

ระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชัน  
ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์  
MICROCONTROLLER BASED MULTIFUNCTION  
MOTOR PROTECTION SYSTEM



นายนิรุช จิรสวรรณกุล  
MR. NIRUDH JIRSUWANKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-210-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 30963  
วัน, เดือน, ปี..... 4 ก.ย. 2541

**MICROCONTROLLER BASED MULTIFUNCTION  
MOTOR PROTECTION SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1998**

**ISBN 974-622-210-4**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชัน

ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

นักศึกษา

นายนิรุช จิรสวรรณกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. พิชิต ถ้ายอง

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2541

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสามเฟส ไม่ให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และการป้องกันไม่ให้มอเตอร์เสียหายจากการใช้งานเกินพิกัดกำลังปกติของมอเตอร์ด้วยวิธีการควบคุมการทำงานของระบบป้องกันมอเตอร์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์และซอฟต์แวร์ควบคุม ซึ่งในส่วน ของซอฟต์แวร์ควบคุมนั้นจะประกอบด้วยโปรแกรมหลัก ที่ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้ และโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันควบคุมการป้องกันมอเตอร์ โดยจะสร้างขึ้นตามกรรมวิธีของการป้องกัน แต่ละแบบแยกเป็นโมดูลอิสระ ซึ่งจะถูกเรียกใช้โดยโปรแกรมหลัก โดยผู้ใช้สามารถกำหนดและปรับค่าการทำงานของฟังก์ชันการป้องกันที่ต้องการ ได้ด้วยการติดต่อกับโปรแกรมหลัก ระบบป้องกันมอเตอร์นี้มีการทำงานโดยรวม คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับข้อมูลซึ่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากอุปกรณ์ตรวจวัด ทำการแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาดแปดบิต แล้วทำการประมวลผลตามฟังก์ชันที่ได้กำหนดไว้แล้วในโปรแกรมหลัก เมื่อได้ผลลัพธ์สุดท้ายแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณให้อุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ทำงาน พร้อมกับส่งสัญญาณแสดงสถานะของการป้องกันขณะนั้นด้วย

**THESIS TITLE** MICROCONTROLLER BASED MULTIFUNCTION  
MOTOR PROTECTION SYSTEM

**STUDENT** MR. NIRUDH JIRSUWANKUL

**THESIS ADVISOR** ASST. PROF. PICHIT LUMYONG

**LEVEL OF STUDY** MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG

**YEAR** 1998

### ABSTRACT

This thesis is proposed the method of digital controlled motor protection system to prevents the damages of a three phase induction motor caused-by both several of utility power supply quality abnormal and it owns rated power-overloading, this digital protection system control software comprising of the main program part and the subroutine program parts, the former is used for system hardware controls and user interfaces, the latter is used to be protection function which its algorithm is programmed in the form of subroutine modules or several functions individually, further more the user can be define the protection function as required easily by an encouragement of main program, the overall system operation resumes are first the microcontroller has received analog input signals from the measurement units, second it converted the analog signals to an eight-bits digital data, then it processed these data accordingly to the defined protection functions task in main program. , finally the microcontroller transferred its protection result or tripping signal to the motor protective gear to disconnect the motor from the utility power supply simultaneously with an alarming signal for status of the protected function monitoring.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำที่มีคุณค่ายิ่ง ในการทำวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณท่าน ผศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการทำวิจัยและได้กรุณาอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและห้องทดลองสำหรับการ ทำวิจัยแก่ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมที่ได้ให้โอกาสและความสะดวก ในด้านเครื่องมือและห้องทดลองในการทำวิจัยแก่ผู้จัดทำในฐานะหน่วยงานต้นสังกัดมา ณ ที่นี้ด้วย และขอบคุณน้องๆทุกคนที่ช่วยเหลือในการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทุกคน

คุณความดีใดๆก็ตามที่จะพึงมีพึงได้จากวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้ แก่ บิดา มารดา และครูอาจารย์ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทสรรพวิชาการศึกษาทั้งหลาย ทั้งปวงอันหาที่สุดมิได้ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจในการทำวิจัยแก่ผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี

นิรุช จิรสวรรณกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
3 สมมติฐานของการวิจัยและพัฒนา.....	3
4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
6 วิธีที่ใช้ในการวิจัย.....	3
2. หลักการของระบบป้องกันมอเตอร์.....	4
2.1 ภาวะผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังและผลกระทบ.....	5
2.1.1 ภาวะแรงดันเกิน.....	5
2.1.2 ภาวะแรงดันเกินชั่วคราว.....	8
2.1.2.1 แรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตชิง.....	8
2.1.2.2 แรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากฟ้าผ่า.....	12
2.1.3 ภาวะแรงดันต่ำ.....	15
2.1.4 ภาวะแรงดันไม่สมดุล.....	17
2.1.5 ภาวะการผิดลำดับเฟส.....	20
2.1.6 ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังผิดปกติ.....	21
2.1.6.1 E/f มีค่าเพิ่มขึ้น.....	22
2.1.6.2 E/f มีค่าลดลง.....	22

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและสภาวะการเกิดโหลดเกินของมอเตอร์...23	
2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์และวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์..... 24	
2.2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์..... 24	
2.2.1.2 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์..... 27	
2.2.1.3 วงจรสมมูลย์ของสเตเตอร์..... 28	
2.2.1.4 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งตัว..... 29	
2.2.2 ผลกระทบเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกิน..... 29	
2.2.3 ทฤษฎีการเพิ่มและลดคอดมทภูมิของมอเตอร์..... 30	
2.2.4 การป้องกันโหลดเกินในมอเตอร์..... 33	
2.2.5 โครงสร้างและการทำงานของรีเลย์โหลดเกินแบบความร่อน..... 36	
2.2.6 คุณลักษณะการใช้งาน..... 38	
2.3 สภาวะอุณหภูมิเกินในมอเตอร์..... 41	
3. การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์..... 45	
3.1 ความจำเป็นและการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ควบคุมการป้องกันมอเตอร์..... 45	
3.2 องค์ประกอบของระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม..... 46	
3.2.1 ส่วนการวัดและการแปลงสัญญาณ..... 47	
3.2.1.1 ส่วนการวัดและตรวจจับสัญญาณ..... 47	
3.2.1.2 การชั่งตัวอย่างสัญญาณ..... 48	
3.2.1.3 การคงค่าตัวอย่างสัญญาณ..... 50	
3.2.1.4 การแปลงและจัดระดับค่าสัญญาณ..... 51	
3.2.1.5 หลักการที่ใช้ในการคำนวณ..... 55	
3.2.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์..... 58	
3.2.2.1 ส่วนควบคุมและประมวลผล..... 58	
3.2.2.2 ส่วนควบคุมการเดินเครื่อง..... 59	
3.3 การทำงานของรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม(ซอฟต์แวร์)..... 60	
3.3.1 โครงสร้างหลัก..... 60	

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.1 โครงสร้างหลัก.....	60
3.3.2 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันมอเตอร์.....	61
3.3.2.1 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันแรงดันต่ำ.....	62
3.3.2.2 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดันเกิน.....	64
3.3.2.3 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดัน ไม่สมดุล.....	65
3.3.2.4 โครงสร้างของฟังก์ชันป้องกันโหลดเกิน.....	65
3.3.2.5 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการขาดหายไปของกระแสเฟสใดเฟสหนึ่ง.....	72
3.3.2.6 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการตัดขั้วของ โหลดทางกล.....	74
3.3.2.7 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการหายไปของ โหลดทางกล.....	76
3.3.2.8 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการลัดวงจร.....	77
3.3.2.9 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันการสลับเฟส.....	78
3.3.2.10 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันอุณหภูมิเกิน.....	80
3.3.2.11 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันความเร็วรอบเกิน.....	81
4. การออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์....	82
4.1 การกำหนดโครงสร้างของระบบป้องกัน โดยรวม.....	82
4.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์.....	83
4.2.1 ส่วนควบคุมการเดินเครื่องและปลดวงจร.....	83
4.2.2 ส่วนการวัดค่าสัญญาณหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	84
4.2.3 ส่วนของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์รับค่าแสดงผลข้อมูล.....	96
4.3 การออกแบบสร้างซอฟต์แวร์.....	100
5. ผลการทดลอง.....	124
6. สรุปผลการทดลองและวิจารณ์.....	137
บรรณานุกรม.....	139
ภาคผนวก.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	150

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การเลือกค่าตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันเกินจากการสวิตชิง..... 12
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมอเตอร์กับอุณหภูมิแตกต่างกันสูงสุด.....66
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา-กระแสตามมาตรฐาน NEMA-Class 2..... 68



## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1(a) ส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีผลต่อสภาวะแรงดันไฟฟ้า.....	6
2-1(b) บริเวณผู้ใช้ปลายทาง.....	6
2-2 ระบบรีเลย์ป้องกันของผู้ใช้ปลายทาง.....	7
2-3(a) แผนภาพเส้นเคเบิลของระบบไฟฟ้ากำลังและมอเตอร์.....	8
2-3(b) วงจรสมมูลย์ของระบบสายป้อนและมอเตอร์.....	8
2-4 อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์กับสายป้อนและการสะท้อนกลับของคลื่น.....	9
2-5(a) แรงดันเกินจากฟ้าผ่า.....	13
2-5(b) แรงดันเกินจากสวิตช์.....	13
2-6(a),(b),(c) ลักษณะการต่อวงจรมอเตอร์แบบต่างๆกับตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันเกิน.....	14
2-7 เวกเตอร์องค์ประกอบสมมาตร ลำดับบวก,ลบและศูนย์.....	18
2-8 การเกิดสายขาดหายไปในพื้นที่ใดๆของมอเตอร์.....	19
2-9 องค์ประกอบสมมาตรที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ประเภท.....	19
2-10 การลดพิกัดกำลังมอเตอร์เมื่อเกิดการไม่สมดุลย์ของแรงดัน.....	20
2-11 ลำดับเฟสปกติและผิดปกติ.....	20
2-12 กระบวนการอุตสาหกรรมที่การผิดลำดับเฟสมีผลกระทบรุนแรง.....	21
2-13 การกระตุ่นทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	22
2-14 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด.....	24
2-15 ขีดจำกัดการทนอุณหภูมิของฉนวนชนิดต่างๆ.....	24
2-16(a) โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	25
2-16(b) โครงสร้างของสเตเตอร์.....	25
2-16(c) โครงสร้างโรเตอร์กรงกระรอก.....	26
2-17 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์.....	27
2-18(a) วงจรสมมูลย์ของสเตเตอร์.....	28
2-18(b) วงจรสมมูลย์ของสเตเตอร์ที่ปรับปรุงใหม่.....	28

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-19 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ทั้งตัว.....	29
2-20(a) การเพิ่มอุณหภูมิ.....	32
2-20(b) การลดอุณหภูมิ.....	32
2-21 อุณหภูมิมอเตอร์เมื่อใช้งานแบบช่วงจังหวะ.....	33
2-22(a) กราฟของรีเลย์โพลคเกินต่างๆไป.....	34
2-22(b) กราฟของรีเลย์โพลคเกินในการป้องกันตามปกติ.....	35
2-23 กราฟลักษณะเวลา-กระแสชนิดต่างๆ.....	35
2-24 โครงสร้างภายในของรีเลย์โพลคเกินชนิดความร้อน.....	36
2-25 วงจรสำหรับการต่อใช้งานของรีเลย์โพลคเกิน.....	37
2-26 กราฟเวลา-กระแสของรีเลย์โพลคเกินตามมาตรฐานต่างๆ.....	38
2-27 การใช้หม้อแปลงอิมตัวภายในรีเลย์โพลคเกิน.....	39
2-28 การควบคุมการทำงานของรีเลย์โพลคเกินด้วยสวิตซ์ตรวจจับความเร็ว.....	40
2-29 วงจรการต่อใช้งานของรูปที่ 2-28.....	41
2-30 การลดพิภักดิ์ กำลังมอเตอร์ลงตามระดับความสูง.....	42
2-31(a),(b) ตำแหน่งที่เป็นไปได้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	43
2-32 ระบบป้องกันมอเตอร์หลายฟังก์ชัน.....	44
3-1 ระบบรีเลย์ที่ควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์/ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	46
3-2 โครงสร้างภายในระบบรีเลย์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	47
3-3 การตรวจวัดสัญญาณชนิดต่างๆ.....	48
3-4 การชักตัวอย่างสัญญาณ.....	49
3-5 กลุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ได้.....	49
3-6 การคงค่าสัญญาณ.....	51
3-7 การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล.....	52
3-8 โครงสร้างภายในของ A/D .....	52
3-9 โครงสร้างของ D/A.....	53

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-10 การจัดค่าระดับสัญญาณในการแปลงค่าA/D .....	55
3-11 โครงสร้างระบบปริเลย์ป้องกันมอเตอร์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	59
3-12 โครงสร้างส่วนควบคุมการเดินเครื่อง.....	60
3-13 โครงสร้างโปรแกรมหลัก.....	61
3-14 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันหลายๆฟังก์ชัน.....	62
3-15 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดันต่ำ.....	63
3-16 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดันเกิน.....	64
3-17 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดัน ไม่สมดุลย์.....	65
3-18 การกำหนดค่าในหน่วยความจำเป็น%.....	69
3-19 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันโหลดเกิน.....	70
3-20 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันโหลดเกินที่ปรับปรุงขึ้น.....	71
3-21 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการขาดหายไปของเฟสใดเฟสหนึ่ง .....	72
3-22 โครงสร้างในรูป 3-21 ที่ได้ปรับปรุงขึ้น .....	73
3-23 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันโหลดติดขัด (Load-Jam).....	75
3-24 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการหายไปของโหลด (Load-Loose) .....	76
3-25 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการลื้อคอโรเตอร์.....	77
3-26(a) โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการสลับเฟส .....	78
3-26(b) โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการสลับเฟส โดยใช้อินเตอร์รัพต์.....	79
3-27 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันอุณหภูมิเกิน.....	80
3-28 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันความเร็วรอบเกิน.....	81
4-1 โครงสร้างวงจรการเดินเครื่องแบบต่อตรง.....	84
4-2(a) การวัดค่าแรงดัน.....	85
4-2(b) การวัดค่ากระแส.....	85
4-2(c) การวัดอุณหภูมิ.....	85
4-2(d) การวัดความเร็วรอบ.....	85
4-3 การปรับปรุงสัญญาณสำหรับการวัดแรงดันให้กับ A/D.....	86

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-4 การปรับปรุงสัญญาณสำหรับการวัดกระแสให้กับ A/D.....	86
4-5(a) การขยายสัญญาณจาก TC.....	87
4-5(b) การชดเชยแรงดันที่อุณหภูมิจุดศูนย์องศา(°C).....	88
4-5(c) การสร้างแรงดันจากอุณหภูมิห้อง.....	88
4-6 วงจรรวมการแปลงสัญญาณ F/V .....	89
4-7(a) วงจรการตรวจวัดลำดับเฟส.....	89
4-7(b) วงจรการรวมเวกเตอร์ระหว่าง 2 เฟสใดๆ.....	90
4-7(c) เวกเตอร์แรงดันและกระแสที่ได้ในสภาวะปกติ.....	90
4-7(d) เวกเตอร์แรงดันและกระแสที่ได้เมื่อผิดปกติ.....	91
4-8 วงจรควบคุมขดลวดแม่เหล็กในสวิตช์แม่เหล็ก.....	93
4-9 ส่วนควบคุมการเดินเครื่องและการตั้งปลดวงจร.....	94
4-10 การเชื่อมต่อระหว่าง A/D กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	95
4-11(a) ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม-1.....	97
4-11(b) ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม-2.....	98
4-11(c) ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งาน.....	99
4-11(d) ส่วนของการแสดงผลการป้องกัน (Alarms).....	100
4-12(a) โปรแกรมหลัก 1/4.....	101
4-12(b) โปรแกรมหลัก 2/4.....	102
4-12(c) โปรแกรมหลัก 3/4.....	103
4-12(d) โปรแกรมหลัก 4/4.....	104
4-13(a) โปรแกรมย่อยเลือกการทำงาน (MODE) 1/2 .....	105
4-13(b) โปรแกรมย่อยเลือกการทำงาน (MODE) 2/2 .....	106
4-14 โปรแกรมย่อยการเลือกค่าเวลาถือครอง (MODE1).....	107
4-15(a) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE2) 1/2.....	108
4-15(b) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE2) 2/2 .....	109
4-16(a) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE3) 1/2.....	110

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-16(b) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE3) 2/2 .....	111
4-17(a) โปรแกรมย่อยการตั้งค่าใน MODE3 1/2 .....	112
4-17(b) โปรแกรมย่อยการตั้งค่าใน MODE4 2/2 .....	113
4-18 โปรแกรมย่อยการตั้งค่าสำหรับการป้องกันแรงดันต่ำ (Function Setting).....	114
4-19 โปรแกรมย่อยการตั้งค่าสำหรับการทำงาน/ไม่ทำงานในแต่ละฟังก์ชัน.....	115
4-20 โปรแกรมย่อยการตั้งค่าการทำงานอินเตอร์รัพต์.....	116
4-21 โปรแกรมย่อยฟังก์ชันการป้องกันโหลดเกิน.....	117
4-22 โปรแกรมย่อยฟังก์ชันการป้องกันการขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง.....	118
4-23 โปรแกรมย่อยการอ่านค่าปรับตั้งของแต่ละฟังก์ชันจาก RAM.....	119
4-24 โปรแกรมย่อยการเขียนค่าปรับตั้งแต่ละฟังก์ชันลงใน RAM.....	120
4-25 โปรแกรมย่อยการแสดงผลการทำงานด้วย LCD สำหรับใน- แต่ละสถานะการทำงานของระบบรีเลย์.....	121
4-26 โปรแกรมย่อยจำลองการลดค่าในหน่วยความจำ- ความร้อน (COOLDOWN1).....	122
4-27 โปรแกรมย่อยจำลองการลดค่าในหน่วยความจำ- ความร้อน (COOLDOWN2).....	123
5-1 การจัดระบบทดสอบ.....	125
5-2 ผลการทดสอบสภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ.....	126
5-3 ผลการทดสอบสภาวะแรงดันเกินกว่าปกติ.....	127
5-4 ผลการทดสอบสภาวะแรงดัน ไม่สมดุลย์1 .....	128
5-5 ผลการทดสอบสภาวะแรงดัน ไม่สมดุลย์2 .....	129
5-6 ผลการทดสอบสภาวะการถือค้โรเตอร์.....	131
5-7 ผลการทดสอบสภาวะการขาดหายไปของเฟสใดเฟสหนึ่ง.....	132
5-8 ผลการทดสอบสภาวะการผิดลำดับเฟส.....	133
5-9 ตำแหน่งของจุดต่อสัญญาณควบคุมการปลดวงจรมอเตอร์.....	136

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นมีความจำเป็นต้องใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับเป็นอุปกรณ์กำเนิดกำลังทางกลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการใช้งานมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ, ถึงแม้มอเตอร์เหนี่ยวนำจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความทนทานและมีประสิทธิภาพความเชื่อถือได้สูงก็ตาม, การใช้งานนั้นมีโอกาสที่จะทำให้มอเตอร์เสียหายได้มาจากหลายๆสาเหตุ[1] ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลงก่อนถึงอายุการใช้งานจริงที่ควรจะเป็น หรืออาจจะเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียระบบป้องกันมอเตอร์ที่มีความสามารถในการป้องกันมอเตอร์จากสาเหตุผิดปกติต่างๆให้ครอบคลุมได้มากที่สุด ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะงานที่จะนำมอเตอร์ไปใช้, เทคโนโลยีของระบบป้องกันและราคา, รวมถึงการกำหนดความต้องการของการป้องกันและการติดตั้งใช้งานด้วย, ปัจจุบันระบบป้องกันมอเตอร์หรือรีเลย์ป้องกันมอเตอร์ส่วนใหญ่จะเป็นแบบแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแบบอิเล็กทรอนิกส์นั้นยังไม่สามารถรองรับการป้องกันจากสาเหตุต่างๆได้อย่างครอบคลุม โดยจะเป็นรีเลย์ชนิดที่ทำงานในลักษณะใดลักษณะหนึ่งเพียงอย่างเดียวสำหรับรีเลย์ 1 ชนิด (one to one function) จึงทำให้การนำมาใช้งานในลักษณะที่ต้องการระดับของการป้องกันที่มีความสามารถสูงขึ้นหรือมีความหลากหลายฟังก์ชันเกิดความยุ่งยากเพราะต้องใช้อุปกรณ์มากขึ้นทำให้เกิดความซับซ้อนในการติดตั้งใช้งาน (Wiring) ในขณะที่เดียวกันทำให้เกิดความยุ่งยากในการตั้งค่าการทำงานสำหรับรีเลย์แต่ละชนิด, นอกจากนั้นยังมีผลต่อการซ่อมบำรุงในอนาคตด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอผลงานวิจัย เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการพัฒนาออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชันที่สามารถป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่ให้เสียหายจากสาเหตุต่างๆในการใช้งาน ได้ดีเทียบเท่ารีเลย์แบบเดิมหลายชนิดและคิดว่าในรีเลย์โหนดเกินแบบความร้อนที่ใช้งานกันทั่วไป โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ออกแบบให้ทำงานโดยการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และซอฟต์แวร์ควบคุม ซึ่งทำให้ระบบมีขนาดเล็กและสามารถเปลี่ยนแปลงวิธีการหรือเพิ่มเติมฟังก์ชันการป้องกันได้ง่ายตามความต้องการในอนาคต, นอกจากนั้นยังสามารถลดอุปกรณ์การติดตั้งใช้งานได้อย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้รีเลย์แบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้เป็นการพัฒนาเครื่องต้นแบบเพื่อนำไปใช้ทดแทนรีเลย์ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น นอกจากนี้แล้วยังเป็นการริเริ่มเพื่อให้มีโอกาสได้พัฒนาความสามารถของระบบป้องกันดังกล่าวได้อย่างต่อเนื่องในอนาคตเนื่องจากระบบมีโครงสร้างหลักคือ ระบบไมโครโปรเซสเซอร์/ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมที่สามารถเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงาน(Algorithms)ได้อย่างอิสระตามความเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีของระบบรีเลย์ป้องกันที่มีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา, และเพิ่มโอกาสในการที่จะพัฒนาขีดความสามารถของระบบดังกล่าวให้มีความสามารถใกล้เคียงกับระบบป้องกันดังกล่าวที่มาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง ซึ่งจะมีใช้เฉพาะในระบบอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น เช่น ศูนย์ควบคุมมอเตอร์ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า(Power Plant), โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น

