้ค่าความต้านทานเป็นส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสคือ มีน้ำหนักเบาขนาดกระทัดรัด ง่ายในท้องตลาดซึ่งเป็นของสำเร็จรูปอยู่แล้วจึงง่ายต่อการประกอบ

-ข้อเสียเปรียบของการใช้ค่าความต้านทานเป็นส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสคือ ที่ขนาดของพิกัดของเครื่องที่สูงมากๆ ซึ่งต้องใช้ขนาดของตัวความต้านทานที่ใหญ่ขึ้นนั้นหาได้ยาก และค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าจะสูงกว่า เพราะจะมีส่วนสูญเสียเป็น  $I^2R$  ซึ่งเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

## ๒. ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของการใช้คาร์แอคแทนซ์เป็นส่วนเบี่ยงถ่ายกระแส

-ข้อได้เปรียบของการใช้คาร์แอคแทนซ์เป็นส่วนเบี่ยงถ่ายกระแส คือ มีค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำกว่าชนิดใช้ค่าความต้านทาน ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานที่ได้จะถูกสะสมไว้ในสนามแม่เหล็กซึ่งจะมีส่วนสูญเสียไปเล็กน้อยในแกนเหล็ก และขดลวดที่ใช้พันเท่านั้น และคาร์แอคแทนซ์สามารถขยายขนาดได้ง่าย ทำให้สามารถขยายพิกัดของเครื่องไปตามต้องการ

-ข้อเสียเปรียบของการใช้คาร์แอคแทนซ์เป็นส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสคือ มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ซึ่งทำให้น้ำหนักของเครื่องเพิ่มขึ้น และยังต้องมีขั้นตอนในการผลิตเพิ่มเติม

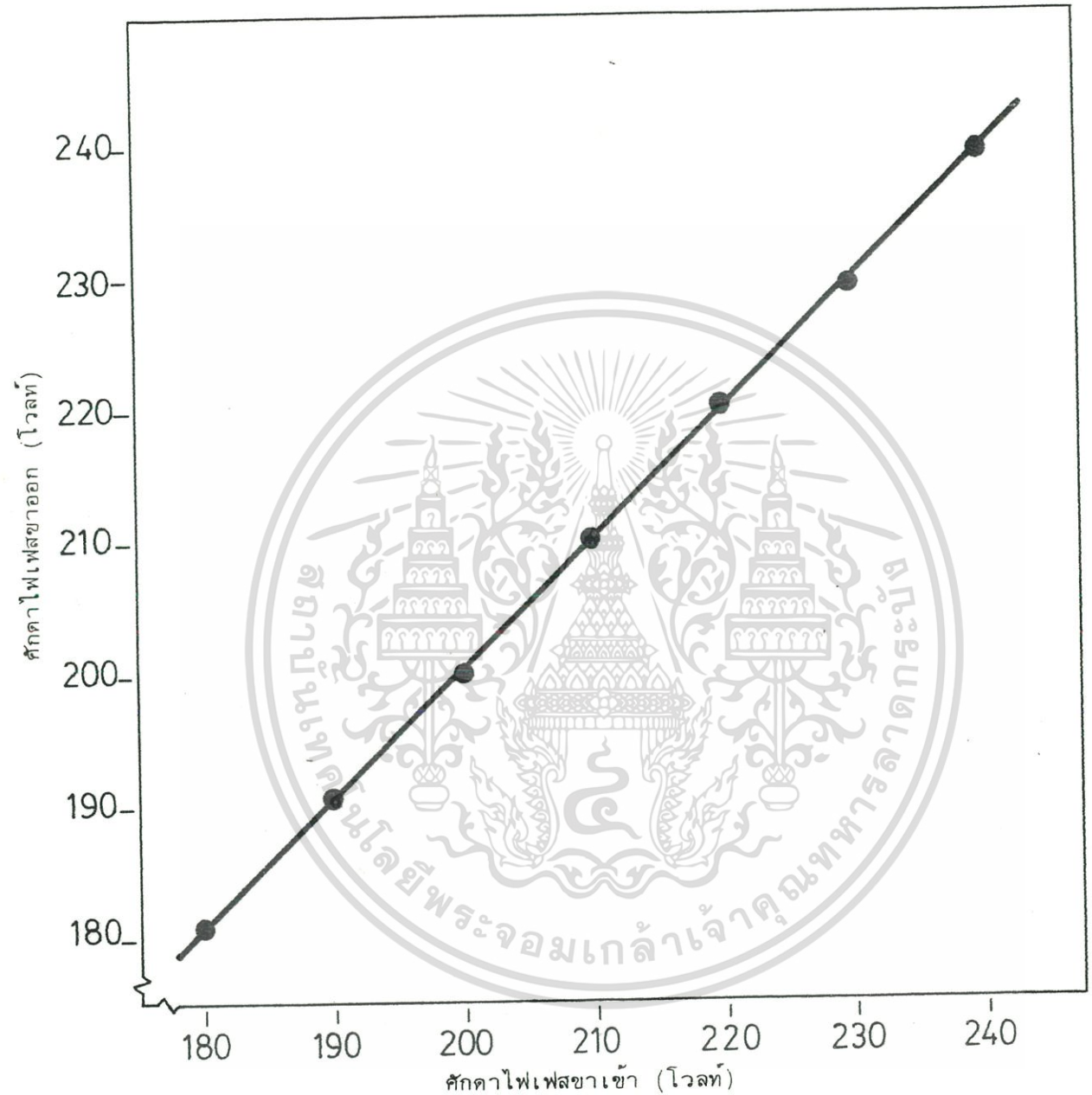
### ๒.๔ การทดสอบ

#### การทดสอบหาคุณสมบัติของหม้อแปลง

- การทดสอบหม้อแปลงขณะ เปลี่ยนแท็ป
- การทดสอบส่วนเบี่ยงถ่ายกระแส
- การทดสอบส่วนป้องกันระบบ

#### ๒.๔.๑ การทดสอบหม้อแปลง

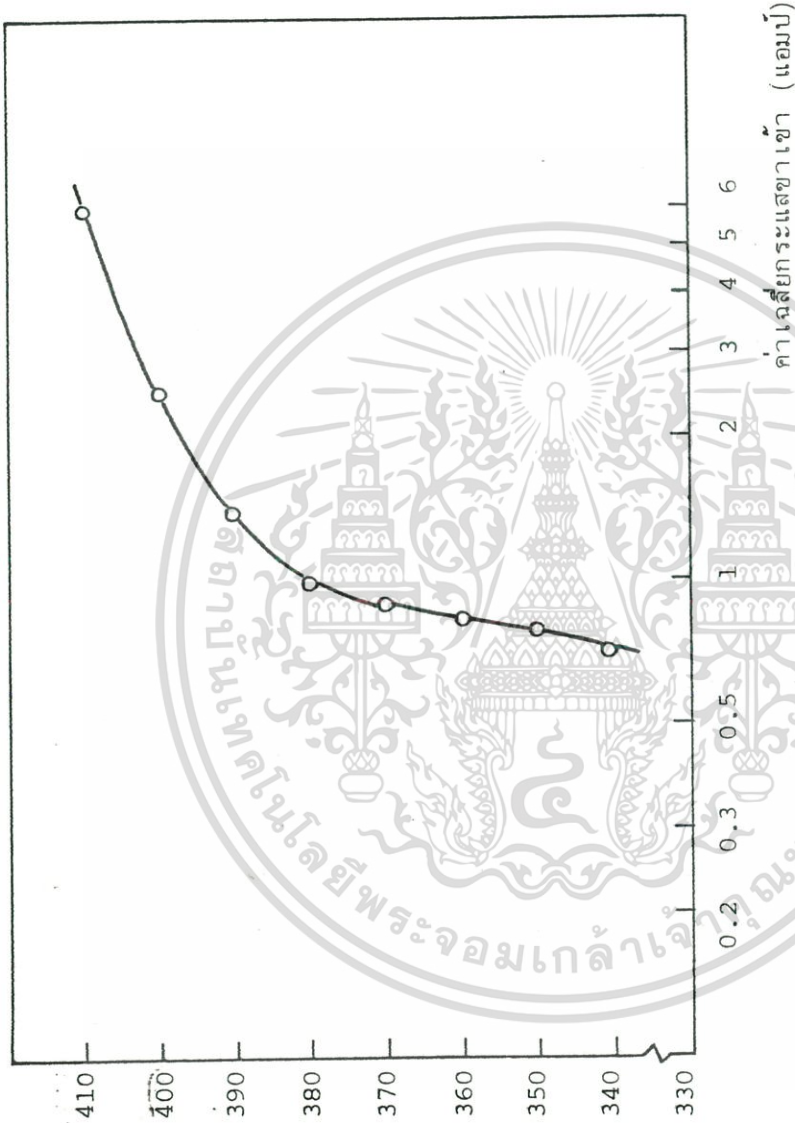
ได้ทำการทดสอบหม้อแปลงขณะไร้อโหลดโดยศึกษาไฟฟ้าขาเข้าของหม้อแปลงให้เข้าที่แท็ป ๗ แล้วปรับศักดาไฟฟ้าขาเข้าไป จากนั้นวัดค่ากระแสขาเข้า และศักดาขาออก ซึ่งได้คุณสมบัติของหม้อแปลงเครื่องต้นแบบ ดังรูปที่ ๒.๖ และ ๒.๗



รูปที่ ๒.๖ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่าง

ศักดาขา เข้ากับศักดาขาออกขณะไร้อโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.๗ แสดงคุณสมบัติของหมแปลระหว่างศีกดา  
 ขาเข้ากับกระขาเข้าขณะไรโรลต

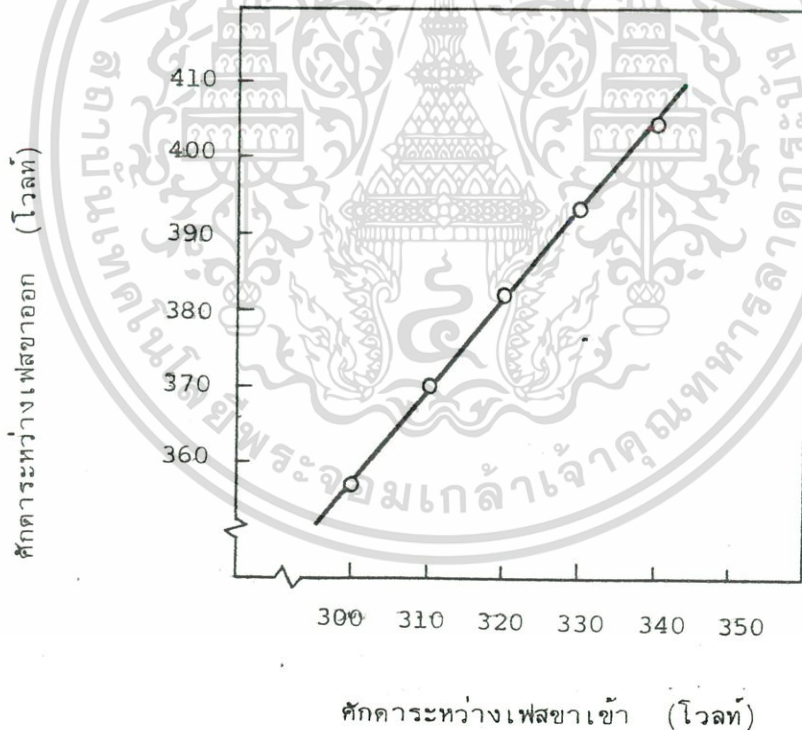
(เลข) เลขเลขทางนระเขน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการทดสอบคุณสมบัตินี้สามารถทำได้เฉพาะขณะไร้โหลด แต่ไม่สามารถทำการทดสอบคุณสมบัติขณะลัดวงจร เพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดได้ ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถหาตัวปรับศักดาที่สามารถจ่ายกระแสสูงกว่า ๑๕ แอมป์ได้

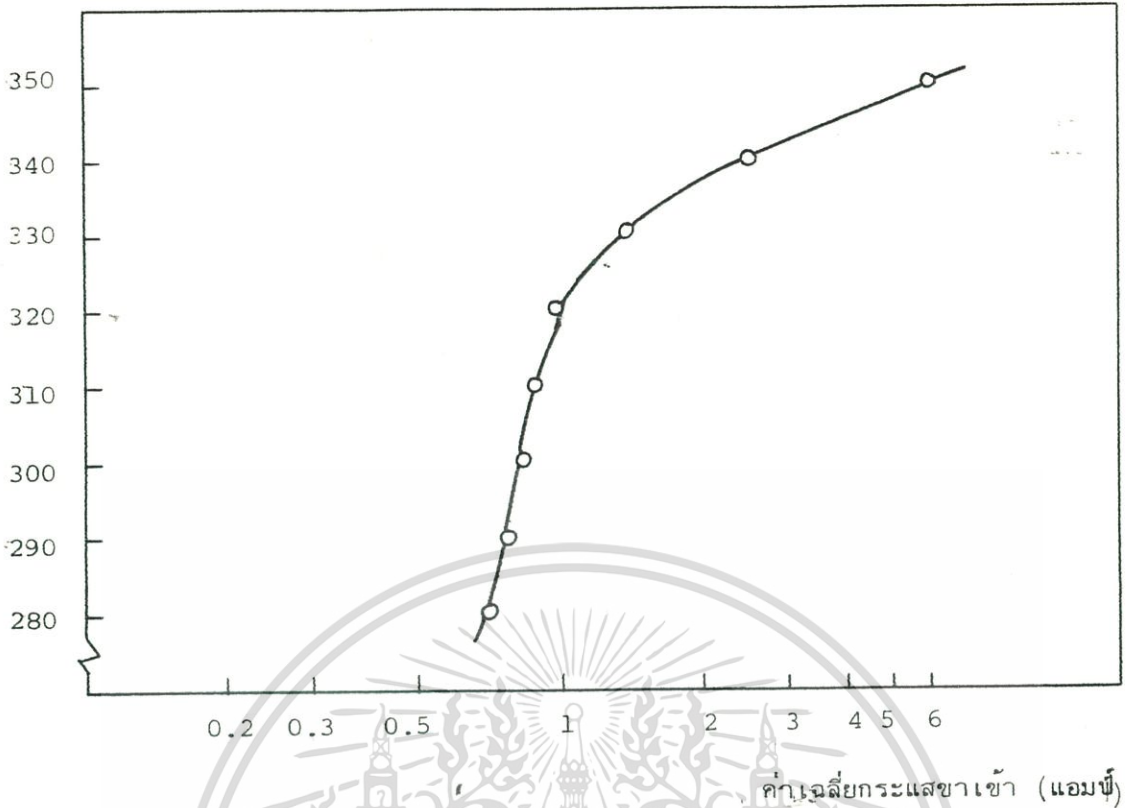
#### ๒.๔.๒ การทดสอบห่อแปลงขณะเปลี่ยนแท็บ

การทดสอบห่อแปลงขณะเปลี่ยนแท็บนั้นได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงโดยเปลี่ยนแท็บไฟเข้าของหม้อแปลงไฟ ทำการทดสอบที่แท็บต่างๆ โดยแต่ละแท็บทำการทดสอบขณะไร้โหลด การทดสอบทำการทดสอบเหมือนในหัวข้อ ๒.๔.๑ ซึ่งได้คุณสมบัติของหม้อแปลงที่แท็บต่างๆ ดังรูปข้างล่าง



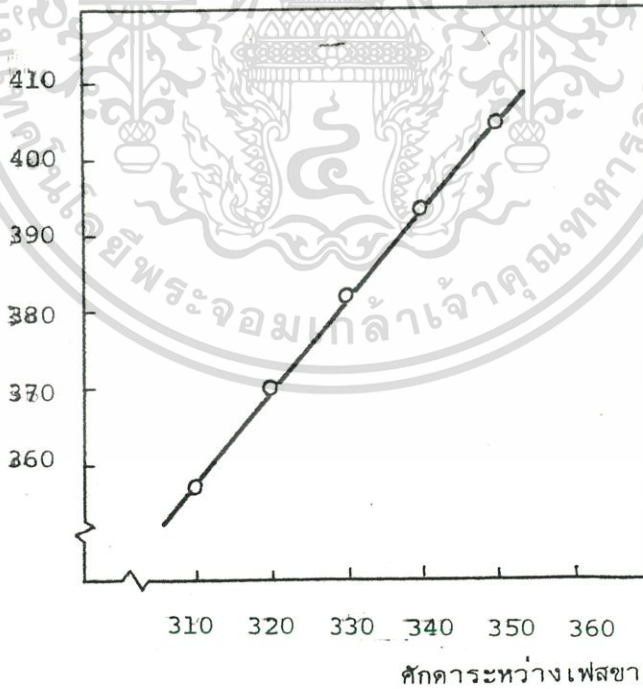
รูปที่ ๒.๔ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างคิกตาดขาเข้ากับ  
คิกตาดขาออกขณะไร้โหลดที่แท็บ ๑ ของหม้อแปลง

ศักดา ระหว่างเฟสขาเข้า (โวลต์)



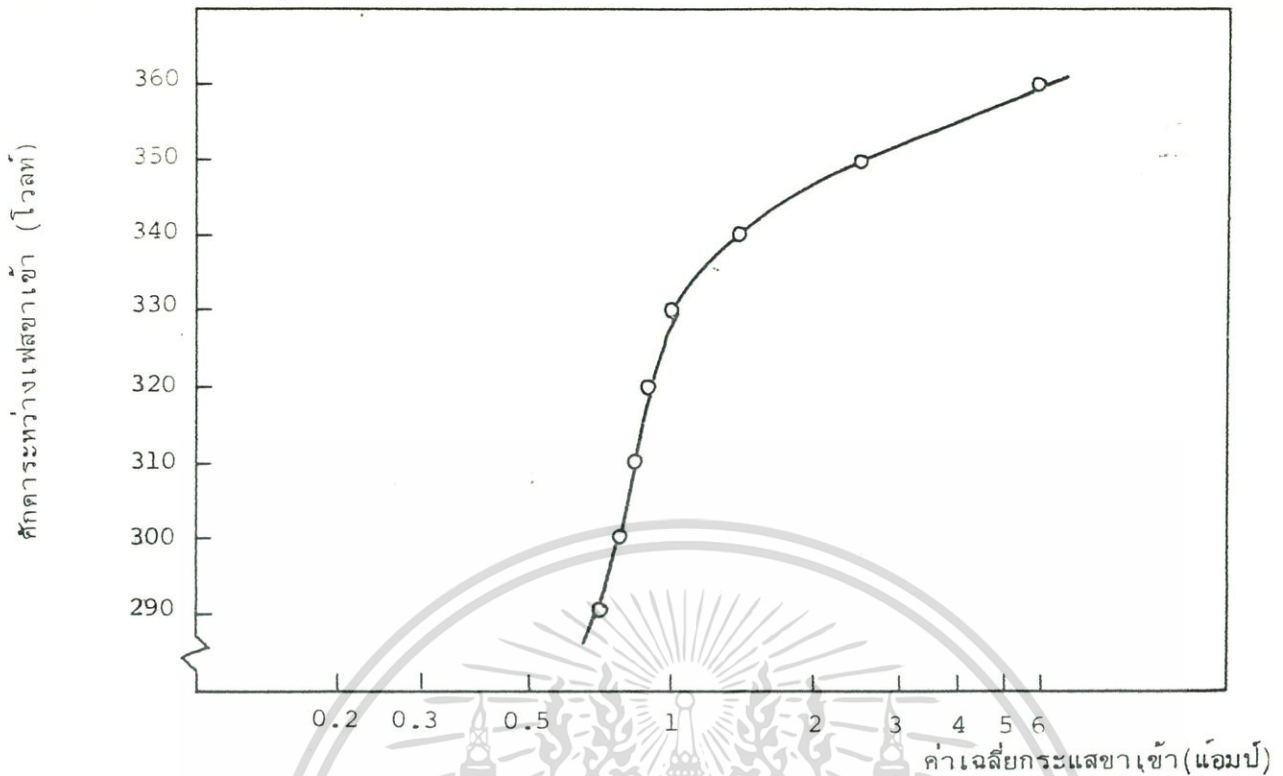
รูปที่ ๒.๘ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาขาเข้ากับ กระแสขาเข้าขณะไร้อโหลดที่แท๊ป ๑ของหม้อแปลง

ศักดา ระหว่างเฟสออก (โวลต์)

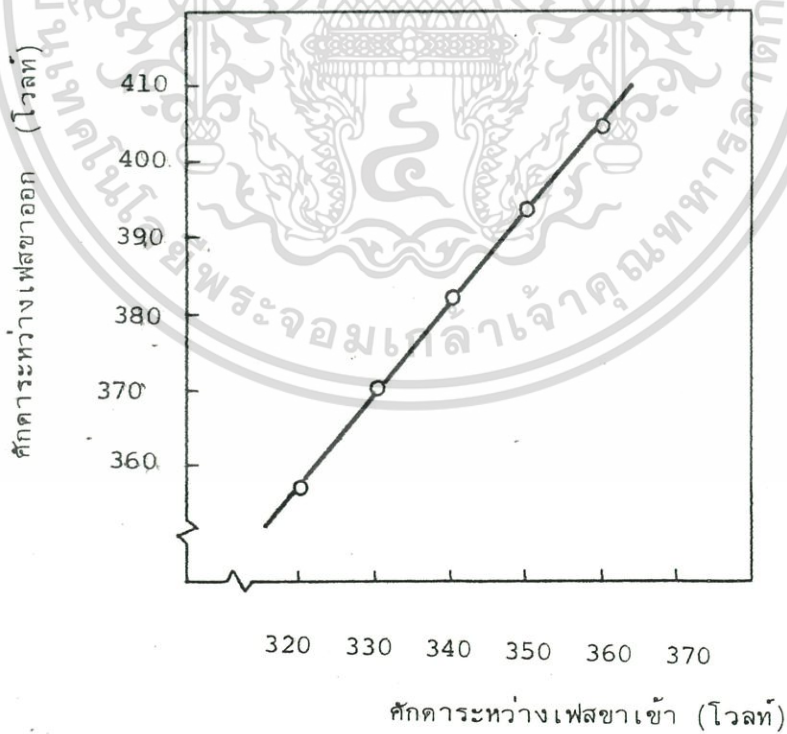


รูปที่ ๒.๙๐ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาขาเข้ากับ ศักดาขาออกขณะไร้อโหลดที่แท๊ป ๒ ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.๑๑ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตขาเข้ากับ  
กระแสขาเข้าขณะไรโวลต์ที่แท็บ ๒ ของหม้อแปลง

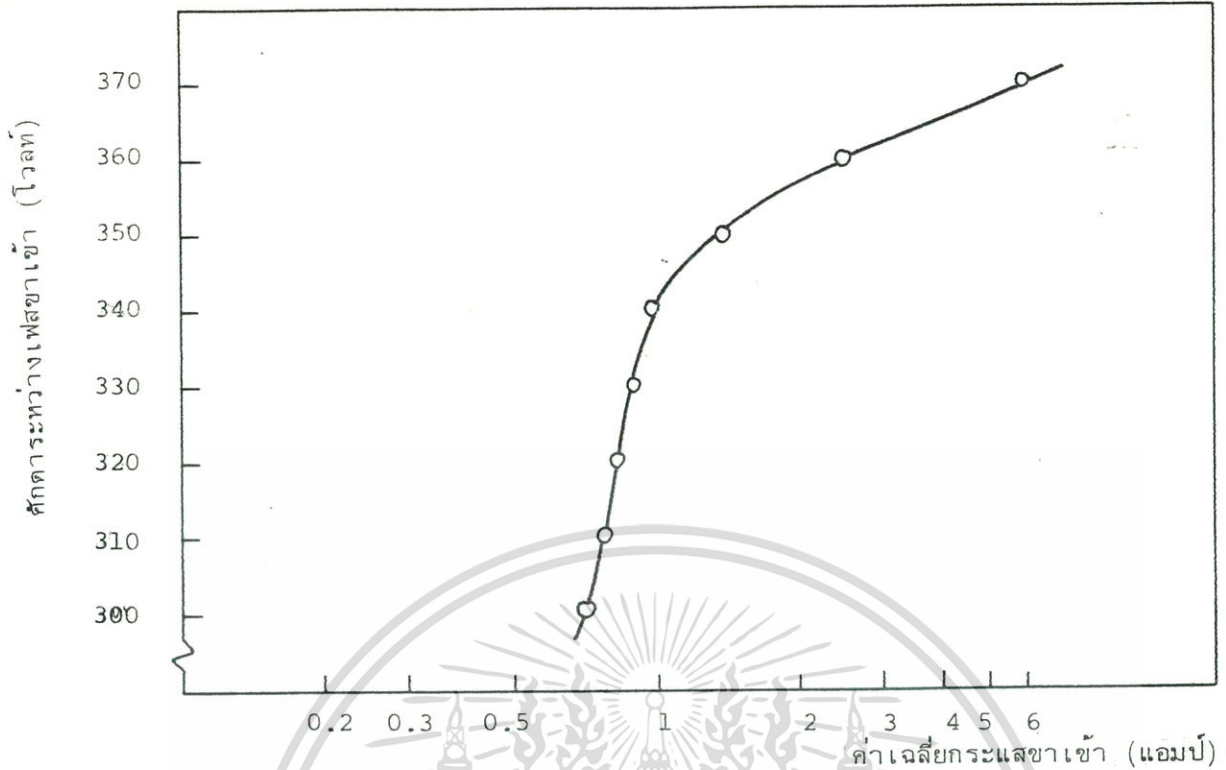


รูปที่ ๒.๑๒ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตขาเข้ากับ

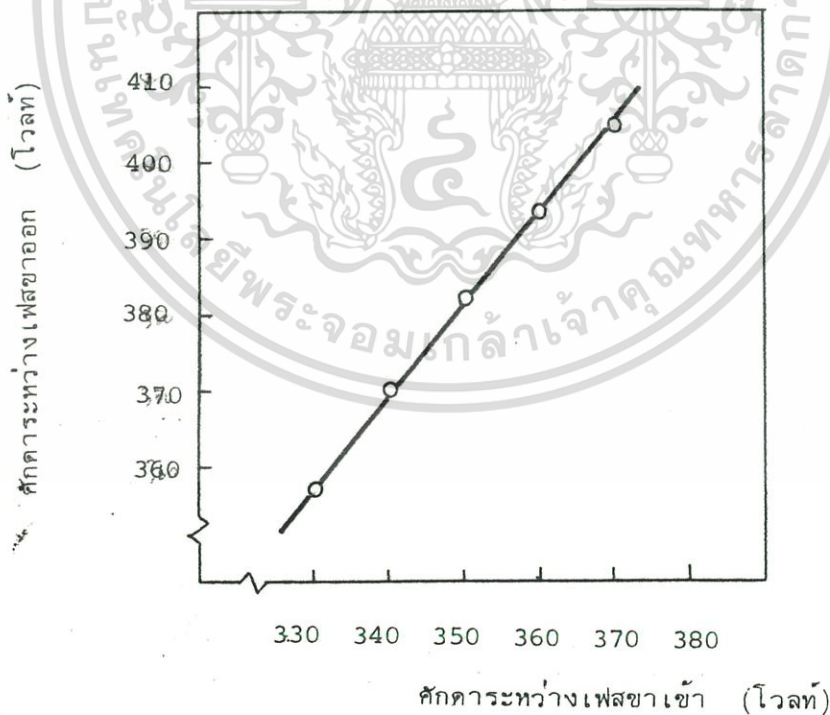
ศักตขาออกขณะไรโวลต์ที่แท็บ ๓ ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

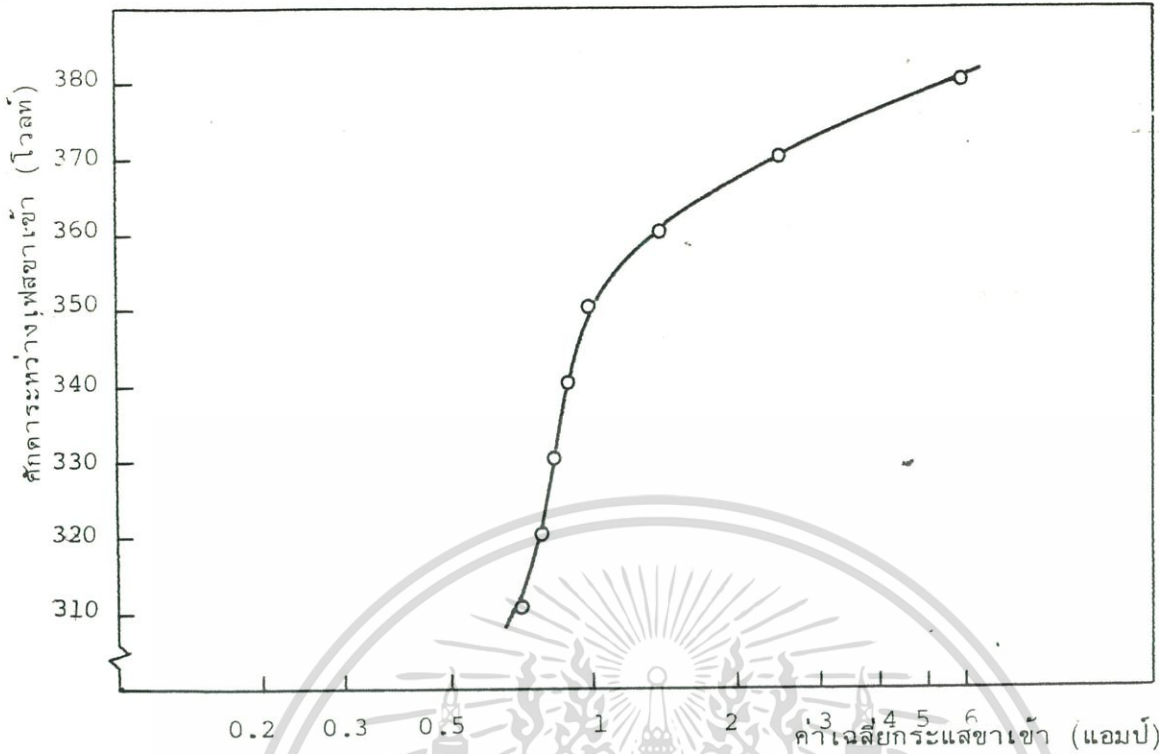


รูปที่ ๒.๑๓ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตาระหว่างเฟสขาเข้ากับกระแสขาเข้าขณะไรโวลต์ที่แท๊ป ๓ ของหม้อแปลง

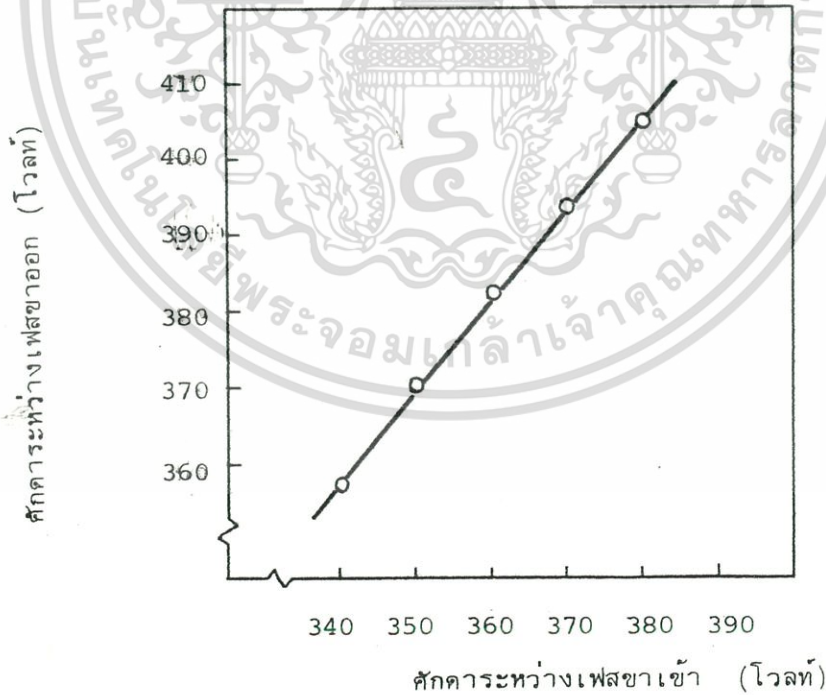


รูปที่ ๒.๑๔ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตาระหว่างเฟสขาเข้ากับศักตาระหว่างเฟสขาออกขณะไรโวลต์ที่แท๊ป ๔ ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

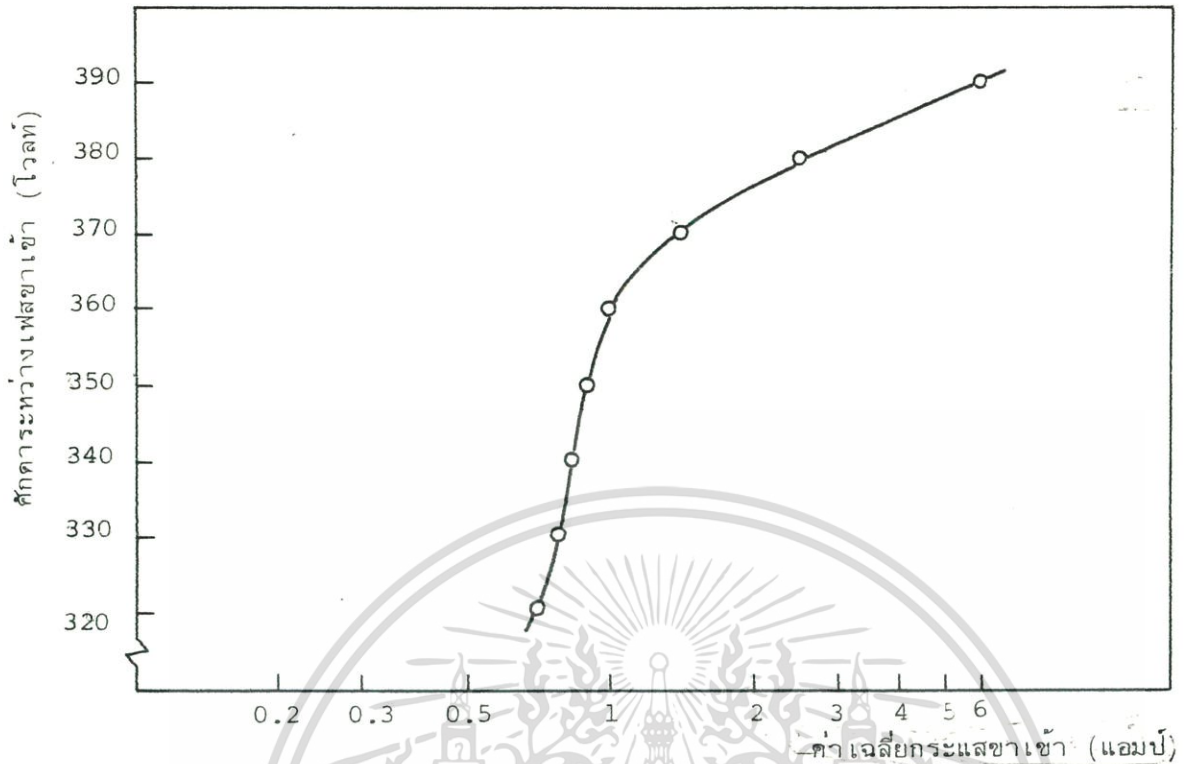


รูปที่ ๒.๑๕ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตาระหว่างเฟสขาเข้ากับกระแสขาเข้าขณะไรโวลต์ที่แท็บ ๔ ของหม้อแปลง