## 3 สมมุติฐานของการวิจัยและพัฒนา

สมมุติฐานในการทำวิจัยและพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชันนี้ได้อาศัยแนวความคิดจากหลักการการทำงานของระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบดั้งเดิมคือ ระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-mechanical Relay) ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานที่มีลำดับชัดเจนคือ การชักตัวอย่างสัญญาณ, การปรับเปลี่ยนรูปสัญญาณและขนาดสัญญาณ, การคำนวณเปรียบเทียบขนาดสัญญาณเพื่อใช้ในการตัดสินใจดำเนินการขั้นสุดท้ายสำหรับการป้องกัน, โดยขบวนการดังกล่าวทั้งหมดอาศัยการทำงานของรีเลย์แม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด, และแม้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาทำงานทดแทนรีเลย์แม่เหล็กไฟฟ้าง่ายๆแล้วก็ตาม, ยังคงมีข้อจำกัดคือ ความไม่ยืดหยุ่นในการปรับปรุงการทำงาน เนื่องจากไม่สามารถจะปรับเปลี่ยนรูปแบบหรือโครงสร้างการทำงานได้ตามความต้องการตามการพัฒนาวิธีการป้องกันใหม่ๆ, นอกจากนี้แล้วยังใช้อุปกรณ์รวม (Discrete Components) ในการทำให้ระบบสามารถทำงานในแต่ละฟังก์ชันมาก เมื่อมีความต้องการฟังก์ชันการป้องกันที่หลากหลายขึ้นจะทำให้ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก, ดังนั้นสมมุติฐานที่ตั้งไว้คือ ระบบรีเลย์ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น สามารถที่จะทดแทนฟังก์ชันการทำงานในทุกฟังก์ชันได้ด้วยโปรแกรมควบคุม ด้วยหลักการและเหตุผลดังกล่าวข้างต้น, และเมื่อสามารถพัฒนาระบบรีเลย์ป้องกันแบบใหม่นี้ได้แล้ว, ข้อดีที่จะได้คือ ฟังก์ชันการทำงานของระบบป้องกันมอเตอร์ทุกฟังก์ชันจะถูกเปลี่ยนรูปแบบจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นขั้นตอนวิธีการทำงาน (Algorithm) ในรูปแบบของโปรแกรมควบคุม โดยโปรแกรมย่อยแต่ละส่วนจะแทนการทำงานในแต่ละฟังก์ชัน ซึ่งโปรแกรมทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถาวร (ที่อ่าน-เขียนได้) ประเภท EPROM ซึ่งสามารถปรับปรุงโครงสร้างวิธีการทำงานในแต่ละฟังก์ชันได้ตามความต้องการ ดังนั้นจึงทำให้สามารถลดขนาดของระบบป้องกันลงได้อย่างมาก

#### 4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยได้อาศัยหลักการของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งแบบแม่เหล็กไฟฟ้า และแบบอิเล็กทรอนิกส์ มาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของขั้นตอนวิธีการทำงาน (Algorithm) เฉพาะของรีเลย์แต่ละชนิดเป็นชุดคำสั่ง (Program) บันทึกไว้หน่วยความจำโดยอาศัยหลักการคำนวณจากทฤษฎีการคำนวณเชิงเลขแบบพื้นฐาน ซึ่งการทำงานลักษณะดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการนำระบบไมโครโปรเซสเซอร์หรือ ไมโครโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้, ในการออกแบบสร้างนั้นสามารถกำหนดจำนวนของฟังก์ชันการป้องกันแต่ละชนิดได้หลายชนิดที่ทำงานได้ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียวกันจึงทำให้ระบบป้องกันนี้มีขนาดโดยรวมที่เล็กลง นอกจากนั้นแล้วยังสามารถเพิ่มเติมความสามารถในการสื่อสารแสดงสภาพการทำงานของระบบรีเลย์เอง และมอเตอร์ให้ผู้ใช้ทราบได้ด้วยการเพิ่มอุปกรณ์เชื่อมต่อกับ ไมโครโทรลเลอร์ที่เป็น โมดูลแสดงอักษรแบบจอผลึกเหลว (LCD) และอุปกรณ์สั่งงานด้วยคีย์สวิตช์เพื่อการควบคุมการทำงานรวมทั้งการปรับตั้งจุดทำงานของฟังก์ชันการป้องกันแต่ละชนิดได้, การทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานตามโปรแกรมควบคุมหลักที่บรรจุในหน่วยความจำถาวร

#### 5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการทำวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่การศึกษาการทำงานและหลักการของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์ชนิดต่างๆ, การศึกษาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้, การออกแบบสร้างโครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับการเชื่อมต่อกับระบบการเดินเครื่องมอเตอร์แบบต่อตรง, การกำหนดฟังก์ชันการป้องกันที่จะทำไปเป็นชุดคำสั่ง (Program) และการสร้างโปรแกรมควบคุม (Programming), สุดท้ายจะเป็นการทดลองเพื่อทราบผลการออกแบบสร้างและการทำงานของฟังก์ชันการป้องกันชนิดต่างๆ

#### 6 วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ในการทำวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาข้อมูลการทำงานของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้มีการนำไปใช้งานตามกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ และจากข้อมูลของผู้ผลิตระบบรีเลย์ป้องกันดังกล่าว, นอกจากนั้นได้ศึกษาจากเอกสาร การวิจัยของวารสารการวิจัยต่างประเทศ (IEEE Journals, Proceeding and Symposium) เพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

## บทที่ 2

### หลักการของระบบป้องกันมอเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์เครื่องจักรแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำงานโดยอาศัยหลักการแปลงรูปพลังงาน (Energy Conversion) ผ่านตัวกลางคือ สนามแม่เหล็ก, จากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานสนามแม่เหล็กและจากพลังงานสนามแม่เหล็กไปเป็นพลังงานทางกลที่นำไปใช้ขับโหลดทางกลที่เพลา, นอกจากนี้ยังเป็นพลังงานสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนที่แกนเหล็กและที่ขดลวดของมอเตอร์, ความร้อนสูญเสียที่คล้ายถูกป็น, โดยทั่วไปแล้วเราจะเลือกใช้งานมอเตอร์ด้วย ข้อกำหนดรายละเอียด (Specification) ของผู้ผลิตเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่จะติดตั้งมอเตอร์ใช้งาน โดยจะต้องพิจารณาหลายส่วนคือ ระบบไฟฟ้ากำลัง (Utility Power Supply), ลักษณะโหลดทางกลที่ต้องการขับ, สภาพแวดล้อมที่จะติดตั้งมอเตอร์ (Environments) ซึ่งจะอยู่ในรูปของการกำหนดระดับการป้องกันตามมาตรฐาน IEC (IP-Index) เป็นต้น, เมื่อเราสามารถปฏิบัติตามขั้นตอนดังกล่าวแล้ว เราสามารถจะมั่นใจได้ว่าจะสามารถเลือกมอเตอร์ที่สามารถทำงานได้เหมาะสมที่สุด และมีอายุการใช้งานได้ยาวนานไม่น้อยกว่าที่ผู้ผลิตระบุไว้ในข้อกำหนดรายละเอียด ครอบคลุมเวลาในการใช้งานมอเตอร์นั้นอยู่ภายใต้สภาพเงื่อนไขต่างๆที่ปกติ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นเราไม่สามารถจะควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆดังกล่าวให้อยู่ในสภาพปกติตลอดเวลาได้, ในบางกรณีอาจเกิดจากการใช้งานมอเตอร์ที่ไม่เหมาะสมจากผู้ใช้งานเอง เช่น การขับโหลดเกินกำลังมอเตอร์ในบางครั้งหรือบ่อยครั้ง, การเดินเครื่องมอเตอร์ซ้ำๆกันหลายครั้งเกินจำนวนครั้งที่ปลอดภัย (Safety intermittent-start) เป็นต้น ดังนั้นความสำคัญของระบบป้องกันมอเตอร์ที่ต้องพิจารณาคือ เมื่อมีสภาวะผิดปกติเกิดขึ้นไม่ว่าจะเกิดจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง หรือเกิดจากผู้ใช้งานก็ตาม ระบบป้องกันจะต้องสามารถตรวจพบและควบคุมสภาพการทำงานของมอเตอร์ด้วยการปลดวงจรหรือ ไม่อนุญาตให้ทำการเดินเครื่องมอเตอร์ได้ รวมทั้งสามารถแจ้งผลการป้องกันและ สาเหตุผิดปกติได้(Alarms), ในบางกรณีสำหรับสภาพผิดปกติบางอย่างระบบป้องกันมอเตอร์ไม่จำเป็นต้องปลดวงจรมอเตอร์ออกทันทีที่ตรวจพบสภาพผิดปกตินั้นๆเพื่อป้องกันมิให้มีการหยุดเดินมอเตอร์โดยไม่จำเป็น (Nuisance Trip) เช่น การเกิดโหลดเกินเพียงเล็กน้อย, การเกิดโหลดเกินช่วงระยะเวลาสั้นๆ หรือการเกิดแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังตกลงเพียงเล็กน้อยหรือในช่วงเวลาเพียงเล็กน้อย (Voltage dip) เป็นต้น, และในบางกรณีที่เกิดสภาพผิดปกติบางอย่างระบบป้องกันมอเตอร์จะต้องปลดวงจร

เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ออกทันทีที่ตรวจพบ เช่น การเกิดสภาวะผิดปกติดับเฟส, การเกิดสภาพไม่สมดุลอย่างรุนแรง เช่น การหายไปของแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งหรือการเกิดการเปิดวงจรของเฟสใดเฟสหนึ่ง เป็นต้น

จากหลักการทำงานของการแปลงรูปพลังงานของมอเตอร์ดังกล่าวข้างต้นสามารถจัดกลุ่มพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่ กลุ่มพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า, กลุ่มพารามิเตอร์ทางกลและกลุ่มพารามิเตอร์ทางความร้อน ซึ่งกลุ่มพารามิเตอร์ต่างๆดังกล่าวนี้จะเป็นตัวบ่งชี้สภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ดังนั้นระบบป้องกันจึงต้องอาศัยการตรวจวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์เหล่านั้น เพื่อทำการตรวจสอบว่ามอเตอร์ที่กำลังใช้งานอยู่นั้นมีสภาพการทำงานที่เป็นปกติหรือไม่ นอกจากนั้นแล้วต้องทำการตัดสินใจว่าจะทำการปลดวงจรมอเตอร์ออกหรือไม่หรือยังคงอนุญาตให้มอเตอร์นั้นทำงานได้ต่อไป พร้อมทั้งแสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์ด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งการแสดงผลของสภาพผิดปกติเพื่อให้ผู้ใช้สามารถรับรู้ได้ ซึ่งในบทนี้จะได้นำเสนอการวิเคราะห์และจัดกลุ่มของสาเหตุผิดปกติตามกลุ่มของพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้ว

## 2.1 สภาวะผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังและผลกระทบ

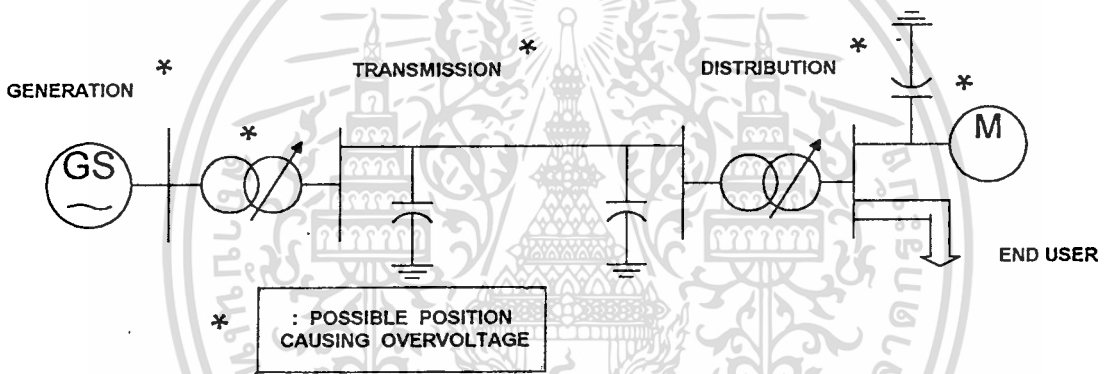
ระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์มีพารามิเตอร์ที่จะต้องพิจารณาคือแรงดัน, ลำดับเฟส, ความสมดุลของแรงดัน, ความถี่ โดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับการใช้งานมอเตอร์ที่สำคัญคือ ความสมดุลของแรงดัน และ อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่ที่มอเตอร์ได้รับ, ในกรณีแรกที่เกิดสภาวะความไม่สมดุลของแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั้น เราจะวิเคราะห์ผลของมันได้โดยอาศัยเครื่องมือวิเคราะห์คือการวิเคราะห์องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) ทางเวกเตอร์ของทั้งแรงดันสามเฟสและกระแสสามเฟสที่มอเตอร์ได้รับซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป, ในกรณีที่สองเมื่อมอเตอร์ได้รับค่าแรงดันต่อความถี่ที่ผิดปกติซึ่งอาจเกิดจากแรงดันเปลี่ยนแปลง, ความถี่เปลี่ยนแปลงหรือเกิดจากทั้ง 2 กรณี ไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงในทางที่เพิ่มค่าขึ้นหรือลดลงก็ตามมีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ที่ด้อยประสิทธิภาพลงรวมทั้งเกิดความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้นดังหัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไป

### 2.1.1 สภาวะแรงดันเกิน (Excess or Over Voltage)

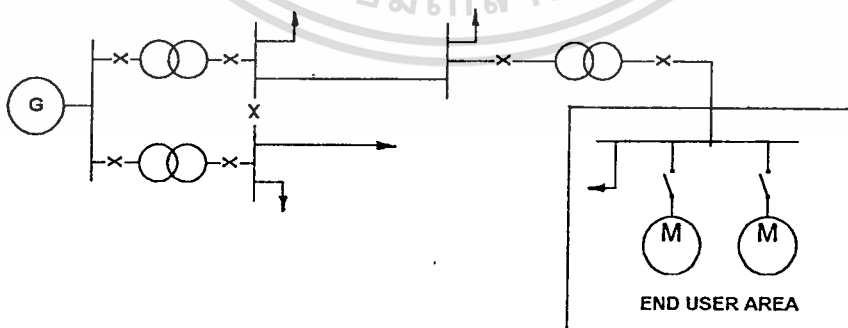
สภาวะแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากระบบไฟฟ้ากำลังต้นทางที่จ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีสาเหตุของการเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น การควบคุมการกระตุ้นของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าไม่เหมาะสม (Exciter Control system) ณ แหล่งผลิตกำลังต้นทาง, การควบคุมระดับแรงดันของระบบส่งและระบบจำหน่ายที่ไม่เหมาะสมในบางช่วงเวลา (Transmission and Distribution system) หรืออาจจะเกิดจากค่าพารามิเตอร์ของระบบสายส่งและสายป้อนไม่เหมาะสม เช่น มีค่าความจุที่ปลายทางของสายส่งหรือสายป้อนมีค่าสูงเกินไป เป็นต้น หรือในบางกรณีในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานปลายทางที่อาจจะมีระบบควบคุมแรงดัน (AVR) ที่ใช้งานเป็นของตนเองมีสภาพการทำงานที่ผิดพลาดในบางช่วงเวลาก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสภาพแรงดันปลายทางที่ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับมอเตอร์, โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นสถานะแรงดันเกินที่ไม่มากนัก และอาจจะเกิดอย่างต่อเนื่องซึ่งบางครั้งช่วงเวลาดังกล่าวจะยาวนานพอจนไม่เหมาะที่จะใช้กับมอเตอร์ในสภาพแรงดันเกินเป็นเวลานานๆ เนื่องจากทำให้เกิดการอิมพัลส์ ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ในส่วนของแกนเหล็กของมอเตอร์ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียในแกนเหล็กมากผิดปกติ เมื่อสะสมเป็นเวลานานพอจะทำให้อุณหภูมิของมอเตอร์โดยรวมเพิ่มขึ้นอาจถึงจุดหรือขีดจำกัดด้านฉนวนของขดลวดมอเตอร์ได้ทำให้อายุการใช้งานของชั้นฉนวนของมอเตอร์ลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่เกินมาจากค่าปกติ (Nominal voltage), ระยะเวลาที่เกิดและอุณหภูมิที่เกินมาจากปกติ, สาเหตุต่างๆแสดงดังรูปที่ 2-1(a),(b)



รูป 2-1 (a) ส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีผลต่อสถานะแรงดันไฟฟ้า

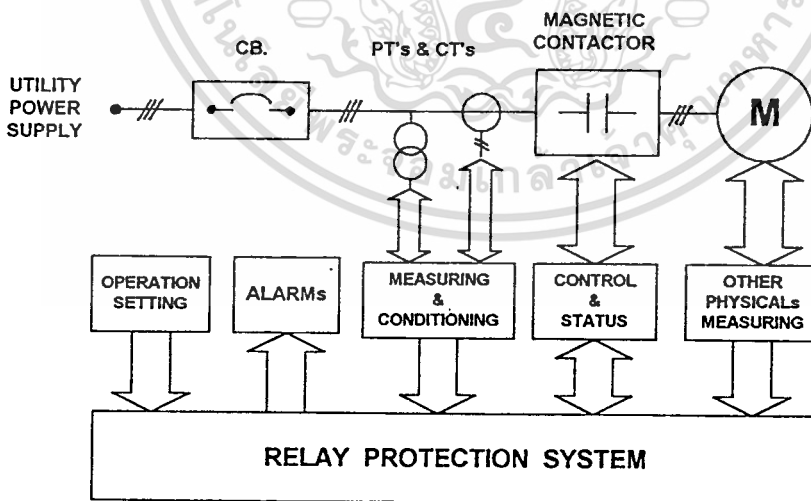


รูป 2-1 (b) บริเวณผู้ใช้ปลายทาง

จากรูปที่ 2-1(a)และ(b) จะเห็นว่าในส่วนของผู้ใช้ปลายทางนั้นเป็นบริเวณที่อยู่นอกเหนือการควบคุมของระบบผลิตและจำหน่ายกระแสไฟฟ้าต้นทาง จึงมีโอกาที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวันเรสสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เอกสารนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันปลายทางได้ ด้วยสาเหตุต่างๆที่ได้ระบุตามตำแหน่งในรูป 2-1(a) เว้นแต่ผู้ใช้ปลายทางจะติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Control Regulator:AVR) ซึ่งจะต้องลงทุนค่าใช้จ่ายสูงมากถ้าหากระบบโหลดของผู้ใช้ทั้งหมดมีพิกัดกำลังสูงๆ โดยทั่วไปแล้วโหลดหลายชนิดจะถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้ในระดับหนึ่ง ดังนั้นการใช้อุปกรณ์ระบบป้องกันเพื่อตรวจสอบสถานะเงื่อนไขของระบบไฟฟ้าเพื่อดูว่ายังมีสภาพที่อยู่ในเงื่อนไขที่พอใช้งานโหลดต่างๆได้จึงยังคงมีความจำเป็นซึ่งลงทุนค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่ามากโดยระบบป้องกันต่างๆไปแสดงดังรูปที่ 2-2

สำหรับการเกิดสภาพแรงดันเกินในกรณีนี้จะต้องใช้รีเลย์ป้องกันที่เรียกว่ารีเลย์แรงดันเกินที่สามารถตรวจสอบสภาพของแรงดันไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับโหลด โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตลอดเวลา เมื่อพบสภาพผิดปกติที่แรงดันเกินค่าพิกัดจะแจ้งให้ผู้ใช้งานมอเตอร์ทราบและในบางกรณีรีเลย์อาจทำการปลดวงจรมอเตอร์ออกเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการใช้งานมอเตอร์ได้ ตามมาตรฐานของ ANSI/IEEE C37.96-1988 นั้น กำหนดให้รีเลย์ป้องกันที่จะใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถกำหนดระดับแรงดันเกินให้ได้สูงสุด  $+15\%$  ของแรงดันที่พิกัดใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งหมายถึงว่ารีเลย์จะไม่อนุญาตให้ใช้งานมอเตอร์ได้ในกรณีที่เกิดสภาพแรงดันเกินสูงสุด  $15\%$  จากแรงดันที่พิกัดปกติ



รูป 2-2 ระบบรีเลย์ป้องกันของผู้ใช้ปลายทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

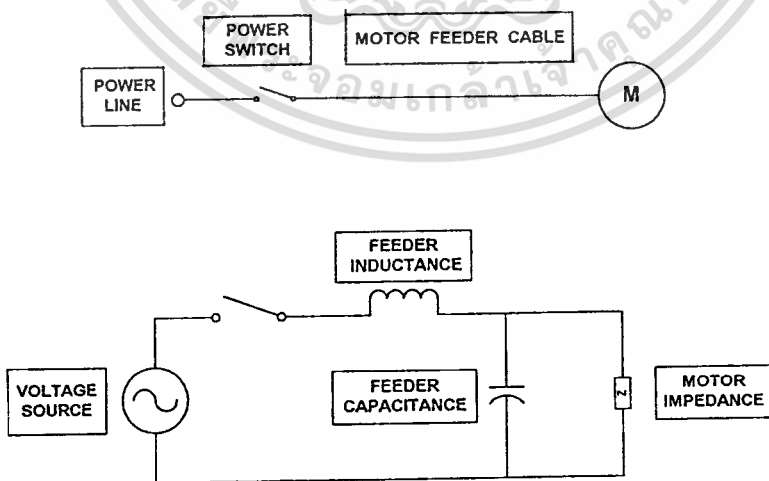
## 2.1.2 สถานะการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Overvoltage)

### 2.1.2.1 แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตชิง (Switching-Surge)

เป็นการเกิดแรงดันชั่วครู่ที่เกิดขึ้นอยู่เสมอขณะที่มีการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อกำลังต่างๆ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์, สวิตช์เกียร์, แมคเนติกคอนแทคเตอร์, โหลดเบรกสวิตช์, ฟิวส์ เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าอย่างกะทันหัน ไม่ว่าจะเป็นการตัดกระแสไฟฟ้าที่กำลังไหลอยู่หรือการต่อวงจรที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าอย่างทันที ตามทฤษฎีโครงข่ายไฟฟ้าแล้ว ในวงจรไฟฟ้าชนิดต่างๆ ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า, โหลดและระบบสายส่ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขึ้นในขณะเดียวกัน ดังรูปที่ 2-3 ในกรณีที่โหลดหรือระบบสายส่งนั้นมีค่าความเหนี่ยวนำแฝงอยู่ด้วยจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้อย่างชัดเจน ดังสมการที่ 2.1 ตามกฎของฟาราเดย์ เมื่อ  $L_s$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำในระบบ

$$V_s = L_s \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

ในทำนองเดียวกันการวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วครู่ในวงจรกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งในที่นี้จะใช้ทฤษฎีการเดินทางของคลื่นและการสะท้อนของคลื่นมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ การเกิดแรงดันเกินจากการสวิตชิงนี้จะมีรูปแบบของคลื่นที่มีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นที่เกิดจากฟ้าผ่า (Lightning Surge)

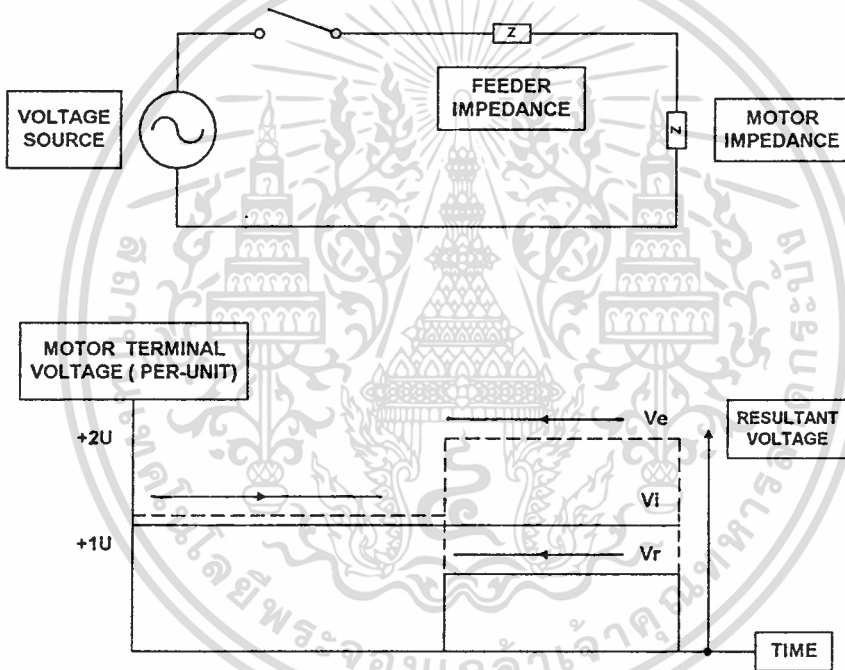


รูป 2-3(a),(b)

แผนภาพเส้นเดียวของมอเตอร์และวงจรสายป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากการตัดต่ออุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งนั้น มีองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีผลทำให้ขนาดและรูปร่างของรูปคลื่นที่เกิดขึ้นได้แตกต่างกันไป ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายป้อนที่เดินไปยังมอเตอร์ ค่าอิมพีแดนซ์ ณ.จุดปลายสายที่ต่ออยู่กับขั้วมอเตอร์ซึ่งอาจจะมีเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์อย่างเดียวหรืออาจจะรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดอื่นๆที่ต่ออยู่บนบัสเดียวกันกับมอเตอร์ด้วย จากรูปที่ 2-4 ที่เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจากรูปที่ 2-3(b) โดยการใช้ทฤษฎีการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบสายส่ง (Transmission line transient) ที่เดินทางแบบแผ่กระจาย (Wave propagation or Travelling Wave) [2] เราจะได้ความสัมพันธ์ที่สำคัญคือ



รูป 2-4 อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์กับสายป้อนและการสะท้อนกลับของคลื่น

$$v_i = Z_l i_i \tag{2.2}$$

$$v_r = -Z_l i_r \tag{2.3}$$

$$v_e = v_i + v_r \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $Z_l = Z_c = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}}$  ...Characteristic impedance ของสายป้อน

$$\text{และ} \quad P_i \rightarrow S_i = \frac{v_i^2}{Z_c} \quad (2.6)$$

$$P_r \rightarrow S_r = \frac{v_r^2}{Z_c} \quad (2.7)$$

$$\text{จาก} \quad v_e = v_i + v_r \quad (2.8)$$

และรูปที่ 2-4

$$S_{zm} = \frac{v_c^2}{Z_m} = \frac{(v_i + v_r)^2}{Z_m} \quad (2.9)$$

ดังนั้น

$$S_i = S_r + S_{zm} \quad (2.10)$$

แทนค่า  $S_i$ ,  $S_r$  และ  $S_{zm}$  จากสมการที่ (2.6), (2.7), และ (2.9) จะได้

$$\frac{v_i^2}{Z_c} = \frac{v_r^2}{Z_c} + \frac{(v_i + v_r)^2}{Z_m}$$

$$\frac{v_i^2 - v_r^2}{Z_c} = \frac{(v_i + v_r)^2}{Z_m}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{v_i - v_r}{Z_c} = \frac{v_i + v_r}{Z_m} \quad (2.11)$$

$$\text{หรือ} \quad v_r = v_i \left( \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c} \right) \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.4) จะได้

$$v_c = 2 v_i \left( \frac{Z_m}{Z_m + Z_c} \right) \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนมอเตอร์กับอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์มีผลต่อขนาดของแอมพลิจูดของแรงดันสวิตซ์ซึ่งที่ปลายสายขั้วมอเตอร์ (Motor terminal) ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนมีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ ในขณะที่ทำการปิดวงจรที่สวิตซ์กำลังนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วคราวที่ปลายสาย ที่ขั้วของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ขนาด 2 เท่าถึง 3.5 เท่าของพิกัดแรงดันปกติ และทุกครั้งที่เหตุการณ์ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเสื่อมของฉนวน (Deterioration of Insulation) แบบสะสมตามจำนวนครั้งที่เกิด (ซึ่งหมายถึงการเปิด/ปิดวงจรมอเตอร์ทุกครั้ง) และขึ้นอยู่กับลักษณะรูปคลื่นขณะที่เกิดขึ้นนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการเดินเครื่องมอเตอร์แบบต่างๆไปที่เป็นแบบต่อตรง (Direct on line Start:DOL) หรือแม้กระทั่งการเดินเครื่องมอเตอร์แบบสตาร์-เดลต้าก็ตาม ดังนั้นการใช้งานมอเตอร์ที่มีการเกินเครื่องแบบเปิดปิดวงจร-จรมอเตอร์เพื่อขับโหลดเป็นช่วงภาระ (Duty Cycle load) จะส่งผลให้อายุการใช้งานของชั้นฉนวนมอเตอร์ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการใช้งานหรือการเดินเครื่องแบบต่อเนื่องตามปกติ

ผลกระทบดังกล่าวที่มีผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ได้แก่การเกิดแรงเค้นทางกล (Transient Stress) ระหว่างขดลวดชั้นที่อยู่ติดกัน ทำให้ชั้นฉนวนที่เคลือบผิวตัวนำลวดทองแดงนั้นถูกแรงกระทำดังกล่าวสะสมทีละเล็กละน้อยจนทำให้อายุการใช้งานลดลงได้ ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันหรือควบคุมจำนวนครั้งของการเดินเครื่องมอเตอร์ให้เหมาะสมในช่วงเวลาที่ปลอดภัย เช่น อาจจะเป็นการจำกัดจำนวนครั้งของการเดินเครื่องต่อชั่วโมง (Starting per hour) เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วอาจจะต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันอื่นๆเช่น อุปกรณ์ป้องกันแบบพาสซีฟ (Passive Protection devices) เช่น ตัวความต้านทานที่แปรค่าตามแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear-Resistance) ประเภท MOV และ Surge Arresstor เป็นต้น หรืออุปกรณ์กรองแบบพาสซีฟ (Passive Filter) ต่อร่วมกับขั้วของมอเตอร์เช่นการใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อคร่อมระหว่างเฟสกับนิวทรัลทุกๆเฟสของมอเตอร์เพื่อเป็นตัวดูดคลื่นพลังงานในช่วงเกิดสวิตซ์ทรานเซียนและช่วยลดอัตราการใช้ขั้วของแรงดันเกินขณะสวิตซ์(Rise time reduction)เพื่อลดความเค้นทางไฟฟ้าลง ซึ่งจะต้องใช้ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าความต้านทานแฝง (ESR) ต่ำและค่าความเหนี่ยวนำสมมูลต่ำ ในขณะที่ต้องทนแรงดันได้สูงทั้งนี้เมื่อต่อตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้เข้าไปกับขั้วมอเตอร์แล้วจะต้องทำให้ค่าสมมูลรวมของอิมพีแดนซ์มอเตอร์กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายป้อน ข้อดีของการใช้ตัวเก็บประจุคือ อุปกรณ์มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการใช้อุปกรณ์ประเภท MOV และ Surge-Arresstor แต่มีข้อเสียคือ มีการดูดคลื่นพลังงานจากรูปคลื่นแรงดันเกินชั่วคราวแบบสวิตซ์ได้น้อยกว่า การเลือกใช้อุปกรณ์ทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปคลื่นที่จะต้องนำไปพิจารณาร่วมด้วย เช่น ขนาดของแอมพลิจูดยอด อัตราเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงขึ้น(Risetime)ของหน้าคลื่น นอกจากนั้นแล้วจะต้องพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายป้อนและค่าของอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ เป็นต้น ความจำเป็นสำหรับการป้องกันในลักษณะนี้ยังขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ภายนอกที่จะนำมาใช้ร่วมกับมอเตอร์ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้สวิตช์กำลังชนิดสูญญากาศ (Vacuum Circuit Breaker or Switch gear) เป็นอุปกรณ์ตัดต่อกำลังให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ตามมาตรฐานของ IEEE Surge Protection Devices Committee ได้ระบุไว้ว่า จะต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินชั่วคราวแบบสวิตช์ซึ่งติดตั้งพร้อมกับมอเตอร์จากผู้ผลิต [3] ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2-1

ตาราง 2-1 การเลือกค่าตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันเกินจากการสวิตช์

Machine voltage rating (phase-to-phase)	For installation at machine terminals or on machine bus†						For installation 1,500 to 2,000 ft out on directly connected exposed overhead lines		
	Protective capacitors			Station-type arresters			Distribution-type arresters		
	Voltage rating	Microfarads per pole	Single-pole units required	Voltage rating			Voltage rating		
				Un-grounded or resistance-grounded system	Effectively grounded system	Single-pole units required	Un-grounded or resistance-grounded system	Effectively grounded system	Single-pole units required
0-650	0-650	1.0	3*	650	650	3*	650	650	3
2,400	2,400	0.5	3*	3,000	3,000	3	3,000	3,000	3
4,160	4,160	0.5	3*	4,500	3,000 †	3	6,000	3,000 †	3
4,800	4,800	0.5	3	6,000	4,500	3	6,000	6,000	3
6,900	6,900	0.5	3	7,500	6,000	3	9,000	6,000	3

\* A single three-pole unit is commonly used.

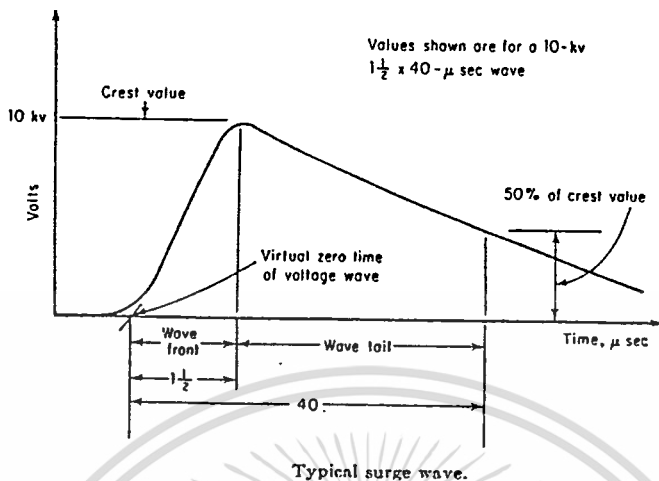
† For single-phase machines the same recommendations apply except that only two single-pole units are required if neither line is grounded and only one (on the ungrounded line) if one line is grounded.

‡ The use of 3,000-volt arresters on a 4,160-volt system requires an  $X_0/X_1$  ratio less than that necessary to make the system "effectively grounded."

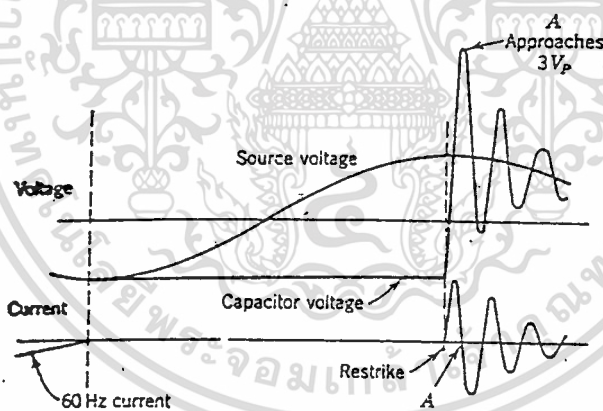
### 2.1.2.2 แรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากฟ้าผ่า (Lightning Surge Overvoltage)

แรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากฟ้าผ่า เกิดจากสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติมีลักษณะรูปคลื่นเช่นเดียวกับรูปคลื่นของแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์ ลักษณะของการเกิดแรงดันเกินดังกล่าวนี้ที่ปรากฏอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมี 2 ลักษณะคือ การเกิดฟ้าผ่าโดยตรงยังระบบไฟฟ้ากำลังและการเหนี่ยวนำเข้าไปยังระบบไฟฟ้ากำลังและการจ่ายพลังงานของประจุไฟฟ้าไปยังส่วนของวงจรต่างๆในระบบ ทั้ง 2 ลักษณะนั้นจะทำให้เกิดขนาดของแรงดันและรูปคลื่นที่ต่างกับกับแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์ โดยเฉพาะในส่วนอัตราเวลาช่วงขึ้นและลงของหน้าคลื่น ดังรูปที่ 2-5(a) และ 2-5(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



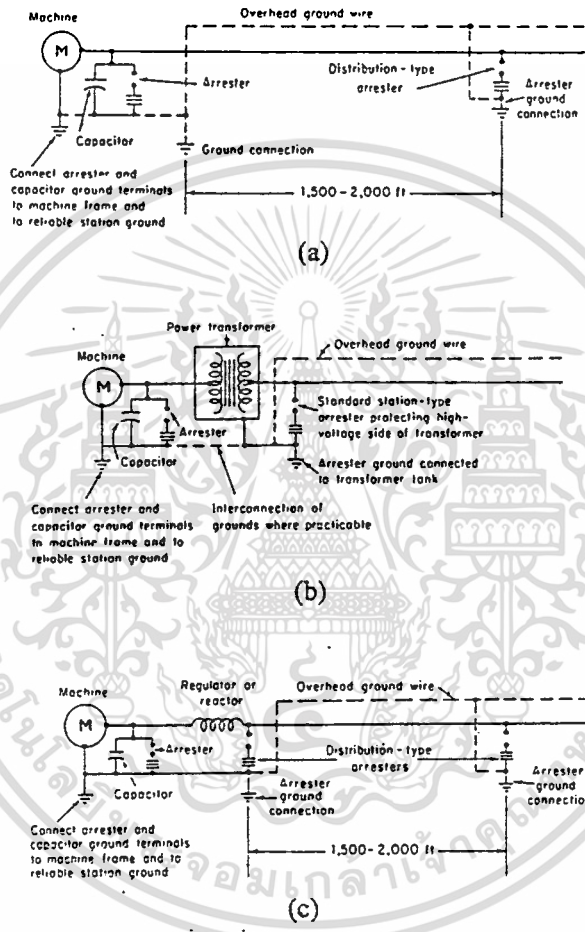
รูป 2-5(a) แรงดันเกินจากฟ้าผ่า



รูป 2-5(b) แรงดันเกินจากสวิตซ์

การป้องกันแรงดันเกินในลักษณะนี้จะทำในลักษณะเดียวกันกับการป้องกันแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากสวิตซ์ โดยทั่วไปแล้วถ้าการใช้งานมอเตอร์นั้นไม่ใช้งานที่อยู่นอกอาคารหรืองานสนามแล้ว โอกาสที่ระบบสายป้อนมอเตอร์หรือตัวมอเตอร์ที่จะได้รับแรงดันเกินจากฟ้าผ่าโดยตรงนั้นก็น้อยมาก ดังนั้นการป้องกันอาจจะใช้ MOV หรือตัวเก็บประจุก็เป็นการเพียงพอ ส่วนการใช้ Surge Arrestor จะสามารถครอบคลุมการป้องกันแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าโดยตรงและโดยการเหนี่ยวนำได้ทั้ง 2 ลักษณะ ซึ่งการใช้ Surge Arrestor นั้นเนื่องจากสามารถดูดกลืนพลังงานจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในช่องทางอื่นโดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดแรงดันเกินลักษณะต่างๆ ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ และยังสามารถทนแรงดันสูงมาก ๆ ได้ดี โดยทั่วไปการเลือกใช้ Surge Arrestor จะต้องเลือก Surge Arrestor ที่สามารถทนแรงดันได้เทียบเท่าหรือไม่เกินระดับแรงดัน BIL ของมอเตอร์ที่ต้องการป้องกันนั้นซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-1 โดยมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2-6(a), (b) และ(c)



รูป 2-6 ลักษณะการต่อวงจรมอเตอร์แบบต่างๆกับตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันเกิน

จากรูปที่ 2-6(a) นอกจากเราจะใช้ Arrestor เป็นอุปกรณ์ดูดกลืนพลังงานที่เกิดจากแรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากฟ้าผ่าแล้ว อาจจะใช้ตัวเก็บประจูดอรร่วมกันกับ Arrestor ได้เพื่อผลในการลดอัตราการขึ้นของแรงดันยอด (Rise time to crest reduction) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปรากฏบนฉนวนระหว่างขดลวดในมอเตอร์ลดลงดังรูปที่ 2-6

สำหรับบางกรณีอาจไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ Arrestor ดังกล่าว คือในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบใช้กับแรงดันต่ำ 600 V หรือน้อยกว่า ถ้าหากต่อร่วมกับสายป้อนแรงดันต่ำที่เดินมาจากหม้อแปลงที่ใช้งานอยู่ในระบบนั้นจะมีอุปกรณ์ Arrestor ป้องกันไว้แล้วดังรูปที่ 2-6(b) ส่วนใน

กรณีสุดท้ายคือการต่อวงจรมอเตอร์แบบต่อตรงโดยสายป้อน (Directly to exposed overhead line or feeders) จะต้องต่อ Arrestor ร่วมด้วยเสมอ