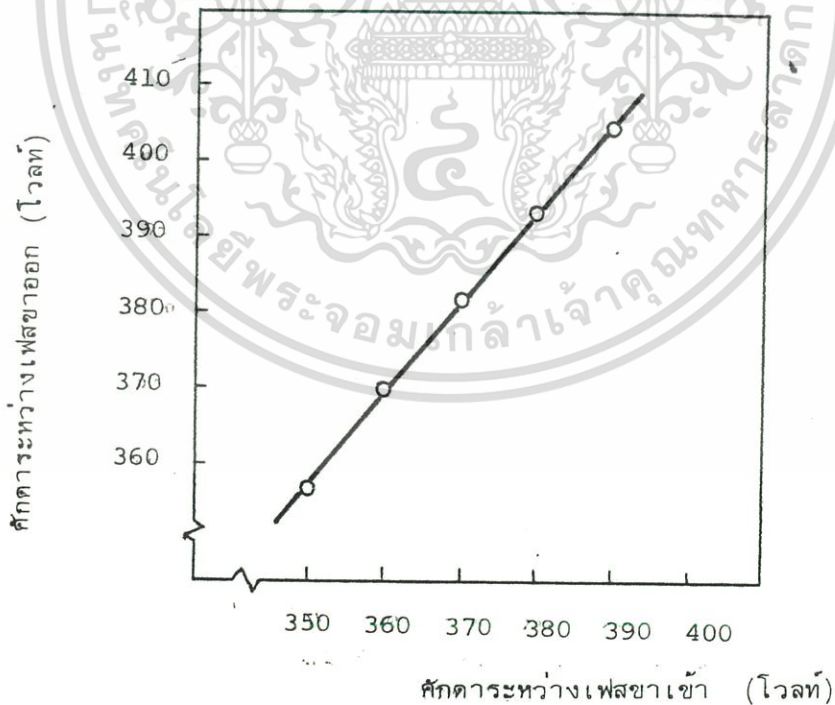


รูปที่ ๒.๑๖ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตาระหว่างเฟสขาเข้ากับศักตาระหว่างเฟสขาออกขณะไรโวลต์ที่แท็บ ๔ ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

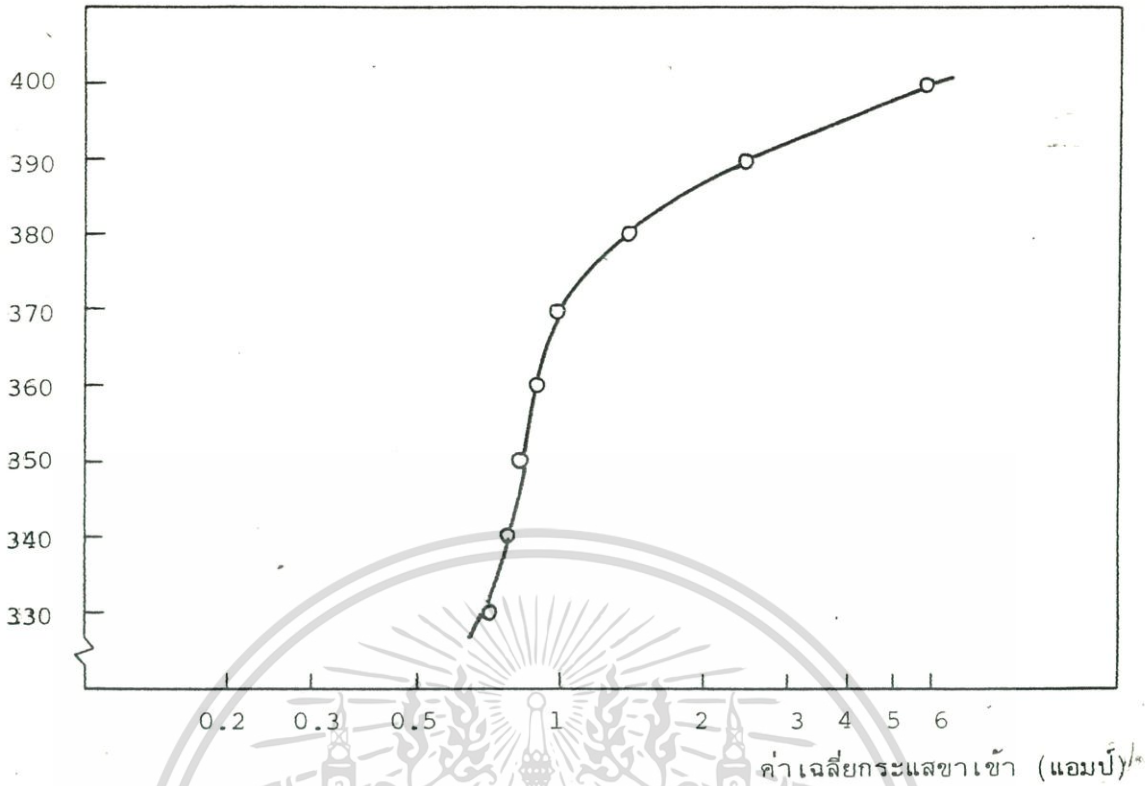


รูปที่ ๒.๑๗ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตาระหว่างเฟสขาเข้ากับ  
กระแสขาเข้าขณะไร้อโหลดที่แท๊ป ๕ ของหม้อแปลง

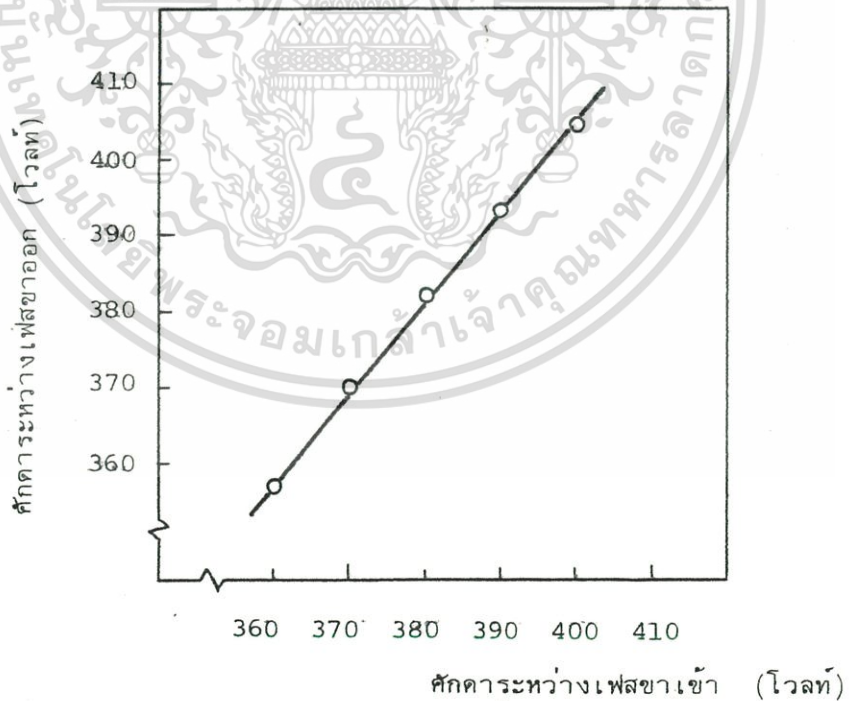


รูปที่ ๒.๑๘ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักตาระหว่างเฟสขาเข้ากับ  
ศักตาระหว่างเฟสขาออกขณะไร้อโหลดที่แท๊ป ๖ ของหม้อแปลง

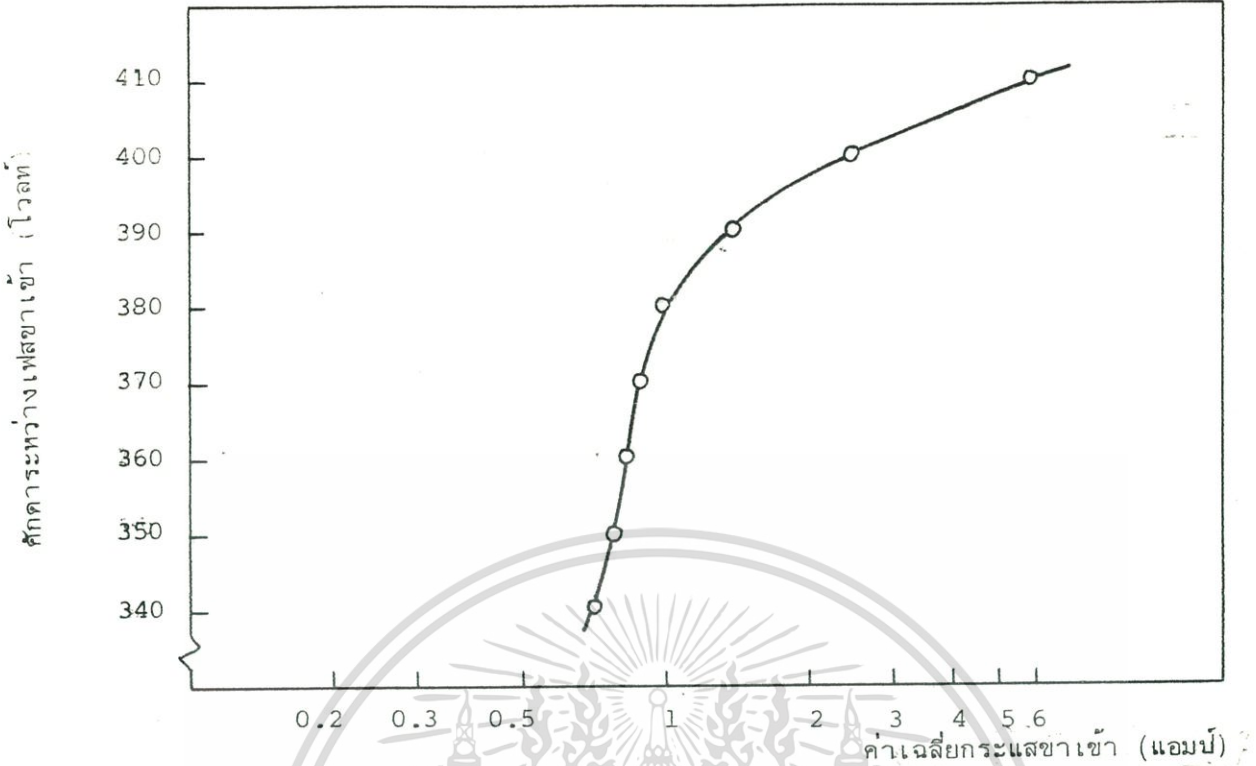
ศักดาระหว่างเฟสขาเข้า (โวลต์)



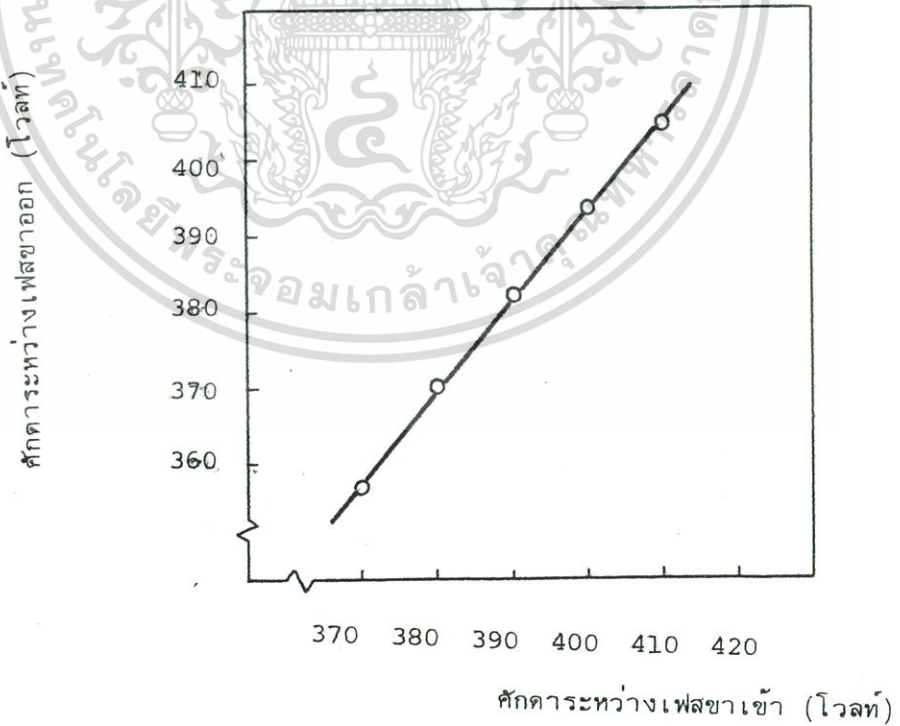
รูปที่ ๒.๑๙ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาขาเข้ากับกระแสขาเข้าขณะไร้อโหลดที่แท็บ ๖ ของหม้อแปลง



รูปที่ ๒.๒๐ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาขาเข้ากับศักดาขาออกขณะไร้อโหลดที่แท็บ ๗ ของหม้อแปลง



รูปที่ ๒.๒๑ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาไฟฟ้าขาเข้ากับ กระแสขาเข้าขณะไรโหลดที่แท๊ป ๗ ของหม้อแปลง

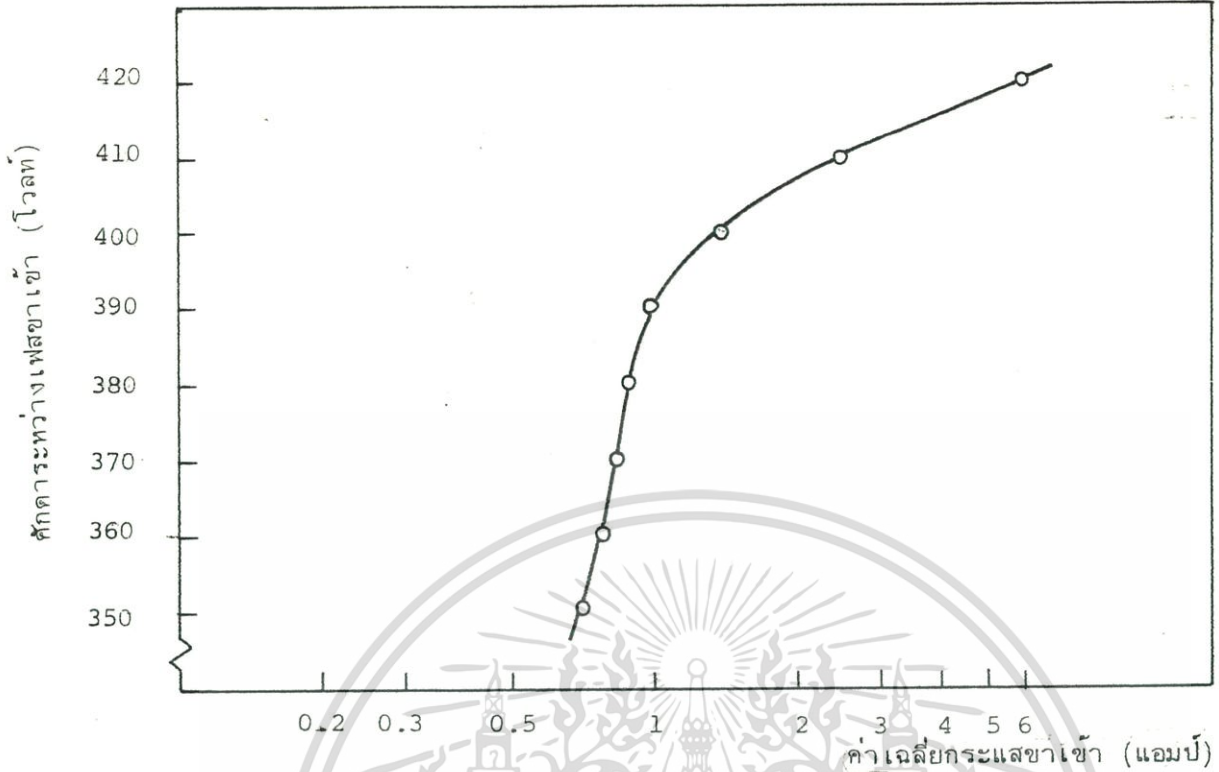


รูปที่ ๒.๒๒ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาไฟฟ้าขาเข้ากับ

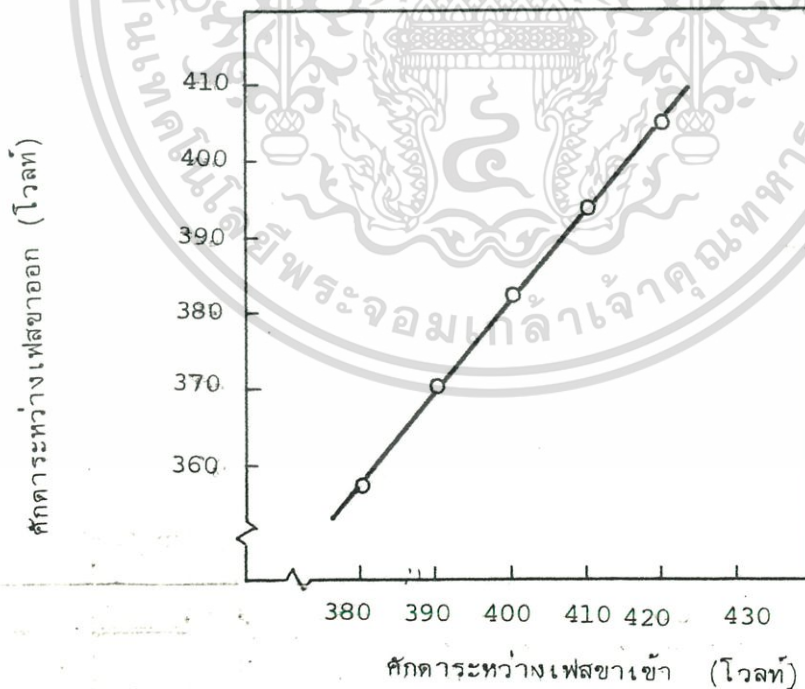
ศักดาไฟฟ้าขาออกขณะไรโหลดที่แท๊ป ๔ ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

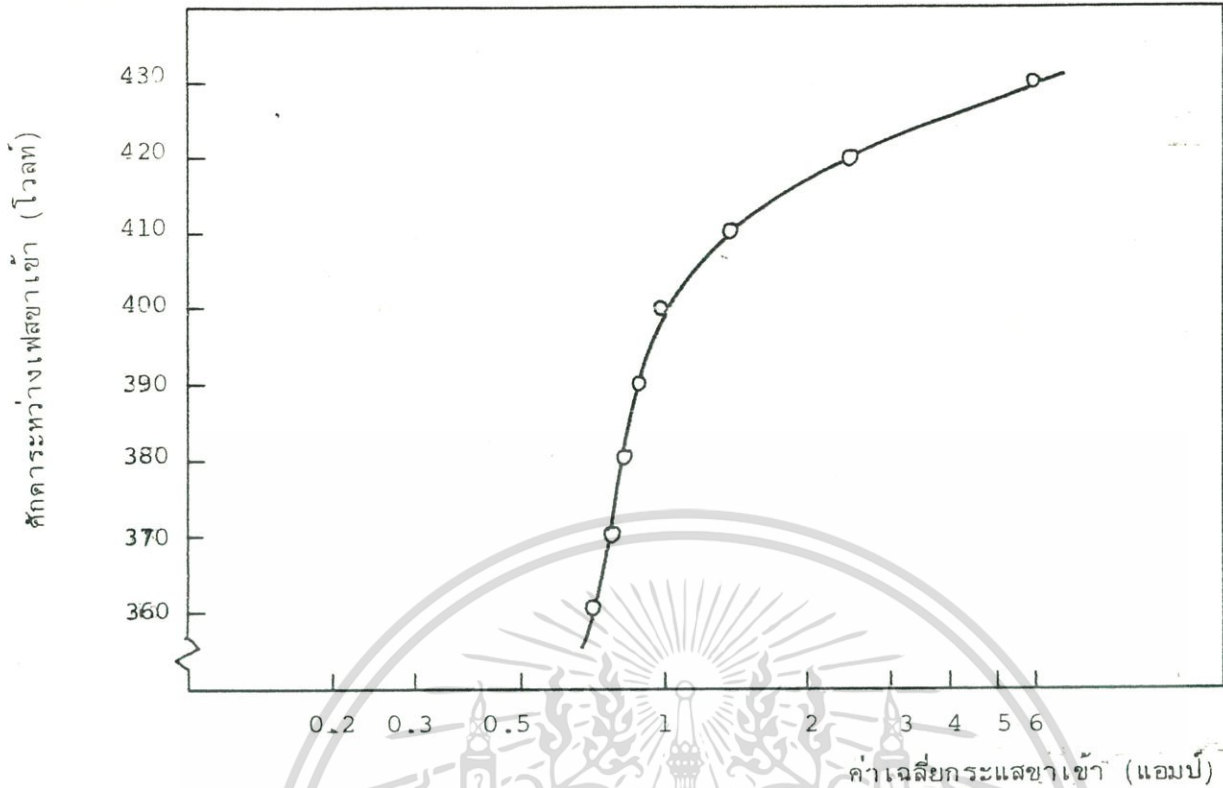
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



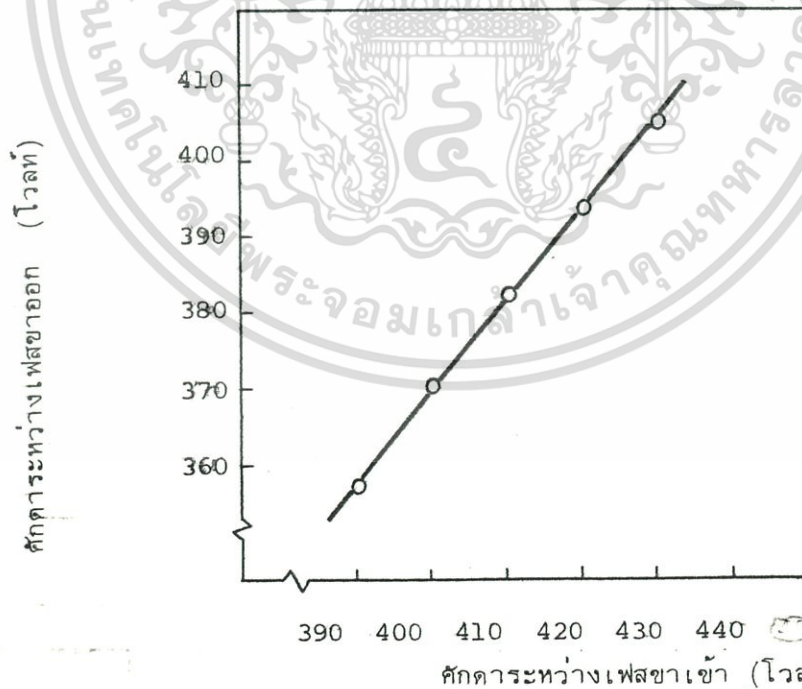
รูปที่ ๒.๒๓ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาไฟฟ้าขาเข้ากับ กระแสขาเข้าขณะไร้อโหลดที่แท็ป ๘ ของหม้อแปลง



รูปที่ ๒.๒๔ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาไฟฟ้าขาเข้ากับ ศักดาไฟฟ้าขาออกขณะไร้อโหลดที่แท็ป ๘ ของหม้อแปลง

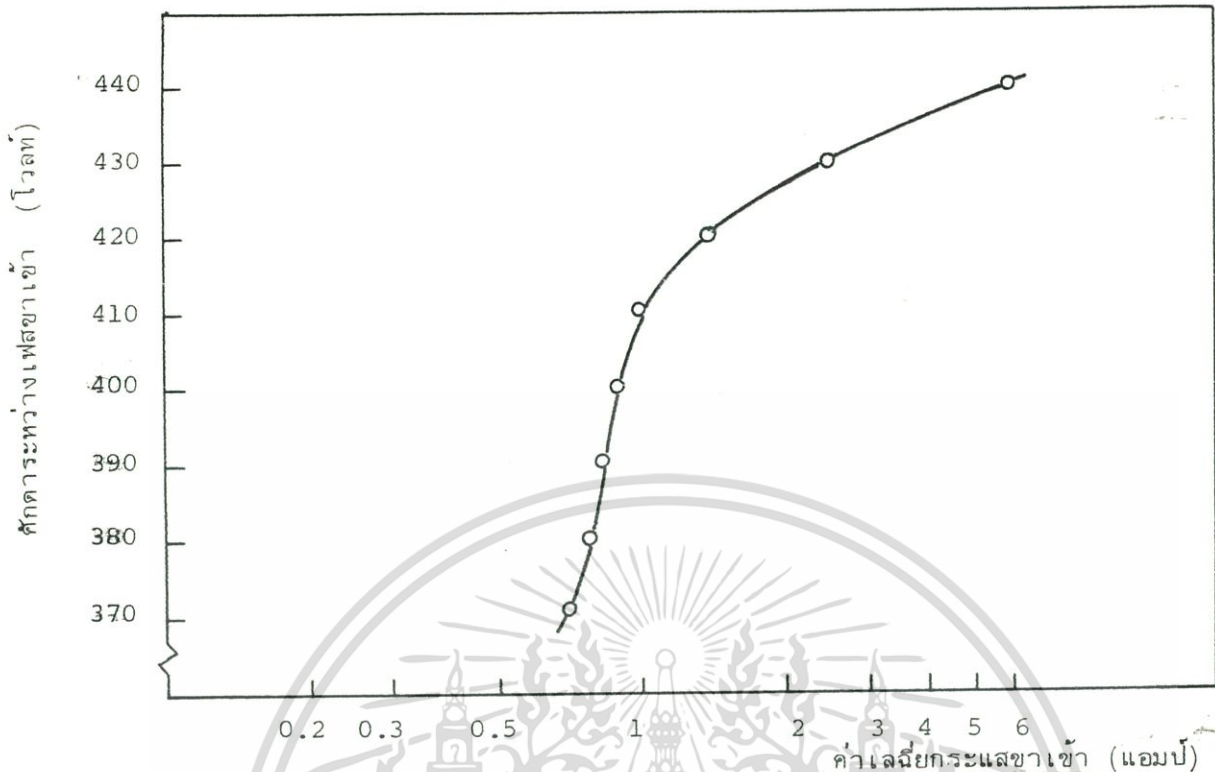


รูปที่ ๒.๒๕ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างคักตาไฟฟ้าขาเข้ากับ กระแสขาเข้าขณะไร้อโหลดที่แท็ป ๕ ของหม้อแปลง



รูปที่ ๒.๒๖ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างคักตาไฟฟ้าขาเข้ากับ คักตาไฟฟ้าขาออกขณะไร้อโหลดที่แท็ป ๑๐ ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.๒๗ แสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงระหว่างศักดาไฟฟ้าขาเข้ากับ

กระแสขาเข้าขณะไร้อโหลดที่แท็บ ๑๐ ของหม้อแปลง

จากรูปที่ ๒.๔-๒.๒๗ ซึ่งแสดงคุณสมบัติของหม้อแปลงที่แท็บต่างๆ แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงสามารถใช้งานได้ดีในตลอดช่วงทั้ง ๑๐ แท็บของหม้อแปลง โดยไม่มีการอิ่มตัวเกิดขึ้นในช่วงการทำงานของแต่ละแท็บ

#### ๒.๔.๓ การทดสอบส่วน เบียงถ่ายกระแส

การทดสอบส่วน เบียงถ่ายกระแสนี้ ได้ทำการทดสอบโดยใช้ค่าความต้านทานตามทีออก-แบบคร่อมเข้าระหว่างแท็บของหม้อแปลงซึ่งมีค่าศักดาไฟฟ้าเท่ากับ ๖ โวลต์ ทิ้งไว้เป็นเวลา ๑ นาที ปรากฏว่าตัวความต้านทานมีการขยายตัวออกแต่ยังไม่เกิดการ เสียรูปร่างหรือคุณสมบัติของตัวความต้านทานไป

ในทำนอง เดียวกัน ได้ทดสอบโดยใช้ค่ารีแอกแตนซ์ตามทีออกแบบคร่อมเข้าระหว่างแท็บของหม้อแปลงซึ่งมีค่าศักดาไฟฟ้าเท่ากับ ๖ โวลต์ ทิ้งไว้เป็นเวลา ๑ นาที ปรากฏว่าตัว-

รีแอคเตนซ์ที่ใช้สามารถใช้งานได้ดี โดยอุณหภูมิของตัวรีแอคเตนซ์ยังคงปกติสูงขึ้นไม่มาก

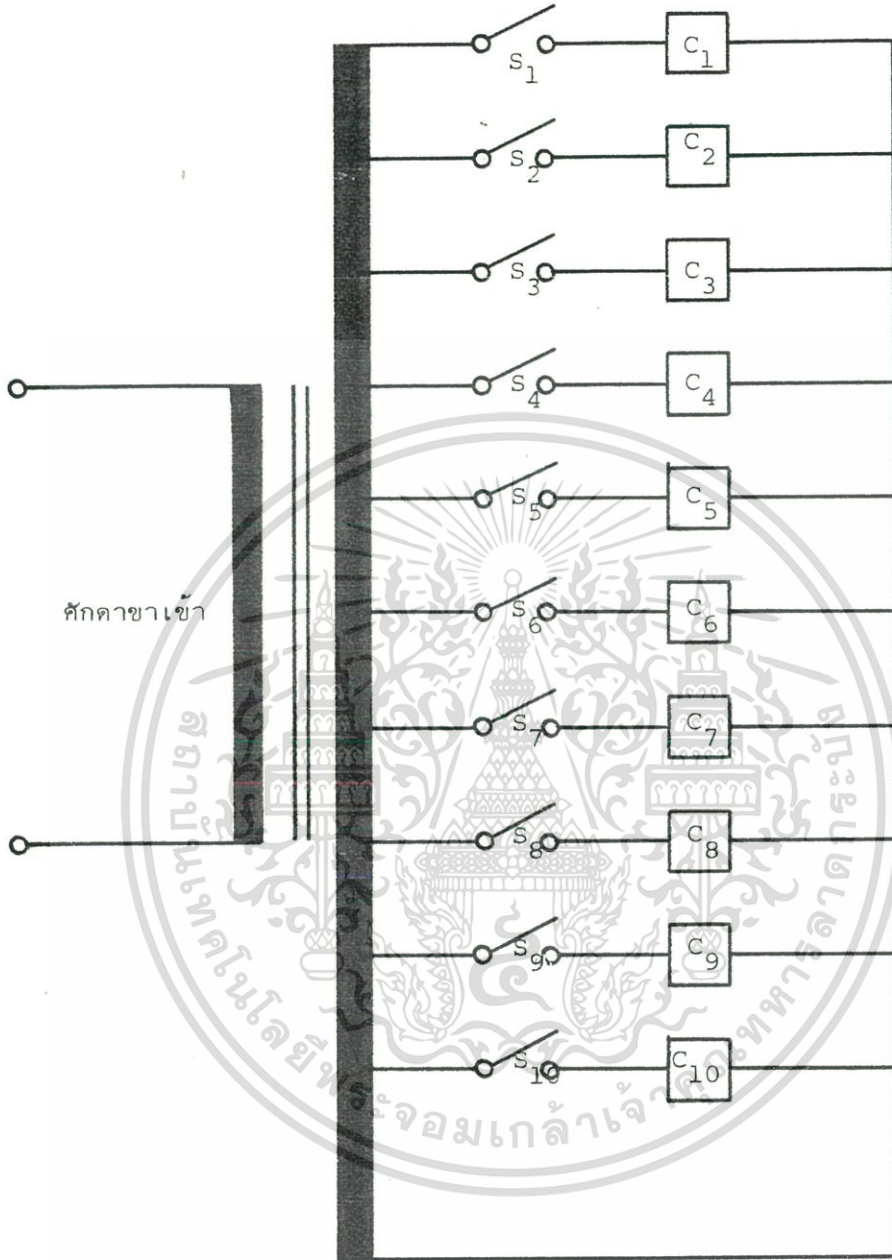
#### ๒.๔.๔ การทดสอบส่วนป้องกันกันระบบ

การทดสอบส่วนป้องกันกันระบบ ได้ทำการทดสอบส่วนป้องกันกันระบบที่ใช้คือ Thermal over load Relay โดยทำการโหลดศึกษาขาออกของเครื่องที่ ๘๐ แอมป์ ซึ่งตั้ง Thermal over load Relay ให้ตัดที่ ๖๕ แอมป์ ปรากฏว่าตัว Thermal over load Relay ตัดภายในเวลา ๑๐ นาที ซึ่งใกล้เคียงกับ ตารางแสดงคุณสมบัติของ Over load Relay ที่แสดงไว้ในภาคผนวก ผ.๓ แสดงว่าส่วนป้องกันกันระบบมีความน่าเชื่อถือพอควร