### 2.1.3 สถานะแรงดันต่ำ (Under Voltage)

สถานะการเกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าต่ำกว่าแรงดันใช้งานปกติ เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นได้โดยสาเหตุต่างๆคล้ายกับในหัวข้อที่ 2.1.1 แต่เกิดขึ้นในลักษณะตรงกันข้ามคือ การควบคุมการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เหมาะสมที่ระบบผลิตไฟฟ้าต้นทาง หรือควบคุมระดับแรงดันในระบบส่งและระบบจำหน่ายไม่เหมาะสม การเกิดแรงดันตกคร่อมในสายส่งมากเกินไป เป็นต้น จากทุกๆสาเหตุดังกล่าว ถ้าหากเราไม่สามารถควบคุมหรือป้องกันได้แล้วมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำกับแรงดันใช้งานที่ต่ำกว่าพิกัดแล้วมีผลเสียคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำจะพยายามดึงกระแสไฟฟ้าจากสายมากขึ้นผิดปกติเพื่อชดเชยกำลังและแรงบิดที่ขาดหายไปจากแรงดันต่ำเพื่อที่จะขับโหลดทางกล ดังนั้นจึงทำให้เกิดความร้อนสูญเสียภายในมอเตอร์มากขึ้นเทียบได้กับการขับโหลดเกินของมอเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพมอเตอร์ต่ำลง ความสัมพันธ์ของแรงบิดปรากฏที่โหลดทางกลกับแรงดันที่มอเตอร์ได้รับแสดงดังสมการ 2.14

$$T_a = \left[ \left( \frac{v_m}{v_r} \right)^2 \cdot T_m \right] - T_L \quad (2.14)$$

$$\text{หรือ } T_L = \left[ \left( \frac{v_m}{v_r} \right)^2 \cdot T_m \right] - T_a \quad (2.15)$$

เมื่อ	$T_L$	คือ แรงบิดที่โหลด
	$T_a$	คือ แรงบิดที่ใช้เร่งการหมุนของโหลด
	$T_m$	คือ แรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์
	$V_m$	คือ แรงดันที่ขั้วมอเตอร์
	$V_R$	คือ แรงดันที่พิกัดมอเตอร์

จากสมการที่ 2.15

กำหนดให้  $T_a$  คงที่เพื่อรักษาคุณสมบัติอัตราเร่งและแรงบิดของมอเตอร์

กำหนดให้  $T_{L1}$  คือแรงบิดที่โหลดในกรณีที่แรงดันขั้วมอเตอร์เป็น  $V_{m1}$

กำหนดให้  $T_{L\phi}$  คือแรงบิดที่โหลดในกรณีที่แรงดันขั้วมอเตอร์เป็น  $V_{m\phi}$

$$\text{ดังนั้น } T_{L1} + T_a = \left( \frac{v_{m1}}{v_r} \right)^2 \cdot T_m \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ } T_{L\phi} + T_a = \left(\frac{V_{m\phi}}{V_R}\right)^2 \cdot T_m \quad (2.17)$$

$$(2.16) / (2.17) \text{ ได้ } \frac{T_{L1} + T_a}{T_{L\phi} + T_a} = \left(\frac{V_{m1}}{V_{m\phi}}\right)^2 \quad (2.18)$$

$$\text{ดังนั้น } T_{L1} = \left(\frac{V_{m1}}{V_{m\phi}}\right)^2 \cdot T_{L\phi} + \left[\left(\frac{V_{m1}}{V_{m\phi}}\right)^2 - 1\right] \cdot T_a \quad (2.19)$$

ถ้าให้  $V_{m\phi}$  คือค่า Nominal Voltage ดังนั้น กำหนด  $T_{L1}$  คือ Derated Torque =  $T_{DR}$  และ  $V_{m1}$  คือค่า Voltage ใดๆที่ปรากฏบนขั้วมอเตอร์ และ  $T_{L\phi}$  คือ Rated Torque =  $T_R$

$$\text{ดังนั้น } T_{DR} = \left(\frac{V_m}{V_R}\right)^2 \cdot T_R + \left[\left(\frac{V_m}{V_R}\right)^2 - 1\right] \cdot T_a \quad (2.20)$$

จากสมการ (2.20) เมื่อเราจำเป็นต้องใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ จะต้องลดขนาดของโหลดที่จะขับลง คือ จาก  $T_R$  ไปเป็น  $T_{DR}$  โดยที่ยังคงให้สภาพการขับโหลด นั้นยังคงมีคุณสมบัติอัตราเร่งความเร็วขึ้นสู่ค่า Rated Speed ได้โดยยังคงมีแรงบิดเร่ง  $T_a$  คงเดิม และทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิขึ้นสูงอย่างปกติโดยไม่มีการเกิดสภาพการขับโหลดเกินอันเนื่องมาจากการลดค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์

โดยทั่วไปแล้วการใช้งานมอเตอร์ที่ได้เลือกคุณสมบัติข้อกำหนดต่างๆรับการขับโหลด ทางกลที่ต้องการแล้วอาจเป็นการติดตั้งมอเตอร์ใช้งานกับอุปกรณ์เครื่องจักรกลอื่นๆหรือกระบวนการผลิตอื่นๆ ที่โหลดคงที่จะสามารถใช้งานมอเตอร์นั้นได้ตามปกติ ในกรณีที่แรงดันระบบไฟฟ้าปกติ เมื่อเกิดสถานะแรงดันต่ำกว่าปกติอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่า 0.3Sec. นั้นจะถือว่าไม่ควรใช้งานมอเตอร์นั้นจนกว่าสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำดังกล่าวจะผ่านพ้นไป ดังนั้นจะต้องมีอุปกรณ์รีเลย์ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบสถานะแรงดันไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เมื่ออุปกรณ์ดังกล่าวตรวจพบที่เกิดสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าค่าพิกัด จะต้องทำการหยุดเดินมอเตอร์หรือไม่อนุญาตให้ทำการเดินเครื่องมอเตอร์ และขณะเดียวกันอุปกรณ์ป้องกันนี้จะต้องแยกสภาพการเกิดแรงดันต่ำชั่วคราวเป็นเวลาสั้นๆออกจากกรณีที่เกิดสถานะแรงดันต่ำที่ยาวนานกว่า 0.3Sec. ได้ โดยไม่ทำให้เกิดการหยุดเดินมอเตอร์ในกรณีที่เกิดแรงดันต่ำชั่วคราวเป็นเวลาสั้นๆ (Voltage dip or flicker)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 สถานะแรงดันไม่สมดุล (Unbalance Voltage)

สถานะแรงดันไม่สมดุลเกิดจากในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่มีการจ่ายกำลังให้โหลดในแต่ละเฟสไม่สมดุลกันจนทำให้แรงดันที่ปรากฏแต่ละเฟสต่างไปจากค่าแรงดันปกติ หรืออาจจะเกิดจากสถานะผิดปกติของระบบส่งและระบบจำหน่ายก่อนถึงปลายทางที่ผู้ใช้ได้รับ สถานะแรงดันไม่สมดุลนั้นจะรวมถึงการที่แรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งหายไป (Phase failure) ด้วยซึ่งเป็นกรณีที่รุนแรงที่สุดและไม่เหมาะสมที่จะใช้งานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างยิ่ง หรือในกรณีที่ขณะกำลังใช้งานมอเตอร์อยู่ตามปกติแล้วเกิดสถานะแรงดันหรือกระแสในเฟสใดเฟสหนึ่งหายไปจะทำให้เกิดกระแสไหลอย่างไม่สมดุลในมอเตอร์และมีปริมาณที่มากผิดปกติทำให้เกิดความร้อนสูงเสี่ยเพิ่มขึ้นมา และถ้าหากโหลดทางกลที่มอเตอร์กำลังขับอยู่นั้นมีปริมาณ 80% ถึง 100% ที่พิคคของแรงบิดมอเตอร์นั้นจะทำให้เกิดสภาพล็อกโรเตอร์ (Lock Rotor) หรือมอเตอร์หยุดหมุนทันที (Stall) และปริมาณความร้อนสูงเสี่ยที่เกิดขึ้นจะมีมากเทียบเท่าได้กับการเกิดสภาพล็อกโรเตอร์ขณะทำการเดินเครื่อง

สำหรับกรณีสถานะไม่สมดุลต่างๆไปจะทำให้เกิดความร้อนสูงเสี่ยในมอเตอร์เพิ่มขึ้นมากว่าสถานะแรงดันสมดุล ซึ่งจะวิเคราะห์ได้โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component Analysis) [4] โดยมีหลักการคือการวิเคราะห์หาองค์ประกอบสมมาตรที่เรียกว่า องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก, ลบ และศูนย์ออกมาจากองค์ประกอบเดิมทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้ากำลังและโหลดไม่ว่าจะเป็นกระแสหรือแรงดัน ซึ่งองค์ประกอบสมมาตรบวก, ลบ และศูนย์ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้สภาพของระบบที่กำลังพิจารณาได้

$$\text{จากสมการ} \quad \begin{bmatrix} V_{a\phi} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

เป็นการแยกองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก, ลบ และศูนย์ของแรงดันในเฟส a จากแรงดันปกติในเฟส a, b และ c โดย a คือ Phasor  $1 \angle 120^\circ$  ประจำตำแหน่งของเฟส 3 เฟส

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a\phi} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีกลุ่มขององค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกคือ

$$\left. \begin{aligned} V_{a1} &= V_1 \\ V_{b1} &= a^2 V_1 \\ V_{c1} &= a V_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

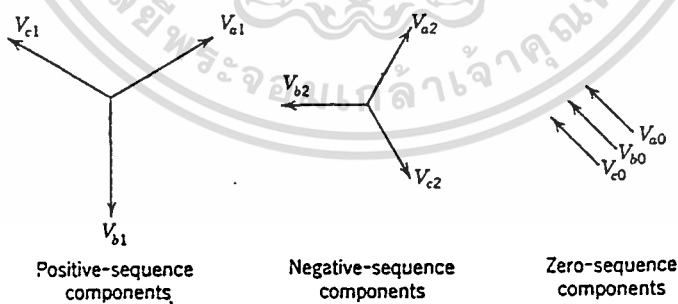
กลุ่มองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบคือ

$$\left. \begin{aligned} V_{a2} &= V_2 \\ V_{b2} &= a V_2 \\ V_{c2} &= a^2 V_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

และองค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์คือ

$$V_{a\phi} = V_{b\phi} = V_{c\phi} = V_\phi \quad (2.25)$$

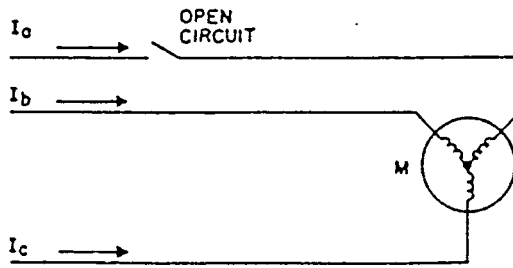
ทั้ง 3 กลุ่มแสดงดังเวกเตอร์ในรูปที่ 2-7



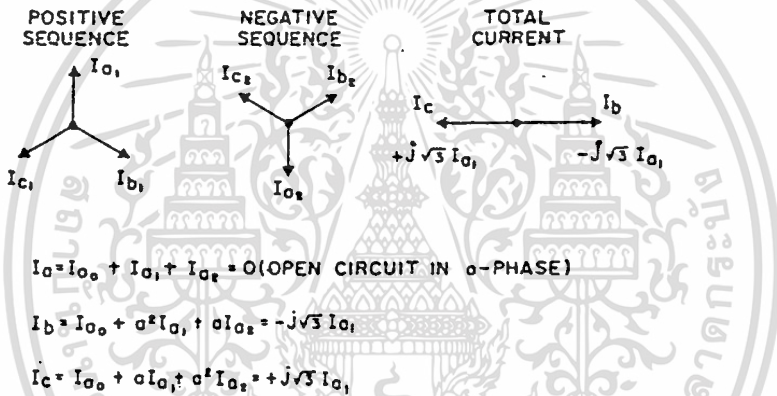
รูป 2-7 เวกเตอร์องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก,ลบและศูนย์

ในกรณีที่กระแสในมอเตอร์หนึ่งขั้วนำขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง ดังรูปที่ 2-8 จากการวิเคราะห์ห่องค์ประกอบสมมาตรโดยสมการที่ (2.22) สามารถแสดงองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 กลุ่มได้ดังรูปที่ 2-9 โดยแยกออกเป็นกระแสทั้ง a, b และ c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2-8 การเกิดสายขาดหายไปเฟสใดๆของมอเตอร์

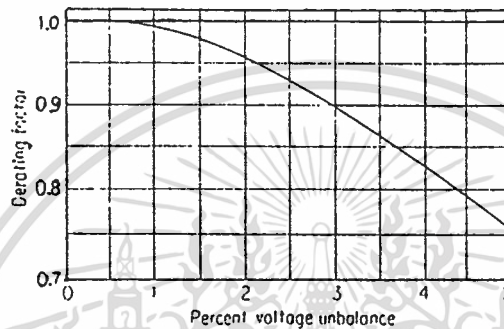


รูป 2-9 องค์ประกอบสมมาตรที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ประเภท

เมื่อสถานะไม่สมดุลจะเกิดองค์ประกอบกระแสสมมาตรลำดับลบไหลในวงจรมอเตอร์ในลำดับเวกเตอร์กลับทิศกับองค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ทำให้เกิดการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กหมุนในทิศสวนกับฟลักซ์แม่เหล็กหมุนเดิมทำให้ผิวตัวนำของโรเตอร์ได้รับการเหนี่ยวนำจากฟลักซ์รวม (Resultant flux) ด้วยอัตราการหมุนตัดตัวนำด้วยความถี่หรือความเร็วเชิงมุมเป็น 2 เท่าของความถี่หรือความเร็วเชิงมุมปกติ ( $2\omega_s$ ) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current) ที่ผิวตัวนำของโรเตอร์มากขึ้นทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นมากผิดปกติ เช่น ถ้าเกิดแรงดันหรือกระแสไม่สมดุล 5% ของค่าพิกัดปกติ จะทำให้เกิดองค์ประกอบสมมาตรลำดับลบขึ้น 30% ของค่ากระแสหรือแรงดันพิกัด และจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากปกติ 40% ถึง 50%

ดังนั้นในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องมีอุปกรณ์รีเลย์ป้องกันมอเตอร์ โดยจะต้องปลดวงจรมอเตอร์ออกทันทีที่ตรวจพบสถานะไม่สมดุลดังกล่าว โดยสามารถตรวจสอบสภาพไม่สมดุลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

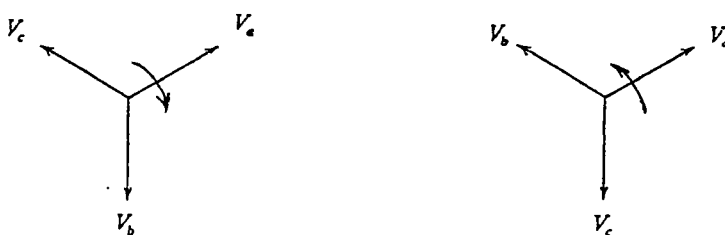
ได้ตั้งแต่ 5% ขึ้นไป ส่วนในกรณีที่เกิดสถานะไม่สมดุลเล็กน้อยไม่เกิน 5% ของค่าพิกัดทั้งแรงดันและกระแสเลยป้องกันยังคงให้มอเตอร์นั้นทำงานได้ต่อไป ในบางครั้งที่จำเป็นจะต้องใช้งานมอเตอร์ในสถานะแรงดันไม่สมดุลนั้นจะต้องทำการลดปริมาณโหลดที่มอเตอร์ต้องขับลงให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดความร้อนสูญเสียในมอเตอร์อยู่ในข้อกำหนดดังกราฟที่ 2-10



รูป 2-10 การลดพิกัดกำลังมอเตอร์เมื่อเกิดการไม่สมดุลของแรงดัน

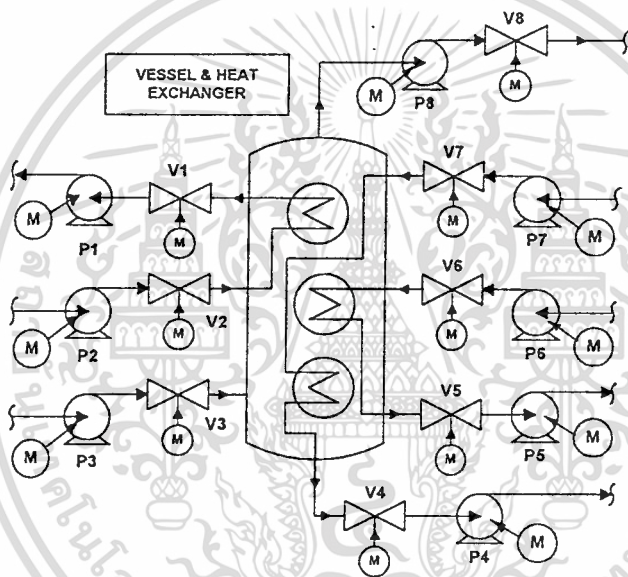
### 2.1.5 สถานะการผิดลำดับเฟส (Reverse phase rotation)

เป็นสถานะที่ลำดับของแรงดันทั้ง 3 เฟสเรียงกันผิดลำดับจากปกติที่มอเตอร์ที่ใช้งานอยู่นั้นเคยได้รับซึ่งอาจมีสาเหตุจากระบบส่งหรือระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการทำงานไขว้สาย (Transposed-line) เพื่อรักษาสภาพของอิมพีแดนซ์ของระบบสายส่งให้คงอยู่ในข้อกำหนดในการปฏิบัติการส่งพลังงานไฟฟ้า ซึ่งบางครั้งอาจมีผลทำให้ลำดับของเฟสของแรงดันที่ปลายทางของผู้ใช้ผิดไปจากปกติได้ เช่นเดิมที่แรงดันปลายทางที่ผู้ใช้ได้รับอาจเป็น A, B และ C อาจจะเปลี่ยนเป็น A, C, B เป็นต้น ดังรูปที่ 2-11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูป 2-11 ลำดับเฟสปกติและผิดปกติ มอนูอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกลับทิศของลำดับเฟส คือทำให้เฟลวมอเตอร์หมุนกลับทิศทางเดิมถ้า โหลดทางกลที่ต่ออยู่กับเฟลวมอเตอร์นั้นมีการทำงานที่ถูกต้องในทิศทางเดียวกันนั้นก็ทำให้เกิด ผลเสียหายกับโหลดหรือกระบวนการผลิตต่างๆเสียหาย เช่น โหลดบีม, โหลดที่เป็นโบลวเวอร์ หรือวาล์วต่างๆ เป็นต้น ดังรูปที่ 2-12 ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมียุทธวิธีป้องกันที่สามารถ กำหนดทิศทางหรือลำดับเฟสได้ เมื่ออุปกรณ์ป้องกันตรวจพบที่มีการผิดลำดับเฟสเกิดขึ้นจะต้อง ทำการปลดวงจรมอเตอร์ออกทันทีแล้วตรวจสอบต่อไปจนกว่าระบบไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะมีลำดับเฟส กลับมาเป็นปกติ จึงทำการต่อวงจรมอเตอร์เข้ากับระบบการเดินเครื่องตามปกติต่อไป



รูป 2-12 กระบวนการอุตสาหกรรมที่มีการผิดลำดับเฟสมีผลกระทบรุนแรง

2.1.6 ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังผิดปกติ (Abnormal Frequency)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำงานเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องอาศัย การเชื่อมโยงและถ่ายทอดพลังงานด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอาศัยแกนเหล็กเป็นตัวกลางเชื่อมโยงและถ่ายทอด ซึ่งแกนเหล็กดังกล่าวจะทำงานนี้ได้ต้องได้รับการกระตุ้น (Excitation) ดังสมการที่ (2.26)

$$\frac{E}{f} = 4.44 k_w N_{ph} \phi \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้ที่การศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า  
 และ  $\phi = F(K.E / f.N_{ph})$  (2.27)  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

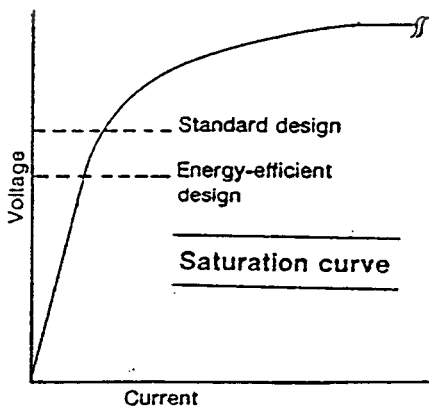
เมื่อ  $E$  คือแรงดันที่มอเตอร์ได้รับ,  $f$  คือความถี่ของระบบไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับ,  $k_w$  คือค่าคงที่ของการพันขดลวดในมอเตอร์นั้นๆ,  $N_{ph}$  คือจำนวนรอบของการพัน,  $\phi$  คือค่าฟลักซ์แม่เหล็ก จากสมการที่ (2.26) การเปลี่ยนแปลงค่าของ  $E$  และ  $f$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักของระบบไฟฟ้ากำลังที่มอเตอร์ได้รับมีความสำคัญต่อการทำงานของมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์จะถูกออกแบบมาให้ทำงานได้ดีที่สุด ที่ค่า  $E/f$  คงที่ (อาจเป็นเงื่อนไขประสิทธิภาพดีที่สุด หรือเพาเวอร์แฟคเตอร์ดีที่สุด เป็นต้น) ดังนั้นเมื่อเงื่อนไขของค่า  $E/f$  เปลี่ยนไปมอเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้ดีที่สุดตามการออกแบบนั้นๆ โดยทั่วไปเราจะแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

### 2.1.6.1 $E/f$ มีค่าเพิ่มขึ้น

สภาพที่ค่า  $E/f$  มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากความถี่  $f$  ลดลง, หรือค่า  $E$  เพิ่มขึ้นหรือเกิดขึ้นทั้ง 2 กรณี จะทำให้เกิดสภาพที่เรียกว่า การกระตุ้นเกิน (Over excitation) ทำให้ความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้นจากการที่แกนเหล็กอิ่มตัวดังรูปที่ 2-13 ซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลวนและความร้อนที่เกิดจากฮิสเทอรีซิสในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น ผลที่สุดทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำกว่าปกติที่ในการใช้งานที่โหลดค่าเดียวกัน

### 2.1.6.2 $E/f$ มีค่าลดลง

สภาพที่ค่าของ  $E/f$  ลดลง อาจเกิดจากค่าแรงดันที่ได้รับ  $E$  ลดลง, หรือความถี่  $f$  เพิ่มขึ้นหรือเกิดทั้ง 2 กรณี ซึ่งทำให้เกิดสภาพที่เรียกว่าการกระตุ้นต่ำ (Under Excitation) ซึ่งทำให้มอเตอร์มีแรงบิดที่เพลาลดลงกว่าค่าที่พิกัดปกติทำให้ไม่มีกำลังขับ โหลด ดังนั้นมอเตอร์จะทำการดึงกระแสจากระบบไฟฟ้าแหล่งจ่ายมากขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดชดเชยกับค่าแรงดันที่ลดลงหรือความถี่  $f$  ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์เพิ่มมากขึ้นผิดปกติ เทียบเท่าได้กับการขับโหลดเกินทั้งที่มอเตอร์นั้นขับโหลดตามปกติ ดังนั้นจึงทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำกว่าปกติเช่นเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูป 2-13 การกระตุ้นทางแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลกระทบทั้ง 2 แบบดังกล่าว ในการใช้มอเตอร์จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เลย์ป้องกันเพื่อตรวจสอบค่าแรงดันที่มอเตอร์ได้รับ ความถี่ระบบไฟฟ้าที่อยู่ในระบบไฟฟ้า เมื่ออุปกรณ์เลย์ดังกล่าวตรวจพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันและความถี่ในระบบเปลี่ยนแปลงไปจากค่าปกติก็จะทำการปลดวงจรมอเตอร์ออก แล้วตรวจสอบต่อไปจนกว่าค่าแรงดันและความถี่ในระบบไฟฟ้าจะเข้าสู่ภาวะปกติ จึงทำให้การต่อวงจรมอเตอร์เข้ากับระบบการเดินเครื่องมอเตอร์อีกครั้ง

## 2.2 คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 8 เฟส และสถานะการเกิดโหลดเกินของมอเตอร์

ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้กำหนดกำลังให้สามารถขับโหลดที่ใช้งานนั้น บางครั้งเราสามารถใช้มอเตอร์นั้นขับโหลดเกินกำลังที่ได้กำหนดไว้แล้วได้ แต่ทั้งนี้จะต้องมีขีดจำกัดในส่วนของเวลาที่ใช้ขับโหลดและ หรือรวมทั้งปริมาณโหลดส่วนที่เกินมาจากพิกัด เพื่อไม่ให้มีอุณหภูมิภายในตัวมอเตอร์ขึ้นสูงจนเกินพิกัดของชั้นฉนวนซึ่งจะต้องพิจารณาชนิดชั้นฉนวนที่ระบุตามแผ่นป้าย (Name Plate) ข้อกำหนดของมอเตอร์นั้นด้วย ในการนิยามหรือกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ว่าเป็นลักษณะใดนั้น ได้อ้างอิงตาม [5] ดังนี้

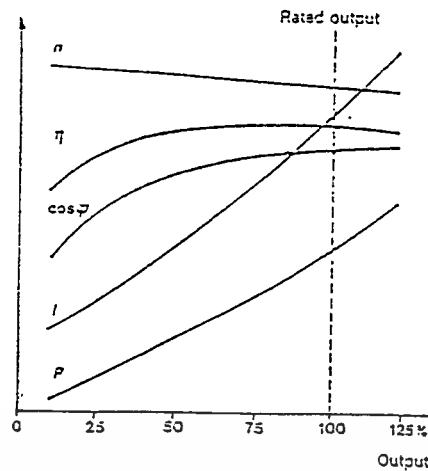
ช่วงที่ 1: ช่วงของกระแสลัดวงจร (Fault Currents) ที่มากกว่า 2 เท่าของกระแสช่วงเดินเครื่องมอเตอร์

ช่วงที่ 2: ช่วงกระแสโหลดเกินซึ่งรวมทั้งช่วงการเดินเครื่องมอเตอร์ด้วยคือ ช่วงเดินเครื่องที่ค่ากระแสตั้งแต่ 3-8 เท่าของกระแสที่พิกัด (FLC) และช่วงโหลดเกินตั้งแต่ 100-200% ของ FLC

ช่วงที่ 3: ช่วงกระแสใช้งานมอเตอร์ตามปกติคือ ตั้งแต่ 10-120% ของ FLC

ในช่วงแรกนั้นจะเกิดสถานะนี้ขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร โรเตอร์ขึ้นหรือเกิดการลัดวงจรภายในของมอเตอร์ขึ้น ในส่วนที่ 2 นั้นเกิดขึ้นเมื่อมีการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์จนกระทั่งมอเตอร์มีความเร็วขึ้นสู่ความเร็วรอบพิกัด และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดทางกลที่มอเตอร์ขับอยู่นั้นซึ่งมีผลให้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100-200% ของกระแสพิกัด ในช่วงที่ 3 นั้นเป็นช่วงที่มีการขับโหลดน้อยกว่าพิกัด สำหรับสาเหตุของการเกิดสถานะในช่วงที่ 1 นั้น อาจจะทำให้เกิดความผิดปกติทางกล การลัดของเพลลา ตลับลูกปืนเสียหายทำให้ไม่สามารถหมุนได้ ในส่วนของช่วงที่ 2 นั้นมีสาเหตุจากการปรับตั้งแนวเพลลาของมอเตอร์กับโหลดไม่เหมาะสม (Misalignment Coupling) นอกจากนั้นแล้วอาจเกิดจากการหล่อลื่นของเพลลาตลับลูกปืนที่ไม่สมบูรณ์และการบิดเบี้ยวของแนวแกนเพลลาของโรเตอร์ นอกจากสาเหตุต่างๆทางกลดังกล่าวแล้ว การแปรเปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้าบางตัวก็สามารถทำให้เกิดสภาพโหลดเกินในมอเตอร์ขึ้นได้ ดังรูปที่ 2-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2-14 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

ผลของการเกิดโหลดเกินจะทำให้ความร้อนสูญเสียเกิดขึ้นมากผิดปกติและสะสมในตัวมอเตอร์จนอุณหภูมิขึ้นไปถึงขีดจำกัดของชั้นฉนวน ใ้ถ้าปริมาณ โหลดเกินพิกัดมากและเกิดขึ้นเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นมอเตอร์พิกัดหนึ่งๆจะสามารถรับ โหลดเกินได้อย่างจำกัดทั้งในส่วนของปริมาณและระยะเวลา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อมและขีดจำกัดของชั้นฉนวนและสภาพการระบายความร้อนโครงสร้างมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อมและขีดจำกัดของชั้นฉนวนดังรูปที่ 2-15

ambient temp(c)	Maximum temp.-rise of insl.class				
	A	E	B	F	H
30°c	75°	90°	100°	125°	150°
40°c	65°	80°	90°	115°	140°

รูป 2-15 ขีดจำกัดการทนอุณหภูมิของฉนวนชนิดต่างๆ

ในการวิเคราะห์เพื่อหาว่าที่ค่ากระแสโหลดแต่ละค่านั้นจะทำให้มอเตอร์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นได้สูงสุดเท่าใดเพื่อใช้หาข้อจำกัดในการขับโหลดเกินที่มอเตอร์เมื่อใช้ชั้นฉนวนชนิดต่างๆนั้นจะต้องอาศัยแบบจำลองโครงสร้างของมอเตอร์ (Model) และทฤษฎีการวิเคราะห์การเพิ่มลอุณหภูมิต่อไปนี้

## 2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์และวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์

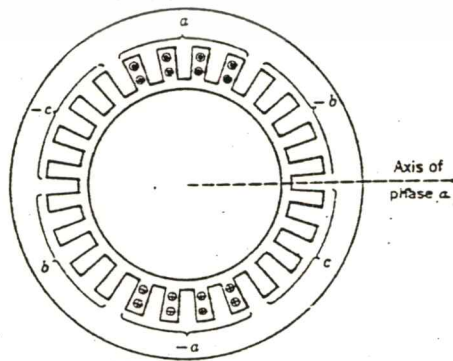
### 2.2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์

ในการวิเคราะห์หาสภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในตัวมอเตอร์นั้น โครงสร้างของมันเองเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงที่มาของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดความร้อนสูญเสียภายในมอเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสประกอบด้วยโครง (Frame) ที่เป็นแผ่นเหล็กซิลิคอน (Silicon Steel Plates) วางตัวซ้อนกันขึ้นรูปเป็นโครงทรงกลมเพื่อใช้เป็นทางเดินของวงจรแม่เหล็ก พื้นที่ของทรงกลมภายในนั้นมีร่องสลิตเพื่อใช้เป็นที่ยางขดลวดสเตเตอร์ ในส่วนของโรเตอร์นั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage) และแบบพันขดลวด (Wound type) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบกรงกระรอกเท่านั้น โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกนั้นประกอบด้วย แผ่นเหล็กซ้อนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกกลมที่มีร่องสลิตอยู่บริเวณรอบๆผิวทรงกระบอกนั้นสำหรับเป็นที่วางตัวนำไฟฟ้าที่ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก อาจจะทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียม ในตอนหัวท้ายของกรงกระรอกนั้นถูกเชื่อมต่อทางไฟฟ้าปิดวงจรระหว่างตัวนำกรงกระรอกทั้งหัวละท้าย ดังรูปที่ 2-16 (c)

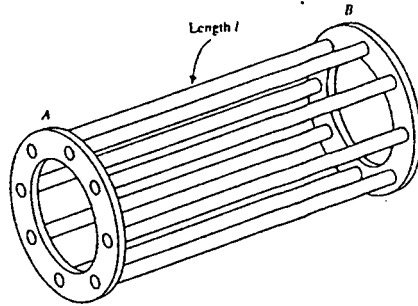


รูป 2-16 (a) โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูป 2-16 (b) โครงสร้างของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2-16 (c) โครงสร้างของโรเตอร์กรงกระรอก

จากทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [6] , จะได้ความสัมพันธ์ต่างๆที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ  
กับพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้าและทางกลดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วรอบซิงโครนัส} \quad N_s = \frac{120f}{P} \quad \text{รอบ/นาที} \quad (2.28)$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส} \quad \omega_s = \frac{4\pi f}{P} \quad \text{เรเดียน/วินาที} \quad (2.29)$$

$$\text{สลลิป} \quad S = \left( \frac{N_s - N_r}{N_s} \right) \quad \text{ไม่มีหน่วย} \quad (2.30)$$

$$\text{หรือ} \quad S = \left( \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \right) \quad \text{ไม่มีหน่วย} \quad (2.31)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad N_r = (1 - S) N_s \quad \text{รอบ/นาที} \quad (2.32)$$

$$\text{หรือ} \quad \omega_r = (1 - S) \omega_s \quad \text{เรเดียน/วินาที} \quad (2.33)$$

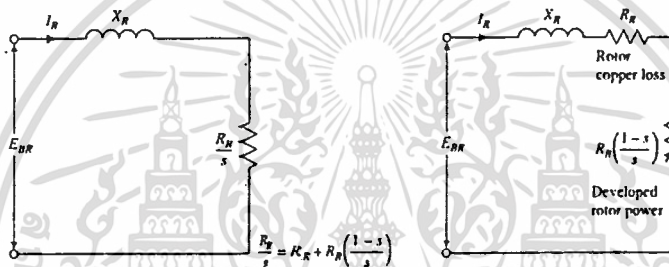
$$\text{และ} \quad f_r = S f_s = \left( \frac{N_s - N_r}{N_s} \right) f_s \quad \text{เฮิรตซ์} \quad (2.34)$$

โดยความสัมพันธ์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณความสัมพันธ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกันในเรื่อง  
หัวข้อถัดไปด้วยการพิจารณาว่ามอเตอร์นั้นมีการทำงานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีวงจรส่วนทุ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิถีภูมิที่เคลื่อนที่ได้ (Rotor) และมีการคำนวณวงจรสมมูลคล้ายกันโดยอาศัยทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า [7], โดยมีการแบ่งพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของโรเตอร์และส่วนของสเตเตอร์ ในตอนท้ายวงจรสมมูลทั้ง 2 ส่วน จะถูกรวมเป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์ทั้งตัวที่เป็นแบบจำลองมอเตอร์ (Model)

2.2.1.2 วงจรสมมูลของโรเตอร์

ในส่วนของโรเตอร์นั้นพิจารณาเทียบได้กับวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีโหนดของวงจรด้านขาออกเป็นความต้านทานที่แปรค่าได้ และประกอบด้วยคาร์รีแอกแตนซ์ดังรูปที่ 2-17



รูป 2-17 วงจรสมมูลของโรเตอร์

จากวงจรสมมูล คาร์รีแอกแตนซ์ของวงจรคือ  $X_R = \omega_R L_R$

เมื่อ  $\omega_R = S \omega_s$  ... คือความเร็วเชิงมุมสลลิป (Slip-frequency-w) ที่ปรากฏบนวงจรของตัวนำที่โรเตอร์ ดังนั้น

$$\begin{aligned} X_R &= S \omega_s L_R \\ &= X_{BR} \end{aligned} \tag{2.35}$$

เมื่อ  $X_{BR}$  คือ Blocked Rotor Reactance ที่ได้จากการทดสอบ และ

$$E_R = S E_{BR} \tag{2.36}$$

ดังนั้น

$$I_R = S E_{BR} / \sqrt{R_R^2 + (S X_{BR})^2} \tag{2.37}$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_R = E_{BR} / \sqrt{(R_R/S)^2 + X_{BR}^2} \quad (2.38)$$

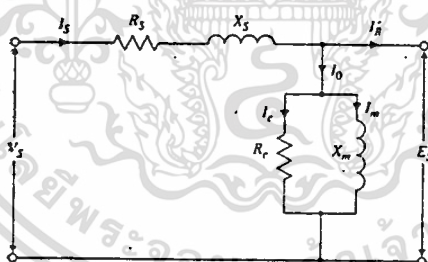
ซึ่งเป็นกระแสเหนี่ยวนำที่ไหลในตัวนำโรเตอร์อันเนื่องมาจากสลลิป  $s$  จากสมการ เฉพาะเทอม  $(R_R/S)$  สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

$$R_R/S = R_R + R_R \left( \frac{1-S}{S} \right) \quad (2.39)$$

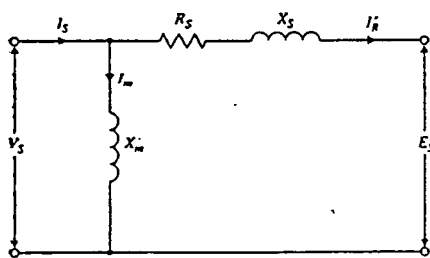
ซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทาน  $R_R$  ที่มีค่าคงที่และเทอม  $R_R \left( \frac{1-S}{S} \right)$  ที่แปรค่าตามค่าสลลิปจากวงจรสมมูลจะเห็นว่าค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทาน โดยรวมจะเปลี่ยนแปลงค่าตามค่าสลลิป( $s$ ) ซึ่งหมายถึงมีการแปรค่าตั้งแต่การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ไปจนถึงค่าความเร็วที่พิกัด

### 2.2.1.3 วงจรสมมูลของสเตเตอร์

ในส่วนของสเตเตอร์จะพิจารณาเทียบได้กับวงจรคานปรูมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าว ในรูปที่ 2-18 (a)



รูป 2-18 (a) วงจรสมมูลของสเตเตอร์



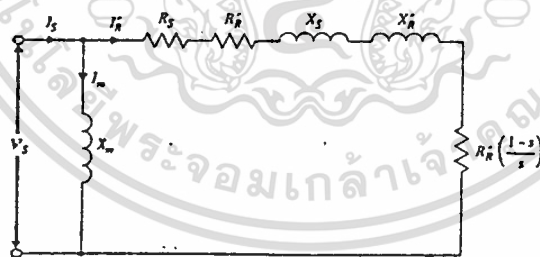
รูป 2-18 (b) วงจรสมมูลของสเตเตอร์ที่ปรับปรุงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2-18(a) ค่าความต้านทาน  $R_c$  นั้นแทนค่าความต้านทานเสมือนที่ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียที่มาจากแกนเหล็ก ซึ่งมีค่าคงที่ที่ความถี่และแรงดันที่ใช้งาน (กระตุ้น) หรือสร้างสนามแม่เหล็กผ่านแกนเหล็กนั้นๆ (Magnetizing) โดยทั่วไปจะมีค่าคงที่ ที่เงื่อนไขค่าความถี่และแรงดันที่ใช้งาน ( $E/f$ ) โดยค่าความร้อนสูญเสียจะระบุหน่วยเป็น วัตต์ต่อกิโลกรัมหรือปอนด์และขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่นำมาใช้ผสมในเนื้อเหล็กแผ่นนั้น เมื่อทราบมวลทั้งหมด (เฉพาะแกนเหล็กของมอเตอร์) จึงสามารถทราบปริมาณความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ได้ ส่วนค่ารีแอคแตนซ์  $X_m$  คือค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก ส่วนค่าความต้านทาน  $R_s$  และค่ารีแอคแตนซ์  $X_s$  คือส่วนของวงจรสมมูลที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ จากทฤษฎีการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า [7] เราจะประมาณวงจรสมมูลโดยการย้ายส่วนของ  $X_m$  และ  $R_c$  ไปยังด้านปฐมภูมิของวงจรและตัดค่า  $R_c$  ทิ้ง เนื่องจากค่ากระแส  $I_m$  ในขณะเครื่องจักรทำงานที่พิกัดนั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $I_s$  ดังนั้นจึงได้วงจรสมมูลของส่วนสเตเตอร์โดยประมาณดังรูปที่ 2-18 (b)

**2.2.1.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งตัว**

จากหัวข้อที่ 2.2.1.3 และ 2.2.1.4 เราสามารถรวมวงจรสมมูลทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวให้เป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งตัวได้ตามทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการถ่ายโอน (Transfer) วงจรสมมูลของโรเตอร์เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของวงจรสมมูลสเตเตอร์ดังรูปที่ 2-19



รูป 2-19 วงจรสมมูลของมอเตอร์ทั้งตัว

**2.2.2 ผลกระทบเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกิน**

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลกระทบต่อมอเตอร์จากสภาวะโหลดเกินโดยอาศัยวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งตัวในรูปที่ 2-19 ค่าความต้านทานทุกตัวในวงจรสมมูลจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดความร้อนสูญเสีย จากรูปที่ 2-19 ค่าความต้านทานสมมูล  $R'_r$  ซึ่งได้ทำการถ่ายโอน (Refer) ไปยังด้านปฐมภูมิของวงจรสมมูลแล้วนั้นสามารถแปรค่าได้โดยขึ้นอยู่กับค่าสลิป (S) ซึ่งแปรค่าได้ตั้งแต่  $0 \leq S \leq 1$  ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วรอบของเพลามอเตอร์ที่ขับโหลดอยู่ เนื่องจากมอเตอร์นั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกออกแบบมาให้ทำงานในลักษณะของกำลังคงที่ (Constant Power output) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลดทางกลที่เพลามอเตอร์จะส่งผลให้ความเร็วรอบที่เพลามอเตอร์นั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยในลักษณะผกผันกัน (จากสมการ  $P=T\omega$ ) จึงทำให้ค่าสลิป (s) เปลี่ยนแปลงด้วย(จากสมการที่ 2.30) ดังนั้นค่าความต้านทานสมมูลของโรเตอร์  $R'_R$  จึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเราจึงรวมค่า  $R'_R$  และ  $R'_R\left(\frac{1-s}{s}\right)$  ให้เป็นเทอมเดียวกันคือ  $(R'_R/s)$  ดังนั้นคำนวณค่าความร้อนสูญเสียภายในมอเตอร์ดังนี้

$$\text{Roter Loss} = 3I_R'^2(R'_R / S) \quad (2.40)$$

$$\text{Stator Loss} = 3I_s^2(R_s) \quad (2.41)$$

$$\text{ดังนั้น Total Power Loss} = 3I_R'^2(R'_R / S) + 3I_s^2(R_s) \quad (2.42)$$

จากวงจรสมมูลรูปที่2-19,เมื่อไม่พิจารณาส่วนของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetization current)  $I_m$  แล้ว เนื่องจาก  $I_s \gg I_m$  และ  $T_R \gg I_m$  ดังนั้น  $I_s \cong T_R$

$$\text{ดังนั้น Total Power Loss} = 3I_s^2(R'_R / S + R_s) \quad (2.43)$$

เมื่อ  $R'_R$  คือ ค่าความต้านทานสมมูลของวงจรโรเตอร์ที่ถูกถ่ายโอนไปด้านสเตเตอร์ และ  $R'_R = \alpha^2 R_R$  เมื่อ  $\alpha = E_s / E_{RR}$  เป็นอัตราส่วนแรงดันด้านสเตเตอร์ที่ได้รับต่อแรงดันสเตเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ, Blocked Test (ซึ่งหมายถึงแรงดันด้านทุติยภูมิที่โรเตอร์) ซึ่ง  $\alpha$  เทียบได้กับอัตราส่วนแรงดันด้านปฐมภูมิต่อแรงดันด้านทุติยภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้า (n) จากสมการ (2.43) คือกำลังความร้อนสูญเสียที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่ทำให้หม้อเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิกติเมื่อมีการใช้มอเตอร์นั้นขับโหลดทางกล โดยจะทำให้อุณหภูมิขึ้นไปได้เท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ ค่ากระแสมอเตอร์ ( $I_s$ )ที่แปรตามปริมาณโหลดทางกล นอกจากนั้นแล้วโครงสร้างทางกลของมอเตอร์ คือ น้ำหนัก, พื้นที่ผิว, การนำความร้อน, การระบายความร้อน, วัสดุที่นำมาใช้เป็นองค์ประกอบของมอเตอร์นั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวด้วยดังต่อไปนี้

### 2.2.3 ทฤษฎีการเพิ่มและลดอุณหภูมิของมอเตอร์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราพิจารณาว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำนี้มีโครงสร้างโดยรวมเป็นสารเนื้อเดียว (Uniform and Homogenius) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยใช้หลักการสมดุลของพลังงานในสสารดังนี้คือ

(ก) พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในมอเตอร์ ณ.ช่วงเวลาใดๆ คือ  $Pdt$ .