#### ๒.๕ การแก้ไขปัญหาระดับศักดาไฟเลี้ยงคอยล์ของคอนแทคแม่เหล็ก

จากการที่เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าต้นแบบได้ใช้คอนแทคแม่เหล็กเป็นส่วนติดต่อแท้ของหม้อแปลงซึ่งการทำงานของคอนแทคแม่เหล็กจะทำงานได้ต้องมีศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าคอยล์ของตัวคอนแทคแม่เหล็กตามที่กำหนดที่ระบุในตัวคอนแทคแม่เหล็ก ซึ่งเครื่องต้นแบบได้ใช้คอนแทคแม่เหล็กที่มีไฟเลี้ยงคอยล์เท่ากับ ๒๒๐ โวลท์ ดังนั้นเมื่อเกิดกรณีศักดาไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องตกลง ๒๐ เปอร์เซ็นต์ก็จะทำให้ไฟที่เลี้ยงคอยล์มีศักดาที่ต่ำกว่าที่กำหนดถึง ๒๐ เปอร์เซ็นต์ด้วย ซึ่งจะทำให้แรงดึงที่ได้จากคอยล์น้อยลง อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่หน้าคอนแทคและรูปร่างของคลื่นรูปขายนัยในทางศึกษาขาออกของเครื่องได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขศักดาไฟเลี้ยงคอยล์ให้มีค่าใกล้เคียงกับพิกัดของคอยล์ในคอนแทคแม่เหล็ก ซึ่งในการแก้ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ ๒ทางด้วยกันคือ การเพิ่มศักดาไฟฟ้าที่ตกลงให้เพิ่มขึ้นโดยใช้หม้อแปลงเพิ่มศักดาไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับศักดาไฟฟ้าภาวะปกติของคอยล์คอนแทคแม่เหล็ก หรือวิธีที่สองโดยการพันคอยล์ของคอนแทคแม่เหล็กใหม่ ซึ่งจะต้องพันคอยล์ของคอนแทคแม่เหล็กทั้งหมดใหม่ โดยคอนแทคแม่เหล็กตัวที่ทำการต่อแท้ขณะศักดาไฟฟ้าทางเข้าใดๆ จะต้องมีจุดพิกัดการทำงานอยู่ที่ค่าศักดาไฟฟ้านั้นๆ จะเห็นได้ว่าวิธีการหลังนี้จะมีความยุ่งยาก และเสียเวลามากกว่าวิธีการแรกมาก ในเครื่องต้นแบบจึงได้ทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยใช้หม้อแปลงตัวเล็กๆอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มหรือลดศักดาไฟฟ้าเข้า ทำให้คอยล์ของคอนแทคแม่เหล็กตัวที่ขณะทำงานมีศักดาใกล้เคียงกับ ๒๒๐ โวลท์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ๒.๒๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.๒๔ แสดงวงจรแกไขคักตาไฟเลี้ยงคอยส์ของคอนแทคแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ๒.๒๘ จะเห็นว่าหม้อแปลงจะมี ๑๐ แท็บด้วยกันเหมือนกับตัวใหญ่ ซึ่งการ ออกแบบมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปบ้าง โดยจะเห็นได้ว่าทางด้านขดลวดปฐมภูมิจะมีขดเดียว และ ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิจะมีขดลวดเพิ่มเติมพิเศษ ๑๐ แท็บ ซึ่งมีหลักในการออกแบบและลักษณะการ ทำงานดังนี้

๒.๕.๑ หลักการออกแบบ

การออกแบบในส่วนนี้ก็เป็นเพียงการออกแบบหม้อแปลงเบื้องต้น แต่ต้องมีการพิจารณา สักดาไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปทางด้านปฐมภูมิ และสักดาไฟฟ้าที่จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมิ ซึ่งการออกแบบในเครื่องต้นแบบได้พิจารณาจากคุณสมบัติช่วงกว้างในการทำงานของเครื่อง คือสามารถ ทำงานรักษาระดับสักดาได้ในช่วง + ๑๐ เปอร์เซ็นต์ ถึง -๒๐ เปอร์เซ็นต์ นั่นคือหม้อแปลงดังรูป ๒.๒๘ นี้จะต้องมีค่าสักดาขาออกเป็น ๒๒๐ โวลท์ที่แท็บ ๑ เมื่อสักดาขาเข้าลดลง ๒๐ เปอร์เซ็นต์ คือประมาณ ๑๘๐ โวลท์ และสักดาขาออกเป็น ๒๒๐ โวลท์ที่แท็บ ๑๐ เมื่อสักดาขาเข้าเพิ่มขึ้น ๑๐ เปอร์เซ็นต์หรือประมาณ ๒๔๐ โวลท์ การพิจารณาขนาดของหม้อแปลงที่ใช้ได้ทดสอบคุณสมบัติของคอน-แทคแม่เหล็กที่ใช้แต่ละตัวจะกินกระแสประมาณ ๑๐๐ mA ขณะทำงานภาวะปกติ และกระแสช่วงขณะ เริ่มทำงานประมาณ ๘๐๐ mA ซึ่งจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงขนาด ๑๒๐ VA น่าจะเพียงพอสำหรับวงจร ไฟเลี้ยงคอยล์ของคอนแทคแม่เหล็ก โดยใช้แกนเหล็กที่มีอยู่ซึ่งมีความกว้างขากลางของรูปตัวอี เท่ากับ ๑.๕" ซึ่งก็จะได้ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กในวงจรแม่เหล็กเท่ากับ ๑.๕" x ๑.๕" และกำหนดให้แกนเหล็กมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ ๑ เทสลาที่ ๒๔๐ โวลท์ที่กักสักดา สูงสุดของเครื่อง ซึ่งก็จะได้จำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลงเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก } E &= 4.44 f N_B A \\ N_1 &= \frac{240}{4.44 \times 50 \times 1 \times 1.5 \times 1.5 \times 2.54 \times 2.54 \times 10^{-4} \times 0.85} \\ \text{ขดลวดทางจันปฐมภูมิ} &\approx 785 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

ซึ่งในทางปฏิบัติได้พันขดลวดปฐมภูมิเท่ากับ ๗๘๐ รอบ และขดลวดปฐมภูมิที่แท็บ ๔ ซึ่ง จะมีสักดาเท่ากับสักดาขาเข้านั้นให้มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ ๘๐๐ รอบเป็นการเพิ่มรอบเพื่อ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุด เขยค่าศักดาที่ตกคร่อมไปในขดลวด

ซึ่งการคำนวณรอบที่แท็บอื่นคิดจาก เปอร์ เซ็นต์ของศักดาที่แตกต่างระหว่างแท็บของ เครื่อง ดันแบบคือ ๓ เปอร์ เซ็นต์ ซึ่งคิดจำนวนรอบที่จะต้องเพิ่มขึ้นและลดลงจากแท็บ ๔ ซึ่งเป็นจุดของศักดา ไฟฟ้าปกติ ก็จะสามารถหาจำนวนรอบที่แท็บต่างๆ ดังข้อมูลข้างล่าง

จะได้จำนวนรอบที่แท็บต่างๆ ดังนี้

$$\text{แท็บ ๑} \quad ๘๐๐ \times ๐.๙๑ \quad \text{รอบ} = ๗๒๘ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๒} \quad ๘๐๐ \times ๐.๙๔ \quad \text{รอบ} = ๗๕๒ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๓} \quad ๘๐๐ \times ๐.๙๗ \quad \text{รอบ} = ๗๗๖ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๔} \quad ๘๐๐ \times ๑ \quad \text{รอบ} = ๘๐๐ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๕} \quad ๘๐๐ \times ๑.๐๓ \quad \text{รอบ} = ๘๒๔ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๖} \quad ๘๐๐ \times ๑.๐๖ \quad \text{รอบ} = ๘๔๘ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๗} \quad ๘๐๐ \times ๑.๐๙ \quad \text{รอบ} = ๘๗๒ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๘} \quad ๘๐๐ \times ๑.๑๒ \quad \text{รอบ} = ๘๙๖ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๙} \quad ๘๐๐ \times ๑.๑๕ \quad \text{รอบ} = ๙๒๐ \quad \text{รอบ}$$

$$\text{แท็บ ๑๐} \quad ๘๐๐ \times ๑.๑๘ \quad \text{รอบ} = ๙๔๔ \quad \text{รอบ}$$

#### ๒.๕.๒ ลักษณะการทำงาน

เมื่อเปิดเครื่องจะมีไฟเข้าทางขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวเล็กดังรูป ที่ ๒.๒๘ ซึ่งก็จะ เกิดการเหนี่ยวนำศักดาขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ ทั้ง ๑๐ แท็บเกิดระดับของศักดาไฟฟ้าขึ้นทั้งหมด ๑๐ ระดับด้วยกัน ซึ่งระดับศักดาไฟฟ้าทั้ง ๑๐ แท็บนี้จะถูกนำไปเลี้ยงคอยล์ของคอนแทกแม่เหล็กที่ทำหน้าที่ ติดต่อแท็บทั้ง ๑๐ ตัวโดยผ่านหน้าคอนแทกของรีเลย์ซึ่งควบคุมด้วยส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยแท็บทั้งหมด-ของหม้อแปลงตัว เล็กนี้จะนำไปต่อเข้ากับขา common ของตัวรีเลย์ ซึ่งมีการต่อ ดังนี้คือ

แท็บที่ ๑ ของหม้อแปลงจะต่อเข้ากับขา common ของรีเลย์ที่ควบคุมไฟเลี้ยงคอยล์ ของคอนแทกแม่เหล็กที่ทำการติดต่อแท็บ ๑๐ เมื่อเกิดภาวะของไฟขึ้นสูงสุด ซึ่งขณะนั้นศักดาขาเข้า

จะประมาณ ๒๔๐ โวลต์ ซึ่งแท็บที่ ๑ ของหม้อแปลงตัวเล็กจะมีศักดาไฟฟ้าประมาณ ๒๒๐ โวลต์ จึงทำให้ไฟเลี้ยงคอยล์ของคอนแทคแม่เหล็กตัวที่ทำงานมีค่าใกล้เคียงกับพิกัด ในทำนองเดียวกันที่แท็บ ๒ ถึง ๑๐ ของหม้อแปลงตัวนี้จะถูกต่อเข้ากับขา common ของรีเลย์ที่ควบคุมการตัดต่อคอนแทคแม่เหล็กที่ แท็บ ๙ ถึง ๑ ตามลำดับ

ซึ่งไม่ว่าศักดาไฟฟ้าขาเข้าจะเปลี่ยนแปลงไปในช่วง + ๑๐ ถึง -๒๐ เปอร์เซ็นต์ ศักดาไฟเลี้ยงคอยล์ของคอนแทคแม่เหล็ก ซึ่งทำหน้าที่ต่อไฟเข้าแท็บในขณะนั้นจะมีค่าประมาณ ๒๒๐ โวลต์เสมอ จึงทำให้การทำงานของแม่เหล็กหรือส่วน Power Switching ของเครื่องมีความน่าเชื่อถือและแน่นอนสูง อีกทั้งเป็นการยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ ๓

ส่วนวงจรควบคุม

๓.๑ ความนำ

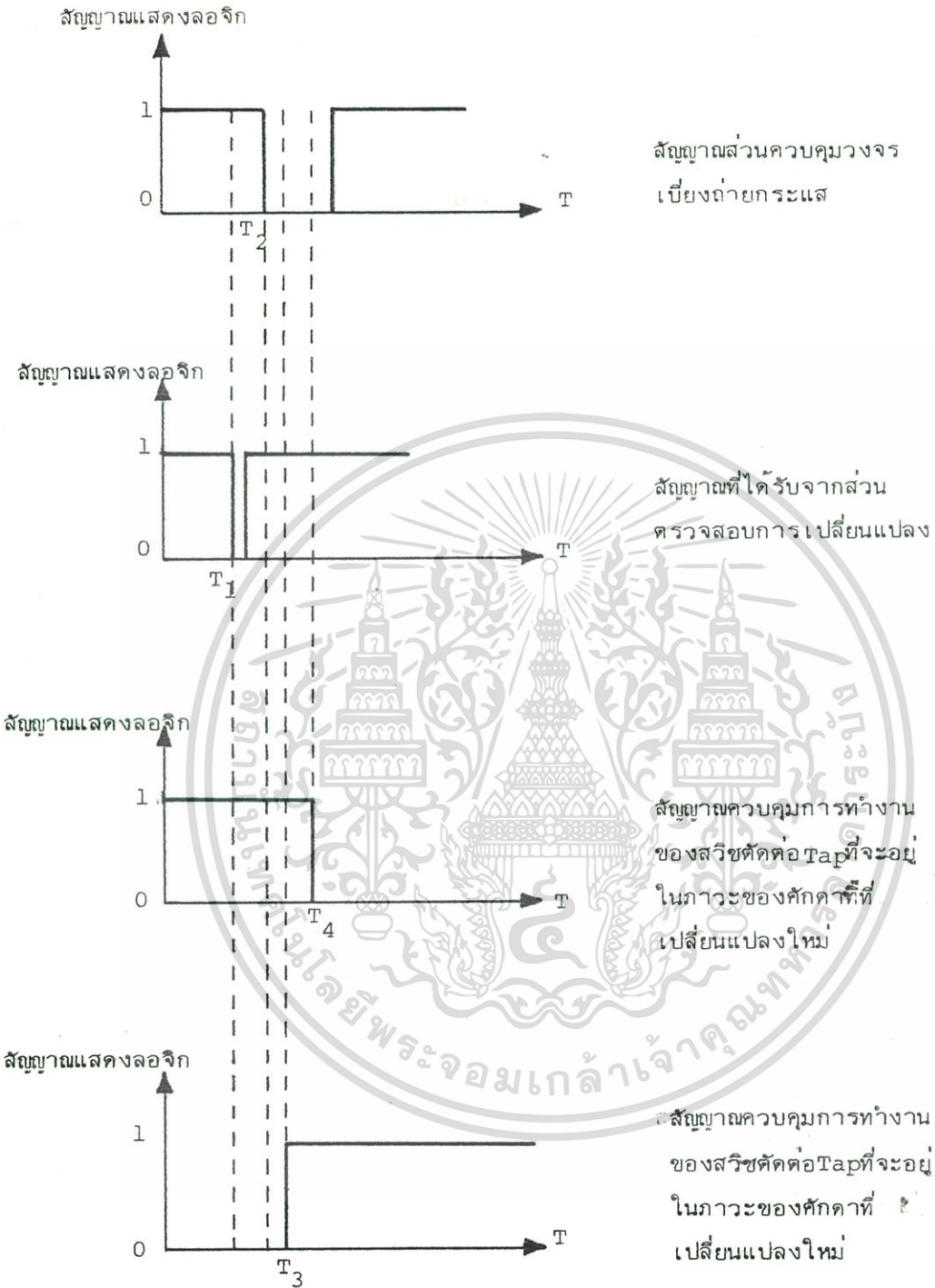
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงส่วนควบคุมทั้งหมดของ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนใหญ่ โดยวงจรรวมของระบบประกอบด้วยวงจร ส่วนต่างๆตั้งแต่ส่วนตรวจสอบศักดา ส่วนหน่วงเวลา ส่วนตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงส่วนสวิตซ์ที่จะ ควบคุมการให้มีการ เปลี่ยนแทป ส่วนเปรียบเทียบศักดา ส่วน เปลี่ยนศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็น- ศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดในการออกแบบและการทำงานของวงจรต่อไป

๓.๒ หลักการทำงานของวงจรส่วนควบคุม

การทำงานของวงจรส่วนควบคุมสามารถอธิบายได้คร่าวๆ ตามแผนผังรูปที่ ๓.๑ และรูปที่ ๓.๒







รูปที่ ๓.๒ แสดงแผนผัง เวลาการทำงานของวงจรรวมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

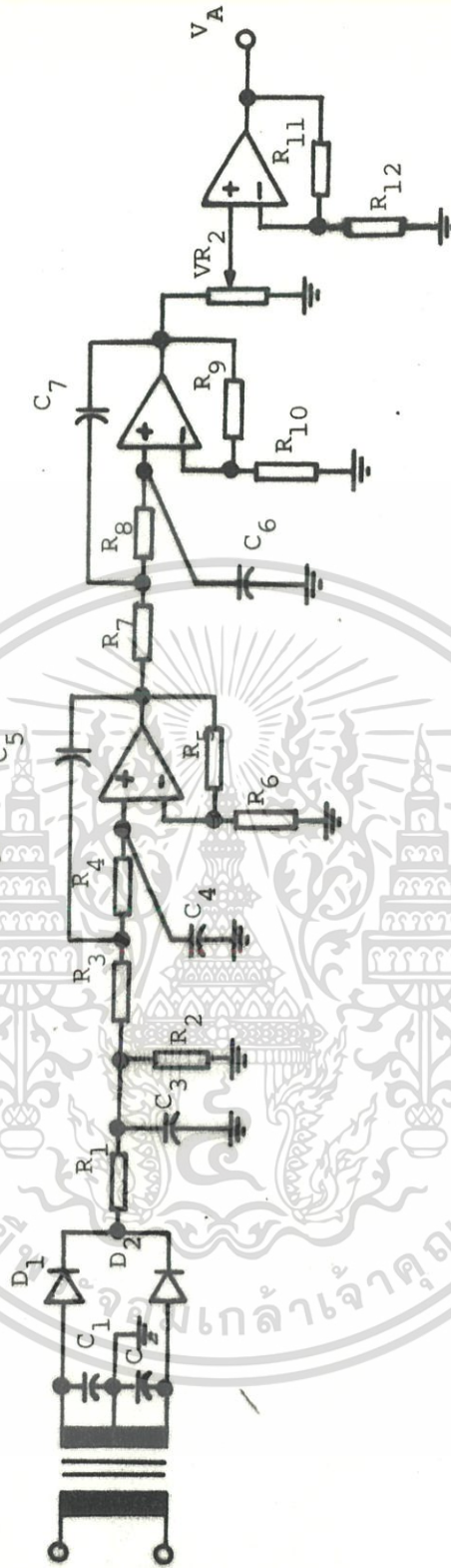
จากแผนผังแสดงการทำงานตามรูปที่ ๓.๑ และ ๓.๒ นี้ จะได้แยกอธิบายรายละเอียดการทำงานของส่วนย่อยๆ แต่ละส่วน

### ๓.๒.๑ ส่วนลดระดับศักดา

ส่วนลดระดับศักดานี้จะใช้ หม้อแปลงตัว เล็กอีกตัวหนึ่ง เพื่อทำการลดระดับศักดาทาง เข้าให้มีค่าต่ำลงจน เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานกับส่วนวงจร เปลี่ยนศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็น ศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้นี้จะมามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของศักดาไฟฟ้ากระแสสลับซึ่ง เป็นค่าศักดาขา เข้าของระบบไฟ

### ๓.๒.๒ ส่วนเปลี่ยนศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็น ศักดาไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ เปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้ากระแสสลับจากส่วนลดระดับศักดาให้เป็นค่าของ ศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการ เปลี่ยนแปลงขึ้นลง เป็นอัตราส่วนกับศักดาไฟฟ้ากระแสสลับทาง เข้า เพื่อทำการป้อนให้กับวงจรส่วน เปรียบเทียบศักดาไฟฟ้าทาง เข้า ซึ่งวงจรได้แสดงไว้ดังรูปที่ ๓.๓



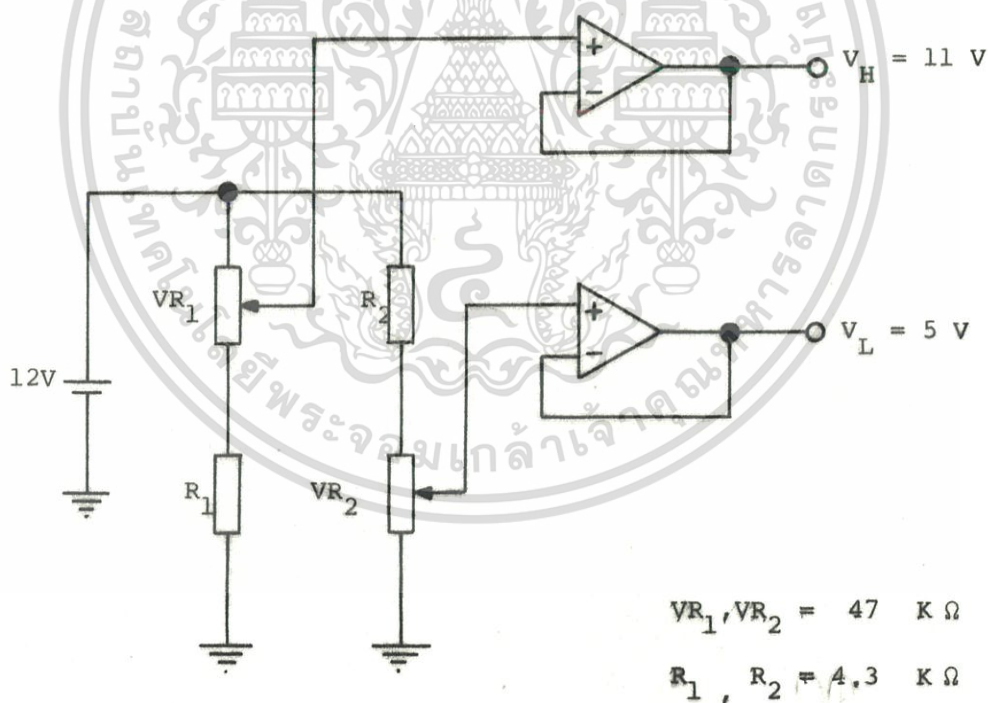
- $C_1, C_2 = 0.1 \mu F$
- $C_3 = 100 \mu F$
- $C_4, C_5 = 1 \mu F$
- $C_6, C_7 = 10 \mu F$
- $D_1, D_2 = \text{Diode 1N 4001}$
- $VR_2 = 47 K\Omega$
- $R_1 = 10 K\Omega$
- $R_2 = 1 K\Omega$
- $R_3 = 20 K\Omega$
- $R_4 = 12 K\Omega$
- $R_5, R_6 = 68 K\Omega$
- $R_7 = 8.2 K\Omega$
- $R_8 = 30 K\Omega$
- $R_9, R_{10} = 75 K\Omega$
- $R_{11} = 30 K\Omega$
- $R_{12} = 15 K\Omega$
- $VA = \text{สัญญาณที่ส่งต่อไปยังส่วนเปรียบเทียบ}$

รูปที่ ๓.๓ แสดงส่วนลดระดับศักดาและส่วนเปลี่ยนศักดาไฟฟ้า  
กระแสสลับเป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ๓.๒.๓ ส่วนสร้างศักดาเปรียบเทียบ (Reference Voltage)

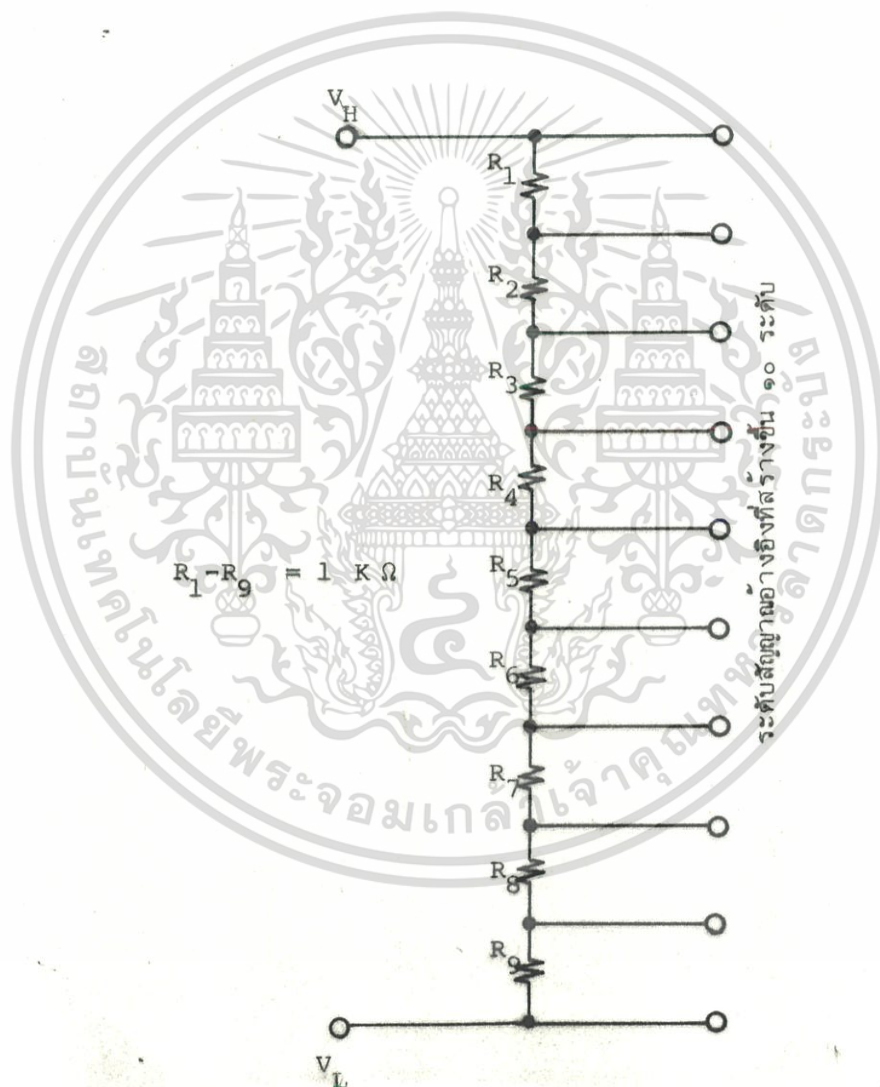
ส่วนนี้จะทำหน้าที่สร้างศักดาเปรียบเทียบขึ้น ๒ ค่า คือค่าศักดาทางด้านสูง และค่าศักดาทางด้านต่ำขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังส่วนแบ่งระดับศักดาไฟฟ้าทำการสร้างศักดาอ้างอิงขึ้น ๑๐ ค่า ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจรเปรียบเทียบ เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างศักดาเปรียบเทียบที่ได้สร้างขึ้นกับศักดาไฟฟ้ากระแสตรงแปรค่าที่ได้จากส่วนลดระดับศักดาและส่วนเปลี่ยนศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวงจรศักดาไฟเปรียบเทียบที่ได้สร้างขึ้นนั้นได้จากแหล่งจ่ายไฟแบตเตอรี่ ๑๒ โวลต์ ซึ่งวงจรได้แสดงไว้ดังรูป ที่ ๓.๔



รูปที่ ๓.๔ แสดงวงจรส่วนสร้างศักดาเปรียบเทียบ

### ๓.๒.๔ ส่วนแบ่งระดับศักดา (Voltage divider)

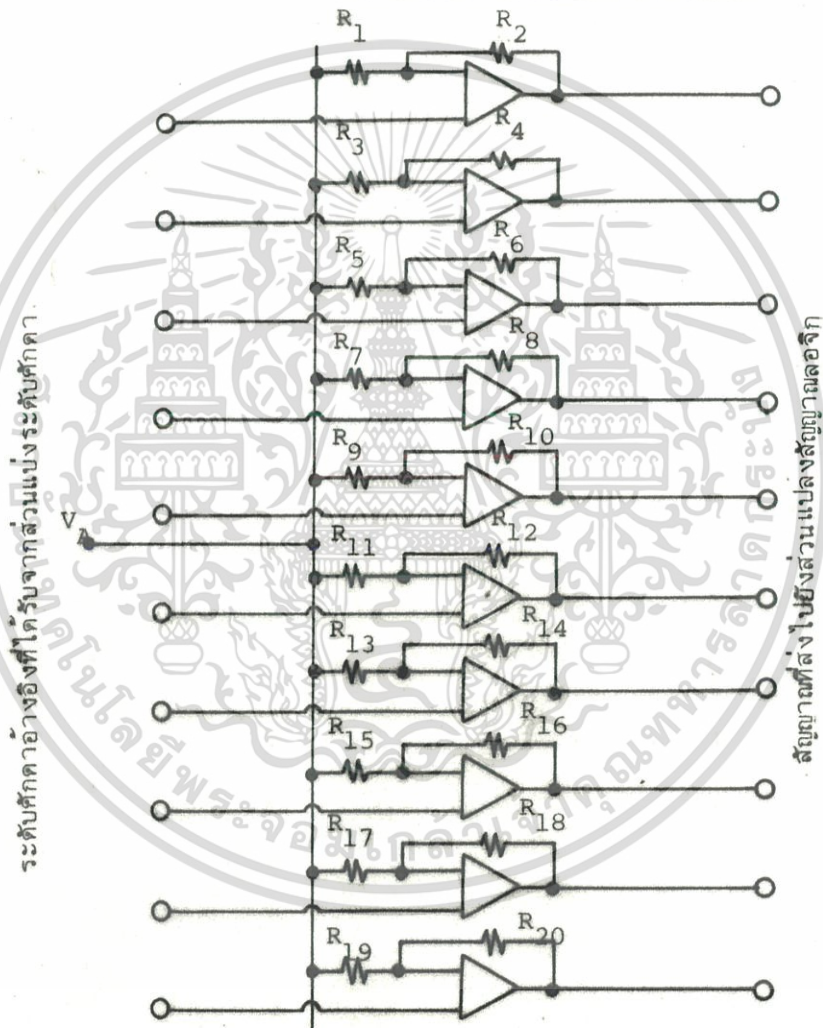
ส่วนแบ่งระดับศักดาจะทำการแบ่งระดับศักดาไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นจากส่วนวงจรสร้างศักดาเปรียบเทียบกับออกเป็น ๑๐ ช่วง โดยศักดาเปรียบเทียบที่ถูกแบ่งนี้จะเป็นค่าศักดาอ้างอิง ๑๐ ค่าที่จะส่งไปยังส่วนเปรียบเทียบศักดาไฟเข้ากับศักดาอ้างอิง (Comparator) โดยค่าของแต่ละช่วงจะมีค่าที่เท่าๆ กันซึ่งถูกแบ่งโดยค่าความต้านทานที่เท่ากัน ๔ ตัว ดังวงจรที่แสดงดังรูปที่ ๓.๕



รูปที่ ๓.๕ แสดงวงจรส่วนแบ่งระดับศักดา

๓.๒.๕ ส่วนเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้าทางเข้ากับศักดาอ้างอิง (Comparator)

ในส่วนนี้จะ เป็นส่วนที่จะทำการ เปรียบ เทียบศักดาไฟฟ้าทาง เข้ากับศักดาอ้างอิงที่ได้ ตั้งไว้ เพื่อทำการส่งสัญญาณที่ได้จากส่วนนี้ซึ่ง เป็นสัญญาณลอจิกออกไปวงจร เกทอีกทีหนึ่ง เพื่อทำ- การรวมสัญญาณจากส่วน เปรียบ เทียบนี้ไปควบคุมวงจรตรวจสอบการ เปลี่ยนระดับและวงจรหน่วงเวลา อีกทีหนึ่ง



ระดับศักดาอ้างอิงที่ได้รับจากส่วนแบ่งระดับศักดา

สัญญาณที่ส่งไปยังส่วนแปลงสัญญาณลอจิก

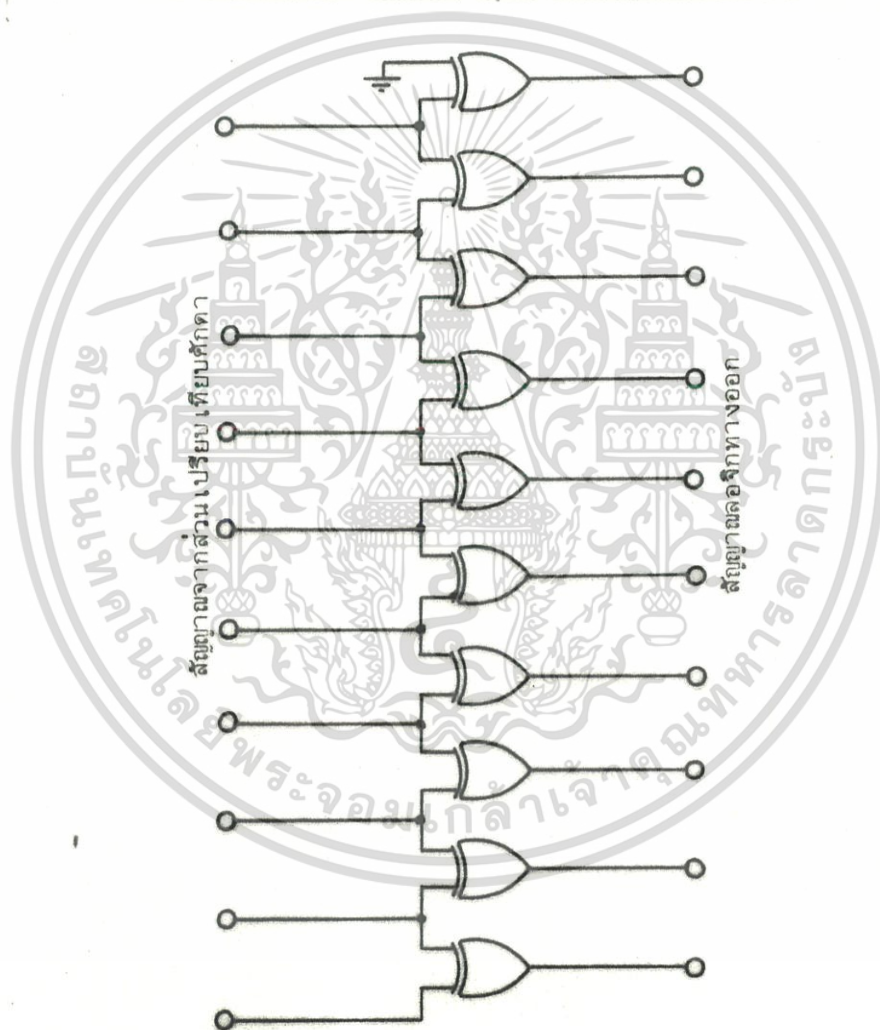
$R_1, R_3, R_5, R_7, R_9, R_{11}, R_{13}, R_{15}, R_{17}, R_{19} = 10K \Omega$

$R_2, R_4, R_6, R_8, R_{10}, R_{12}, R_{14}, R_{16}, R_{18}, R_{20} = 750K \Omega$

รูปที่ ๓.๖ แสดงวงจรส่วนเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้า (Comparator)

### ๓.๒.๖ ส่วนแปลงสัญญาณลอจิก

ส่วนนี้จะทำการแปลงสัญญาณที่ได้จากส่วน เปรียบเทียบศักดาไฟฟ้า (Comparator) ซึ่งมีทั้งหมดอยู่ ๑๐ ตัวให้มีสัญญาณลอจิกเป็น ๑ เพียงตัวเดียว เพื่อจะได้ส่งไปควบคุมวงจรหน่วย-เวลาและวงจรสวิตซ์อีกทีหนึ่งในขณะเดียวกันยังอาศัยการเปลี่ยนแปลงลอจิกในส่วนนี้ไปควบคุมสวิตซ์ทำ-หน้าที่ตัดต่อส่วนวงจร เบี่ยงถ่วงกระแส