(ข) พลังงานสูญเสียออกจากมอเตอร์ในรูปแบบของการระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกซึ่งแปรตามค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เป็นโครงสร้างมอเตอร์  $\lambda$  พื้นผิวภายนอกของมอเตอร์  $A$ , ความแตกต่างอุณหภูมิ  $T$  ขณะระบายความร้อน ณ.เวลาใดๆ  $dt$ .

(ค) พลังงานสะสมในตัวมอเตอร์ซึ่งแปรตามค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุโครงสร้างมอเตอร์  $C$ , มวลของมอเตอร์  $M$ , และส่วนความแตกต่างอุณหภูมิ  $dT_m$  ที่เปลี่ยนแปลง

จาก(ก)ถึง(ค) เขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของสมดุลพลังงานความร้อนคือ

$$Pdt = A\lambda T_m dt + CMdT_m \quad (2.44)$$

จากสมการ,  $P$  หมายถึง กำลังสูญเสียภายในของมอเตอร์จากค่าความต้านทานของสเตเตอร์ทั้งสามเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อให้มอเตอร์ขับโหลดที่ค่ากระแสของมอเตอร์ใดๆ ในกรณีทั่วไปพิจารณาที่ค่ากระแสพิกัดซึ่งหมายถึงการเกิดความร้อนสูญเสียจากกระแสและความต้านทานดังกล่าวภายในมอเตอร์จนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดที่มีอัตราการระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกสมดุลกับความร้อนดังกล่าว (Steady-State) ดังนั้น  $dT_m = 0$ , และ  $T_m = P/A\lambda$  ซึ่งกำหนดให้เป็น  $T_{fm}$  ณ.จุด Steady-State

จากสมการ (2.44)

$$Pdt - A\lambda T_m dt = CMdT_m \quad (2.45)$$

$$(P/A\lambda)dt - T_m dt = (CM/A\lambda)dT_m \quad (2.46)$$

เมื่อแทนค่า  $T_{fm} = P/A\lambda$  แทนลงในสมการ (2.46)

และกำหนด  $\tau_m = (CM/A\lambda)$  แทนลงในสมการ (2.46) ดังนั้นจะได้

$$T_{fm}dt - T_m dt = \tau_m dT_m \quad (2.47)$$

$$(T_{fm} - T_m)dt = \tau_m dT_m \quad (2.48)$$

$$\frac{1}{\tau_m} dt = \frac{1}{(T_{fin} - T_m)} dT_m \quad (2.49)$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับ 1 มีผลเฉลยดังนี้คือ

$$T_m(t) = T_{fin}(1 - e^{-t/\tau_m}) + T_{sm} \cdot e^{-t/\tau_m} \quad (2.50)$$

โดยที่  $T_{fin} = T_{sm}$  , และ  $\tau_m$  คือค่าคงตัวเวลาของการเพิ่มและลดอุณหภูมิ

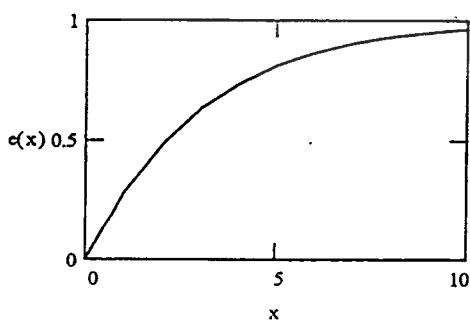
$T_{fin}$  เป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นั้นคงที่ ณ จุด Steady-State โดยทั่วไปจะอยู่ที่เวลา  $t \geq 4\tau_m$  , จากสมการที่ (2.50) แยก ออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิและส่วนของการลดอุณหภูมิ คือ

$$T_h(t) = T_{fin}(1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (2.51)$$

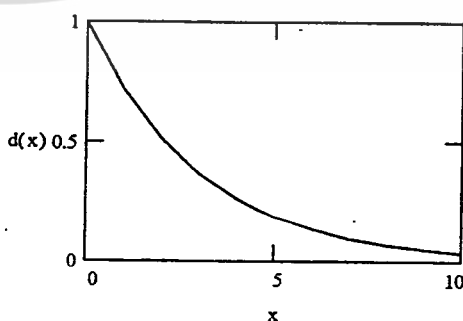
เป็นสมการที่แสดงการเพิ่มอุณหภูมิของมอเตอร์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาคือ  $T_h(t)$  , และ

$$T_c(t) = T_{sm} e^{-t/\tau_m} \quad (2.52)$$

เป็นสมการที่แสดงการลดอุณหภูมิของมอเตอร์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาคือ  $T_c(t)$  โดยที่  $T_{sm}$  มีค่าเท่ากับ  $T_{fin}$  ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดจากอุณหภูมิกิจจนถึงตำแหน่งที่มีการหยุดเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อ  $t \geq \tau_m$  , กราฟของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามสมการที่ (2.51) และ (2.52) แสดงดังรูปที่ 2-20 (a) และ 2-20 (b)



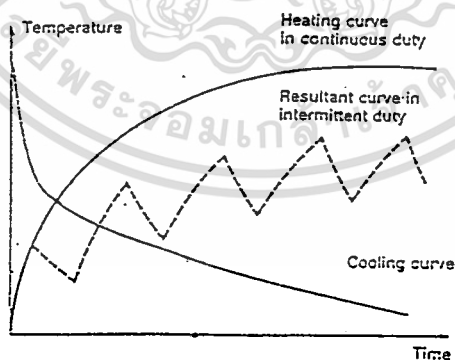
รูป 2-20(a) การเพิ่มอุณหภูมิ



รูป 2-20(b) การลดอุณหภูมิ

สำหรับในโครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำจริง ๆ นั้น ประกอบด้วยสารต่างๆหลายชนิดทั้งส่วนที่เป็นโลหะและอโลหะ ที่สารแต่ละชนิดนั้นมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางความร้อนแตกต่างกันไปทำให้สภาพการเปลี่ยนแปลงเพิ่มและลดอุณหภูมิภายในมอเตอร์นั้นมีความซับซ้อน และทำให้การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากองค์ประกอบของพารามิเตอร์ในสมการที่ (2.44) นั้นจะมีจำนวนของนิพจน์มากขึ้นตามชนิดของสาร แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลอง [8] ก็ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มและลดอุณหภูมิที่มีลักษณะของกราฟเอ็กซ์โพเนนเชียลและถ้าในกรณีที่สารนั้นๆเป็น โลหะซึ่งมีค่าความนำความร้อนที่ดีแล้วแนวโน้มการเพิ่มและลดอุณหภูมิจะมีลักษณะเข้าใกล้กราฟเอ็กซ์โพเนนเชียลมากขึ้น จากการใช้ทฤษฎีการเพิ่มและลดอุณหภูมิในสสารมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในมอเตอร์โดยใช้เงื่อนไขในการพิจารณาว่ามอเตอร์นั้นประกอบด้วยสารเนื้อเดียวที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโลหะนั้นจึงสามารถใช้อธิบายและคาดการณ์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังกราฟข้างต้น

ในกรณีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในมอเตอร์เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง คือ ในลักษณะของการเดินเครื่องแบบเป็นช่วงจังหวะ (Intermittent duty) และถ้ามอเตอร์นั้นมีความสภาพการนำความร้อนที่ดีมากเราจะได้ลักษณะการเพิ่มและลดอุณหภูมิในมอเตอร์เป็นดังรูปที่ 2-21



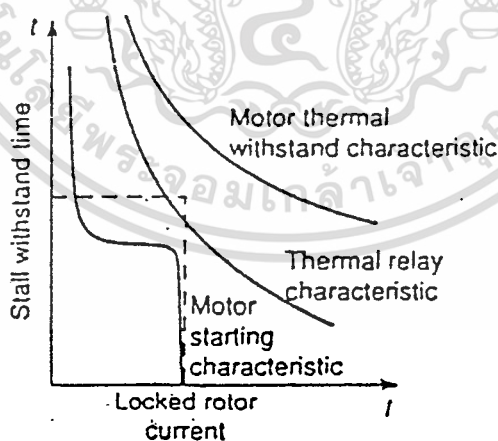
รูป 2-21 อุณหภูมิมอเตอร์เมื่อใช้งานแบบช่วงจังหวะ

#### 2.2.4 การป้องกันโหลดเกินในมอเตอร์

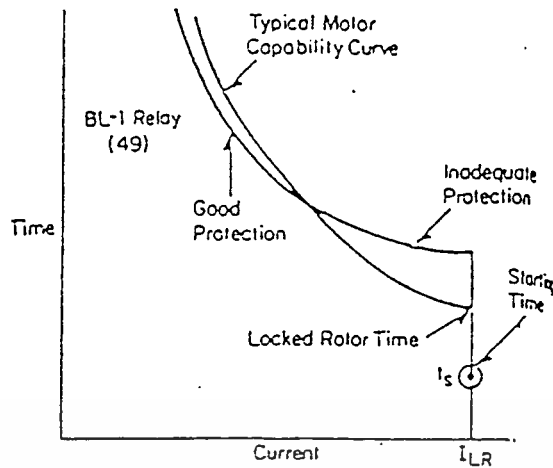
จากการเกิด โหลดเกินและผลกระทบต่อมอเตอร์ที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังหัวข้อข้างต้นนั้น จำเป็นต้องมีการควบคุมหรือป้องกันไม่ให้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเกินขีดจำกัดของชั้นฉนวนชั้นในของมอเตอร์ หรือทำให้ฉนวนชั้นในไหม้ไหม้จนเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปจนทำให้มอเตอร์ไหม้ไหม้ได้ ดังนั้น การป้องกันโหลดเกินในมอเตอร์จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงและดำเนินการป้องกันไว้ก่อน เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนที่จะสามารถทนได้ ซึ่งจะเป็นการป้องกันเพื่อไม่ให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานที่ลดลงด้วย ในการกำหนดรายละเอียดที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์ป้องกันนั้นมีมาตรฐานกำหนดไว้หลายมาตรฐาน เช่น NEC หัวข้อ 430-440, UL-508, ANSI-C19, NEMA, ANSI/IEEE เป็นต้น โดยในแต่ละมาตรฐานจะมีข้อกำหนดรายละเอียดปลีกย่อยแตกต่างกันไป และส่วนหลักๆจะคล้ายกัน แต่ทุกมาตรฐานต้องใช้ข้อมูลหลักเหมือนกันคือ ค่ากระแสมอเตอร์ ที่โหลดที่พิกัดมาใช้เป็นตัวพิจารณาเพื่อเลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน นอกจากนั้นแล้วยังต้องพิจารณาข้อมูลอื่นๆ ประกอบด้วยซึ่งจะหาได้จากป้ายประจำเครื่อง (Name Plate) ได้แก่ แรงดันพิกัด, ชีตจำกัดเวลาของโรเตอร์ (Lock Rotor time limit), ชั้นฉนวน (Insulation Class), อุณหภูมิห้องสูงสุด, กำลังมอเตอร์ที่พิกัด ฯลฯ เมื่อทราบค่าต่างๆดังกล่าวนี้แล้วก็จะนำไปพิจารณาเทียบกับกราฟคุณสมบัติของรีเลย์ป้องกันโหลดเกิน โดยจะต้องให้กราฟคุณสมบัติของรีเลย์ป้องกันโหลดเกินนั้นอยู่ใกล้ชิดกัน ทับหรือตัดกันกับกราฟคุณลักษณะกระแสของมอเตอร์และอยู่ก่อนลงมาด้านล่างของกราฟของมอเตอร์ ดังรูปตัวอย่างที่ 2-22 ส่วนการพิจารณาหรือการเลือกว่าจะให้กราฟของรีเลย์โหลดเกินนั้นอยู่ห่าง (Over Protecton) หรืออยู่ใกล้ (Under Protection) กับกราฟคุณสมบัติกระแสเวลาของมอเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของผู้ใช้เป็นหลัก, นอกจากนั้นยังอาจแยกพิจารณาเฉพาะส่วน โหลดเกินของมอเตอร์ออกจากส่วนชีตจำกัด โรเตอร์ (Lock Rotor time) ของช่วงเดินเครื่องได้เพื่อให้สามารถเลือกรีเลย์มีคุณสมบัติสอดคล้องตามลักษณะการใช้งานของผู้ใช้ได้เช่นกัน

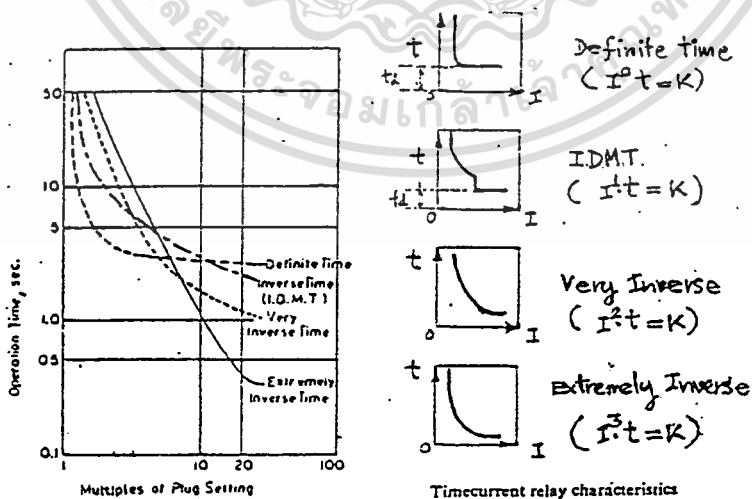


รูป 2-22 (a) กราฟของรีเลย์โหลดเกินทั่วไป



รูป 2-22 (b) กราฟของรีเลย์โหลดเกินในการป้องกันตามปกติ

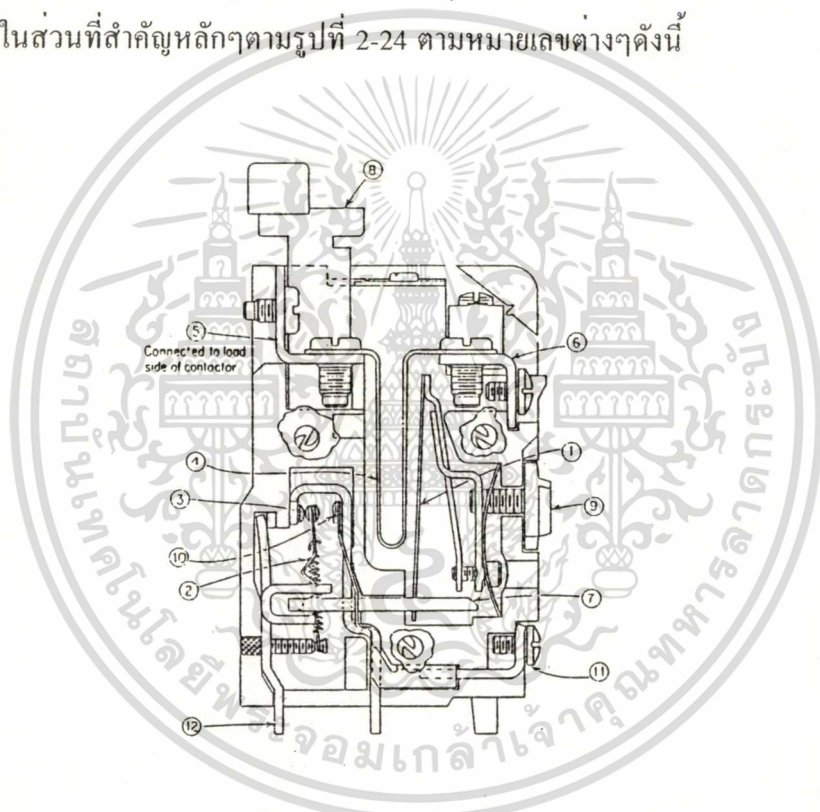
ในการเลือกใช้รีเลย์ป้องกัน โหลดเกินชนิดความร้อนนั้นจะต้องเลือกชนิดที่มีลักษณะของกราฟเวลา-กระแสในช่วงโหลดเกินนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟกระแส-เวลาของมอเตอร์ให้มากที่สุด นอกจากนั้นจะต้องทนค่ากระแสลัดวงจรได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเริ่มเดินเครื่องจะต้องทนกระแสลัดโรเตอร์ได้และไม่ปลดวงจรมอเตอร์ในเวลาที่ยาวกว่าเวลาของช่วงลัดโรเตอร์ (Lock Rotor time limit) ลักษณะทั่วไปของกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของรีเลย์โหลดเกินมีชนิดต่างๆ เช่น IDMT (Inverse definite Minimum time) DT, (Definite Time), VI (Very-Inverse), EI (Extremely Inverse) ดังแสดงในรูปที่ 2-23



รูป 2-23 กราฟลักษณะเวลา-กระแสชนิดต่างๆ

## 2.2.5 โครงสร้างและการทำงานของรีเลย์โหลดเกินแบบความร้อน [9]

โครงสร้างของรีเลย์โหลดเกินแบบความร้อนนั้นมีรายละเอียดภายในและองค์ประกอบต่างๆ แตกต่างกันไปตามบริษัทของผู้ผลิต แต่ทั้งหมดจะมีคุณสมบัติในการทำงานที่คล้ายกันตามมาตรฐานสากลที่ได้กำหนดขึ้นมาจากกลุ่มประเทศต่างๆ ทั้งยุโรปและอเมริกา ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะในส่วนที่สำคัญหลักๆ ตามรูปที่ 2-24 ตามหมายเลขต่างๆ ดังนี้

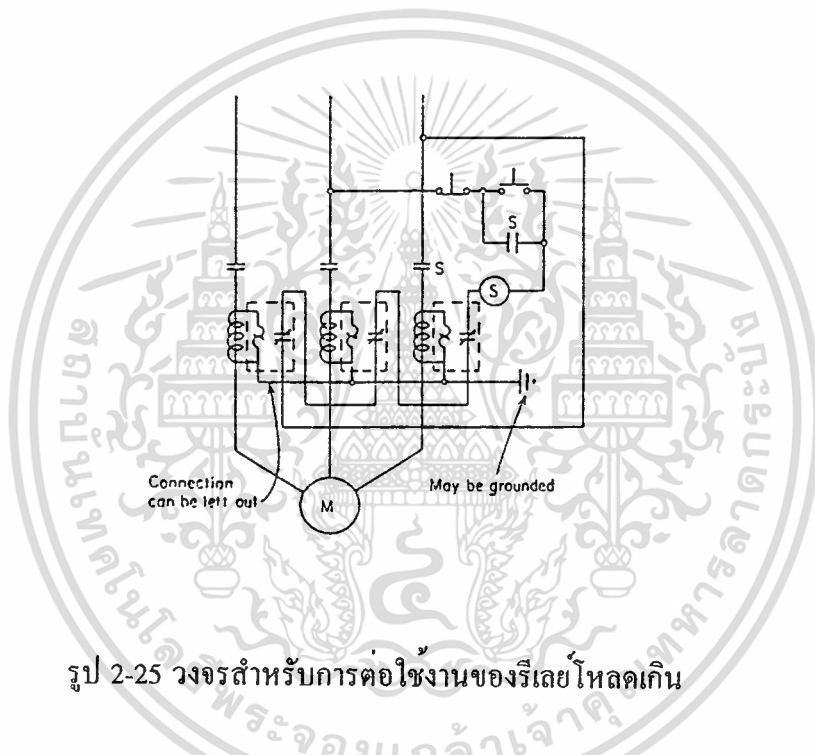


รูป 2-24 โครงสร้างภายในของรีเลย์โหลดเกินชนิดความร้อน

จากรูปที่ 2-24 หมายเลข (1) คือแถบโลหะคู่ (Bimetal Strip) ที่เป็นส่วนที่เป็นทางผ่านของกระแสมอเตอร์โดยตรงเพื่อเป็นตัวกำเนิดความร้อนที่แปรตามค่ากระแสมอเตอร์ยกกำลัง 2 ซึ่งต่อตรงกับสปริงหมายเลข (2) ที่ทำหน้าที่รี้งแถบโลหะคู่นี้ไว้ในสภาพปกติ (NC) เพื่อให้ครบวงจรสำหรับทางเดินกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ และจะทำงานโดยควบคุมการเปิดวงจรของหน้าสัมผัสชนิดปกติปิดวงจรหมายเลข (3) ด้วยส่วนสร้างความร้อน (Heater) คือหมายเลข (4) ที่ติดตั้งอยู่บนแถบติดตั้งหมายเลข (5) และ (6), หมายเลข (7) เป็นคานกระดก (Snap action lever) สำหรับทำงานร่วมกับแถบโลหะคู่, หน้าสัมผัสสามารถเลื่อนและรีเซ็ตได้ด้วยแถบเลื่อนหมายเลข (8) ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเขียวจะเขียนทานการค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

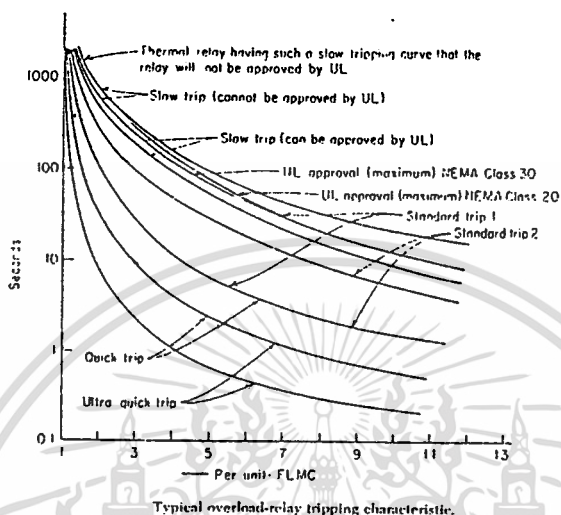
สามารถเลื่อนกลับไปยังตำแหน่งปกติปิด (NC) เมื่อไม่มีการเกิดสภาวะโหลดเกินและสามารถปรับตั้งค่าการทำงานของกระแสโหลดของมอเตอร์ที่เกินค่าพิกัดได้ด้วยปุ่มปรับหมายเลข (9) โดยเป็นการปรับระยะเวลาการทำงานของแถบโลหะคู่กับส่วนสร้างความร้อนให้มีระยะเวลากระทำ (Snap-action) ที่ส่งผลให้มีการใช้เวลาในการกระทำได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับกระแสมอเตอร์ โดยทั่วไปจะปรับได้ในช่วงกระแสตั้งแต่ 85% ไปจนถึง 115% ของค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์ สำหรับในการใช้งานนั้นมีการต่อวงจรทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2-25



รูป 2-25 วงจรสำหรับการต่อใช้งานของรีเลย์โหลดเกิน

การทำงานโดยสรุปคือ รีเลย์โหลดเกินจะทำการตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า (ที่แปรตามปริมาณโหลดทางกล) ที่ไหลเข้ามอเตอร์ ซึ่งจะผ่านตัวรีเลย์โดยตรงเข้าไปยังส่วนสร้างความร้อน (Heater) ความร้อนที่ได้จากส่วนนี้จะถูกส่งผ่านด้วยการแผ่รังสี, การนำพาความร้อนผ่านอากาศไปยังส่วนแถบโลหะคู่ (Bimetal Stripes) ที่ควบคุมการตัดต่อทางเดินกระแสของมอเตอร์อีกต่อหนึ่ง เมื่อแถบโลหะคู่นั้นได้รับความร้อนดังกล่าวจะเกิดการบิดงอตัวเองโดยการบิดงอนี้จะไปทำให้มีการเปิดวงจรทางเดินกระแส (Open) ซึ่งกลไกการควบคุมการตัดต่อทางเดินกระแสจะมีชุดกลไกควบคุมด้วยสปริงและคาน (Lever) ควบคุมต่างๆ กลไกนี้สามารถปรับตั้งจุดการทำงานได้ ซึ่งสามารถปรับตั้งการทำงานของรีเลย์ได้ในช่วงกระแสค่าต่างๆกันเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกิน (กระแสเกินพิกัด) โดยเกินทั้งปริมาณและระยะเวลาที่เกิดขึ้นนั้นจนถึงจุดปรับตั้งแล้ว รีเลย์จะทำการปลดวงจรมอเตอร์ออก (Trip) ทันที โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโหลดเกินกับช่วงเวลานั้นจะมีเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ในการดำเนินการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบล่าขึ้นอยู่กับชนิด และแบบของรีเลย์ที่เลือกใช้นั้น โดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลา-กระแสดังรูปที่ 2-26



รูป 2-26 กราฟ-เวลากระแสของรีเลย์โหลดเกินตามมาตรฐานต่างๆ

## 2.2.6 คุณลักษณะและการใช้งาน

โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกออกแบบมาให้ใช้งานแบบต่อเนื่อง (Continuous Duty) และจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ไม่เกินพิคัดของชั้นฉนวนตามเงื่อนไขการใช้งานที่อุณหภูมิห้องสูงสุดไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$  ตามมาตรฐาน IEC เมื่อมีการจับมอเตอร์ด้วยโหลดเกินพิคัดจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วน โดยตรงกับกระแสมอเตอร์ยกกำลัง  $2 (KI_M^2)$  และใช้เวลาในการเกิดเป็นส่วนผกผันกับกระแสมอเตอร์ยกกำลัง  $2 (\alpha 1 / KI_M^2)$  ซึ่งเวลาดังกล่าวนี้จะน้อยลง ถ้าขนาดของกระแสมอเตอร์มีค่ามากขึ้น ถ้ามีการเกิดสภาวะทั้งกระแสมอเตอร์เพิ่มมากขึ้นและเวลาที่เกิดยาวนานก็สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงเกินพิคัดชั้นฉนวนได้ ดังนั้นการเลือกคุณลักษณะของรีเลย์โหลดเกินจึงมีความสำคัญที่จะต้องพิจารณาข้อกำหนดมอเตอร์ คือขีดจำกัดของโรเตอร์ (Lock Rotor time) และกระแสพิคัดมอเตอร์ประกอบเสมอ

ในการออกแบบสร้างรีเลย์โหลดเกินนั้น ผู้ผลิตได้มีการสร้างและวิธีการที่จะให้รีเลย์นั้นมีการทำงานได้ต่าง ๆ กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเวลาหน่วงในการปลดวงจร (Time delay to trip) ซึ่งก็คือการสร้างให้รีเลย์มีคุณลักษณะของเวลา-กระแสที่ต่างกันออกไปดังนี้

การออกแบบให้รีเลย์โหลดเกินปลดวงจรได้เร็วขึ้น

- (1) ลดปริมาณมวลสารของส่วนสร้างความร้อน (Heater) ภายในตัวรีเลย์ทั้งชนิดที่เป็นแบบแยกส่วนสร้างความร้อนออกจากส่วนควบคุมปลดวงจร (Trip) และชนิดที่เป็นตัวสร้างความร้อน
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปลดวงจรภายในตัวเดียวกัน เพื่อเป็นการลดค่าคงตัวเวลาทางความร้อนอย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดในกรณีที่การลดปริมาณมวลสารของส่วนสร้างความร้อนลงมากจะทำให้ไม่สามารถทนกระแสลัดวงจรได้เมื่อมีการเกิดการลัดวงจรหรือแม่กระทั่งช่วงการเริ่มเดินมอเตอร์

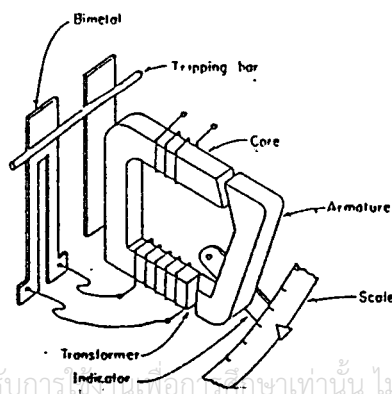
(2) การลดระยะระหว่างส่วนสร้างความร้อนกับส่วนควบคุมการปลดวงจรภายในตัวรีเลย์ วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ เมื่อลดระยะลงมากๆ ประมาณ 0.07 นิ้วถึง 0.18 นิ้ว อากาศที่คั่นอยู่ระหว่างส่วนดังกล่าวจะมีสภาพเหมือนวัตถุฟิล์มบางที่นำความร้อนได้ดีทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหน่วงที่ได้กับระยะทางที่ลดลงไปนั้นไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นทำให้การควบคุมระยะดังกล่าวเพื่อให้ได้เวลาหน่วงที่แน่นอนนั้นทำได้ยาก (ในการผลิต) นอกจากนั้นแล้วโครงสร้างประกอบของมันเอง (Casing) ยังมีผลในการนำความร้อนจากส่วนสร้างความร้อนไปยังส่วนปลดวงจรได้จึงทำให้ได้เวลาหน่วงที่ไม่แน่นอน

(3) การทำให้ส่วนสร้างความร้อนมีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงขึ้น ส่วนที่เป็นแถบโลหะคู่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงขึ้น เพื่อให้ปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากและเร็วขึ้น

**การออกแบบให้รีเลย์ไหลดเกินปลดวงจรได้ช้าลง**

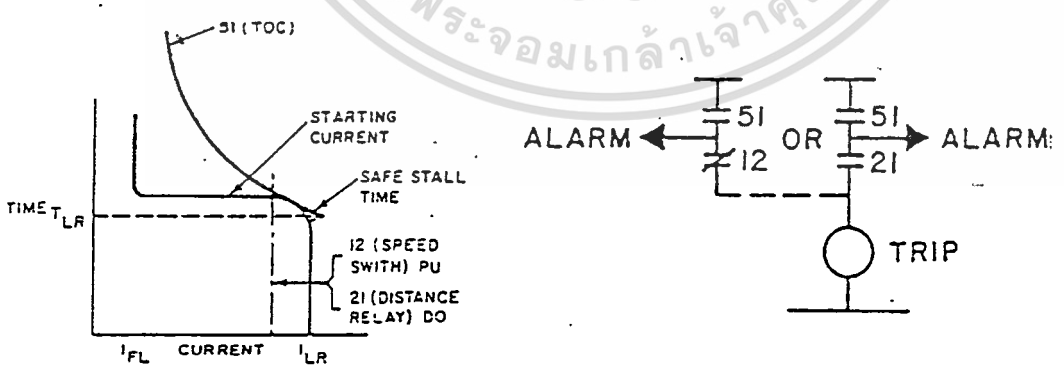
- (1) ทำการเพิ่มปริมาณมวลสารของส่วนสร้างความร้อนภายในตัวรีเลย์
- (2) การเพิ่มระยะทางระหว่างส่วนสร้างความร้อนกับส่วนควบคุมการปลดวงจรภายในตัวรีเลย์

(3) การใช้หม้อแปลงชนิดอิมตัวเพื่อผลในการอาศัยการกระตุ้นการสร้างสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงการอิมตัวภายในแกนเหล็กจากกระแสลัดวงจร แล้วนำกระแสที่ได้จากด้านทุติยภูมิ (ซึ่งค่ากระแสนี้ลดลงตามอัตราส่วนจำนวนรอบแต่ไม่ได้ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นในช่วงอิมตัว) จ่ายให้กับส่วนสร้างความร้อนภายในตัวรีเลย์ ดังนั้นเมื่อเกิดภาวะไหลดเกินมากๆ หรือช่วงเริ่มเดินเครื่องหรือแม่กระทั่งเกิดการลัดวงจรช่วงสั้นๆก็จะไม่ทำให้กระแสมอเตอร์ที่ได้จากหม้อแปลงกระแสนี้มีปริมาณและการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปตามกระแสมอเตอร์จริงๆ จึงทำให้รีเลย์ปลดวงจรได้ช้าลง รีเลย์ลักษณะดังกล่าวนี้แสดงดังรูปที่ 2-27

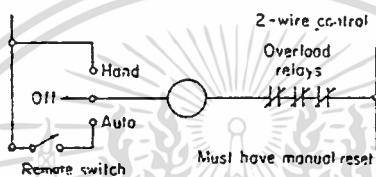
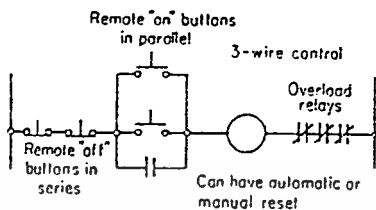


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูป 2-27 การใช้หม้อแปลงอิมตัวภายในรีเลย์ไหลดเกิน**

ในการเลือกใช้รีเลย์ไหลคเกินทั้งแบบที่มีเวลาหน่วงในการสั่งปลดวงจรมอเตอร์ที่เร็วหรือช้า นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะโหลดทางกลที่มอเตอร์นั้นขับอยู่ซึ่งจะพิจารณาจากค่าโมเมนต์เฉื่อย (Moment of Inertia) ของโหลดทางกล ในทางปฏิบัติจะดูได้จากกราฟลักษณะสมบัติของโหลด และของมอเตอร์ประกอบกัน [10] ทั้งนี้เวลาที่มอเตอร์จะสามารถเร่งความเร็วของเพลาลให้ขึ้นไปจนถึงความเร็วพิกัดได้นั้นจะต้องใช้เวลาไม่เกินค่าขีดจำกัดเวลาของโรเตอร์ (Lock Rotor time limit) นับตั้งแต่เริ่มเดินเครื่อง รีเลย์ที่ใช้จะต้องไม่สั่งปลดวงจรมอเตอร์ภายในเวลาดังกล่าวนี้สำหรับในช่วงการเดินเครื่อง หลังจากมอเตอร์ได้เร่งความเร็วสู่ค่าพิกัดแล้วรีเลย์จะรับหน้าที่ป้องกันการเกิดไหลคเกินได้ตามหลักการทำงานที่ได้อธิบายถึงในหัวข้อ 2.2.5 แล้ว ในบางกรณีที่โหลดทางกลมีค่าความเฉื่อยสูง เช่น โหลดพัดลม บีม หรือโหลดแบบล้อถ่วงน้ำหนัก (Flywheel) ที่ต้องใช้เวลาในการเร่งความเร็วขึ้นสู่ความเร็วพิกัดนานมากนั้น เราไม่สามารถจะใช้รีเลย์ไหลคเกินแต่เพียงลำพังได้ เนื่องจากรีเลย์นั้นมีค่าคงตัวทางเวลาในการทำงานที่จำกัด (โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเริ่มเดินเครื่องที่มีกระแสสูงๆ) และไม่สามารถรับค่ากระแสเริ่มเดินเครื่องสูงมากๆ (6-10 เท่าของกระแสพิกัด) เป็นเวลานานได้เพราะจะทำให้รีเลย์นั้นสั่งปลดวงจรมอเตอร์ก่อน ดังนั้นจึงต้องใช้สวิทช์ตรวจจับความเร็วที่เพลาลของมอเตอร์ควบคุมการทำงาน (Supervise) ของรีเลย์ไหลคเกินอีกชั้นหนึ่งดังรูปที่ 2-28 ส่วนรูปที่ 2-29 เป็นวงจรการทำงานทั่วไป



รูป 2-28 การควบคุมการทำงานของรีเลย์ไหลคเกินด้วยสวิทช์ความเร็ว



รูป 2-29 วงจรการต่อใช้งานของรูปที่ 2-28

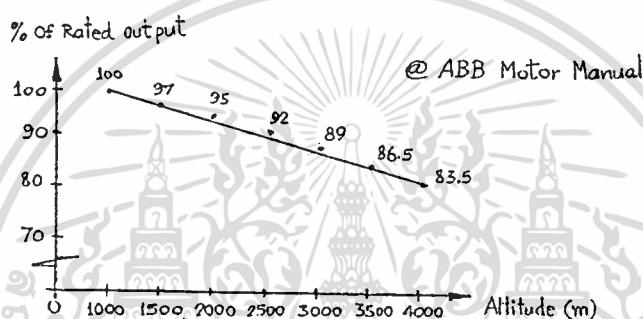
สวิตช์ตรวจจับความเร็วนั้น (Speed Switch) จะทำการวัดความเร็วรอบของเฟลมอเตอร์ตลอดเวลา ตั้งแต่ช่วงเริ่มเดินมอเตอร์ โดยมีชุดหน้าสัมผัสปกติปิด (NC) ที่ลัดวงจรของรีเลย์ไหลดเกินไว้ และจะทำการเปิดวงจรดังกล่าวนี้ออกเมื่อความเร็วรอบที่ตรวจวัดได้นั้นถึงจุดปรับตั้งซึ่งจุดปรับตั้งดังกล่าวนี้สามารถปรับค่าได้โดยกำหนดให้สวิตช์ตรวจจับความเร็วทำงานได้ตั้งแต่ความเร็ว 60% ขึ้นไปจนถึง 100% ของความเร็วพิกัด เมื่อความเร็วรอบถึงจุดปรับตั้งแล้ว สวิตช์ตรวจจับความเร็วจะทำการเปิดวงจรหน้าสัมผัสปกติปิด (NC) ออก ทำให้วงจรทางเดินกระแสมอเตอร์นั้นไปผ่านวงจรของรีเลย์ไหลดเกิน เพื่อให้รีเลย์ไหลดเกินทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันตามปกติต่อไป

### 2.3 สภาวะอุณหภูมิเกินในมอเตอร์

จากหัวข้อที่แล้วมาการเกิดไหลดเกินนั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้อุณหภูมิภายในตัวมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้นจนอาจเกินพิกัดชั้นฉนวนและโครงสร้างของมอเตอร์ได้ นอกจากสภาวะไหลดเกินแล้วยังมีสาเหตุอื่นๆอีกที่ทำให้มอเตอร์มีโอกาสเกิดสภาพอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเกินพิกัดได้เช่น สภาพแวดล้อมที่โรงงานมีอุณหภูมิแวดล้อมสูงเกินไป (เกินกว่า 40°C ตามมาตรฐาน IEC), มอเตอร์มีการระบายความร้อนออกจากตัวไม่เพียงพอเนื่องจากมีฝุ่นละอองปกคลุมพื้นผิวของมอเตอร์มาก เป็นต้น หรืออาจเกิดจากบริเวณที่ติดตั้งใช้งานมอเตอร์นั้นมีความกดอากาศต่ำเนื่อง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากพื้นที่ติดตั้งนั้นอยู่สูงจากระดับใช้งานปกติ (MSL) มาก ซึ่งมีความหนาแน่นของอากาศต่ำจึงทำให้อากาศที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน (Coolant medium) นั้นมีน้อย โดยจะเกิดผลกระทบดังกล่าวนี้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโครงสร้างการระบายความร้อนโดยตรงกับอากาศเป็นส่วนใหญ่ คือ โครงสร้างมอเตอร์แบบ TEWAC, TEFC, TE เป็นต้น ดังนั้นในการใช้งานมอเตอร์ในลักษณะนี้จะต้องลดภาระโหลดทางกลที่จะขับลงเป็นสัดส่วนตามความสูงของพื้นที่ที่ติดตั้งใช้งาน (Derating) ดังรูปที่ 2-30 ทั้งนี้เพื่อเป็นการรักษาสภาพการเพิ่มของอุณหภูมิในมอเตอร์ให้อยู่ในพิสัยของชั้นฉนวนของมอเตอร์นั้น



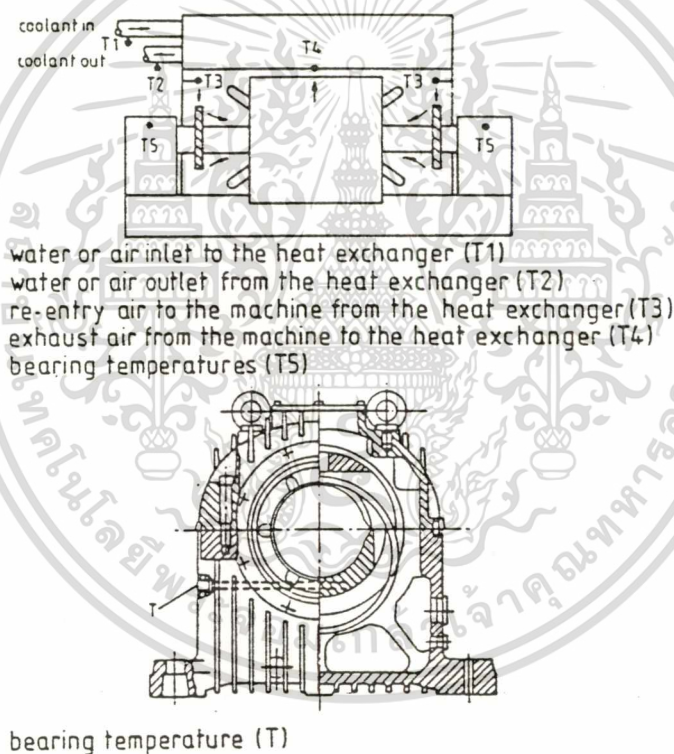
รูป 2-30 การลดพิสัยมอเตอร์ลงตามระดับความสูง