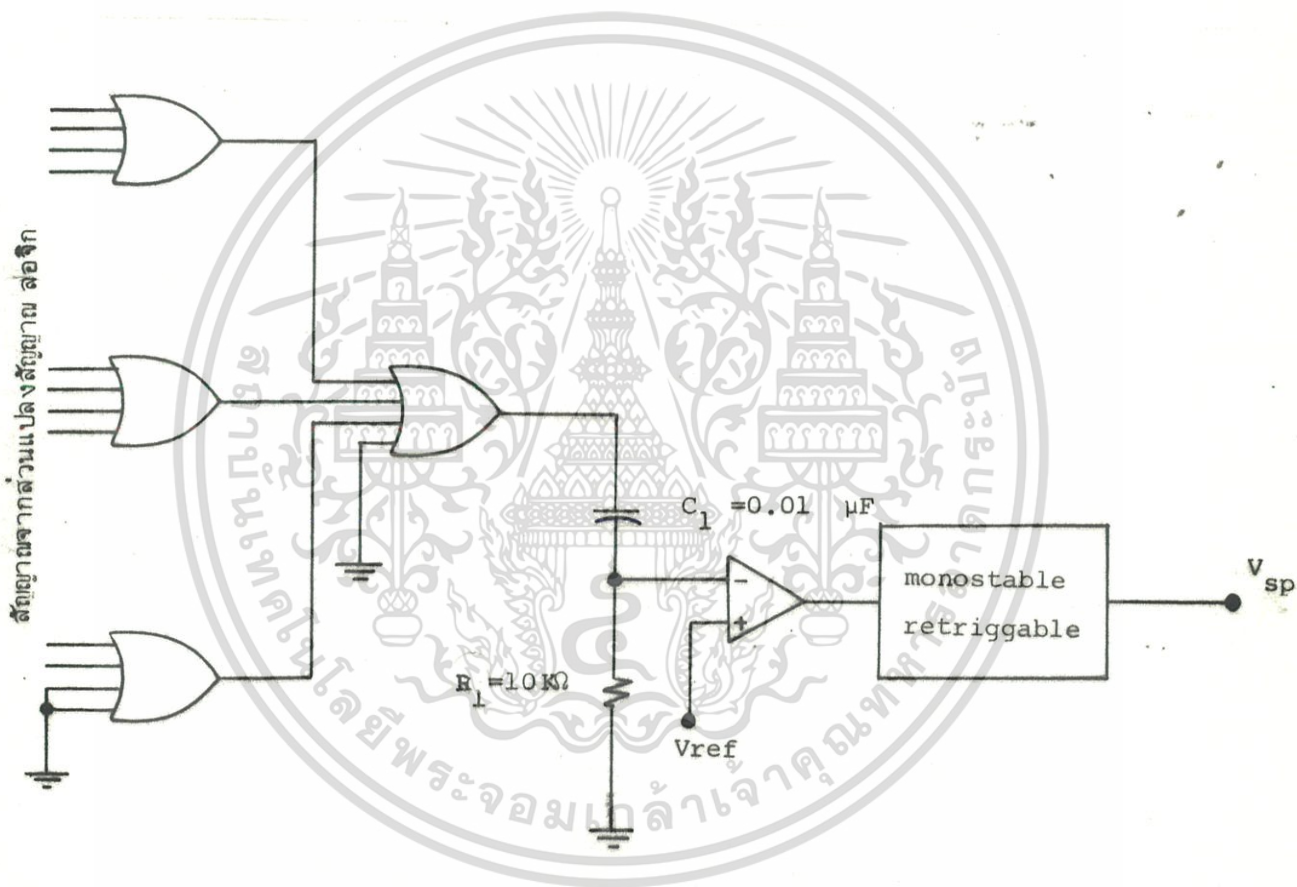


รูปที่ ๓.๗ แสดงวงจรส่วนแปลงสัญญาณลอจิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๓.๒.๗ ส่วนควบคุมวงจรเพียงถ่ายกระแส

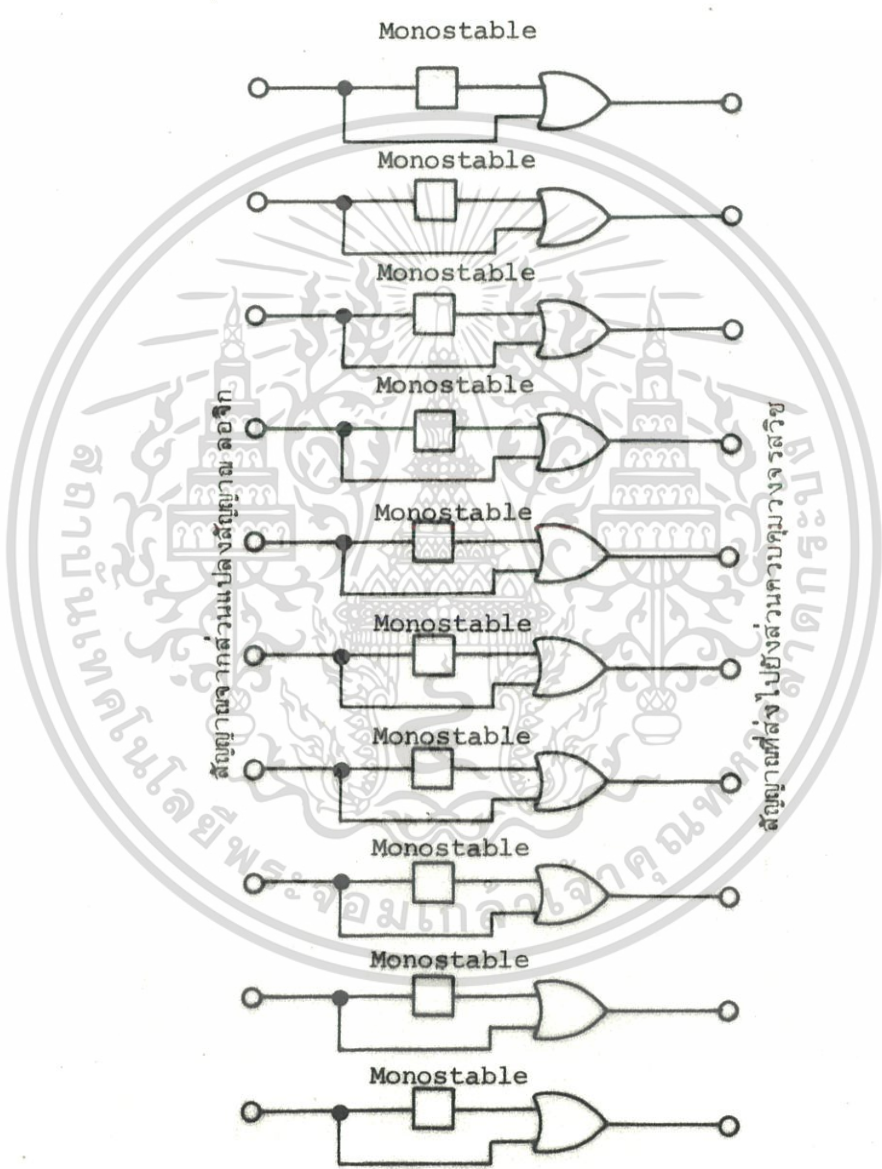
ส่วนนี้จะทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของลอจิกใน ๑๐ ช่วง โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกในช่วงใดช่วงหนึ่งใน ๑๐ ช่วง แล้ววงจรก็จะทำการต่อส่วนเพียงถ่ายกระแส และเมื่อเปลี่ยนแปลงอยู่ในสถานะใหม่เรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการตัดวงจรส่วนเพียงถ่ายกระแสออก ซึ่งมีวงจรแสดงดังรูปที่ ๓.๘



รูปที่ ๓.๘ แสดงส่วนควบคุมวงจรเพียงถ่ายกระแส

๓.๒.๘ ส่วนหน่วงเวลา (Delay time)

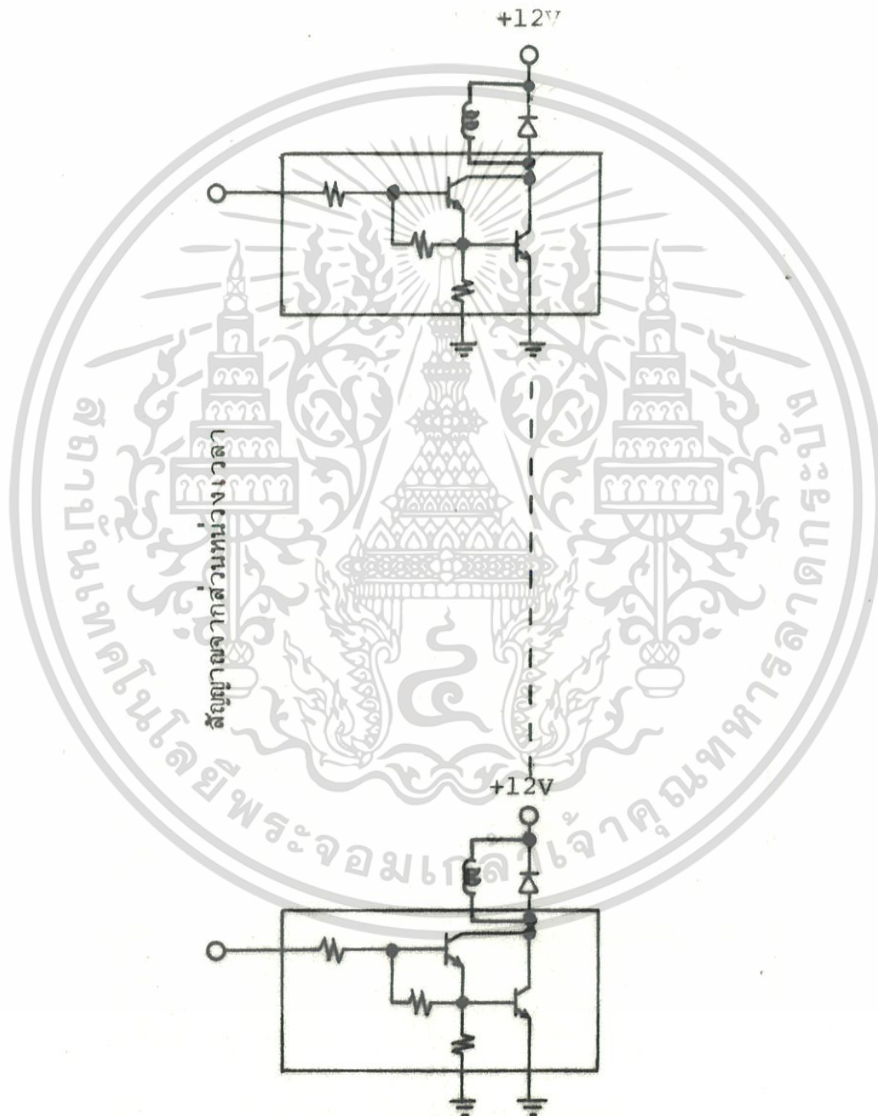
วงจรส่วนหน่วงเวลาจะทำหน้าที่หน่วงเวลาในการเปิดปิดสรีชของวงจรสรีชเพื่อให้วงจรสรีชสามารถทำงานให้สัมพันธ์กันได้ตาม(Timing Diagram)ที่ได้ตั้งไว้ในรูปที่ ๓.๒ เพื่อให้ศักดาไฟฟ้าทางออกมีค่าที่ต่อเนื่องและเป็นรูปขยายนัดลอกเวลา วงจรได้แสดงไว้ในรูปที่ ๓.๘



รูปที่ ๓.๘ แสดงส่วนวงจรหน่วงเวลา

### ๓.๒.๕ ส่วนวงจรสวิช (Switching Circuit)

วงจรสวิชจะทำการตัดต่อคอนแทกแม่เหล็กเพื่อทำการตัดต่อไฟฟ้าทางเข้าของหม้อแปลงทั้ง ๑๐ แท็บให้มีความสัมพันธ์กันต่อ Timing Diagram ที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งวงจรสวิชจะมีสัญญาณลจิกเป็น ๑ เมื่อวงจรสวิชทำงานและจะไม่ทำงานเมื่อได้รับสัญญาณลจิกเป็น ๐ วงจรแสดงไว้ดังรูปที่ ๓.๑๐

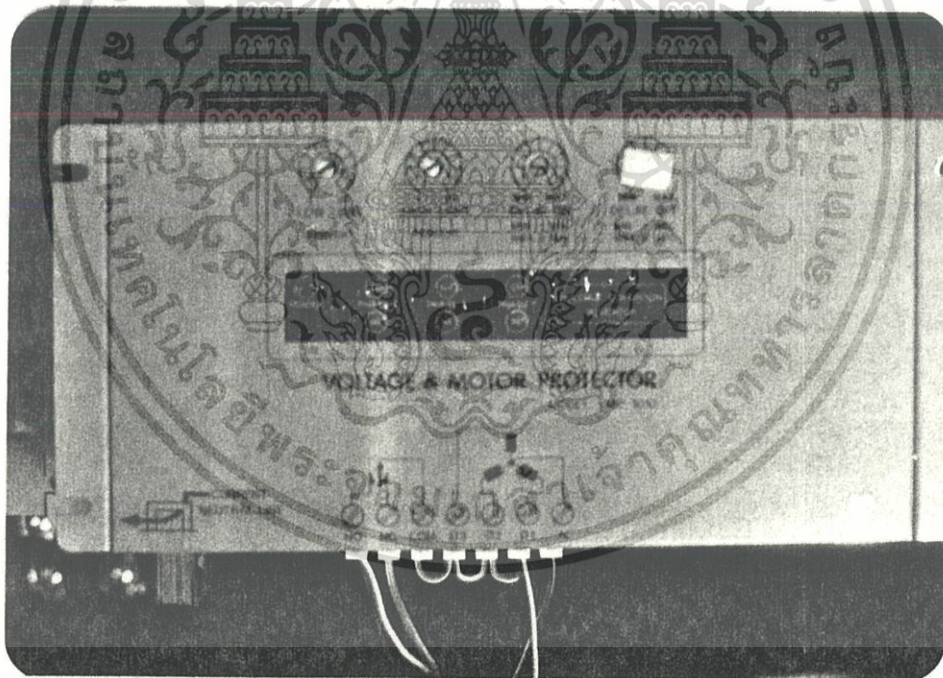


รูปที่ ๓.๑๐ แสดงส่วนวงจรสวิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๓.๒.๑๐ วงจรตรวจสอบความผิดปกติของศักดา

ส่วนนี้ได้ใช้เครื่องตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าและป้องกันมอเตอร์ ตามหนังสืออ้างอิงหมายเลข ๒ VMP-1005 ซึ่งผลิตขึ้นอยู่ก่อนมาทำการตรวจสอบความผิดปกติของศักดาไฟฟ้าโดยส่วนนี้จะทำการตรวจสอบกรณีไฟ ๓ เฟสเกิดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง หรือระดับศักดาไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเกินกว่าพิกัดเครื่อง ซึ่งออกแบบไว้ -๒๐ เปอร์เซ็นต์ ถึง +๑๐ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียหายขึ้นแก่เครื่องหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟจากเครื่องได้ เมื่อเกิดความผิดปกติดังกล่าวขึ้นก็จะส่งสัญญาณเตือนภัยให้แก่ผู้ใช้ได้รับทราบ และเมื่อตัดสัญญาณเตือนภัยแล้วก็จะตัดวงจรจ่ายไฟออกของเครื่องออกไปเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น เครื่อง VMP-1005



รูปที่ ๓.๑๑ แสดงเครื่อง VMP-1005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ๓.๓ หลักการออกแบบวงจรส่วนควบคุม

หลักการออกแบบวงจรส่วนควบคุมนี้ สามารถอธิบายเป็นส่วนๆ ตามแผนผังที่แสดงไว้ในรูปที่ ๓.๑

#### ๓.๓.๑ ส่วนลตรระดับศักดา

ส่วนลตรระดับศักดาตั้งที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ ๓.๒.๑ นั้น หม้อแปลงที่ใช้เป็นส่วนลตรระดับศักดาต้องออกแบบให้เหมาะสมในการใช้งาน โดยในการออกแบบต้องคำนึงถึงศักดาที่เปลี่ยนแปลงไปสูงสุดของพิกัด เครื่อง เป็นอันดับแรกเพื่อไม่ให้เกิดการอ้อมตัวของ เส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงก่อน ทั้งนี้เพื่อจะได้ศักดาทางออกของหม้อแปลงในส่วนลตรระดับศักดามีค่าเป็นเชิงเส้น ซึ่งเมื่อแปลงเป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจะได้เป็นเชิงเส้นด้วย สิ่งที่ต้องคำนึงต่อมาก็คือ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าขาเข้ากับศักดาไฟฟ้าขาออกต้องมีค่าที่เหมาะสมที่จะมาใช้กับวงจรส่วนควบคุมอื่นๆ ด้วย

การออกแบบในวงจรส่วนนี้ได้ออกแบบให้หม้อแปลง ยังไม่เกิดการอ้อมตัวที่ ๒๔๐ โวลต์ โดยภาวะปกติของไฟเฟลมมีค่าเป็น ๒๒๐ โวลต์ และให้ศักดาขาออกของหม้อแปลงมีค่าเป็น ๑๘ โวลต์ ที่ศักดาขาเข้ามีค่าเท่ากับ ๒๔๐ โวลต์ ซึ่งมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ ๑ เทสลา และขนาดพื้นที่ของแกนเหล็กมีขนาด  $๑.๕" \times ๑.๕"$  ดังนั้นเราสามารถคำนวณขนาดจำนวนรอบของขดลวดของด้านปฐมภูมิได้ดังนี้ คือ

จากกฎการเหนี่ยวนำศักดาของขดลวดเราได้ว่า

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 4.44 f N_1 B A \\
 E_1 &= \text{ศักดาไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ} && (\text{โวลต์}) \\
 f &= \text{ความถี่ของไฟฟ้าใช้} && (\text{HZ}) \\
 N_1 &= \text{จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ} && (\text{รอบ}) \\
 B &= \text{ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก} && (\text{เทสลา}) \\
 A &= \text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก} && (\text{ตร. เมตร})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore \text{จะได้ } N &= \frac{240}{4.44 \times 50 \times 1 \times 1.5 \times 1.5 \times 2.54 \times 2.54 \times 10^{-4} \times 0.88} \\
 &= 785 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในทางปฏิบัติจำนวนรอบของขดลวด = ๗๘๐ รอบ  
 และทางคานทุติยภูมิ = ๖๐ รอบ

### ๓.๓.๒ ส่วนเปลี่ยนศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนนี้จากรูปที่ ๓.๓ จะเป็นวงจรแปลงไฟศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ จากหม้อแปลงที่ทำการลดศักดาไฟฟ้ากระแสสลับลงมาเป็นศักดากระแสตรง และผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อทำให้ศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีความราบเรียบดี ซึ่งการออกแบบวงจรส่วนกรองความถี่นี้ใช้ค่าจากรางในภาคผนวก ผ. ๔ และส่วนสุดท้ายของวงจรส่วนนี้จะเป็นส่วนปรับอัตราขยายค่าของศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่แปลงมาได้ให้มีค่าเหมาะสมกับศักดาอ้างอิงที่ปรับไว้ เพื่อให้วงจรส่วนเปรียบเทียบสามารถทำงานตามช่วงที่ได้ออกแบบไว้ โดยการออกแบบในส่วนนี้ ได้ตั้งให้ศักดาไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่า ๑๑ โวลต์ในขณะที่ศักดาไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านขาเข้าเป็น ๒๕๐ โวลต์ และศักดาไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเป็น ๕ โวลต์เมื่อศักดาไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านขาเข้าเป็น ๑๘๐ โวลต์ โดยที่ค่าศักดาอื่นๆ ก็จะไปตามอัตราส่วนโดยศักดาไฟฟ้ากระแสตรงจะเปลี่ยนแปลงไปทุก ๐.๖ โวลต์ เมื่อศักดาไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านขาเข้าของ เครื่อง เปลี่ยนแปลงไป ๖ โวลต์

### ๓.๓.๓ ส่วนสร้างศักดาเปรียบเทียบ (Reference Voltage)

ในส่วนนี้ซึ่งแสดงดังรูปที่ ๓.๔ จะเป็นวงจรแบ่งศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่คงที่ โดยในวงจรได้ใช้แหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ ๑๒ โวลต์ ขนาด ๑๐ A-H และปรับค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้โดยใช้ความต้านทานปรับค่า ๒ ตัวคือ  $VR_1$  และ  $VR_2$  เป็นตัวปรับค่าศักดาไฟฟ้า ซึ่งจะได้อ้างอิงค่าที่ขึ้น ๒ ค่า คือค่าหนึ่งจะเป็นค่าสูงสุด และอีกค่าหนึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดแล้วผ่านวงจรบัฟเฟอร์ การออกแบบในส่วนนี้จะต้องทำการปรับค่าศักดาอ้างอิงทั้ง ๒ ค่านี้ให้สัมพันธ์กับส่วนหน้าคือส่วนแปลงไฟ ศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นในส่วนนี้จึงได้ตั้งค่าของศักดาอ้างอิงสูงสุด ( $V_H$ ) ไว้ที่ ๑๑ โวลต์ และศักดาอ้างอิงต่ำสุด ( $V_L$ ) ไว้ที่ ๕ โวลต์ ซึ่งศักดาอ้างอิงทั้ง ๒ ค่านี้จะถูกทำการแบ่งออกเป็น ๑๐ ช่วงเท่าๆ กันในส่วนของการแบ่งระดับศักดาซึ่งเป็นภาคถัดไป เมื่อส่งระดับศักดาอ้างอิงที่ได้สร้างขึ้นทั้ง ๑๐ ค่าไปยังส่วนเปรียบเทียบ (Comparator)

### ๓.๓.๔ ส่วนแบ่งระดับศักดา (Voltage divider)

ส่วนแบ่งระดับศักดานี้การออกแบบได้ใช้ค่าความต้านทานค่าความที่เท่ากัน ๔ ตัว ต่ออนุกรมกันโดยจุดปลายของค่าความต้านทาน ๔ ตัวที่ต่ออนุกรมนี้ จะต่อเข้ากับส่วนสร้าง ศักดาเปรียบเทียบ โดยปลายหนึ่งจะต่อเข้ากับศักดาอ้างอิงสูงสุดคือ ๑๑ โวลท์ และอีกปลาย หนึ่งต่อเข้ากับศักดาอ้างอิงต่ำสุดคือ ๕ โวลท์ ซึ่งศักดาไฟฟ้าอ้างอิงนี้ก็จะถูกแบ่งออกเป็น ๑๐ ค่าด้วย โดยจะมีค่าต่างกันเท่ากับ ๐.๖ โวลท์ในแต่ละช่วงและระดับศักดาที่ได้นี้ จะต่อกันกับขา บวกของตัวเปรียบเทียบ (comparator) เพื่อทำการเปรียบเทียบระดับศักดาระดับศักดาที่ได้ นี้กับศักดาที่ได้จากส่วนแปลงไปศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรงต่อไป

### ๓.๓.๕ ส่วนเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้า (Comparator)

ส่วนเปรียบเทียบนี้การออกแบบได้ใช้ไอซีที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบ ทำการ เปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากส่วนแปลงไปศักดาไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า เป็นศักดาไฟฟ้ากระแส- ตรงโดยใช้ไอซีตัวเปรียบเทียบทั้งหมด ๑๐ ตัว โดยลักษณะการเปรียบเทียบออกแบบไว้เป็น ลักษณะ positive compare คือสัญญาณส่วนที่แปลง เป็นระดับศักดาไฟฟ้ากระแสตรงจาก ศักดาไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าจะเข้าขาลบของไอซีตัวเปรียบเทียบทั้ง ๑๐ ตัว ส่วนสัญญาณของ ระดับศักดาไฟฟ้าอ้างอิงที่สร้างไว้ทั้ง ๑๐ ระดับจะถูกป้อนเข้าขาบวกของไอซีตัวเปรียบเทียบ เมื่อสัญญาณที่เข้ามา เปรียบเทียบมีค่าสูงกว่าศักดาอ้างอิงของไอซีเปรียบเทียบตัวไหน ก็จะได้ สัญญาณทางขาออกของไอซีเป็น ๑ ส่วนที่ต่ำกว่าก็จะมีสัญญาณขาออกเป็น ๐ ซึ่งสัญญาณจากส่วนนี้ จะเห็นได้ว่ายังไม่สามารถที่จะนำไปควบคุมวงจรสวิชได้ เพราะจะมีสัญญาณออกเป็น ๑ อยู่หลาย- ช่วง จึงจำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณออกที่ได้ให้มีสถานะเป็น ๑ เกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวใน จำนวนทั้งหมดทั้ง ๑๐ ช่วง ดังนั้นสัญญาณในส่วนนี้จะถูกนำไปแปลงให้มีลักษณะของสัญญาณตาม ที่ต้องการในส่วนแปลงสัญญาณลอจิกต่อไป

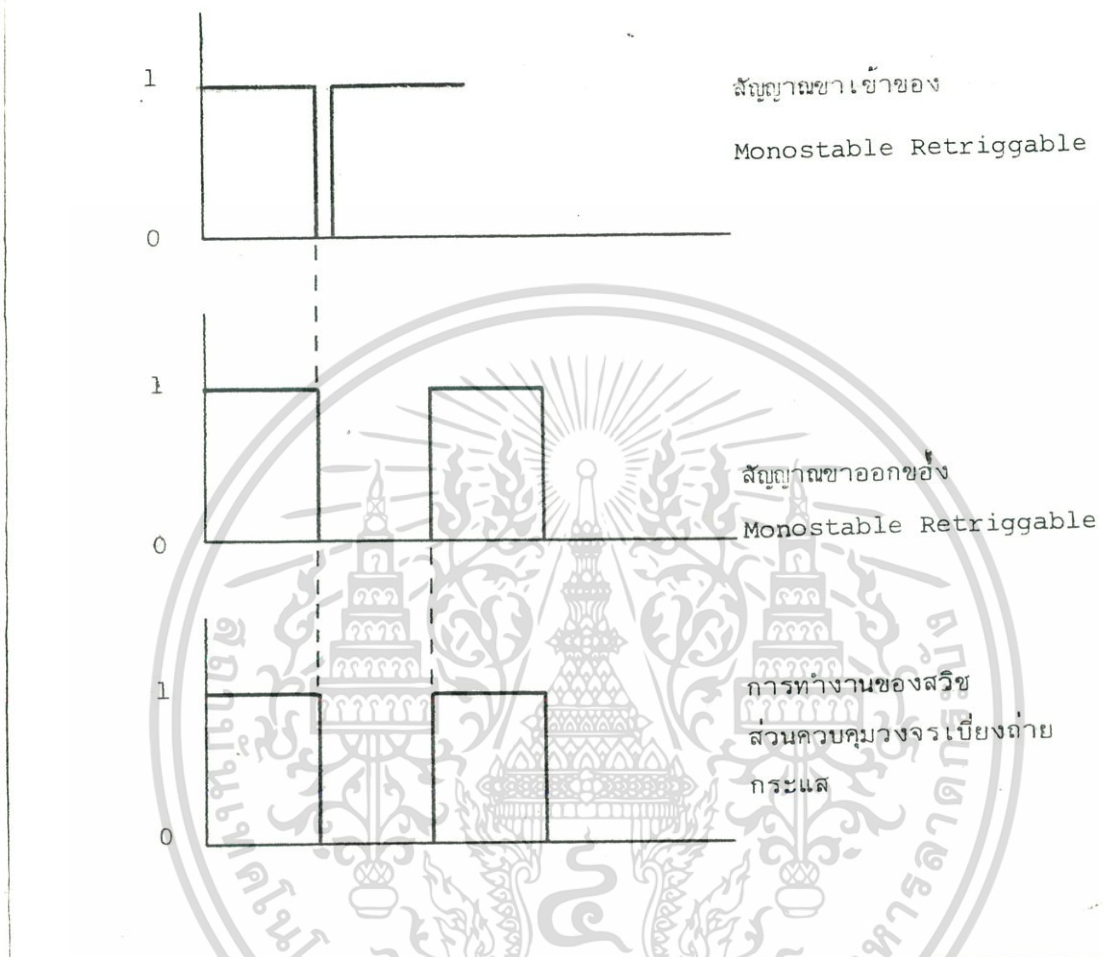
### ๓.๓.๖ ส่วนแปลงสัญญาณลอจิก

วงจรถูกออกแบบโดยใช้วงจรถูกนำมาช่วยในการแปลงสัญญาณที่ได้จากตัวเปรียบเทียบ (comparator) ให้มีสัญญาณทางออกเป็น ๑ เพียงช่วงเดียวใน ๑๐ ช่วง ซึ่งวงจรถูก

เกทที่ใช้ได้ใช้ Exclusive-OR Gate เป็นตัวแปลงสัญญาณ โดยวงจร Exclusive-OR Gate นี้จะทำการรวมสัญญาณขาออกจากตัวเปรียบเทียบทั้ง ๑๐ ตัว ซึ่งเมื่อสัญญาณออกที่ได้ออกมาเหมือนกันคือ เป็น ๐ ทั้งคู่ หรือ ๑ ทั้งคู่ สัญญาณขาออกของวงจร Exclusive-OR Gate ก็จะเป็น ๐ ส่วนที่มีสัญญาณขาเข้าของ Exclusive-OR Gate มีค่าต่างกันคือ ๐ กับ ๑ แล้วก็จะได้สัญญาณขาออกจาก Exclusive-OR Gate เป็น ๑ ซึ่งจากวงจรจะเห็นได้ว่า สัญญาณออกจากรวม Exclusive-OR Gate นี้จะเป็น ๑ เพียงช่วงเดียว คือช่วงของ ไอซีตัวเปรียบเทียบสุดท้ายที่มีสัญญาณเปรียบเทียบต่ำกว่าสัญญาณระดับตักดาอ้างอิง ซึ่งให้ สัญญาณขาออกเป็น ๐ ตัวสุดท้ายกับไอซีตัวเปรียบเทียบตัวแรกที่มีสัญญาณเปรียบเทียบสูงกว่าสัญญาณ ระดับตักดาอ้างอิง ซึ่งให้สัญญาณขาออกเป็น ๑ ตัวแรก สัญญาณขาออกจากตัวเปรียบเทียบ ช่วงอื่นซึ่งนอกจากช่วงนี้แล้ว เมื่อผ่านวงจร Exclusive-OR Gate แล้วก็จะได้สัญญาณขาออก จากตัว Gate เป็น ๑ หมด

### ๓.๓.๗ ส่วนควบคุมวงจรเบี่ยงถ่ายกระแส

ส่วนนี้การออกแบบได้อาศัยวงจร OR Gate ในการรวมสัญญาณที่ได้จากวงจร Exclusive-OR Gate โดยใช้ OR Gate ๔ อินพุต ๔ ตัว ซึ่งตัว OR Gate นี้จะให้สัญญาณขาออกเป็น ๑ เสมอเมื่ออินพุตขาใดขาหนึ่งเข้ามาเป็น ๑ ดังนั้นในสภาวะปกติ คือขณะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแท็บของหม้อแปลงไป สัญญาณขาออกของ OR Gate ก็จะเป็น ๑ เสมอแต่ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงแท็บนั้น สัญญาณจากรวม Exclusive OR Gate จะมีการเปลี่ยนสถานะเป็น ๑ ไปยัง Exclusive-OR Gate อีกตัวหนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยน สถานะของสัญญาณที่เข้า OR Gate ไปนี้จะมีช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งเกิดสถานะที่สัญญาณ ทางออกของ OR Gate ตกลงเป็น ๐ ทำให้เกิด pulse เล็กๆ ขึ้น จากวงจร จะเห็นได้ว่ามีที่ขาสัญญาณออกของตัว OR Gate จะมีค่าของ C และ R ต่อไว้ ซึ่งค่า R C นี้จะช่วยในการขยายช่วง pulse เพื่อจะได้นำสัญญาณ pulse นี้ไปใช้ในการ trigger วงจรหน่วงเวลาที่ใช้ไอซี Monostable Retriggerable ต่อไป ซึ่งสัญญาณจาก ไอซี Monostable Retriggerable นี้จะไปควบคุมวงจรเบี่ยงถ่ายกระแส ตามแผนผังเวลาที่แสดงไว้ดังรูปที่ ๓.๑๒



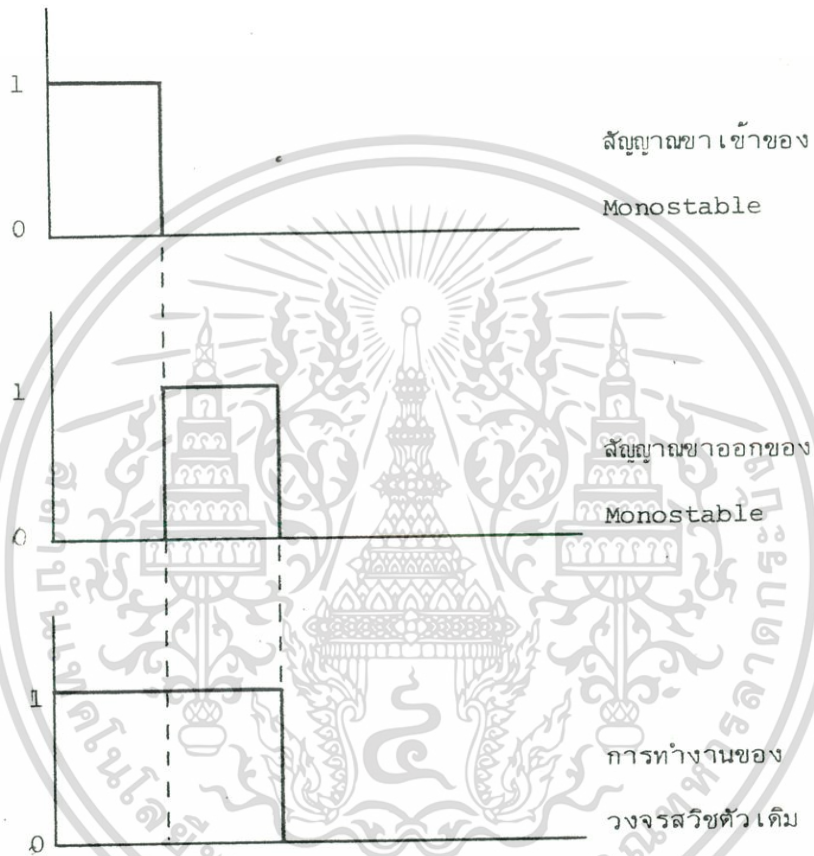
รูปที่ ๓.๑๒ แสดงแผนผังเวลาการทำงานของสัญญาณควบคุมสวิชส่วน เบี่ยงถ่ายกระแส

จากแผนผังเวลาการทำงานจะเห็นว่าไอซี Monostable จะควบคุมให้สวิช ซึ่งคร่อมส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสอยู่ให้คายออก จนกว่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในสภาวะเรียบร้อยแล้ว จึงต่อสวิชคร่อมเข้าส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งทำให้สวิชส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสมีความแน่นอนสูง

### ๓.๓.๔ ส่วนหน่วงเวลา

วงจรส่วนนี้ได้ออกแบบใช้ไอซี Monostable คู่กับวงจรเกทซึ่งใช้ไอซี

OR Gate 2 input โดยสัญญาณที่ได้จาก Exclusive-OR Gate ในภาคหน้าจะส่งสัญญาณ ๑ มาเพียงช่วงเดียวในช่วงที่ทำงาน ซึ่งในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าขาเข้าไปเกินช่วงนั้น ส่วน Exclusive-OR Gate ก็เปลี่ยนสถานะของสัญญาณ ๑ ไปช่วงที่ตรงกับศักดาที่เปลี่ยนแปลงไปใหม่ ซึ่งสถานะของสัญญาณขาออกของ Exclusive-OR ตัวเดิมก็จะเปลี่ยนเป็น ๐ ทันที ถ้าเป็นเช่นนี้แล้วจะทำให้สัญญาณรูปคลื่นขายน้ขาดช่วงไป วงจรหน่วงเวลานี้จะช่วยในการหน่วงสถานะสัญญาณ ๑ ของ Exclusive-OR ตัวเดิมไว้จนกว่าคอนแทกแม่เหล็กทำการต่อแท็บที่สูงหรือต่ำกว่าเดิม ๑ แท็บต่อเข้าเรียบร้อยแล้ว จึงจะทำการคายคอนแทกแม่เหล็กที่ต่อแท็บเดิมอยู่ออก ในการหน่วงเวลานี้ต้องอาศัยวงจร OR Gate ซึ่งตัว OR Gate จะทำการออร์สัญญาณที่ได้จากไอซี Monostable กับสัญญาณที่ได้จาก Exclusive-OR Gate ดังนั้นขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับศักดาไฟจะมีสัญญาณ ๑ เกิดขึ้นที่ตัว OR Gate พร้อมกัน ๒ ตัว โดยตัวแรกที่แสดงสถานะ ๑ เดิมจะเป็น ๑ ต่อไปตามเวลาที่ตั้งไว้ที่ตัวไอซี Monostable ซึ่งตั้ง Timer ไว้ให้มีค่าเท่ากับ ๒๐ ms ในขณะที่สัญญาณจาก Exclusive-OR Gate เป็น ๐ ส่วนตัวที่ ๒ จะมีสถานะเป็น ๑ โดยสัญญาณจาก Exclusive-OR Gate ได้มีสถานะ ๑ ซึ่งทำให้ OR-Gate มีสถานะเป็น ๑ จากที่กล่าวมาแล้วสามารถแสดงแบบแผนเวลาการทำงานของวงจรได้ดังรูปที่ ๓.๑๓



รูปที่ ๓.๑๓ แสดงแผนผังเวลาการทำงานของส่วนหน่วงเวลา

### ๓.๓.๔ ส่วนวงจรสวิตช์(Switching Circuit)

ในส่วนนี้ของวงจรได้ออกแบบโดยใช้ไอซีที่ทำหน้าที่เป็น Switching

โดยเมื่อมีสัญญาณ ๑ มาจาก OR Gate ภาคสุดท้าย ตัว Switching ก็จะทำการต่อไฟเลี้ยง

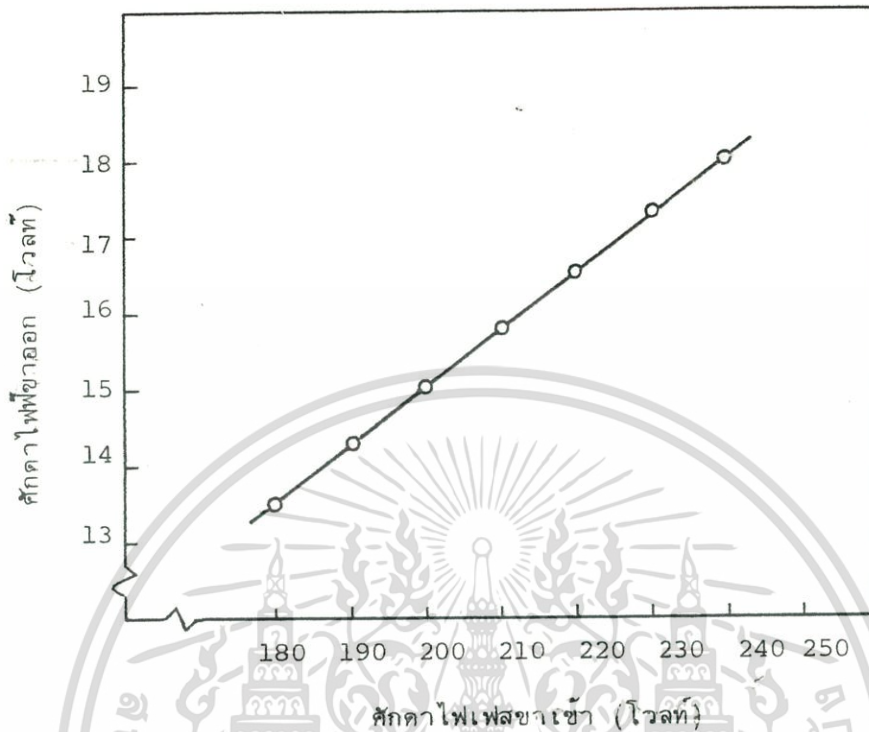
ซึ่งเป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ๑๒ โวลต์ เข้าคอยส์ของรีเลย์ รีเลย์ก็จะทำงานคือคอนแทก NO ของรีเลย์จะปิด ซึ่งเมื่อคอนแทก NO ของรีเลย์เปิด ไฟเลี้ยงคอยส์ของคอนแทกแม่เหล็กอีกเส้นหนึ่งซึ่งต่อรอยูที่ขา Common ของรีเลย์จะถูกต่อเข้าคอยส์ของคอนแทกแม่เหล็กซึ่งคอนแทกแม่เหล็กก็จะทำการต่อศักดาไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าแท็บของหม้อแปลงตามส่วนควบคุมวงจร

### ๓.๔ การทดสอบ

การทดสอบวงจรส่วนควบคุมได้ทำการตรวจสอบการทำงานของวงจรส่วนควบคุมทั้งหมด โดยทำการเปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า แล้วตรวจสอบการทำงานทุกๆ ส่วนของวงจร ซึ่งได้ผลดังนี้

#### ๓.๔.๑ ส่วนลดระดับศักดา

ทำการปรับศักดาไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าให้เปลี่ยนแปลงในช่วง ๑๔๐-๒๔๐ โวลต์ ปรากฏว่าหม้อแปลงที่ทำการลดระดับศักดานี้ใช้งานได้ดี โดยเมื่อศักดาไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้ามีค่าต่ำสุดตามทีออกแบบไว้คือ ๑๔๐ โวลต์จะให้ศักดาขาออกทางด้านขดทุติยภูมิเป็น ๑๒.๖ โวลต์ และเมื่อเปลี่ยนศักดาไฟฟ้ากระแสสลับให้มีค่าสูงสุด คือที่ ๒๔๐ โวลต์ จะได้ศักดาขาออกทางด้านขดทุติยภูมิเป็น ๑๘ โวลต์ ซึ่งตลอดช่วงของการเปลี่ยนแปลงคือตั้งแต่ ๑๔๐ โวลต์ถึง ๒๔๐ โวลต์นี้ ให้ค่าศักดาขาออกทางด้านขดลวดทุติยภูมิที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแสดงว่าหม้อแปลงที่ออกแบบใช้งานได้ดีซึ่งผลการทดสอบได้ดังรูปที่ ๓.๔



รูปที่ ๓.๑๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคักตาซาเข้า และคักตาซาออก  
ของหม้อแปลงส่วนลดคักตา

๓.๕.๒ ส่วนเปลี่ยนคักตาไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นคักตาไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนนี้ได้ทำการทดสอบเปลี่ยนคักตาไฟฟ้าซาเข้าจาก ๑๕๐ โวลท์ถึง ๒๕๐ โวลท์  
ไป เมื่อปรับค่าไป ปรากฏว่าสามารถปรับค่าคักตาไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ค่าตามที่ต้องการแบบไว้  
โดยที่คักตาไฟฟ้ากระแสสลับซาเข้ามีค่า ๑๕๐ โวลท์จะมีค่าคักตาไฟฟ้ากระแสตรงเป็น ๕ โวลท์  
และขณะที่ปรับคักตาไฟฟ้ากระแสสลับซาเข้าเป็น ๒๕๐ โวลท์ ค่าคักตาไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้  
เท่ากับ ๑๒ โวลท์ด้วย

### ๓.๔.๓ ส่วนสร้างคักดาเปรียบเทียบและแบ่งระดับคักดา

ทั้ง ๒ ส่วนนี้ได้ทำการทดสอบควบคุมคู่กัน โดยทำการปรับค่าความต้านทานทั้ง ๒ ตัวในวงจรแล้วทำการวัดค่าคักดาทั้ง ๒ ค่า ปรากฏว่าได้คักดาส่วนเปรียบเทียบสูงสุดเท่ากับ ๑๑ โวลท์ และคักดาต่ำสุดเท่ากับ ๕ โวลท์ตามทีออกแบบ และเมื่อทำการวัดคักดาทั้ง ๑๐ ช่วง ผลการวัดปรากฏว่าทุกช่วงห่างกันประมาณ ๐.๖ โวลท์ตามทีออกแบบ

### ๓.๔.๔ ส่วนเปรียบเทียบคักดาไฟฟ้า

ส่วนนี้ได้ทำการทดสอบการทำงานของตัวเปรียบเทียบ โดยการปรับคักดาไฟฟ้า กระแสสลับขาเข้าไปตั้งแต่ ๑๕๐ โวลท์ถึง ๒๕๐ โวลท์ แล้วทำการวัดสัญญาณขาออกของตัวเปรียบเทียบแต่ละตัว ได้ผลการทดสอบดังนี้คือ

ตัวเปรียบเทียบ

ระดับคักดาไฟฟ้าขาเข้าที่ตัวเปรียบเทียบเริ่มให้สัญญาณขาเข้าเป็น ๑

ตัวที่ ๑	๑๗๐ โวลท์
ตัวที่ ๒	๑๘๔ โวลท์
ตัวที่ ๓	๑๙๐ โวลท์
ตัวที่ ๔	๑๙๖ โวลท์
ตัวที่ ๕	๒๐๒ โวลท์
ตัวที่ ๖	๒๐๘ โวลท์
ตัวที่ ๗	๒๑๖ โวลท์
ตัวที่ ๘	๒๒๓ โวลท์
ตัวที่ ๙	๒๓๐ โวลท์
ตัวที่ ๑๐	๒๓๖ โวลท์

### ๓.๔.๕ ส่วนแปลงสัญญาณลอจิก

การทดสอบได้ทำการวัดสัญญาณลอจิกที่ขาออกทุกตัวของ Exclusive-OR Gate ขณะที่เปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าไปจาก ๑๘๐-๒๔๐ โวลท์ ซึ่งทำควบคู่ไปกับ ส่วนเปรียบเทียบสัญญาณ ผลการทดสอบปรากฏว่าได้ผลตามที่ออกแบบ คือมี Exclusive-OR Gate เพียงตัวเดียวในทั้งหมด ๑๐ ตัวที่ให้สัญญาณทางขาออกเป็น ๑ โดยผลการทดสอบ ได้ผลดังนี้

Exclusive-OR Gate

ระดับศักดาที่เริ่มให้สัญญาณลอจิกเป็น ๑

ตัวที่ ๑	๑๗๐	โวลท์
ตัวที่ ๒	๑๘๔	โวลท์
ตัวที่ ๓	๑๙๐	โวลท์
ตัวที่ ๔	๑๙๖	โวลท์
ตัวที่ ๕	๒๐๒	โวลท์
ตัวที่ ๖	๒๐๘	โวลท์
ตัวที่ ๗	๒๑๖	โวลท์
ตัวที่ ๘	๒๒๓	โวลท์
ตัวที่ ๙	๒๓๐	โวลท์
ตัวที่ ๑๐	๒๓๖	โวลท์

### ๓.๔.๖ ส่วนควบคุมวงจรเบี่ยงถายกระแส

ทำการทดสอบโดยการ เปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้าให้ เปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างช้าๆ และเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแท็ปไปที่ละ ๑-๒ แท็ป หรือที่ละ ๘-๘ แท็ป ปรากฏทำการจับสัญญาณไฟที่ป้อนแก่คอยล์ของรีเลย์และสัง เกตุจากหน้าคอนแทคของรีเลย์ ปรากฏว่าการทำงานทำไปตาม Timing Diagram ที่ได้ตั้งไว้ทุกประการ

### ๓.๔.๗ ส่วนหน่วง เวลาและส่วนวงจรสวิช

ในส่วนนี้ได้ทำการทดสอบ เช่นเดียวกับส่วนควบคุมวงจรเบี่ยงถ่ายกระแส แล้วทำการวัดสัญญาณที่ไอซี Monostable ปรากฏว่ามีความกว้างของ pulse เกิดขึ้นมีความกว้างประมาณ ๒๐ ms และทำการต่อคอนแทกแม่เหล็กที่ใช้งานทุกตัวเข้ากับรีเลย์เหมือนขณะใช้งานของเครื่อง ทำการต่อลวดวงจรคอนแทกด้านหนึ่งของคอนแทกแม่เหล็กทั้ง ๑๐ ตัว อีกด้านหนึ่งทำการวัดโอห์ม ซึ่งการวัดจะวัดคอนแทกแม่เหล็ก ๓ ตัวที่อยู่ติดกันสลับไปที่ละตัวจนครบ ปรากฏว่าไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงไปอย่างรวดเร็วหรืออย่างช้าๆ ในช่วงพักที่คอนแทกแม่เหล็กนี้ทำงาน จะมีคอนแทกแม่เหล็ก ๒ ตัวที่ต่อกันเท่านั้นที่เข็มของโอห์มมิเตอร์แสดงว่ามี การต่อถึงกัน แสดงว่าคอนแทกแม่เหล็กตัวที่ติดกันขณะที่มีการเปลี่ยนแท็บไปนั้น เวลาการทำงานมีคาบกันอยู่ และขณะเดียวกันตัวที่ไม่ได้อยู่ติดกัน จะไม่มีโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันเลย ซึ่งการทำงานของวงจรมีส่วนนี้สามารถทำงานตามแผนผังเวลาที่ต้องการ แสดงว่าเครื่องจะสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยรูปคลื่นขายนจะไม่มีการขาดช่วง และไม่มีการลัดวงจร เกิดขึ้นในขณะที่เปลี่ยนแท็บ

## บทที่ ๔

## ผลการทดลอง

## ๔.๑ บทนำ

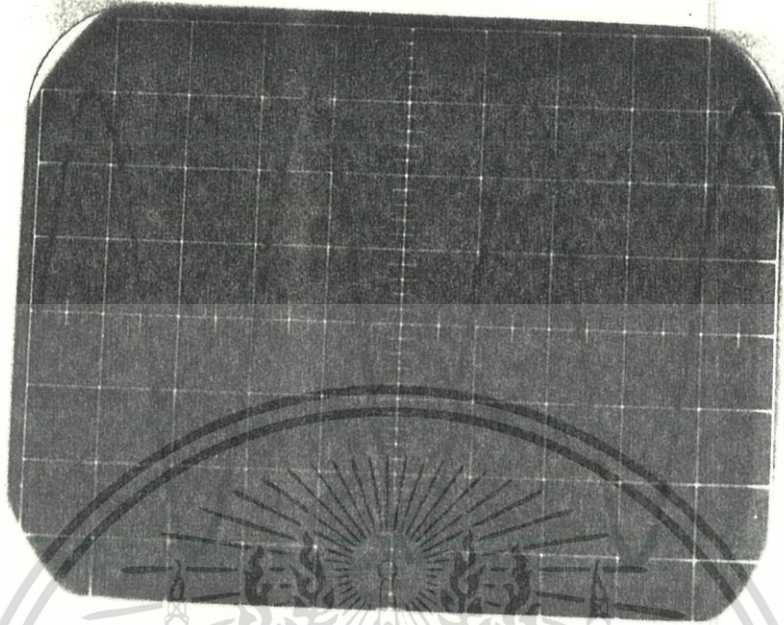
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลองคุณสมบัติของ เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น ซึ่งจะเป็นการทดสอบผลการทำงาน และคุณสมบัติต่างๆ ของส่วน Main Power Circuit และส่วนควบคุม ที่นำมาประกอบกัน เข้า เป็น เครื่อง เรียบร้อยแล้ว

## ๔.๒ การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ส่วนรวม

การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ส่วนรวมนี้ ได้ทำการทดสอบทั้งในภาวะไร้อโหลดและมีโหลด ซึ่งจะแยกหัวข้อในการอธิบายดังนี้

## ๔.๒.๑ การทดสอบขณะไร้อโหลด

การทดสอบขณะไร้อโหลดได้ทำการทดสอบโดยป้อนค่าศักดาไฟฟ้าจากแวนแอก ๓ เฟส เพื่อทดสอบการทำงานของแท็ปต่างๆ โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้าแบบช้า ๆ ทีละแท็ป (ศักดาระหว่างเฟสเท่ากับ ๑๐ โวลท์) และแบบต่อเนื่องอย่างรวดเร็วทีละหลายแท็ป (ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงศักดาระหว่างเฟสไปประมาณ ๗๐-๘๐ โวลท์) ได้เวลาตอบสนองเข้าสู่ภายใน ๑.๕ เปอร์เซ็นต์ของพิกัดศักดาต่ำกว่า ๑ วินาที และเวลาการเปลี่ยนแปลงรวมเมื่อนับส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสทำงานเสร็จสิ้นไม่เกิน ๒ วินาที ทำการจับลักษณะของศักดาไฟฟ้าทางออกของ เครื่องด้วยสโคป ปรากฏว่าได้รูปครี้นขายนี้อต่อเนื่อง และไม่มีส่วนผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นที่ส่งมาตามสายส่ง ดังรูปที่ ๔.๑ และ ๔.๒

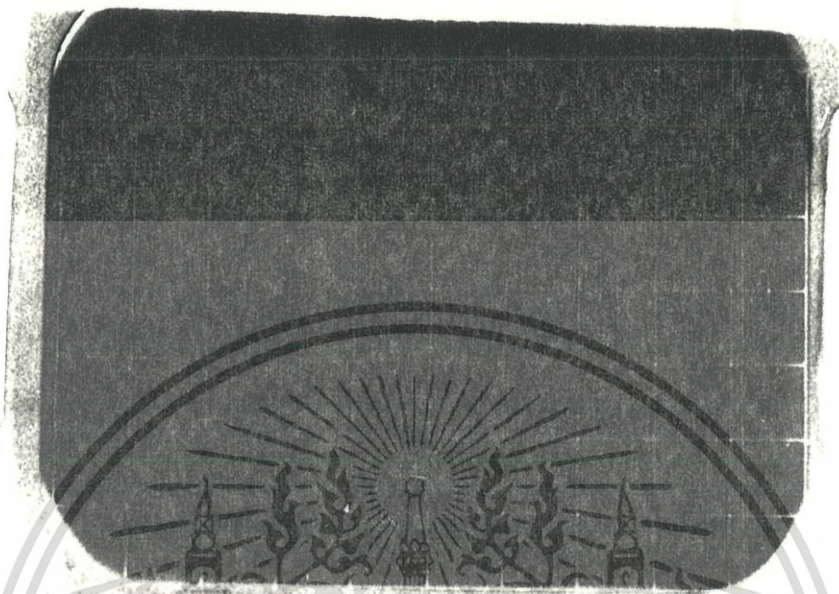


รูปที่ ๔.๑ แสดงลักษณะของศกดาไฟฟ้าขาเข้า



รูปที่ ๔.๒ แสดงลักษณะของศกดาไฟฟ้าขาออกขณะไร้อโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



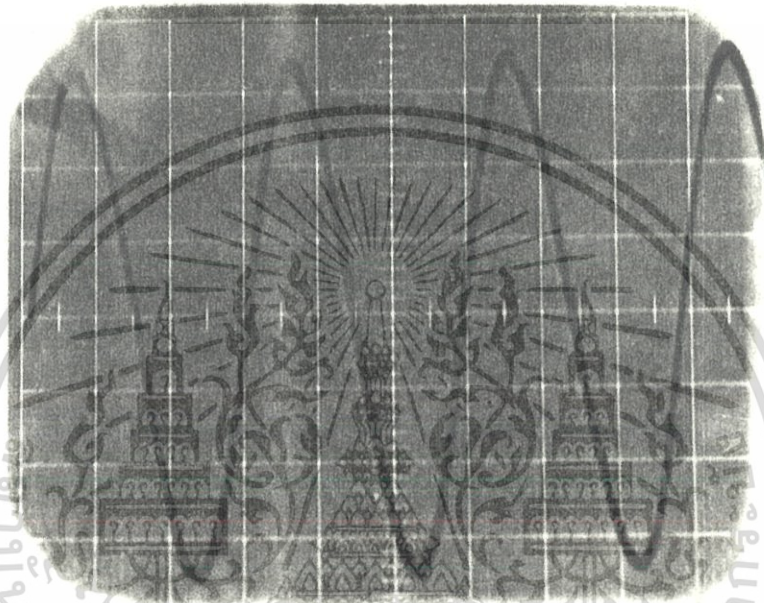
รูปที่ ๔.๓ แสดงลักษณะของศักดาไฟฟ้าขณะ เปลี่ยนแท็บ

การที่ทำการทดสอบขณะไร้โหลดในการเปลี่ยนแปลงแท็บนี้ เพื่อความแน่นอนในการทำงานทดสอบขณะมีโหลดต่อไป การทดสอบทำการเปลี่ยนแท็บจำนวน ๑๐๐ ครั้งภายในเวลา ๑ ชั่วโมง

๔.๒.๒ การทดสอบขณะมีโหลด

การทดสอบขณะมีโหลด ทำการทดสอบขณะมีโหลดเริ่ม ๘๐ เปอร์เซ็นต์ โหลดที่ ๕๐ แอมป์ โดยอาศัยโหลดเป็นค่าอินดักแตนซ์ และคาปาซิแตนซ์ ทั้งนี้เพราะไม่สามารถหาโหลดในห้องปฏิบัติการเป็นค่าความต้านทานถึง ๓๒ KW ได้ ทำการทดสอบอย่างละ ๒ ชั่วโมง โดยมีการทดสอบการทำงานเปลี่ยนแท็บ ต่อเนื่องครั้งละ ๒ แท็บ โดยใช้วงจรค่าความต้านทานต่ออนุกรมก่อนเข้าอุปกรณ์ เพื่อลดค่าศักดาไฟฟ้าบ้อนเข้าชั่วคราว เมื่อตรวจสอบลักษณะของศักดาไฟฟ้าทางออกปรากฏว่าลักษณะรูปคลื่นของศักดาคงเป็นรูปชายนโดยไม่มีความผิดเพี้ยน

ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๔.๔ และมีความต่อเนื่องไม่ขาดหายผลของเวลาในการตอบสนองของเครื่อง  
เท่ากับขดลวดรีโพลด



รูปที่ ๔.๔ แสดงลักษณะของคักดาไฟฟ้าขดลวดรีโพลด

๕๐ เฟอร์เซนต์ ของพิกัดเครื่อง

๔.๒.๓ การทดสอบ ๑๒๕ เฟอร์เซนต์ โพลดใช้โพลดเป็นค่าคาปาซิแตนซ์

แก๊สเพาเวอร์แฟลคเตอร์ขนาด ๑๐ KVAR จำนวน ๕ ตัวมีค่ากระแสประมาถ ๗๕ แอมป์ ทำการ  
ทดสอบทั้งไว้ต่อเนื่อง ผลการทดสอบเครื่องทำงานได้ดีแต่การเพิ่มของอุณหภูมิของหม้อแปลงวัด  
ภายนอกผิวได้ ๘๕-๙๐ องศาเซนติเกรด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงหยุดทำการทดสอบ  
ภายหลังจากทดสอบ ๒ ชั่วโมงวงจรส่วนอื่นๆ ยังปฏิบัติการได้ดี มีการเปลี่ยนแท็บไป ๑ แท็บ  
๑ ครั้ง โดยที่สภาวะระดับคักดาไฟฟ้าป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงในช่วงที่นิคมอุตสาหกรรมซึ่งอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณใกล้เคียงกับการทดสอบ เลิกงาน

#### ๔.๓ การทดสอบหาประสิทธิภาพรวมของระบบ

การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบได้ทำการทดสอบ เดิน เครื่องขณะโหลด เต็มพิกัด ทำการวัดค่ากำลังที่ป้อน เข้าและกำลังที่จ่ายออกจาก เครื่องชั่วคราว ซึ่งค่าที่วัดได้มีดังนี้คือ

ศักดาไฟฟ้าระหว่าง เฟสขา เข้าขณะทำการวัด เท่ากับ	๓๕๐	โวลท์
กระแสขา เข้าขณะทำการวัด เท่ากับ	๕๕	แอมป์
ศักดาไฟฟ้าระหว่าง เฟสขาออกขณะทำการวัด เท่ากับ	๓๕๐	โวลท์
กระแสขาออกขณะทำการวัด เท่ากับ	๖๒	แอมป์

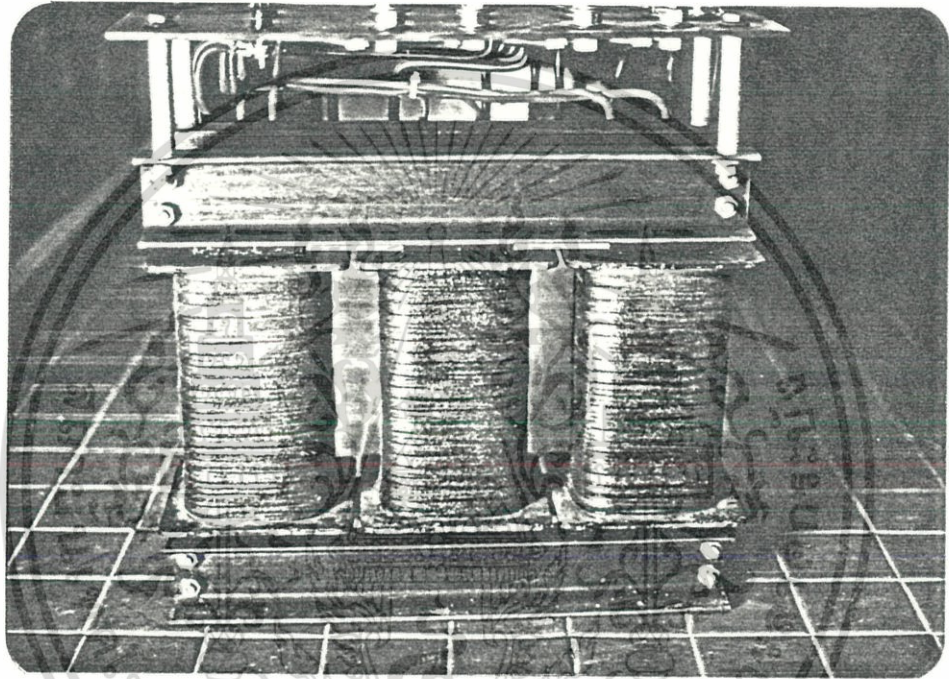
เมื่อดำเนินการหาประสิทธิภาพโดยคิด เพาเวอร์แฟคเตอร์ขาเข้า เท่ากับขาออก แล้วจะได้ประสิทธิภาพของระบบ เท่ากับ ๕๗.๖๖ เปอร์เซ็นต์

ซึ่งค่าที่ได้ดังกล่าวไม่สามารถตัดสินได้ว่าถูกต้อง ๑๐๐ เปอร์เซ็นต์ เพราะความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้วัด จึงทำการทดสอบโดยการหาจากค่าสูญเสียในส่วนต่างๆ ซึ่งค่าการสูญเสียใหญ่อยู่ในวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ซึ่งได้ทำการทดสอบและคำนวณไว้แล้วในตอนต้นโดยมีค่าประมาณ ๕๖-๕๗ เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าอุปกรณ์มีค่าประสิทธิภาพในการทำงานจริงประมาณ ๕๖-๕๗ เปอร์เซ็นต์ ขณะโหลดเต็มที่

#### ๔.๔ การทดสอบหาความแน่นอนในการทำงานของอุปกรณ์

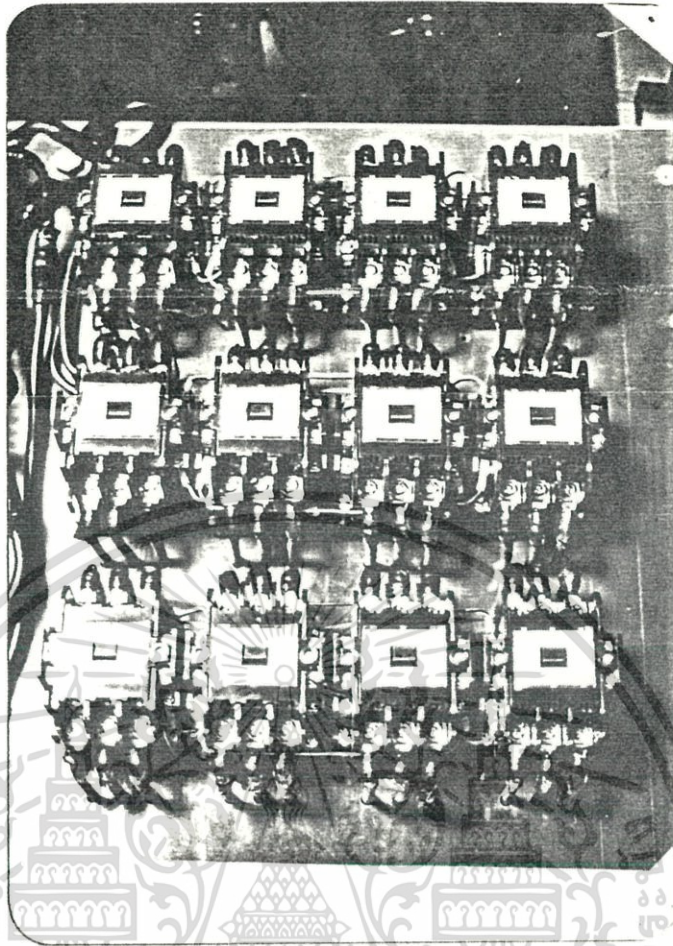
เมื่อทำการทดสอบให้หัวข้อ ๔.๒ และ ๔.๓ ได้ทำการทดสอบโดยใช้คาปาซิทีฟโหลด จำนวนเต็มพิกัด ๔๐ KVAR ทำการทดสอบต่อเนื่องที่เต็มพิกัดกระแสเป็นเวลา ๓ เดือน เพื่อหาความแน่นอนของอุปกรณ์สภาพการใช้งานจริง มีการเปลี่ยนแท็บเฉลี่ยวันละ ๓-๔ ครั้ง ครั้งละ ๑-๒ แท็บจากระดับของศักดาไฟฟ้าของระบบที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลง และมีการทำงานของระบบ เดือนของเครื่อง VMP-1005 ๑๐ ครั้ง เพราะมีช่วงเฟสหายไปของระบบป้อนเข้าของสายจ่าย ซึ่งจากผลการทดสอบในส่วนรวมทั้งหมดแล้วมีความมั่นใจว่าอุปกรณ์สามารถทำหน้าที่ตามที่ได้พัฒนาและออกแบบได้อย่างมีความแน่นอนสูง อุณหภูมิที่ผิวของหม้อแปลงมีขนาด

ประมาณ ๖๕-๗๕ องศาเซนติเกรด ซึ่งอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมในการทดสอบสูงสุด ๓๘ องศาเซนติเกรด



รูปที่ ๔.๕ แสดงส่วนของหม้อแปลงที่ใช้ในเครื่องต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

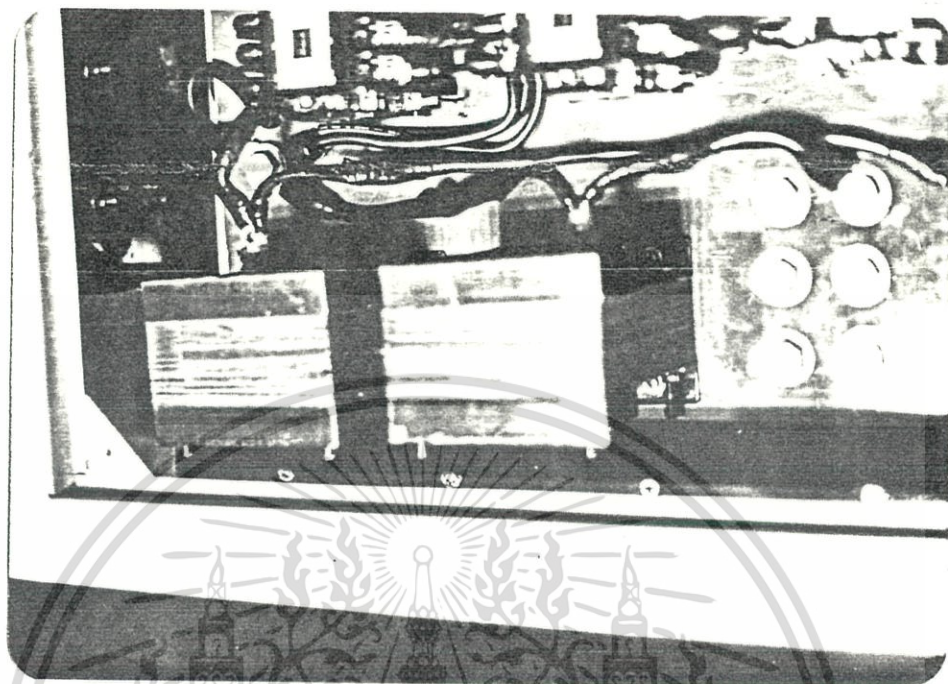


รูปที่ ๔.๖ แสดงส่วนของคอนแทคแม่เหล็กที่ใช้ในเครื่องต้นแบบ

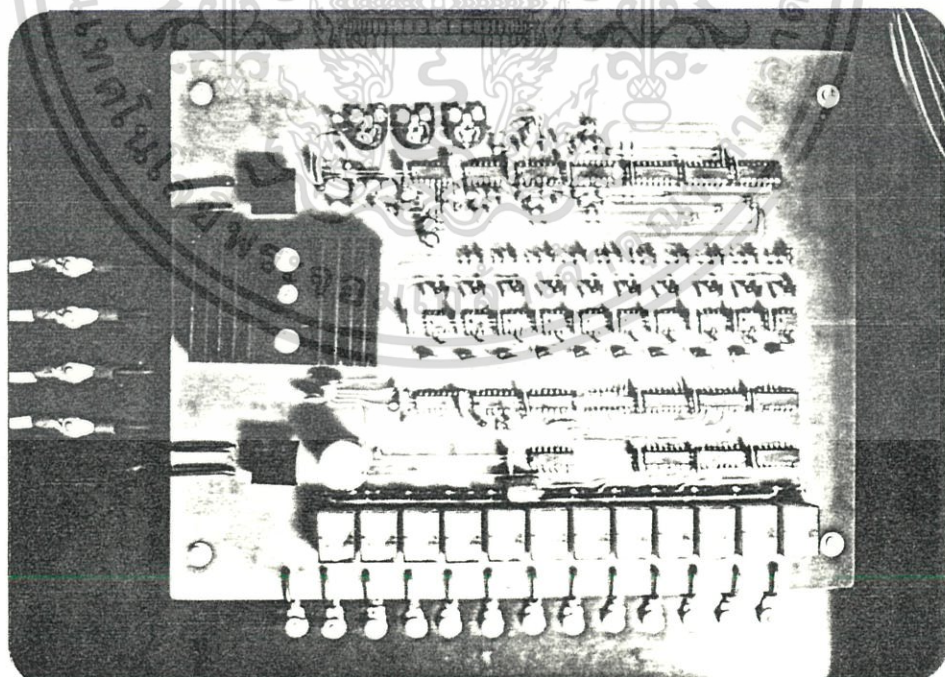


รูปที่ ๔.๗ แสดงส่วนเชิงถ่ายกระแสตัวความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

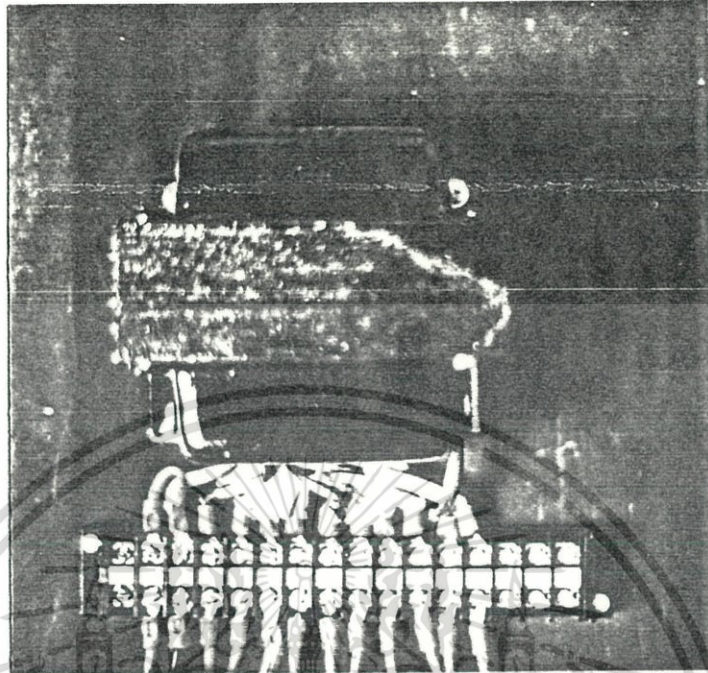


รูปที่ ๔.๘ แสดงส่วนเบี่ยงถ่ายกระแสรีแอกทีฟ

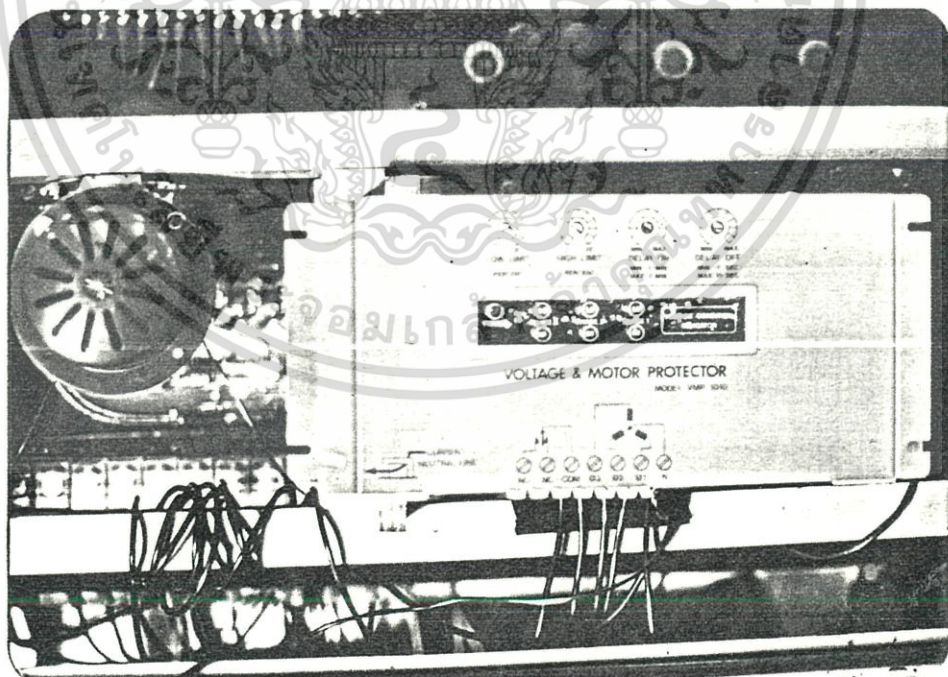


รูปที่ ๔.๙ แสดงส่วนวงจรควบคุมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

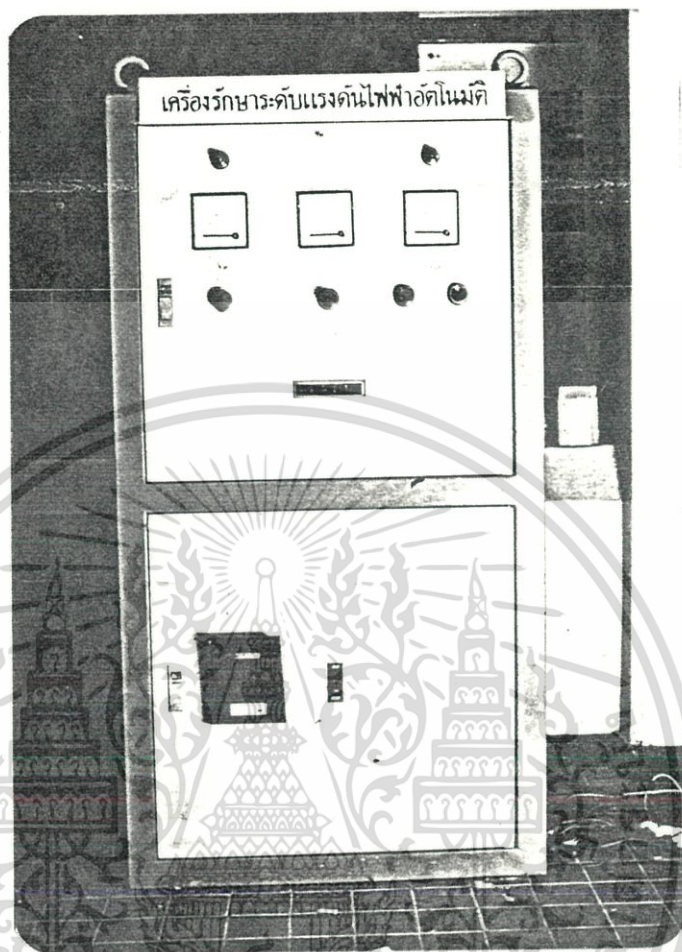


รูปที่ ๔.๑๐ แสดงส่วนป้อนศักดาไฟฟ้าคงที่แก่คอยล์ของคอนแทคแม่เหล็ก



รูปที่ ๔.๑๑ แสดงส่วนเตือนความผิดปกติของ เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๔.๑๒ แสดงถึง เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ ๕

## บทสรุป

จากที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดปัญหาต่างๆ ในการที่จะให้วงจรทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ นั้นมีความยุ่งยากพอสมควร และต้องใช้ความละเอียดอ่อนในการปรับแต่ง เวลาควบคุมยากมาก ส่วนของต้นกำลังคือส เต็ปป์ทรานส์ฟอร์ เมอร์ที่นำมาใช้ก็ต้องทำการออกแบบสร้างขึ้นเอง เพราะไม่มีขายในท้องตลาด ซึ่งการคำนวณและออกแบบได้กล่าวไว้ในบทที่ ๒ และเครื่องที่สร้างขึ้นได้ทำการทดสอบ full load คือ ๔๐ KVA, ๓๑, ๖๑ Amp. ไว้ต่อเนื่อง ๓ เดือน ปรากฏว่าได้ผลดีและเครื่องมีประสิทธิภาพดีและมีประสิทธิภาพของเครื่องทั้งหมดอยู่ในช่วง ๘๖-๘๗ เปอร์เซ็นต์ อุปกรณ์ดังกล่าวน่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตที่ต้องการความแน่นอนของศักดาไฟฟ้าระหว่างขบวนการผลิตสูงต่อไป

เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติที่สร้างขึ้นมีข้อดี และข้อเสียดังนี้

ข้อดี

๑. สามารถขยายขนาดพิกัดของเครื่องได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ส่วนประกอบของเครื่องมีขนาดพิกัดการทำงานสูงและหาได้ง่ายตามท้องตลาด
๒. มีช่วงกว้างในการทำงาน ซึ่งสามารถออกแบบตามสภาวะของศักดาไฟฟ้าในท้องที่ที่ใช้งาน
๓. มีความแน่นอนในการทำงาน ทั้งนี้เนื่องจากส่วน Power Switch ใช้คอนแทกแม่เหล็กซึ่งมีการทำงานที่แน่นอน
๔. ค่าบำรุงรักษาต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากส่วนที่ต้องทำการบำรุงรักษาส่วนใหญ่คือการตรวจสอบหน้าคอนแทกของคอนแทกแม่เหล็ก และสามารถซ่อมได้ง่าย หรือเปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อเกิดการชำรุดเสียหาย
๕. การปรับค่าศักดาไฟฟ้าเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการขาดช่วง และไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นในรูปคลื่นขายนของศักดาไฟฟ้า

๖. มีความคงทนในการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากส่วนต้นกำลังและส่วนสวิตซ์ในการเปลี่ยนแท็บซึ่งเป็นต้นกำลังในการจ่ายไฟออก ประกอบด้วยหม้อแปลง และ คอนแทคแม่เหล็ก ซึ่งสามารถต่อการกระชาก และการเกินขนาดฟักัดของกระแสได้นาน
๗. มีราคาถูกกว่า เครื่องปรับแรงดันชนิดอื่นที่มีอยู่ในท้องตลาด
๘. ประสิทธิภาพของระบบจะสูง ทั้งนี้เนื่องจากส่วนสูญเสียในระบบส่วนใหญ่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ซึ่งมีค่าต่ำ

### ข้อเสีย

๑. ต้องหมั่นตรวจและทำความสะอาดหน้าคอนแทคแม่เหล็ก
  ๒. ความไวในการตอบสนอง ถูกจำกัดด้วยความไวการทำงานของคอนแทคแม่เหล็ก
- คุณสมบัติของ เครื่องต้นแบบ
- |                      |  |
|----------------------|--|
| ขนาดฟักัดของ เครื่อง | - ๓ เฟส, ๔๐ KVA, ๖๑ แอมป์  |
| ระบบไฟเข้า           | - ๓ เฟส ๓๘๐ โวลท์ ช่วงกว้างที่สามารถปรับได้ของระดับศักดาไฟเข้า ๓๒๐-๔๒๐ โวลท์ ๓ สายหรือ ๕ สาย ๕๐ เฮิซ   |
| ระบบไฟออก            | - ๓๘๐ โวลท์ $\pm ๑.๕$ เปอร์เซนต์ ลักษณะศักดาไฟฟ้ามีความต่อเนื่อง และไม่มีควมผิดเพี้ยน  |
| ระบบป้องกัน          | - มีระบบเตือนภัย เมื่อมีการหายของไฟเฟสใดเฟสหนึ่งหรือระดับศักดาไฟฟ้าเข้าต่ำกว่า ๓๒๐ หรือสูงกว่า ๔๒๐ โวลท์ และเครื่องจะทำการตัดไฟจ่ายออกจากเครื่องเองหลังจากเกิดภาวะของไฟผิดปกติภายในเวลาประมาณ ๒๐-๔๐ ms |
| ความไวในการตอบสนอง   | - ด้านศักดาไฟทางออกจะสามารถปรับเข้าภาวะปกติ ๓๘๐ โวลท์ $\pm ๑.๕$ เปอร์เซนต์ ภายในช่วงเวลาต่ำกว่า ๒ วินาทีต่อช่วงความแตกต่าง ๘๐ โวลท์ของศักดาไฟเข้า  |

## หนังสืออ้างอิง

๑. ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ "เครื่องจักรไฟฟ้า ๑ วงจรแม่เหล็กและเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ๒๕๒๓.
๒. เรืองพจน์ ภัคตุรงค์, และคณะฯ "เครื่องตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าและป้องกันมอเตอร์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๔, เล่ม ๓, หน้า ๑๑-๓, ๒๕๒๔.
๓. Member of the staff of the Department of Electrical Engineering M.I.T. "Magnetic Circuit and transformers" E.E.Staff M.I.T. Copyright 1943.
๔. Nippon Steel Corporation "Orientcore Orientcore-Hi-B" Cat No. EXE 320 Sep.1975.
๕. A.Dymkov "Transformer Design" Mockba, English translation 1975.
๖. Engence R. Hnatek "Application of Linear Integrated Circuits" John Wiley & Sone. 1976.
๗. Graneme I,G. "Operational Amplifiers Design and Application" Mc.Graw-Hill, 1971.
๘. National Semiconductor "Linear Data Book" 1978.
๙. National Semiconductor "CMOS Data Book" 1978.
๑๐. National Semiconductor "Interface Deta Book" 1978.
๑๑. Alan J. Chapman "Heat fransfer" Collier Macmillan Publishers London, Third Edition, 1974.
๑๒. M. Paul Hagelbery "Physics" Prentece-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jerscy, 1973.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Control circuit  
Auxiliary contacts

Control circuit

	LC1 contactors						CP1 contactors		
	D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB

Rated voltage at Vn

Minimum/maximum rated values

The contactor will function correctly at 85% of its nominal voltage and its coil will operate indefinitely at 110% nominal voltage without damage.

	Frequency (1)	LC1 contactors						CP1 contactors		
		D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB
• AC	V	12 - 660						—		
	Hz	50/60						—		
• DC without economy resistor	V	—						12 - 600		
• AC rectified/DC with economy resistor	V	—						—		

Average coil consumption

	Inrush	50Hz	LC1 contactors						CP1 contactors		
			D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB
• AC	Sealed	VA	73 - 80	—	100	—	220	—	—	—	—
		60 Hz VA	73 - 80	—	100	—	220	—	—	—	—
	Sealed	50Hz VA	8	—	9	—	22	—	—	—	—
		60Hz VA	8	—	9	—	22	—	—	—	—
		Watts	1.8 - 2.7	—	2.5 - 3.5	—	6 - 10	—	—	—	
• Heat dissipated	Inrush and sealed	Watts	—	—	—	—	—	14	—	23	
• DC without economy resistor	Inrush	VA	—	—	—	—	—	—	—	—	
• AC rectified	Sealed	Watts	—	—	—	—	—	—	—	—	
• DC with economy resistor	Inrush	Watts	—	—	—	—	—	—	—	—	
	Sealed	Watts	—	—	—	—	—	—	—	—	

Cos  $\theta$  or sealed time constant ( $\frac{L}{R}$ )

	Cos $\theta$	LC1 contactors						CP1 contactors		
		D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB
• AC	0.3	—	0.4	—	0.3	—	—	—	—	—
• DC without economy resistor	L/R : ms	—	—	—	—	—	60	—	80	—
• AC rectified/DC with economy resistor	L/R : ms	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Average operating time at Vn (in milliseconds)

The operating time depends on the type of electromagnet fitted to the contactor and its method of control.  
The closing time is measured from the moment the control supply is switched on to the time that contact is just made by the main poles.

		ms	LC1 contactors						CP1 contactors		
			D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB
• AC	Closing	15-22	—	18-25	—	14-21	—	—	—	—	
	Opening	5-15	—	7-19	—	6-16	—	—	—	—	
• DC without economy resistor	Closing	—	—	—	—	—	72-102	—	40-55	—	
	Opening	—	—	—	—	—	24-33	—	30/45 - 35/50	—	
• AC rectified/DC with economy resistor	Closing	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	Opening	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Note: The arcing time depends upon the circuit controlled by the poles. For 3 phase current, in all nc time of the contactor and the arcing time.

Mechanical life (millions of operations)

	LC1 contactors						CP1 contactors		
	D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB
• AC	Millions	—	—	20	—	—	—	—	—
• DC without economy resistor	Millions	—	—	—	—	—	40	—	20
• AC rectified/DC with economy resistor	Millions	—	—	—	—	—	—	—	—

Auxiliary contacts. Instantaneous and time delay

	Type	Instantaneous LA1-D, Time delay LA2, LA3-D for LC1							Instantaneous ZC1-GR				
		D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB			
• AC (2)	Rated power	1 million operations	—	48	110/127	220	380	—	500	—	48	110/127	
		3 million operations	—	300	500	600	520	—	430	—	450	900	
		10 million operations	—	160	300	330	300	—	260	—	140	300	
		10 million operations	—	70	100	110	100	—	80	—	55	100	
	Maximum making/breaking capacity	VA	—	3000	7000	12000	15000	—	13000	—	4000	8000	
• DC (3)	Rated power	1 million operations	Watts	120	90	75	68	—	61	—	250	150	100
		3 million operations	Watts	70	50	38	33	—	28	—	60	40	30
		10 million operations	Watts	25	18	14	12	—	10	—	—	—	—
		Maximum making/breaking capacity	Watts	1000	700	400	260	—	220	—	2000	800	350

- (1) For frequencies greater than those shown, up to approximately 400 Hz, use the rectified AC control.
- (2) Circuit such as the electromagnet of a contactor with:— inrush  $\cos \theta \approx 0.7$ , sealed  $\cos \theta \approx 0.4$ .  
If occasional breaking of the inrush current is necessary, ensure that the inrush power does not exceed the maximum making/breaking capacity.
- (3) Circuit such as electromagnet coils without an economy resistor; time constant varying from 20ms for 5W to 200ms for 100W or more.

For information on LC1-B contactors not given on pages 2/30 to 2/32 please consult your local sales office.

CN1 contactors						CN2 contactors			LC1-B contactors			CV3 contactors		
DB	EB	FC	GC	HC	JC	FC	GC	HC	BJ	BK	BL	MB	PB	RB

Conforming to UTE NFC 63110 these contactors make a clean closure when the voltage build-up is slow. This clean closure eliminates welding and contact damage.

24-600 50/60		24-660 50/60		24-660 50/60		—		—		—		50/60		—	
20/440		22/600		DC 12-600V - AC rectified 48-440		DC 12-600V-AC rectified 48-440		—		—		24-600		—	

80	128	380	500	810	980	380	500	810	—					
100	180	455	600	996	1230	455	600	996	—					
8.5	12.5	36.5	46	60	75	36.5	46	60	—					
9	16.5	45	58	75	100	45	58	75	—					
2.5	4	13.5	16.5	24	36	13.5	16.5	24	—					

—		—		—		—		—		—		80-105		—	
—		220/290		280/370		450/600		440/610		220/290		280/370		450/600	
—		7.5/10.5		9.5/15		13/23		15/20		7.5/10.5		9.5/15		13/23	
85		130		170/250		220/350		320/480		440/700		170/250		220/350	
5.5		4.7		10/25		10/30		11/23		16/24		10/25		10/30	
—		—		—		—		—		—		—		300 - 1100	
—		—		—		—		—		—		—		5 - 40	
—		—		—		—		—		—		—		250 - 950	
—		—		—		—		—		—		—		5 - 40	

0.3 - 0.35		0.35 - 0.50		0.35 - 0.50		—		—		—		—		—	
< 5		< 5		< 5		—		—		—		180		—	
—		—		—		—		—		—		10		10	

The opening time is measured from the moment the coil supply is switched off to the separation of the main poles.

22 - 35	15 - 23	40 - 85	30 - 80	30 - 55	24 - 40	40 - 85	30 - 80	30 - 55	—						
8 - 15	5 - 18	10 - 20		5 - 12		10 - 20		—		—		260		—	
—		—		—		—		—		—		160/100		—	
15 - 20		30 - 50		40 - 60		30 - 50		—		—		100/150		—	
8 - 12		10 - 20		10 - 20		10 - 20		—		—		Breaking: AC 50/100 DC/AC rectified 20/40		—	

cases, arcing time is less than 10ms. The load is isolated from the supply after a time equal to the sum of opening

20		10		5		10		—		—		10		—	
1.2		3		1		3		—		—		3		—	

and ZC1-GP for CP1, CN1, CN2		Instantaneous ZC4-GM for CV1, CV3				Time delay ZC2-GG for CV1, CV3											
220	380	—	500	—	48	110/127	220	380	—	500	—	48	110/127	220	380	—	500
1200	1200	—	1200	—	900	2200	4000	4000	—	4000	—	500	1200	1300	1300	—	1300
300	300	—	300	—	800	1300	1500	1500	—	1500	—	450	700	750	750	—	750
110	110	—	110	—	450	500	500	500	—	500	—	120	175	200	200	—	200
8000	8000	—	8000	—	5000	14000	23000	35000	—	45000	—	4000	12000	17000	22000	—	25000
220	—	440	—	24	48	110	220	—	440	—	24	48	110	220	—	440	—
70	—	70	—	300	280	250	250	—	230	—	150	125	115	100	—	80	—
25	—	25	—	115	105	95	90	—	85	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	45	40	35	33	—	30	—	45	37	32	20	—	9	—
200	—	200	—	5000	6000	1600	800	—	400	—	300	240	200	190	—	180	—

Power circuit: poles

		LC1 contactors							CP1 and CN1 contactors		
		D09	D12	D16	D25	D40	D63		CB	DB	EB
1. Current rating for open-type contactor used on AC3 duty	A	9	12	16	25	40	63	A	12	25	50
Working conditions or certain standards may reduce these values											
2. Maximum rated supply frequency											
• Normal use	Hz	25 - 400 Hz						Hz	25 - 400 Hz		
• Restricted use	Hz	≤ 1,000 Hz						Hz	≤ 1,000 Hz		
3. Rated voltage for 3 phase circuit such as that of a motor stator	V	660						V	500		
A contactor can be relied upon to break a circuit if the voltage is not greater than 110% of the rated voltage.											

• Our contactors can be used for higher voltages in certain cases, such as rotor circuits. (Please see relevant literature)

Various limiting factors depending upon the application and, in some cases, the availability of spare parts are detailed in the selection guide and in specific literature.

4. Rated insulation voltage	IEC.158.1 BS.775	V	660				IEC.158.1 BS.775	500		
The rated insulation voltage is based on the insulation distance, measured according to standard specifications. Since these specifications are not the same for all standards a contactor may have several insulation voltages.	UTE NFC 20040 Category C	V	500				UTE NFC 20040 Category C	500		
	VDE.0110 group C	V	660				VDE.0110 group C	500		
	CSA C22.2 No.14	V	600				CSA C22.2 No. 14	600		

5. Making capacity r.m.s. current		A	250	450	1000		A	250	480	650	
The making capacity is independent of the voltage. (1).											

6. Breaking capacity r.m.s. current	380V	A	250	450	1000	380V	250	480	650		
	500V	A	175	450	1000	500V	150	480	650		
	660V	A	85	120	180	400	630	660V	-	-	-
This depends upon the effectiveness of the arc shield in reducing the contactor's arcing current. It is expressed in amps and decreases as the voltage increases $1 \cos \theta = 0.35$ .											

7. Overload currents	t1 = 3min	A	35	55	105	125	t1 = 3 min	35	55	110	
	t2 = 1min	A	56	80	160	180	t2 = 1 min	50	80	150	
	t3 = 10s	A	105	156	320	350	t3 = 10s	80	150	280	
	t4 = 5s	A	140	200	430	440	t4 = 5s	110	200	370	
	t5 = 2s	A	195	300	610	620	t5 = 2s	152	280	500	
	t6 = 1s	A	250	400	800	800	t6 = 1s	200	360		
	Permissible current through the poles for a time "t", provided no current was passing up to the time of overload for at least 4 x t1 Occasionally currents 20% in excess of these values (or if the current is not zero prior to the overload) may be carried without damage (2).										

8. Impedance of the poles	mΩ	2.5	2	1.5	mΩ	2.5	2	1.5
---------------------------	----	-----	---	-----	----	-----	---	-----

(1) The making and breaking capacities are given for the constant r.m.s. current left after the decay of transients. The contacts can therefore sustain an asymmetric current with a peak twice as large.

(2) If, during operation, there is a risk of currents greater than the making and breaking capacity flowing through the poles, the contactors must be protected against short circuits by fuses or some other safety device. The safety co-ordination "S" (Standard UTE 63810) is assured if, for voltages < 500V, the contactor is associated with an overload relay (with entirely thermal action), < maximum AC3 duty current rating, and used with aM or gT fuses indicated on the relay.

For information on LC1-B contactors not given on pages 2/30 to 2/32 please consult your local sales office.

	CN1 contactors				CN2 contactors				LC1-B contactors			CV3 contactors		
	FC	GC	HC	JC	FC	GC	HC		BJ	BK	BL	MB	PB	RB
A	80	125	200	260	80	125	200	A				1000	1500	2000
Hz	25 - 400 Hz < 1,000 Hz				60 Hz AC < 250 Hz			Hz				60 Hz AC < 250 Hz		
V	500				660			V				1000'		

brochures dealing with lifting gear, induction heating etc.

IEC 158.1 BS 775	660				660			IEC 158.1 BS 775				1000		
UTE NFC 20040 Category C	750				750			UTE NFC 20040 Category C				1000		
VDE 0110 group C	750				750			VDE 0110 group C				1000		
CSA C22.2 No. 14	600				600			CSA C22.2 No. 14				600		
A	1200	1600	2200	2700	1400	1900	2500	A				12000	16000	20000
380 V	1400	1600	2000	3200	2000	2600	3200	380V				12000	16000	20000
500 V	800	1000	1400	3200	2000	2600	3200	500V				12000	16000	20000
660 V	—	—	—	—	500	500	800	660V	—	—	—	10000	12000	16000
t1 = 3 min	125	190	250	360	125	190	250	t1=15min				1500	2600	3500
t2 = 1 min	200	300	400	580	200	300	400	t2=5 min				2000	3200	4200
t3 = 10s	400	600	800	1000	400	600	800	t3=2 min				2600	4300	5500
t4 = 5s	530	800	1050	1400	530	800	1050	t4=30s				4800	8000	10000
t5 = 2s	750	1100	1500	2000	750	1100	1500	t5 = 10s				7200	12000	15000
t6 = 1s	900	1350	1800	2300	900	1350	1800	t6 = 5s				9600	16000	20000
mΩ	0.6	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4	mΩ				0.18	0.13	0.09

#### GENERAL OPERATING CONDITIONS

##### ● Ambient temperature

Operating characteristics and conditions given in the following pages are valid for an ambient temperature from  $-5^{\circ}$  to  $+40^{\circ}\text{C}$  without restrictions and  $-50^{\circ}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$  with certain restrictions.

##### ● Mounting

Normally the contactors are mounted vertically. They will function, however, at an angle of  $22^{\circ}$  to  $30^{\circ}$  from vertical in any direction (for compliance with official marine regulations).

##### ● Altitude

Our contactors can be used without derating up to a height of 2,000 metres, and up to 5,000 metres with certain restrictions.

### (1) Motors with A.C. supply Breaking after starting

#### General Information

#### Slip-ring motors

Category AC2 conforming to UTE standards  
AC2 " " VDE, IEC & BS standards

#### Squirrel cage motors

AC3 for all standards

#### Closing

The contactor makes the starting current, i.e. 1.5 to 3 x the rated current of the motor. The starting current depends upon the rotor resistances.

#### Closing

The contactor makes the starting current, i.e. 5 to 7 x the rated current of the motor.

#### Opening

The contactor breaks the rated motor current, the voltage at the contactor terminals is 15 to 20% of the mains voltage.

AC2: light duty

AC3: duty may imply frequent operation but breaking remains easy.

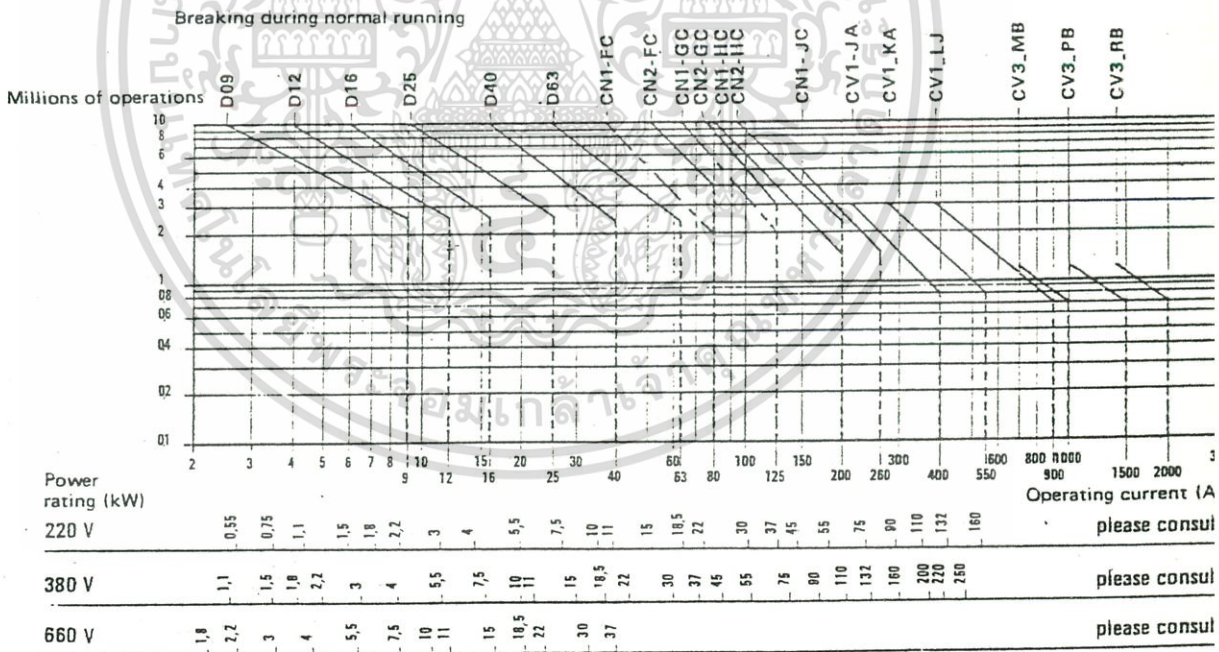
For information on LC1-B contactors not given on pages 2/30 to 2/32 please consult your local sales office.

Selection of contactors according to maximum operating current or standardised power rating of motors in AC2-AC3 categories.

Size of contactors	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FC	GC	HC	BJ	BK	BL	MB(1)	PB(1)	RB(1)	
Maximum operating current (A)	9	12	16	25	40	63	80	125	200				1000	1500	2000	
Power rating in kW	220V: 2.2 380V: 4 500V: 5.5 660V: 5.5	3 5.5 7.5 7.5	4 7.5 10 11	5.5 11 15 15	11 18.5 22 30	18.5 30 37 45*	22 37 55 45*	30 55 75 55*	55 90 132 110*							

(1) The figures are valid for use in AC2 category.  
\*These ratings applicable to CN2- contactors only.

Electrical life of main contacts in AC2 & AC3 categories



Maximum operating frequency according to power rating (ops/hr)

Size of contactors	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FC	GC	HC	BJ	BK	BL	MB	RB
Use 100% of power rating in AC3 category	1200	1200	1200	1200	1000	1000	750	750	750	SEE NOTE	NOTE	ABOVE	150	PB
Use 75% of power rating in AC3 category	2000	2000	2000	2000	1500	1500	1200	1200	1200				150	
Use 50% of power rating in AC3 category	3000	3000	2500	2500	2500	2500	2000	2000	2000				150	

#### Remarks

In AC2 and AC3 categories, the operating current is the rated current of the motor. In categories AC2 and AC4 it is best to take into account the CURRENT BROKEN. The OPERATING CURRENT must never exceed the current indicated for AC1 category, according to ambient conditions.

The control of motors is never only AC2 or AC4, but a combination of AC2-AC2 or AC3-AC4. If the number of operations in AC2 or AC4 (heavy duty) categories is more than 67% of the total number of operations, the influence of AC2 or AC3 operation is negligible. In the contrary case, please refer to page 2/42.

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท... ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้... และต้องอ้างอิงถึงเอกสารที่ครั้งที่มีการแก้ไข

(2) Inductive circuits and motors with A.C. supply  
(cos  $\theta$  from 0.3 to 0.7) breaking during starting or plugging

General Information

Slip-ring motors

– category AC2 conforming to IEC and UTE  
AC2' conforming to VDE, IEC & BS

Closing

The contactor makes the starting current, i.e. 1.5 to 3 x the rated current of the motor.

Opening:

The contactor breaks the starting current of the motor, the voltage at the contactor terminals is equal to the mains voltage.

Operations in AC2 and AC4 categories only occur in severe duty.

Squirrel cage motors

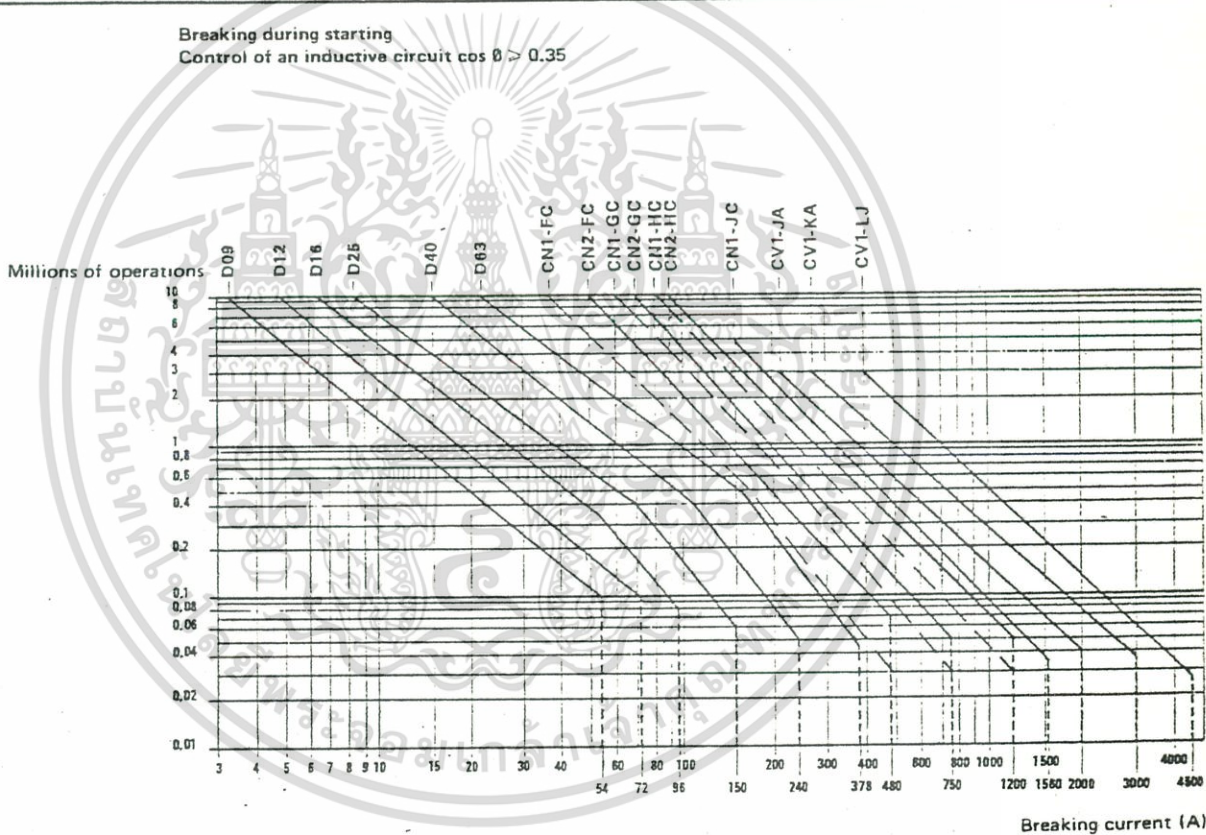
category AC4 for all standards

Closing

The contactor makes the starting current, i.e. 5 to 7 x the rated current of the motor.

Electrical life of main contacts in AC2 and AC4 categories

Breaking during starting  
Control of an inductive circuit cos  $\theta > 0.35$



Breaking current (A)

For information on LC1-E contactors not shown on pages 2/30 to 2/32 please consult your local sales office.

Maximum breaking current in A according to type of duty (number of operations/hour load factor)	Operations	load factor	Operations	load factor	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FC	GC	HC	BJ	BK	BL
	/hour		/hour													
from 150 & 15% up to 300 & 10%			300	10%	30	40	58	75	110	160	220	285	400			
from 150 & 20% up to 600 & 10%			600	10%	27	36	50	67	98	148	200	255	360			
from 150 & 30% up to 1200 & 10%			1200	10%	24	30	44	56	80	132	165	215	300			
from 150 & 55% up to 2400 & 10%			2400	10%	19	24	38	45	62	110	132	172	240			
from 150 & 85% up to 3600 & 10%			3600	10%	16	21	31	40	53	90	116	150	210			

Plugging

The current varies from between the maximum current when plugging to the rated current of the motor. The switched current must be compatible with the closing and breaking capacity of the contactor (see page 2/36). Since Breaking most often takes place at a current value near the stalled current, the contactors can be selected as for AC2 and AC4 category.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Squirrel cage or slip-ring motors

Mixed duty with breaking during starting (or plugging) and after starting.

The duty is mixed when the contactor may have to break the motor current at any instant, i.e. when stalled during starting, when plugging or when the motor is running at its rated speed.

The current broken will be between the rated current and the stalled motor current.

It can be seen from the graphs on the preceding pages that breaking during starting has much more effect on the life of the contactors than breaking after starting.

The actual current broken must therefore be taken into account when determining the electrical life of the contactors.

• Operations are classified into two groups:

**Group A:** operation when the motor is running, or by breaking a current which is lower than the rated motor current. This is comparable to AC3 or AC<sup>2</sup> operation.

**Group B:** operation when the current is broken during acceleration or plugging is higher than the rated motor current (operating current).

This operation is comparable to AC4 duty with a breaking current equal to the mean value of the actual currents broken. The latter are known or determined from the plugging or starting peaks of the motor characteristic.

• Next choose an apparently suitable contactor size and determine: -

(a) on the graph showing the electrical life in AC3 category the number N3 of operations the contactor would perform if these operations belonged to group A;

(b) on the graph showing the electrical life in AC4 category the number N4 of operations it would perform if they belonged to group B (actual or average current broken).

(c) carry over the N3 (vertical axis) and N4 (horizontal axis) on the axes of the graph below. Draw the straight line joining them by these two points.

The electrical life N in mixed duty can be read from the intersection of this straight line with the oblique axis corresponding to the % of group B operations in the total number of operations.

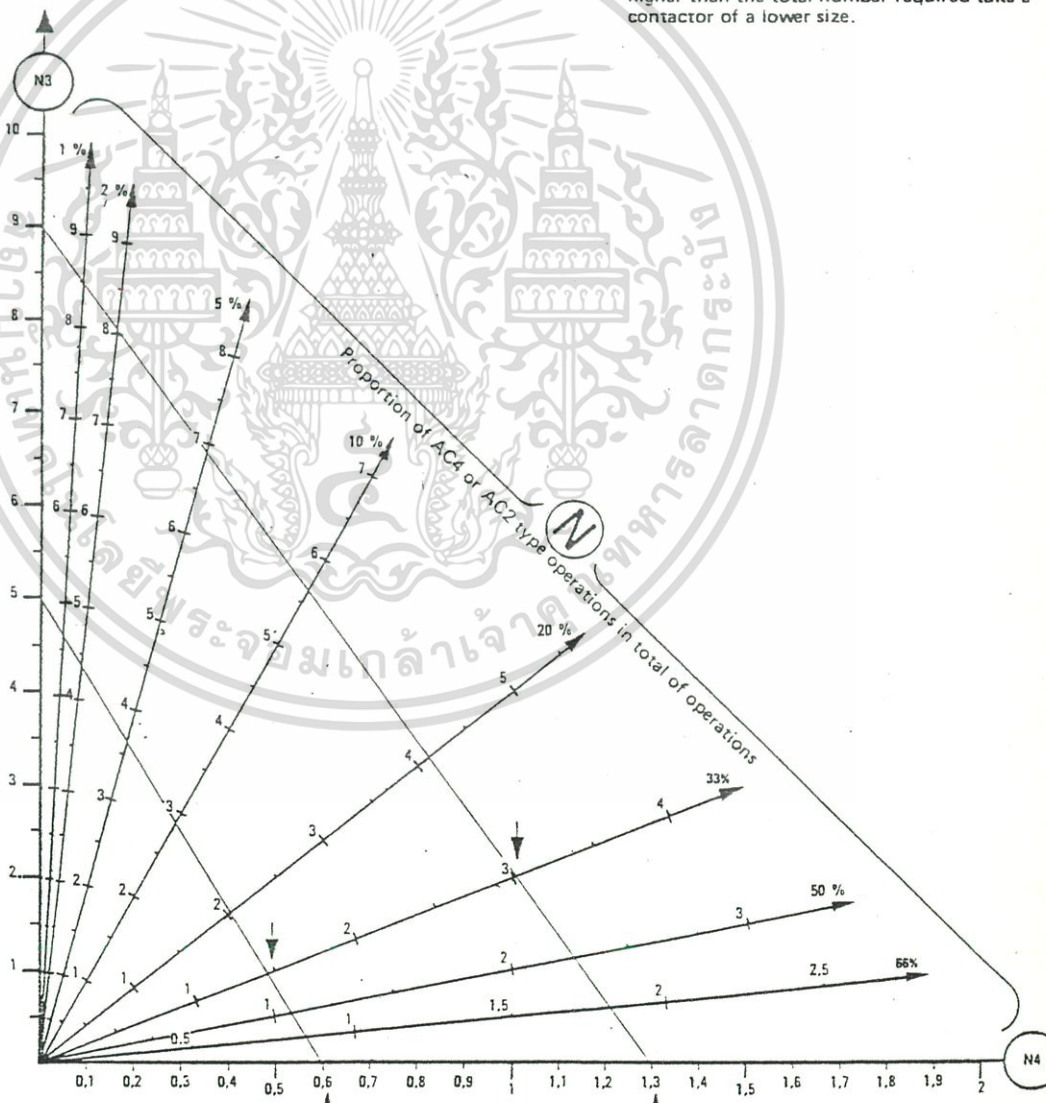
If this number N is lower than the total number required repeat a) b) c) with a contactor of a higher size. If N is appreciably higher than the total number required take a contactor of a lower size.

Number of operations (in millions)  
AC<sup>2</sup>-AC3  
Breaking when motor running

**Example:**  
Breaking with motor running 100A  
Breaking during starting or plugging: mean current broken 240A  
Required electrical life: 2.5 million operations of which 33% at 240A.

• First test with CN2-GC contactor:  
-100A following diagram AC3/AC<sup>2</sup>: 5 million operations (N3) See page 2/40.  
-240A following diagram AC2/AC4 : 0.6 million operations (N4) See page 2/41.  
N3 and N4 carried over to graph: number of operations read from 33% axis = 1.450 million operations (N) - not sufficient.

• Second test with CN2-HC contactor:  
-100A following diagram AC3/AC<sup>2</sup>: 9 million operations (N3)  
-240A following diagram AC2/AC4 : 1.3 million operations (N4)  
N3 and N4 carried over to chart: number of operations read from 33% axis = 3 million operations which is correct since it is ≥ 2.5 million operations.



Number of operations (million)  
AC4-AC2 breaking.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในพิธีการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The standards classify these loads in category AC1  
All loads with  $\cos \theta \geq 0.95$  belong to this category.

**Category AC1**

Definition of operating current.

All standards give the limit of the temperature rise for equipment in continuous operation. The temperature rise is measured at the terminals and defines the rated thermal current of the equipment. The rated thermal current varies according to the method of mounting and the ambient temperature. In the IEC recommendations the operating current is at the most equal to the rated thermal current  $I_{th}$ .

In the French UTE standards and German VDE standards the operating current is limited by the size of the terminals. The latter limit being more restrictive than the former, it results in a significant safety margin as far as temperature rise is concerned.

Note: The German standard VDE 0660 (paragraph IV 30b) states that operating current in continuous operation need not be limited by the size of the terminals, provided the section of connecting cables is indicated and sufficient to keep the temperature rise within the given limits.

**Operating current in category AC1**

of contactors and equipment (A)

**1** According to all standards

For information on LC1 E contactors not given on pages 2/20 to 2/32 please consult your local sales office

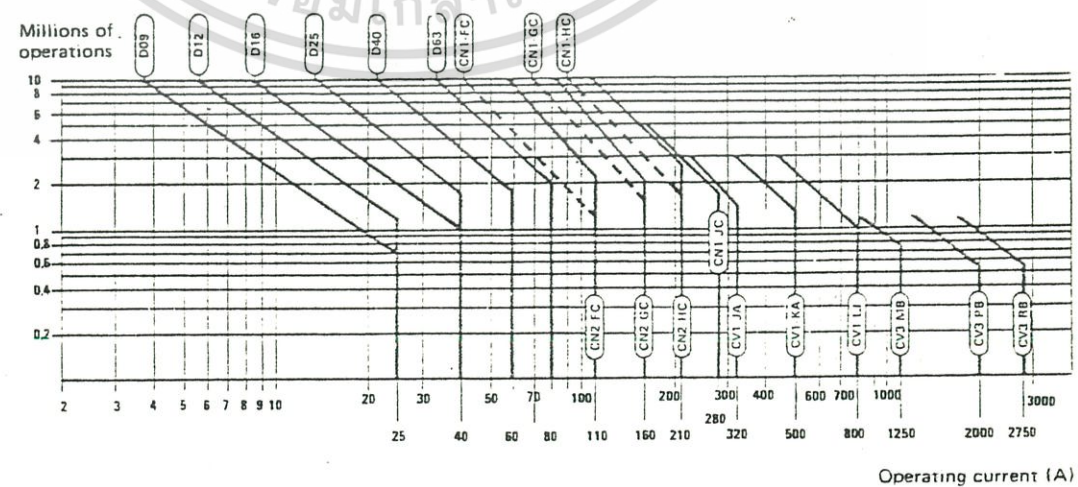
Size of contactors	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FC	GC	HC	JC	BJ	BK	BL	MB	PB	RB
Starters in normal enclosure	12A	12A	25A	25A	50A	63A	80A	110A	170A	260A	-	-	-	-	-	-
Contactors or starter when the temperature in the neighbourhood of the contactor $\leq 55^\circ\text{C}$	12A	12A	25A	25A	50A	63A	80A	125A	200A	280A				1250A	2000A	2750A

**2** According to IEC and VDE standards

Size of contactors	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FC	GC	HC	JC	BJ	BK	BL	MB	PB	RB
with section of cables in $\text{mm}^2$	2.5	2.5	6	6	16	25	35	50	95	120				Busbars for $\Delta < 60^\circ\text{C}$		
Contactors or starter with air temperature $\leq 55^\circ\text{C}$	20A	20A	32A	32A	55A	70A	100A	125A	200A	280A				1250A	2000A	2750A
Contactors or starter in free air or a temperature $\leq 40^\circ\text{C}$	25A	25A	40A	40A	60A	80A	110A	160A	210A	300A				1250A	2000A	2750A

- \* Starter 125A ND1-GC: minimum enclosure DE1-GP 422 (500 x 300 x 200 mm). relay RA1-HA 95-125.
- \* Starter 200A ND1-HC: minimum enclosure DE1-GP522 (600 x 300 x 200 mm). relay RA1-HA 150-200.

**Electrical life in category AC1**



Switching three phase capacitors used for power factor correction.

Automatic short circuiting of rotor resistances.

• Switching three phase capacitors used for power factor correction.

This type of application is characterised by:

- Transient currents and voltages which occur particularly at switch on.
- Harmonic currents which flow in addition to the rated current.

The operating power values indicated in the adjoining table take into account the normal amount of harmonic current flowing in addition to the rated current of the capacitor bank and the thermal rating of the contactor.

Protection is by means of a thermal overload relay calibrated for 140% of the rated current of the load.

Similarly rated HRC fuses are recommended; for severe transient currents may occur at the moment of switching on power in addition to the harmonic currents monitored by the relay.

The peak value of these currents must not exceed those shown below. If necessary, they can be reduced by introducing inductances in series on each phase.

For information on LC1-B contactors not given on pages 2/30 to 2/32 please consult your local sales office.

Size of Contactors	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FC	GC	HC	BJ	BK	BL
Rated current of the bank for an ambient temperature of 40°C	9A	12A	16A	25A	40A	63A	75A	100A	140A			
Maximum permissible closing current peak	400A	500A	750A	900A	1800A	2000A	2300A	2600A	3600A			
Rated power in KVAR for temperature < 55°C	220V	3.5	4.5	7.5	9	15	25	27.5	37.5	50		
	380V	4.5	7.5	9	15	25	37.5	50	65	90		
	415/440V	7.5	9	15	17.5	30	45	50	75	100		
	500V	9	10	17.5	20	35	50	60	80	100		

• Automatic short-circuiting of rotor resistances

An easy making and breaking duty characterise this type of operation.

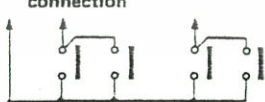
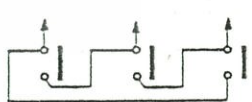
Only the thermal effects of the current need be taken into account.

When there are several short-circuiting contactors those controlling all steps but the last have a low on-load factor (in this case the on-load factor is the ratio between the time the contactor in question carries current to the interval of time between two successive starts). The intermittent duty rating can be higher than the continuous rating of the contactor.

By using four pole contactors with two pairs of pole connected in parallel it is possible to double the effective current rating using two pole switching. By delta connecting the poles of a three pole contactor it is possible to reduce the contactor current to  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  of the phase current at each pole.

When using the table below, the current referred to

- the starting rotor current if for the given contactor the duration of the peak is > 25% of the time it passes current.
- the rated rotor current if for the given contactor the duration of the peak is < 25% of the time it passes current.

Period for which current passes through short-circuiting contactor	On load factor	Maximum current (A) up to rotor voltage of 500V per phase for connection											
		 two pole switching							 delta connection				
		D09	D12	D16	D25	D40	D63	FC (CN1)	GC (CN1)	HC (CN1)	BJ SEE	BK NOTE	BL ABOVE
> 5 min.	100 %	35	35	60	60	90	125	160	230	320			
3 min.	60 %	40	45	75	75	120	150	200	300	420			
1 min 30s	30 %	60	60	100	100	160	200	280	400	580			
30 s	10 %	100	100	180	180	270	340	480	690	960			
8 s	2.5 %	180	180	300	300	470	600	800	1150	1600			

Contactors are available for rotor voltages up to 2500 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power circuit: direct current

- In choosing, consider both the contactor and the number of poles to be connected in series in the circuit.
- Points to consider in choosing:
  - voltage
  - breaking capacity
  - required electrical life, if important
  - nature of load and in particular the  $\frac{L}{R}$  time constant
  - thermal operating conditions

Contactor selection

Time constant

$\frac{L}{R} < 60\text{ms}$

NUMBER OF POLES to be connected IN SERIES depending on the voltage as indicated in the table below:

- for most applications max. rated voltage  $V_e$  max. > supply voltage
- with switching during plug breaking  $V_e$  max > 1.5 supply voltage

SIZE depending on the rated current of the load (I) according to table below:

- poles in series only.....max. rated current  $I_e > I$
- each pole as above replaced by n poles in parallel..... $n I_e \times 0.8 > I$

$I_e$ (A)	CC3 FB-80 A HB-200 A	LC1 D09, D12 D16, D25 D40, D63	CN2 FC-80 A GC-125 A HC-200 A	CV1 FB-80 A GB-160 A HB-250 A	CV3 JA-400 A KA-550 A LJ-900 A	IFB-80 A IGB-160 A IHB-250 A	JB-320 A KB-500 A LB-800 A	MB-1250 PB-2000 RB-2750
1 pole	125 V	75 V	125 V	220 V	440 V	440 V	850 V	1200 V
2 poles in series	250 V	150 V	225 V	440 V				
3 poles in series		300 V	300 V					
4 poles in series								

- (1) when several poles are connected in series, they may be connected to one polarity or two.
- (2) the use of a contactor chosen as above guarantees a breaking capacity of up to four times the rated current ( $4 \times I_e$ ).
- (3) the current available for the control circuit, the other necessary main or auxiliary contacts... make it possible to choose between several alternative solutions, according to the table
- (4) the CN1- FC, GC, HC contactors do not have a useful DC rating.

How to select the required electrical life

The size of the contactor and the number of poles in series must at least comply with the conditions above but must sometimes be increased to obtain the desired electrical life. This depends on the POWER broken i.e. the current broken (I) times the recovery voltage (Vr). Calculated as follows:

	Recovery voltage Vr	Power broken Pc	Example: 5 kW motor - 200 V - 25 A
Resistor, electro-magnet or motor with switching at slow speed under full voltage.	Vr = Supply voltage, Vs Negligible back emf	$I_c \times V_s$	Inching with switching of starting current ( $62 I_c = 62 \times 200 = 12.4$ kW D25 contactor, sufficient for rated current and Vs with 3 pole in series, will stand 900,000 operations, according to diagram.
Switching while running or Ward-Leonard drive.	Vr < Vs Back emf comparable with Vs	$I_c \times 0.5V_s$	Same motor, switched while running $P_c = 25 \times 100 = 2.5$ kW The same D25 contactor will stand more than 10 million operations
Switching during plug braking.	Vr > Vs Back emf in opposition to the supply voltage	$I_c \times 1.5V_s$	Same motor but with breaking of plugging current = 40 A $P_c = 40 \times 300 = 12$ kW A fourth pole will have to be provided (see note a)

a) Correction of power broken before using the diagram. The power broken values, as read from the diagram, correspond to the number n of poles in series most often used for each contactor. In the table for contactor selection n stands on the same line as the voltage marked in *italics*. If the number of poles actually in series - m - differs from n, the power broken value must be reduced to this reference by applying to it a coefficient  $\frac{n}{m}$  before reading the number of operations from the diagram.

Thus, in our example we have:  $12 \text{ kW} \times \frac{3}{4} = 9 \text{ kW}$ , a power rating for which the D25 contactor withstands 1.7 million operations.

b) Correction of the number of operations according to the time constant  $T (= \frac{L}{R})$  of the circuit.  
 -  $T < 15\text{ms}$ , read the number of operations directly from the diagram;  
 -  $15\text{ms} < T < 60\text{ms}$ : number of operations = figure from the diagram  $\times \frac{15}{T}$   
 -  $T > 60\text{ms}$ , please consult your local sales office.

c) When several poles are connected in parallel, multiply the number of operations given by the diagram by the number of poles in parallel.

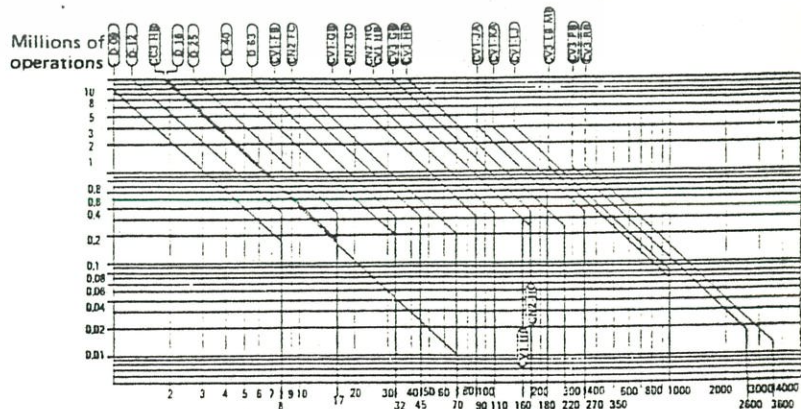
d) Mixed categories with different types of breaking. Proceed as before to determine the number of operations which the contactor would stand for each type of breaking, then use the same methods and combination chart as for squirrel cage and slip-ring motors.

e) Thermal limit. The following rates must not be exceeded:

- used at maximum power, as in diagram; - 150 one second operations per hour.
- used at the maximum rated current i.e. - 150 operations per hour with a 60% on load factor or 300 operations per hour with a 30% on load factor.

Electrical life as a function of the power broken

The required life span can be obtained, according to circumstances, by increasing the number of poles in series, in parallel or by using a larger size contactor.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table A.1 Thermal Properties of Metals\***

Metal	Properties at 68°F				k, Btu/hr-ft-°F									
	$\rho$ lb <sub>m</sub> ft <sup>3</sup>	$c_p$ Btu lb <sub>m</sub> -°F	$k$ Btu hr-ft-°F	$\alpha$ ft <sup>2</sup> hr	-148°F -100°C	32°F 0°C	212°F 100°C	392°F 200°C	572°F 300°C	752°F 400°C	1112°F 600°C	1472°F 800°C	1832°F 1000°C	2192°F 1200°C
Aluminum	169	0.214	132	3.665	134	132	132	132	132					
Pure														
Al-cu (Duralumin) 94-96 Al, 3-5 Cu, trace Mg	174	0.211	95	2.580	73	92	105	112						
Al-Mg (Hydronalium) 91-95 Al, 5-9 Mg	163	0.216	65	1.860	54	63	73	82						
Al-Si (Silumin) 87 Al, 13 Si	166	0.208	95	2.773	86	94	101	107						
Al-Si (Silumin, copper bearing) 86.5 Al; 12.5 Si; 1 Cu	166	0.207	79	2.311	69	79	83	88	93					
Al-Si (Alusil) 78-80 Al; 20-22 Si	164	0.204	93	2.762	83	91	97	101	103					
Al-Mg-Si 97 Al; 1 Mg; 1 Si; 1 Mn	169	0.213	102	2.859	—	101	109	118						
Lead	710	0.031	20	0.924	21.3	20.3	19.3	18.2	17.2					
Iron	493	0.108	42	0.785	50	42	39	36	32	28	23	21	20	21
Pure	490	0.11	34	0.634	—	34	33	30	28	26	21	19	19	19
Wrought iron (C < 0.50%)	454	0.10	30	0.666	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cast iron (C ≈ 4%)	489	0.111	31	0.570	—	32	30	28	26	24	20	17	17	18
Steel (C max ≈ 1.5%)	487	0.113	25	0.452	—	25	25	.24	23	21	19	17	16	17
Carbon steel C ≈ 0.5% C: 1.0%														

Table A.1 (continued)

Metal	Properties at 68°F				$k$ , Btu/hr-ft-°F									
	$\rho$ lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>	$c_p$ Btu/lb <sub>m</sub> -°F	$k$ Btu/hr-ft-°F	$\alpha$ ft <sup>2</sup> /hr	-148°F -100°C	32°F 0°C	212°F 100°C	392°F 200°C	572°F 300°C	752°F 400°C	1112°F 600°C	1472°F 800°C	1832°F 1000°C	2192°F 1200°C
Iron (Continued)														
Carbon steel (Cont.)														
1.5% Nickel steel Ni $\approx$ 0%	484	0.116	21	0.376	—	21	21	21	20	19	18	16	16	17
10% Nickel steel Ni $\approx$ 0%	493	0.108	42	0.785										
20%	496	0.11	15	0.279										
30%	499	0.11	11	0.204										
40%	504	0.11	7	0.118										
50%	510	0.11	6	0.108										
60%	516	0.11	8	0.140										
70%	523	0.11	11	0.182										
80%	531	0.11	15	0.258										
90%	538	0.11	20	0.344										
100%	547	0.11	27	0.452										
Invar Ni $\approx$ 36%	556	0.106	52	0.892										
Crume steel Cr = 0%	508	0.11	6.2	0.108										
1%	493	0.108	42	0.785	50	42	39	36	32	28	23	21	20	21
2%	491	0.11	35	0.645	—	36	32	30	27	24	21	19	19	17
5%	491	0.11	30	0.559	—	31	28	26	24	22	19	18	18	17
10%	489	0.11	23	0.430	—	23	22	21	21	19	17	17	17	17
20%	486	0.11	18	0.344	—	18	18	18	17	17	16	16	16	16
30%	480	0.11	13	0.258	—	13	13	13	13	13	14	15	15	15
Cr-Ni (chrome-nickel)														
15 Cr; 10 Ni	476	0.11	11	0.204										
	491	0.11	11	0.204										

Table A.1 (continued)

Metal	Properties at 68°F				k, Btu/hr-ft-°F									
	$\rho$ lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>	$c_p$ Btu/lb <sub>m</sub> -°F	k Btu/hr-ft-°F	$\alpha$ ft <sup>2</sup> /hr	-148°F -100°C	32°F 0°C	212°F 100°C	392°F 200°C	572°F 300°C	752°F 400°C	1112°F 600°C	1472°F 800°C	1832°F 1000°C	2192°F 1200°C
Cr-Ni (Continued).														
18 Cr; 8 Ni (V2A)	488	0.11	9.4	0.172	—	9.4	10	10	11	11	13	15	18	
20 Cr; 15 Ni	489	0.11	8.7	0.161										
25 Cr; 20 Ni	491	0.11	7.4	0.140										
Ni-Cr (nickel-chrome)														
80 Ni; 15 Cr	532	0.11	10	0.172										
60 Ni; 15 Cr	516	0.11	7.4	0.129										
40 Ni; 15 Cr	504	0.11	6.7	0.118										
20 Ni; 15 Cr	491	0.11	8.1	0.151										
Cr-Ni-Al: 6 Cr; 1.5 Al;														
0.5 Si (Sicromal 8)	482	0.117	13	0.237										
0.24 Cr; 2.5 Al	479	0.118	11	0.194										
0.5 Si (Sicromal 12)	493	0.118	42	0.784										
Manganese steel Ma = 0%														
1%	491	0.11	29	0.538										
2%	491	0.11	22	0.376										
5%	490	0.11	13	0.247										
10%	487	0.11	10	0.194										
Tungsten steel W = 0%														
1%	493	0.108	42	0.785										
2%	494	0.107	38	0.720										
5%	497	0.106	36	0.677										
10%	504	0.104	31	0.591										
	519	0.100	28	0.527										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table A.1 (continued)

Metal	Properties at 68°F			k, Btu/hr-ft-°F										
	$\rho$ lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>	$c_p$ Btu/lb <sub>m</sub> -°F	k Btu/hr-ft-°F	$\alpha$ ft <sup>2</sup> /hr	-148°F -100°C	32°F 0°C	212°F 100°C	392°F 200°C	572°F 300°C	752°F 400°C	1112°F 600°C	1472°F 800°C	1832°F 1000°C	2192°F 1200°C
Tungsten steel (Continued)														
20%	551	0.093	25	0.484										
Silicon steel Si = 0%	493	0.108	42	0.785										
1%	485	0.11	24	0.451										
2%	479	0.11	18	0.344										
5%	463	0.11	11	0.215										
Copper														
Pure	559	0.0915	223	4.353	223	219	216	—	210	204				
Aluminum bronze 95 Cu;														
5 Al	541	0.098	48	0.903										
Bronze 75 Cu; 25 Sn	541	0.082	15	0.333										
Red brass 85 Cu; 9 Sn;														
6 Zn	544	0.092	35	0.699	—	34	41	—	85	85				
Brass 70 Cu; 30 Zn	532	0.092	64	1.322	51	—	74	—	85	28				
German silver 62 Cu;														
15 Ni; 22 Zn	538	0.094	14.4	0.290	11.1	—	18	23	26					
Constantan 60 Cu; 40 Ni	557	0.098	13.1	0.237	12	—	12.8	15						
Magnesium														
Pure	109	0.242	99	3.762	103	99	97	94	91					
Mg-Al (electrolytic)														
6-8% Al; 1-2% Zn	113	0.24	38	1.397	—	30	36	43	48					
Mg-Mn 2% Mn	111	0.24	66	2.473	54	64	72	75						
Molybdenum	638	0.060	79	2.074	80	79	79							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table A.1 (continued).

Metal	Properties at 68°F				k, Btu/hr-ft-°F									
	$\rho$ lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>	$c_p$ Btu/lb <sub>m</sub> -°F	$k$ Btu/hr-ft-°F	$\alpha$ ft <sup>2</sup> /hr	-148°F -100°C	32°F 0°C	212°F 100°C	392°F 200°C	572°F 300°C	752°F 400°C	1112°F 600°C	1472°F 800°C	1832°F 1000°C	2192°F 1200°C
Nickel														
Pure (99.9%)	556	0.1065	52	0.882	60	54	48	42	37	34				
Impure (99.2%)	556	0.106	40	0.677	—	40	37	34	32	30			39	40
Ni-Cr: 90 Ni; 10 Cr	541	0.106	10	0.172	—	9.9	10.9	12.1	13.2	14.2				
80 Ni; 20 Cr	519	0.106	7.3	0.129	—	7.1	8.0	9.0	9.9	10.9				
Silver														
Purest	657	0.0559	242	6.601	242	241	240	238	209	208				
Pure (99.9%)	657	0.0559	235	6.418	242	237	240	216	209	208				
Tungsten	1208	0.0321	94	2.430	—	96	87	82	77	73		44		
Zinc, pure	446	0.0918	64.8	1.591	66	65	63	61	58	54				
Tin, pure	456	0.0541	37	1.505	43	38.1	34	33						

\* From E. R. G. ECKERT, *Introduction to the Transfer of Heat and Mass*, New York, McGraw-Hill, 1950.

## SI-Unit Conversion Table

The following *derived* units are then defined:

Quantity	Unit	Unit Abbreviation
Force	1 newton = $1 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}$	N
Energy	1 joule = 1 N·m	J
Power	1 watt = $1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$	W
Temperature	degree Celsius = degree Kelvin - 273.15	

The equivalency between the above quantities and their English-unit counterparts may be obtained from various sources (e.g., Ref. 1) to yield the following conversion factors:

Acceleration:	1 ft/sec <sup>2</sup>	= $3.0480 \times 10^{-1} \text{ m/s}^2$
	1 ft/hr <sup>2</sup>	= $2.3519 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$
Area:	1 ft <sup>2</sup>	= $9.2903 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
	1 in. <sup>2</sup>	= $6.4516 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Conductance, thermal:	1 Btu/hr-ft <sup>2</sup> -°F	= $5.6784 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$
Conductivity, thermal:	1 Btu/hr-ft-°F	= $1.7308 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$
Density:	1 lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>	= $1.6018 \times 10 \text{ kg/m}^3$
Diffusivity, thermal:	1 ft <sup>2</sup> /sec	= $9.2903 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
	1 ft <sup>2</sup> /hr	= $2.5806 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Energy:	1 Btu	= $1.0551 \times 10^3 \text{ J}$
	1 kw-hr	= $3.6000 \times 10^6 \text{ J}$
	1 ft-lb <sub>r</sub>	= $1.3558 \text{ J}$
	1 hp-hr	= $2.6845 \times 10^6 \text{ J}$
Force:	1 lb <sub>r</sub>	= $4.4482 \text{ N}$
Heat:	1 Btu	= $1.0551 \times 10^3 \text{ J}$
Heat flow rate:	1 Btu/sec	= $1.0551 \times 10^3 \text{ W}$
	1 Btu/hr	= $2.9308 \times 10^{-1} \text{ W}$
Heat flux:		
(unit area):	1 Btu/hr-ft <sup>2</sup>	= $3.1546 \text{ W/m}^2$
(unit length):	1 Btu/hr-ft	= $9.6152 \times 10^{-1} \text{ W/m}$
Heat generation rate:		
(unit mass):	1 Btu/hr-lb <sub>m</sub>	= $6.4612 \times 10^{-1} \text{ W/kg}$
(unit volume):	1 Btu/hr-ft <sup>3</sup>	= $1.0350 \times 10 \text{ W/m}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SI-Unit Conversion Table

Heat transfer coefficient:	1 Btu/hr-ft <sup>2</sup> -°F	= 5.6784 W/m <sup>2</sup> -°C
Latent heat:	1 Btu/lb <sub>m</sub>	= 2.3260 × 10 <sup>3</sup> J/kg
Length:	1 ft	= 3.0480 × 10 <sup>-1</sup> m
	1 micron	= 1.0000 × 10 <sup>-6</sup> m
	1 in.	= 2.5400 × 10 <sup>-2</sup> m
	1 mile	= 1.6093 × 10 <sup>3</sup> m
Mass:	1 lb <sub>m</sub>	= 4.5359 × 10 <sup>-1</sup> kg
Mass flow rate:	1 lb <sub>m</sub> /sec	= 4.5359 × 10 <sup>-1</sup> kg/s
	1 lb <sub>m</sub> /hr	= 1.2600 × 10 <sup>-4</sup> kg/s
Mass flux:	1 lb <sub>m</sub> /sec-ft <sup>2</sup>	= 4.8824 kg/s-m <sup>2</sup>
	1 lb <sub>m</sub> /hr-ft <sup>2</sup>	= 1.3562 × 10 <sup>-3</sup> kg/s-m <sup>2</sup>
	1 lb <sub>m</sub> /sec-in. <sup>2</sup>	= 7.0362 × 10 <sup>2</sup> kg/s-m <sup>2</sup>
	1 lb <sub>m</sub> /hr-in. <sup>2</sup>	= 1.9545 × 10 <sup>-1</sup> kg/s-m <sup>2</sup>
Momentum, linear:	1 lb <sub>m</sub> -ft/sec	= 1.3825 × 10 <sup>-1</sup> kg-m/s
	1 lb <sub>m</sub> -ft/hr	= 3.8404 × 10 <sup>-5</sup> kg-m/s
Power:	1 Btu/sec	= 1.0551 × 10 <sup>3</sup> W
	1 ft-lb <sub>f</sub> /sec	= 1.3558 W
	1 Btu/hr	= 2.9308 × 10 <sup>-1</sup> W
	1 hp	= 7.4570 × 10 <sup>2</sup> W
Pressure:	1 lb <sub>f</sub> /ft <sup>2</sup>	= 4.7880 × 10 N/m <sup>2</sup>
	1 lb <sub>f</sub> /in. <sup>2</sup>	= 6.8948 × 10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>
	1 standard atmosphere	= 1.0133 × 10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup>
	1 in. water	= 2.4909 × 10 <sup>2</sup> N/m <sup>2</sup>
	1 ft water	= 2.9891 × 10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>
1 in. mercury	= 3.3866 × 10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>	
Resistance, thermal:		
	(total):	1 hr-°F/Btu
(unit):	1 hr-ft <sup>2</sup> -°F/Btu	= 1.7611 × 10 <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> -°C/W
Specific energy:	1 Btu/lb <sub>m</sub>	= 2.3260 × 10 <sup>3</sup> J/kg
	1 ft-lb <sub>f</sub> /lb <sub>m</sub>	= 2.9891 J/kg
Specific heat:	1 Btu/lb <sub>m</sub> -°F	= 4.1868 × 10 <sup>3</sup> J/kg-°C
Specific volume:	1 ft <sup>3</sup> /lb <sub>m</sub>	= 6.2428 × 10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> /kg
Surface tension:	1 lb <sub>f</sub> /in.	= 1.7513 N/m
Temperature:	°R	°K = $\frac{5}{9} \times \text{°R}$
	°F	°C = $\frac{5}{9} \times (\text{°F} - 32)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

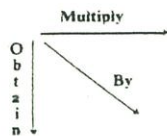
## SI-Unit Conversion Table

Temperature difference:	1°F(°R)	= $\frac{5}{9}$ °C(°K)
Time:	1 hr	= $3.6000 \times 10^3$ s
	1 min	= $6.0000 \times 10$ s
Velocity:	1 ft/sec	= $3.0480 \times 10^{-1}$ m/s
	1 ft/hr	= $8.4667 \times 10^{-5}$ m/s
	1 mph	= $4.4704 \times 10^{-1}$ m/s
Viscosity, dynamic: (see also Table B.1)	1 poise (g/cm-sec)	= $1.0000 \times 10^{-1}$ kg/ms (N-s/m <sup>2</sup> )
	1 lb <sub>m</sub> /ft-sec	= 1.4882 kg/m-s
	1 lb <sub>m</sub> /ft-hr	= $4.1338 \times 10^{-4}$ kg/m-s
	1 lb <sub>r</sub> -sec/in. <sup>2</sup>	= $6.8947 \times 10^3$ kg/m-s
	1 lb <sub>r</sub> -hr/ft <sup>2</sup>	= $1.7237 \times 10^5$ kg/m-s
Viscosity, kinematic:	1 stoke (cm <sup>2</sup> /sec)	= $1.0000 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s
	1 ft <sup>2</sup> /sec	= $9.2903 \times 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /s
	1 ft <sup>2</sup> /hr	= $2.5806 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s
Volume:	1 ft <sup>3</sup>	= $2.8317 \times 10^{-2}$ m <sup>3</sup>
	1 in. <sup>3</sup>	= $1.6387 \times 10^{-5}$ m <sup>3</sup>
Volume flow rate:	1 ft <sup>3</sup> /sec	= $2.8317 \times 10^{-2}$ m <sup>3</sup> /s
	1 ft <sup>3</sup> /min	= $4.7195 \times 10^{-4}$ m <sup>3</sup> /s
	1 ft <sup>3</sup> /hr	= $7.8658 \times 10^{-6}$ m <sup>3</sup> /s

## Reference

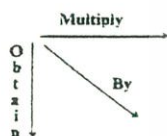
1. MECHTLY, E. A., "The International System of Units, Physical Constants and Conversion Factors," N.A.S.A. SP-7012, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1964.

Pressure



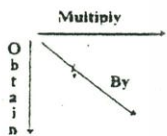
	N/m <sup>2</sup>	dynes/cm <sup>2</sup>	atm	p/in. <sup>2</sup> (psi)	mm of Hg
N/m <sup>2</sup>	1	0.1	1.013 × 10 <sup>5</sup>	6.895 × 10 <sup>3</sup>	1.333 × 10 <sup>2</sup>
dynes/cm <sup>2</sup>	10	1	1.013 × 10 <sup>6</sup>	6.895 × 10 <sup>4</sup>	1.333 × 10 <sup>3</sup>
atm	9.869 × 10 <sup>-6</sup>	9.869 × 10 <sup>-7</sup>	1	6.804 × 10 <sup>-2</sup>	1.316 × 10 <sup>-3</sup>
p/in. <sup>2</sup> (psi)	1.450 × 10 <sup>-4</sup>	1.450 × 10 <sup>-5</sup>	14.70	1	1.934 × 10 <sup>-2</sup>
mm of Hg	7.501 × 10 <sup>-3</sup>	7.501 × 10 <sup>-4</sup>	7.60 × 10 <sup>2</sup>	51.71	1

Energy and Work



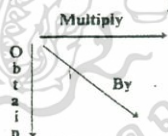
	joule	erg	fp	kW-hr	eV	calorie	Btu
joule	1	10 <sup>-7</sup>	1.356	3.6 × 10 <sup>6</sup>	1.602 × 10 <sup>-19</sup>	4.186	1.055 × 10 <sup>3</sup>
erg	10 <sup>7</sup>	1	1.356 × 10 <sup>7</sup>	3.6 × 10 <sup>13</sup>	1.602 × 10 <sup>-12</sup>	4.186 × 10 <sup>7</sup>	1.055 × 10 <sup>10</sup>
fp	0.7376	7.376 × 10 <sup>-8</sup>	1	2.655 × 10 <sup>6</sup>	1.182 × 10 <sup>-19</sup>	3.087	7.783 × 10 <sup>2</sup>
kW-hr	2.778 × 10 <sup>-7</sup>	2.778 × 10 <sup>-14</sup>	3.766 × 10 <sup>-7</sup>	1	4.450 × 10 <sup>-26</sup>	1.163 × 10 <sup>-6</sup>	2.930 × 10 <sup>-4</sup>
Electron-volt (eV)	6.242 × 10 <sup>18</sup>	6.242 × 10 <sup>11</sup>	8.464 × 10 <sup>18</sup>	2.246 × 10 <sup>25</sup>	1	2.613 × 10 <sup>19</sup>	6.585 × 10 <sup>21</sup>
calorie	0.2389	2.389 × 10 <sup>-8</sup>	0.3239	8.6 × 10 <sup>5</sup>	3.827 × 10 <sup>-20</sup>	1	2.520 × 10 <sup>2</sup>
Btu	9.480 × 10 <sup>-4</sup>	9.480 × 10 <sup>-11</sup>	1.285 × 10 <sup>-3</sup>	3.413 × 10 <sup>3</sup>	1.519 × 10 <sup>-22</sup>	3.919 × 10 <sup>-3</sup>	1

Electric Charge\*



	coulombs	statcoulombs
coulombs	1	1/3 × 10 <sup>-9</sup>
statcoulombs	3 × 10 <sup>9</sup>	1

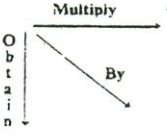
Electric Potential\*



	volts	statvolts
volts	1	3 × 10 <sup>2</sup>
statvolts	1/3 × 10 <sup>-2</sup>	1

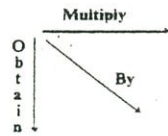
\*Here, as in the tables which follow, the digit 3 represents the significant figures in c, that is, 2.997 925.

Electric Current\*



	amperes	statamperes
amperes	1	1/3 × 10 <sup>-9</sup>
statamperes	3 × 10 <sup>9</sup>	1








Resistance\*



	ohms	statohms
ohms	1	9 × 10 <sup>11</sup>
statohms	1/9 × 10 <sup>-11</sup>	1

**Protection relays** always control components capable of interrupting the circuits they monitor (a contactor for example). They normally only have to operate occasionally.

**Measuring relays** monitor current and voltage variations. They operate at set limits. Max. duty 1200 operations per hour.

	Use	Applications
 LR1-D12...	Protection relays	– squirrel cage, slip ring motors and similar loads – shunt motors and other loads – up to 30 ops/hour
 RA1-FA to HA		Same applications as above. Long starting times and higher currents
 RMT-D	Protection against overload only	– unbalanced circuits – up to 30 ops/hour
 RT1-TK	Protection against overload and high peak currents	Same applications as above. Long starting times and higher currents
	Direct thermal protection	– motors of unbalanced currents – up to 60 ops/hour
	Protection of starting peaks against excessive starting	– stator winding of motors or other loads, with suitably positioned thermistors – any type of duty
	Protection against excessive starting	– slip ring motors – series motors
		– starting resistance – (may be used as a thermal timer)
 RM1-J	Measuring relays	– motors and other applications
 RN1-BA		Sensing relay with adjustable differential Low power consumption, 0.05W
 RVE		Vibrating relay – controlling the field on shunt motor and other applications Low differential – polarisation – reverse current – battery charger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออกจากรีจิสตรี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

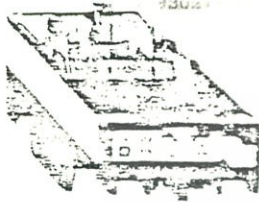
AC/DC	Type	Voltage	Range	Reference	Page
AC < 400Hz and DC	Triple pole, thermal ambient temperature compensated differential relays	660V	0.1 to 66A	LR1-D09 to LR1-D63	2/48
			60 to 80A	RA1-FA	2/48
			75 to 105A	RA1-GA	2/48
AC 50 and 60 Hz			95 to 200A	RA1-HA	2/48
AC 50-400Hz	As LR1 but current transformer operated	Variable	< 200A _____ > 200A	LR1-D09 + current transformers	2/49
AC < 400 Hz and DC	Triple pole, thermal ambient temperature compensated non-differential relays	660V	0.1 to 66A	LR3-D09 to LR3-D63	2/48
			60 to 80A	RB1-FA	2/48
			75 to 105A	RB1-GA	2/48
AC 50 and 60 Hz			95 to 200A	RB1-HA	2/48
AC 50-400 Hz	As LR3 but current transformer operated	Variable	< 200A _____ > 200A	LR3-D09 + current transformers	2/49
AC 50 and 60 Hz	Thermal magnetic	500V	0.6 to 1085A	RMT-D	2/50
DC			0.18 to 861 A	RME-TL	2/52
DC	Thermal with shunt		800 to 4000A	RTL with shunt	*
AC and DC	Thermistor protection relay	24-415V	Any type of duty	LT1-S	2/57
AC < 60Hz and DC	Instantaneous magnetic	500V	0.7 to 1000A	RM1-XA	2/53
			> 1000A	RM1-XA9	*
AC and DC	Thermal timer	48-500V	Any type of duty	RT1-TK	2/53
* For information on these relays please consult your local sales office.					
AC < 60 Hz and DC	Magnetic max. or min. current or-voltage relay	20-625V	2 to 900A	RM1-J	2/54
AC with rectification and DC	Adjustable differential max. or min. current or voltage sensitive relay	0.1-600V	< 30A DC	RN1-BA	2/55
			> 30A DC or > 5A AC	RN1-BA with current transformer or shunt	*
DC	Adjustable current or voltage vibrating relay	0.5 - 600V	0.3 to 900A	RVE-VB1	2/56
DC	Similar to above but having 2 coils. Additive or subtractive flux	0.5 - 600V	0.3 to 900A	RVE-VB2	2/56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- LR1/RA1 — protection against overload, phase unbalance and phase failure.
- LR3/RB1 — overload protection only: for lighting, heating, etc.
- Ambient temperature compensation from -20°C to +60°C.
- Signal contact incorporated as standard on LR1 relays.

UTE NF C63650  
VDE 0660  
• Approvals: (600V) (S) (S)  
NOTE: The LR1-D40355 and LR1-D6335 are not CSA approved as standard. For the use the UL version. Please consult your local sales office.  
• Approvals pending:  
ASE

DIFFERENTIAL RELAYS	Recommended current range AC or DC in amps.	Associated fuse rating in amps *Motor protection fuses	Power rating for AC3 duty 3-phase 50 or 60 Hz						Reference	Weight (kg)	ATTACHMENTS	
			220V	380/440V	500V	660V						
			kW	HPkW	HPkW	HPkW	HP	HP				
 <p>LR1-D12316</p>	D09	0.1-0.16	2	Select the relay corresponding to the motor full load current						LR1-D09301	0.12	Remote tripping device LA7-D0903*
		0.16-0.25	2							LR1-D09302		
		0.25-0.40	2							LR1-D09303		
		0.40-0.63	2			0.37	0.5	LR1-D09304				
		0.63-1	4			0.37	0.5	1	LR1-D09305			
		1-1.6	6		0.37	0.75	1.1	1.5	LR1-D09306			
		1.6-2.5	10		0.37	0.75	1.1	1.5	2	LR1-D09307		
		2.5-4	15		0.75	1.5	2.2	3	4	LR1-D09308		
		4-6	15		1.1	2.2	3	4	5.5	LR1-D09310		
		5.5-8	20		1.8	3	4	5.5	7.5	LR1-D09312		
		7-10	25*		2.2	4	5.5	7.5	10	LR1-D09314		
		D12	10-13	30*	3	5.5	7.5	10	13.5	LR1-D12316		0.12
	D16	13-18	40*	4	7.5	10	15	20	LR1-D16321	0.12	Adaptor terminals for mounting on contactors D40 and D63	
	D25	18-25	50*	5.5	11	15	18.5	25	LR1-D25322	0.12	LA7-D4058	
	D40	23-32	60*	7.5	15	18.5	22	30	LR1-D40353	0.34	Remote tripping device LA7-D4003*	
		30-40	80*	10	18.5	22	30	40	LR1-D40355		Electrical reset device LA7-D4053*	
	D63	38-50	100*	11	22	30	37	50	LR1-D63357	0.34	Baseplate for independent mounting LA7-D4054	
		48-57	100*	15	25	37	45	60	LR1-D63359		Lead sealing kit LA7-D4052	
		57-66	125	18.5	30	45	55	75	LR1-D63361			
	FA	60-80	150*	22	37	55	55	75	RA1-FA6080	1.16	Trip signal contact N/O ZC1-RP1 N/C ZC1-RP2	
	GA	75-105	250*	30	55	75	90	125	RA1-GA75105	1.16	Remote tripping device ER1-FA1*	
	HA	95-125	250*	30	55	75	110	150	RA1-HA95125	1.35	Electrical reset device ER1-FA2*	
		120-160	350*	45	75	90	132	175	RA1-HA120160		Start button ZC1-RP5	
		150-200	350*	55	90	132	160	220	RA1-HA150200		Lead sealing kit RA1-FZ01	
NON-DIFFERENTIAL RELAYS	The sizes are similar to those quoted above for the LR1 and RA1 overload relays							The reference LR1 becomes LR3 and RA1 becomes RB1	Connector for cable without tail: FA DZ2-FB GA DZ2-GA HA DZ2-HA			

NOTE: FA relays are also available in 14 other sizes from 1 to 59.9A. Please consult your local sales office.

- When ordering: NOTE: Set the overload relay to the motor nameplate full-load current.
- An overload relay. Please state the exact reference as shown above.
  - An electrical attachment. Complete the reference with the letter indicating the control circuit voltage and frequency as shown in the table: Example: LA7-D0953F.
  - A mechanical attachment. State the exact reference.

Control circuit voltage (V)		
50 Hz	60 Hz	Ref.
24V		B
42V	48V	D
48V		E
110V	120V	F
	208/220V	L
220V	240V	M
240V		U
380V	440V	Q

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CURRENT TRANSFORMER OPERATED THERMAL OVERLOAD RELAYS

Used when the current is greater than 200 A and/or when:

— with FUSES-CONTACTORS-OVERLOAD assembly, the breaking of high overcurrents must be ensured by fuses only (not by relays with magnetic tripping).

— with PLUG-IN CONTROL CENTRES and similar equipment, the CT's mounted on the fixed part are calibrated for each output current, while each tray has the same low-rated relay.

— with LONG STARTING TIMES (more than 7 seconds for an average current of 5 In) a relay would trip directly.

CT's with a low "saturation index" are used in order to increase the time up to about 30 seconds. Beyond this, normal CT's are used, the secondary being short-circuited for a time equal to the starting time less the tripping time of the relays.

When the sole function of the relay is to provide overload protection for a motor (or balanced circuit) with 3-phase supply without neutral, supply via 2 CT's is normal and conserves all the relay characteristics, including tripping in the event of phase failure (differential).

When LR1-D09305 (.63/1A) relays are used with CT's for PROTECTION, use 10% accuracy class (alternatively, 5% if a small ratio error is required) with 1 Amp secondaries.

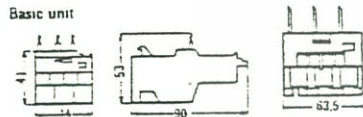
### DIMENSIONS

LR1-D09, D12, D16 & D25

LR1-D40 & D63

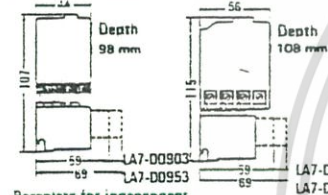
RA1-FA to HA

Basic unit

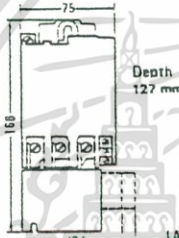
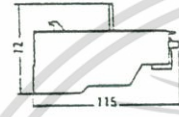
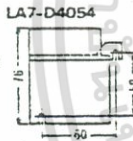


Mounted on contactor

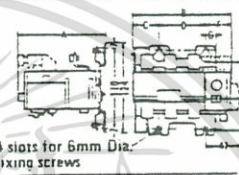
LR1-D09 & D12



Baseplate for independent mounting

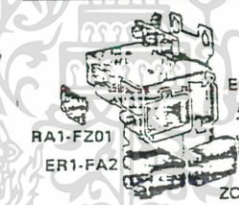


Baseplate for independent mounting

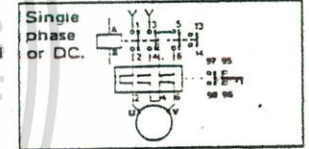
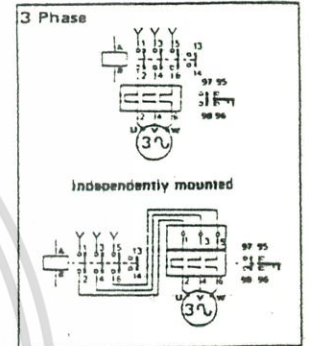


4 slots for 6mm Dia. fixing screws

Dimension reference	RA1-FA	RA1-HA
A	124.5	143
B	135	159
C	33	42
D	64	80
F	37	40
G	15.5	16
H	50	50
I	43	48



### SCHEMES



### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Overload relay type	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FA	GA	HA					
									95-125	120-160	150-200			
Rated voltage	All standards: 660V except CSA: 600V (common between N/O & N/G)						550V AC 600V DC			550V AC				
Frequency	Up to 400 Hz						25 to 400 Hz			50 & 60 Hz				
Power consumption per phase at max. current setting.	1.65 to 2.3 watts						3.65 to 4 watts			5.6 to 7.3W	7.6 W	6 VA	9 VA	12 VA
Power circuit wiring capacity with screw and clamp	Capacity	flexible				solid								
	Capacity	1 or 2 x 6mm <sup>2</sup>				1 or 2 x 10mm <sup>2</sup>		1 x 25mm <sup>2</sup>		2 x 16mm <sup>2</sup>		2 x 25mm <sup>2</sup>		
Power circuit wiring capacity with connector	Capacity	flexible				solid								
	Capacity	25mm <sup>2</sup>				35mm <sup>2</sup>		70mm <sup>2</sup>		50mm <sup>2</sup>		95mm <sup>2</sup>		
Control circuit wiring capacity	2 x 2.5mm <sup>2</sup>													
Auxiliary contacts	Occasional making and breaking capacities													
Thermal rating 10A	AC						DC							
	48V	110V	220V	380V	500V	110V	220V	440V	600V					
LR1-D09 to D63	55A	55A	55A	45A	30A									
RA1-FA to HA	4 000VA	8 000 VA	14 000 VA	12 000 VA	10 000 VA	300 W	200 W	175 W	120 W					

LR1-D09 to D63

RA1-FA to HA

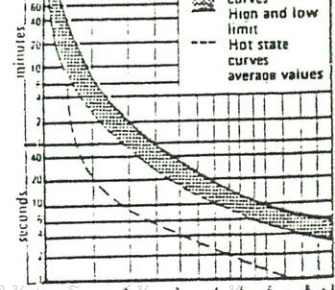
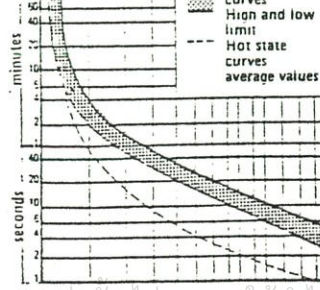
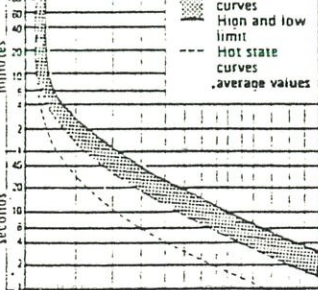
• Tripping curves

All overloads have ambient temperature compensation between -20°C and +60°C  
Storage temperature -60°C to +60°C

LR1-D09 to D63

RA1-FA & GA

RA1-HA



Multiples of the setting current

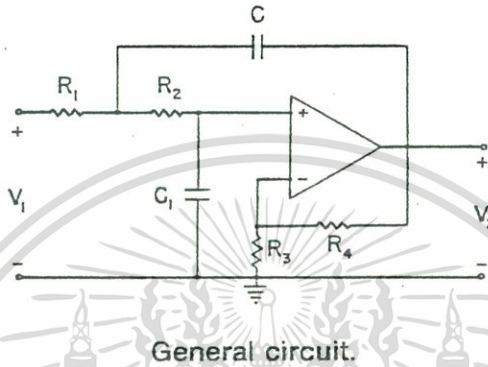
Multiples of the setting current

Multiples of the setting current

## Manual of Active Filter Design

with their graphs are presented first, followed by the fourth-order filters and their graphs.

### SUMMARY OF LOW-PASS SECOND-ORDER FILTER DESIGN PROCEDURE



#### Procedure

Given  $f_c$  (Hz), gain, and filter type (Butterworth or Chebyshev), perform the following steps:

1. Select a value of capacitance  $C$ , determining a  $K$  parameter from Fig. 2.10a if  $f_c$  is between 1 and  $10^2 = 100$ , from Fig. 2.10b if  $f_c$  is between 100 and  $10^4 = 10,000$ , and from Fig. 2.10c if  $f_c$  is between 10,000 and  $10^6 = 1,000,000$  Hz.
2. Using this value of  $K$ , find the remaining element values of the circuit from the appropriate one of Figs. 2.11 through 2.15 for the Butterworth filter, and Figs. 2.16 through 2.27 for the Chebyshev filter, depending on the gain and, in the Chebyshev case, the dB ripple desired.
3. Select standard element values which are as close as possible to those indicated on the graph and construct the circuit.

#### Comments and Suggestions

The curves are designed for 35 standard values of capacitance. Any intermediate values of capacitance may be used by observing that dividing the capacitance values by a constant  $k$  multiplies the cutoff frequency  $f_c$  by  $k$ . The resistances remain unchanged. This procedure of changing the capacitances may be accomplished by interpolation on the frequency versus  $K$  parameter graphs.

If the op-amp to be used has a low-input resistance (less than

250 k $\Omega$ ), values of  $K$  from 1 to 10 give best results. For higher input resistances (like 1 M $\Omega$ ),  $K$  values up to 25 are acceptable, and for very high input resistances, such as those associated with FET op-amps, values of  $K$  up to 100 may be used in most cases.

The values on the graphs for  $R_3$  and  $R_4$  were determined to minimize the dc offset of the op-amp. Other values of  $R_3$  and  $R_4$  may be used as long as the ratio  $R_4/R_3$  is the same as that of the graph values. Standard element values of 5% tolerance normally yield acceptable results, but for best performance higher precision elements with values close to the graph values should be used. This is especially true for the higher gains where the element values are much more critical.

Finally there must be a dc return to ground at the filter input, the open-loop gain of the op-amp should be at least 50 times the gain of the filter at  $f_c$ , and the desired peak-to-peak voltage at  $f_c$  should not exceed  $10^6/\pi f_c$  times the slew rate of the op-amp.

A specific example of a second-order design is given in Sec. 2.3.

2.3.



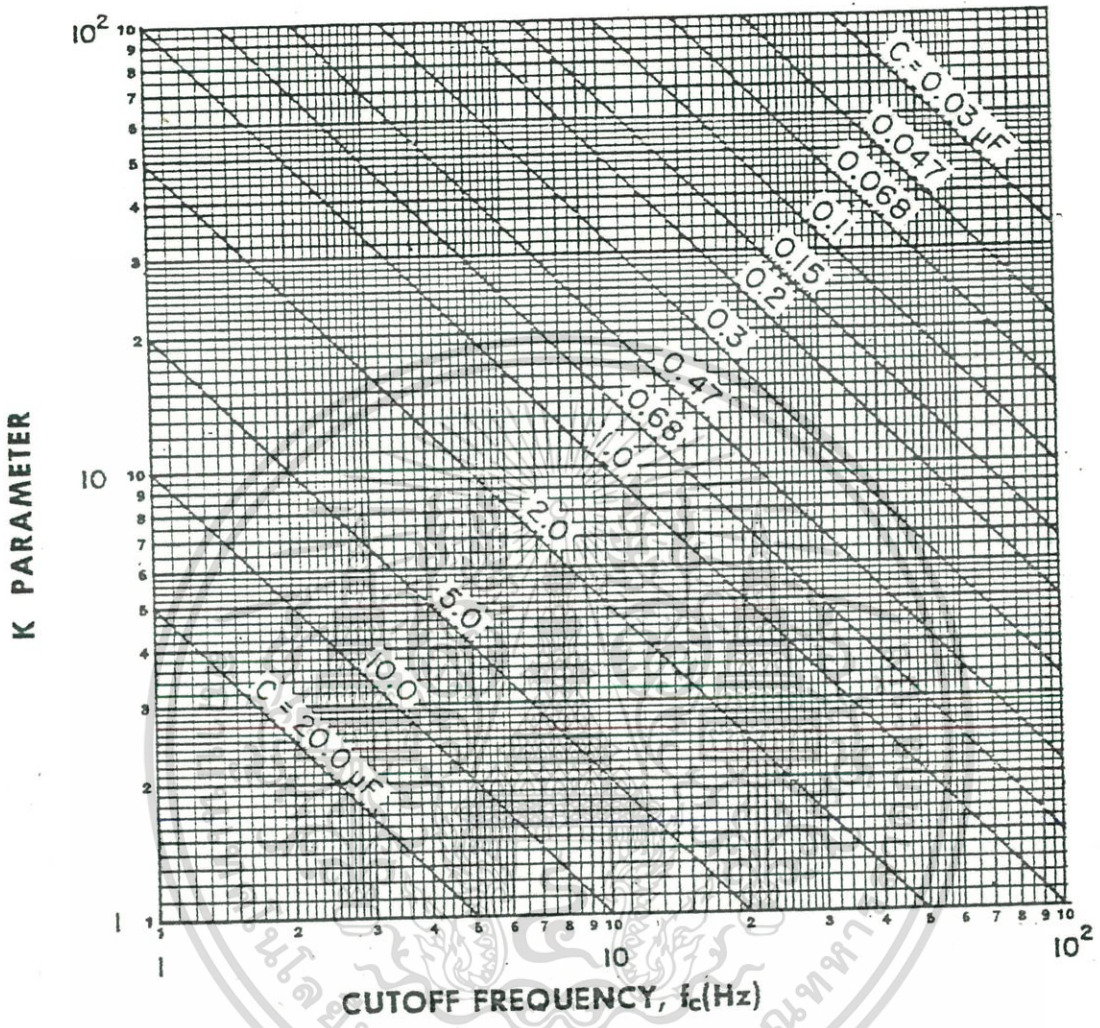
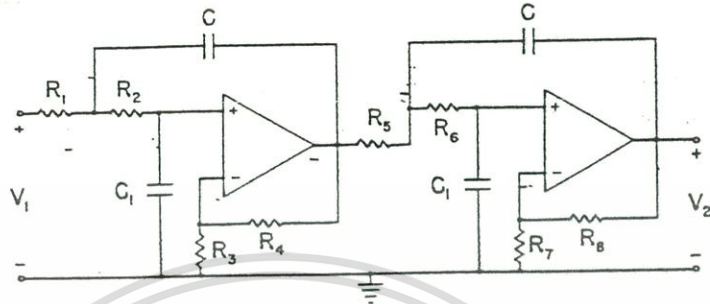


Fig. 2.10. (a) K parameter versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SUMMARY OF LOW-PASS FOURTH-ORDER FILTER DESIGN PROCEDURE



General circuit.

### Procedure

Given  $f_c$  (Hz), gain, and filter type (Butterworth or Chebyshev), perform the following steps:

1. Select a value of capacitance  $C$ , determining a  $K$  parameter from Fig. 2.10a, b, or c, as described in the second-order low-pass case.
2. Using this value of  $K$  find the remaining element values of the circuit from the appropriate one of Figs. 2.28 through 2.30 for the Butterworth filter, and Figs. 2.31 through 2.42 for the Chebyshev filter, depending on the gain and, in the Chebyshev case, the dB ripple desired.
3. Select standard element values which are as close as possible to those indicated on the graph and construct the circuit.

### Comments and Suggestions

The suggestions given in the second-order low-pass case apply except that the open-loop gain of the op-amps should be at least 50 times the square root of the filter gain. The remarks in the second-order case for  $R_3$  and  $R_4$  apply also to  $R_7$  and  $R_8$ .

A specific example is given in Sec. 2.6.

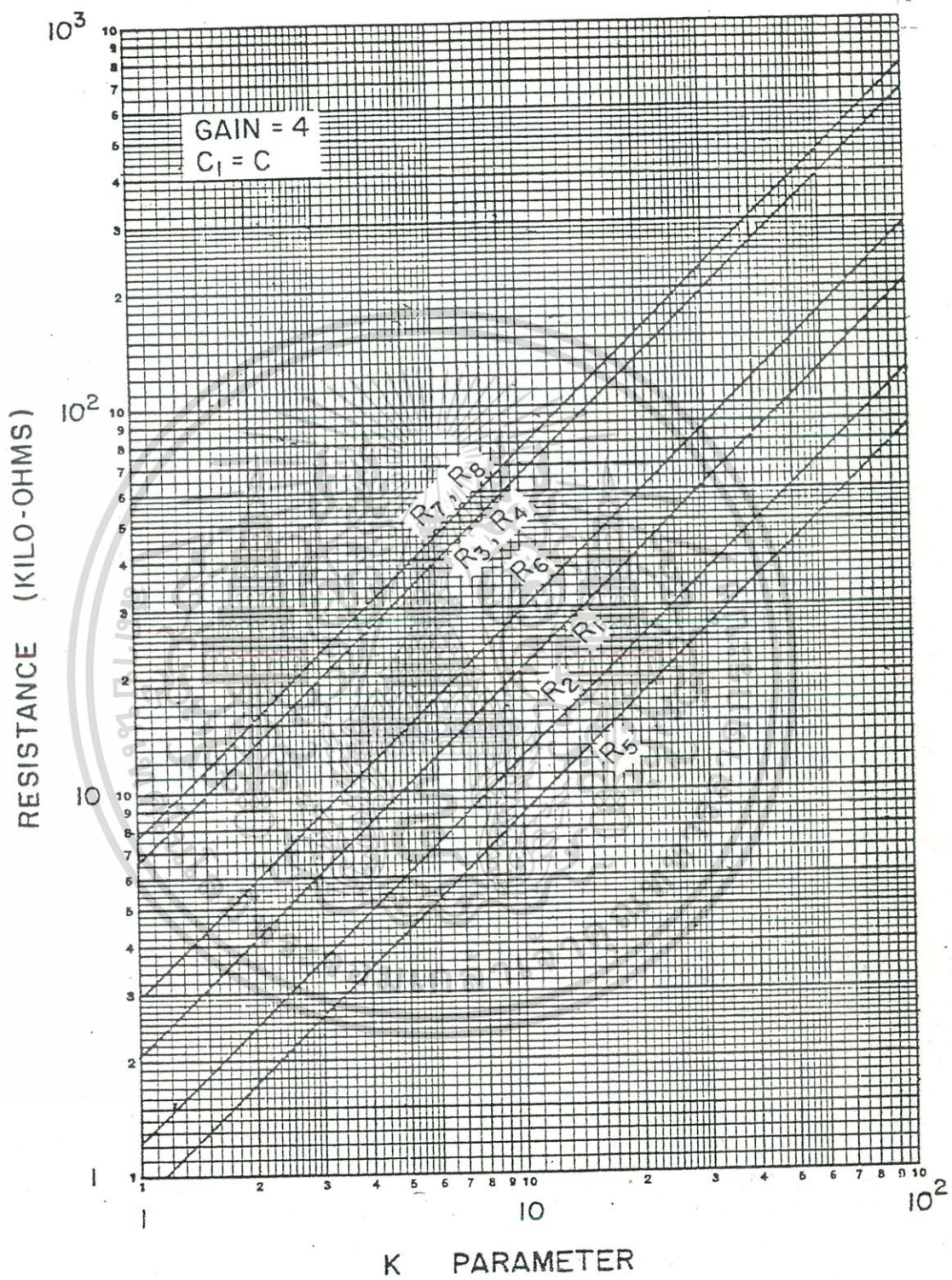


Fig. 2.28. Fourth-order low-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้