ในการใช้งานทั่วไปแล้วจะต้องมีการป้องกันอุณหภูมิเกินอยู่ด้วยเสมอเพื่อความแน่นอนถึงแม้จะมีการลดภาระโหลดลง (Derating) แล้วก็ตาม ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบอุณหภูมิภายในมอเตอร์อยู่ตลอดเวลาในการใช้งาน เมื่ออุปกรณ์ป้องกันอุณหภูมิเกินตรวจสอบพบว่ามีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกินพิสัยชั้นฉนวนของมอเตอร์ (หรือค่าที่จุดปรับตั้งที่ประมาณ 85%-95% ของพิสัยสูงสุดของฉนวน) รีเลย์ป้องกันอุณหภูมิเกินนี้จะทำการปลดวงจรมอเตอร์ออกทันทีจากนั้นจะต้องมีการหน่วงเวลาออกไปให้ยาวนานพอจนกระทั่งมอเตอร์มีอุณหภูมิลดลงจนถึงค่าอุณหภูมิที่ปลอดภัยสำหรับการใช้งานมอเตอร์เดินเครื่องในครั้งต่อไป

สาเหตุสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทางมาตรฐานกำหนด (Recommend) ให้ต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดและป้องกันอุณหภูมิเกินภายในมอเตอร์นั้นเนื่องจาก ในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดโรเตอร์แบบตัวนำกรงกระรอก เมื่ออยู่ในสภาวะลัดโรเตอร์นั้นจะมีความร้อนสูญเสียอันเนื่องมาจากความถี่สลิปอย่างมากและทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่กี่วินาที เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่สามารถระบายออกได้ทันหรือไม่สามารถหยุดการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ในสภาวะดังกล่าวได้แล้ว จะทำให้โครงสร้างของโลหะตัวนำกรงกระรอกเสียหายและยังทำให้เกิดการแตกร้าวภายในตัวนำลัดวงจรด้านหัว-ท้ายของโรเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจวัดอุณหภูมิในส่วนต่างๆของมอเตอร์นั้นจะต้องเลือกจุดที่สามารถวัดได้ถูกต้อง และสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว โดยอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensors) ที่ใช้มีหลายประเภทเช่น อาร์ทีดี (RTD : Resistance temperature Detector) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ,เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่เปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่วัดออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้าที่แปรตามอุณหภูมิโดยตรง,เทอร์มิสเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของมันเองแบบไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แวดล้อมตัวมัน เป็นต้น ตำแหน่งที่สำคัญที่สามารถใช้เป็นจุดติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2-31(a)และ (b)



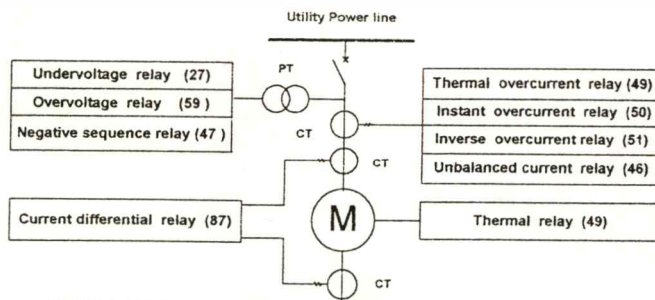
: Location of temperature detectors in electrical machines

รูป 2-31(a),(b) ตำแหน่งที่เป็นไปได้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

จากอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) แบบต่างๆจะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมและป้องกันอุณหภูมิเกินซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะทำงานร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินในหัวข้อที่ 2.2.4 เพื่อให้สามารถป้องกันอุณหภูมิเกินภายในตัวมอเตอร์ได้อย่างครอบคลุม โดยที่ทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่ให้ใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ป้องกันอุณหภูมิเกินและอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินต่างทำงานในส่วนที่อุปกรณ์แต่ละชนิดไม่สามารถจะทำได้ คือ ในส่วนของอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินนั้นสามารถจะป้องกันอุณหภูมิในมอเตอร์ไม่ให้เกินพิกัดได้จากสาเหตุของการเกิดโหลดเกินทางกลรูปแบบต่างๆ โดยอาศัยการตรวจวัดที่สำคัญขณะกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ เช่น โหลดเกินที่เพลลาของมอเตอร์, การเชื่อมต่อ (Coupling) กับโหลดทางกลที่ไม่เหมาะสม (Misalignment), ความฝืดหรือติดขัดของเพลลา กับลูกปืน (Bearing), การเกิดโหลดเกิน หรือกระแสเกินจากการที่แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไม่สมมาตรหรือต่ำเกินพิกัด, ความถี่ที่ไม่ปกติ เป็นต้น และยังอาจป้องกันโหลดเกินได้จากการที่ความเร็วรอบที่เพลลาตกลงกว่าพิกัดได้ แต่อุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินนั้นไม่สามารถจะป้องกันอุณหภูมิเกินของมอเตอร์ได้ ในกรณีที่มีการระบายความร้อนของมอเตอร์ที่ผิดปกติ อุณหภูมิแวดล้อมที่สูงเกินค่าที่กำหนด (40°C : IEC) ดังนั้นปัญหาดังกล่าวนี้อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิจึงสามารถทำหน้าที่นี้แทน คือ การตรวจวัดสภาพอุณหภูมิเกินในมอเตอร์อื่นเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆทางกล (การระบายความร้อน) ที่ไม่ใช่การตรวจวัดอุณหภูมิเกินที่มีสาเหตุจากกระแสไหลเข้ามอเตอร์เกินพิกัด นอกจากนี้แล้วในบางกรณีถ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งเพลลาวงแหวนลูกปืนของมอเตอร์ตามรูปที่ 2-30 (b) นั้น ยังสามารถที่จะทำการป้องกันอุณหภูมิภายในมอเตอร์ได้จากการเกิดโหลดทางกลเกินพิกัดเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากความเสียดทานที่ผิวของลูกปืนที่เพิ่มมากขึ้นจากการเยื้องศูนย์กลางของแกนเพลลาเนื่องมาจากน้ำหนักของโหลดทางกลที่ไปเบี่ยงเบนแนวแกนเพลลาส่วนที่กดทับ หรือส่วนที่คลบลูกปืนรับน้ำหนักอยู่

จากหลักการทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ป้องกันมอเตอร์ทั้งหมดที่กล่าวมานั้น แสดงได้ด้วยภาพรวมของระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ประกอบด้วยรีเลย์ป้องกันทุกฟังก์ชันดังรูปที่ 2-32 ในรูปที่ 2-31 นั้นเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพันโรเตอร์ (Wound Type) หรือมอเตอร์ซินโครนัสเท่านั้นที่รีเลย์ป้องกันชนิดกระแสแตกต่าง (Differential Current Relay) เพื่อใช้หาสถานะฉนวนบกพร่องซึ่งจะทำให้เกิดกระแสรั่ว (Leakage Current) ที่สามารถตรวจพบได้โดยรีเลย์ชนิดนี้



Schematic arrangement of induction motor protective equipment with system device function numbers according to IEEE C37.2-1987

รูป 2-32 ระบบป้องกันมอเตอร์หลายฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

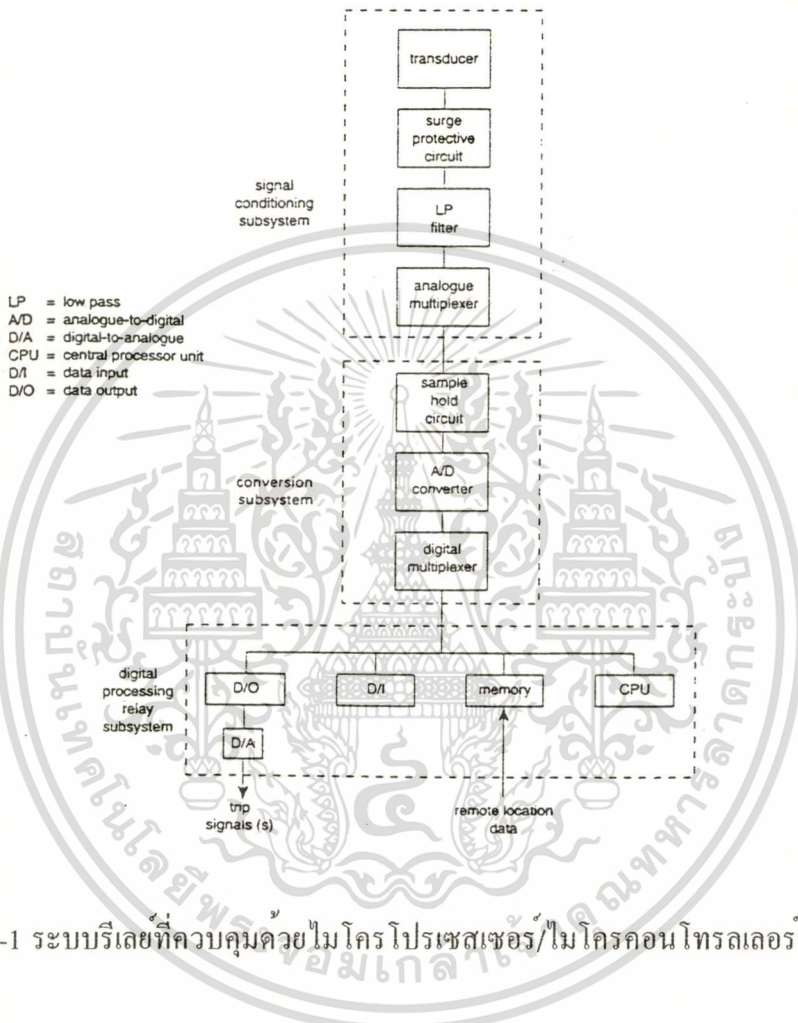
### การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 3.1 ความจำเป็นและการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ควบคุมการป้องกันมอเตอร์

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงหลักการทำงานการใช้งานของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์ในภาพรวมสำหรับรีเลย์ป้องกันมอเตอร์แต่ละชนิด (Functional type Relays) สำหรับแต่ละสถานะที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการใช้มอเตอร์ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเราต้องการให้มีการป้องกันมอเตอร์สำหรับสถานะใดๆก็ตามจะต้องใช้รีเลย์เฉพาะสำหรับหน้าที่ (Function) การป้องกันในสถานะนั้นๆ 1 ชุด 1 หน้าที่ เมื่อต้องการระดับการป้องกันที่สูงขึ้นจึงต้องใช้จำนวนรีเลย์แต่ละชนิดมากขึ้น ทำให้การใช้งานระบบป้องกันมอเตอร์มีความยุ่งยาก ทั้งในการปรับตั้งจุดทำงานและการซ่อมบำรุงในอนาคต ผลเสียดังกล่าวนี้จะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ถ้ามีการนำระบบป้องกันดังกล่าวนี้ไปใช้กับศูนย์ควบคุมมอเตอร์ (Motor Control Center: MCC) ในระบบควบคุมอุตสาหกรรมต่างๆที่มีการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์ที่สามารถทำงานได้หลากหลายหน้าที่มากที่สุดภายในระบบรีเลย์ 1 ชุดหรือการออกแบบสร้างระบบรีเลย์ป้องกันให้มีความซับซ้อนและใช้อุปกรณ์รวมกันน้อยที่สุด หรือการออกแบบสร้างระบบรีเลย์ป้องกันที่สามารถทดแทนการทำงานรีเลย์ระบบเดิมได้ทั้งหมด เป็นต้น ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวนี้ การใช้ระบบไมโครโพรเซสเซอร์หรือระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ออกแบบใช้งานในลักษณะดังกล่าวนี้ได้ ด้วยการแปลงสภาพการทำงานของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์แต่ละหน้าที่ให้เป็นวิธีการ (Algorithms) ทำงานที่อยู่ในรูปของชุดคำสั่ง (Program) เก็บไว้ในหน่วยความจำในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ จะสามารถทำให้มีขนาดของระบบที่เล็กลงอย่างมาก นอกจากนี้แล้วยังสามารถออกแบบโปรแกรมควบคุมให้สามารถทำหน้าที่พิเศษอื่นๆเพิ่มเติมได้ เช่นการทำให้สามารถแจ้งข้อมูลของการป้องกันในแต่ละฟังก์ชันให้กับผู้ใช้งานได้เมื่อเกิดสถานะผิดปกติต่างๆอีกทั้งยังสามารถให้ผู้ใช้สามารถเลือกการทำงานแต่ละฟังก์ชันได้อย่างอิสระจากจำนวนฟังก์ชันการป้องกันทั้งหมดที่บรรจุไว้ในหน่วยความจำ ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงาน (Algorithm) ของแต่ละฟังก์ชันก็สามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงชุดคำสั่งในโปรแกรมน้อยสำหรับฟังก์ชันการป้องกันชนิดนั้นๆ เนื่องจากสามารถออกแบบให้ชุดคำสั่งของแต่ละฟังก์ชันการป้องกันเป็นโปรแกรมน้อย (Subroutines) ที่เป็นอิสระจากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแต่ละฟังก์ชันระบบที่แสดงแทนรูปแบบของรีเลย์ป้องกัน แบบที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงดังรูปที่ 3-1



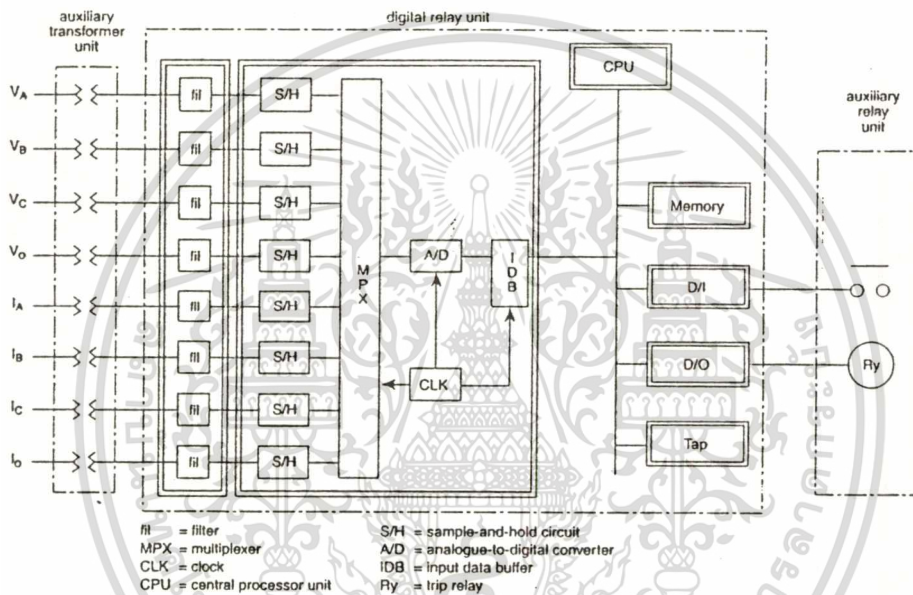
รูป 3-1 ระบบรีเลย์ที่ควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์/ไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.2 องค์ประกอบของระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม

ระบบของรีเลย์ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายฟังก์ชันที่ควบคุมการทำงานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตามรูปที่ 3-1 นั้น ประกอบด้วยส่วนหลักหลายส่วน คือ ส่วนของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และชิพหน่วยความจำ ส่วนของชิพเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตภายนอกที่ใช้ควบคุมการทำงานของทั้งระบบรีเลย์เองและระบบการเดินเครื่องมอเตอร์ อุปกรณ์การตรวจวัดสัญญาณและชิพการแปลงสัญญาณจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอล นอกจากนี้แล้วยังมีอุปกรณ์ที่ให้ผู้ใช้งานได้ติดต่อ และรับทราบข้อมูลสถานะต่างๆของมอเตอร์และสถานะของรีเลย์ในแต่ละฟังก์ชัน ซึ่งทั้งหมดนี้จะสามารถทำงานได้ด้วยโปรแกรมควบคุมเท่านั้น โดยส่วนของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมและโปรแกรมที่ทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันการป้องกันมอเตอร์แทนรีเลย์ชนิดต่าง ๆ นั้นจะกล่าวถึงในบทที่ 4 สำหรับส่วนต่างๆในระบบบริเลย์ดังกล่าวจะกล่าวถึงแต่ละส่วนต่อไปนี้



รูป 3-2 โครงสร้างภายในของระบบบริเลย์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

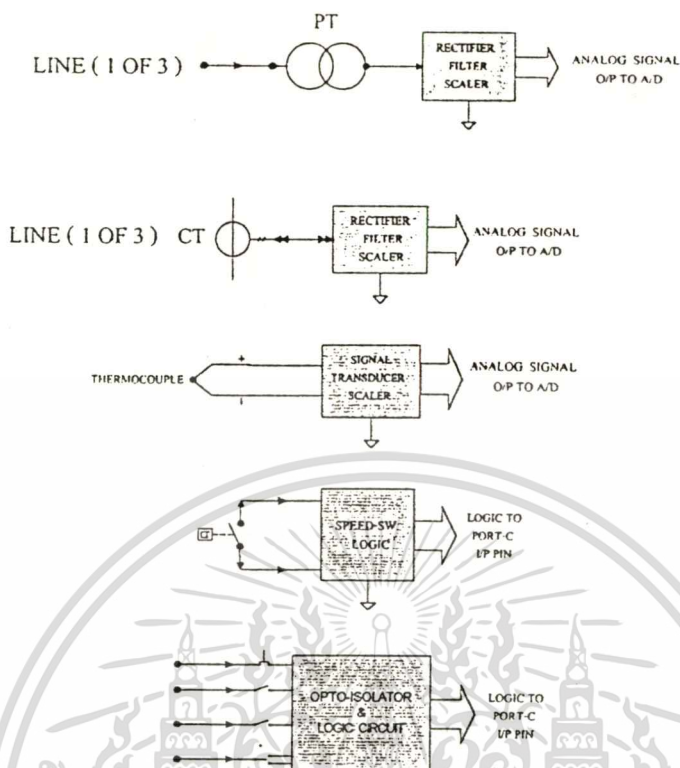
### 3.2.1 ส่วนการวัดและการแปลงสัญญาณ

จากรูปที่ 3.2 เฉพาะในส่วนการวัดและการแปลงสัญญาณนั้นประกอบด้วยส่วนต่างๆต่อไปนี้

#### 3.2.1.1 ส่วนการวัดและตรวจจับสัญญาณ (Sensors & Transducers)

ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดและตรวจจับสัญญาณที่เป็นตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้สภาพการทำงานของมอเตอร์ได้แก่ สถานะแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของมอเตอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ และอื่นๆนอกเหนือจากตัวแปรเหล่านี้ เช่น สภาพการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Contactor) เป็นต้น รูปที่ 3-3 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



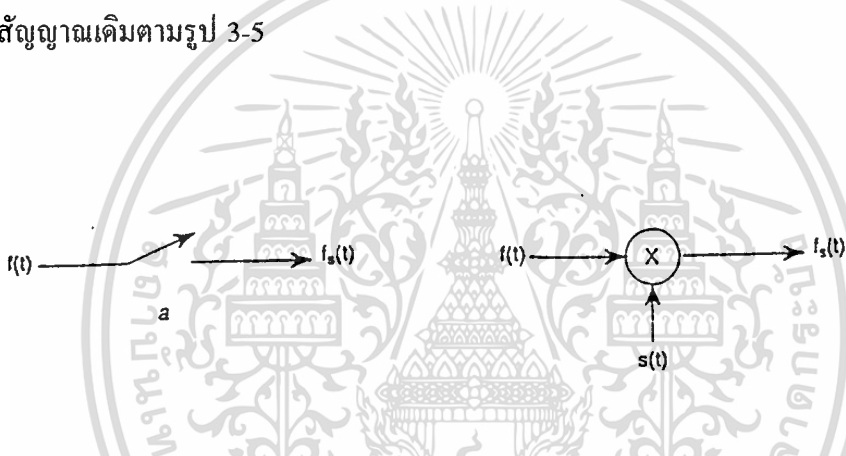
รูป 3-3 การตรวจวัดสัญญาณชนิดต่างๆ

อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณต่างๆเหล่านี้จะทำการเปลี่ยนรูปแบบของพารามิเตอร์ใดๆทางฟิสิกส์ให้อยู่ในรูปแบบของปริมาณทางไฟฟ้าที่แปรค่าตามปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ นั้น เช่น หม้อแปลงแรงดัน (PT/VT) ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าโดยการลดขนาดลงตามสัดส่วนจำนวนรอบของขดลวด, หม้อแปลงกระแส (CT) ใช้วัดกระแสไฟฟ้าโดยการลดขนาดลงตามสัดส่วนจำนวนรอบของขดลวดเช่นกัน นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์ตรวจวัดบางชนิดจะต้องมีการปรับแต่งและขยายขนาดสัญญาณให้มีขนาดที่เพียงพอในการใช้งาน เช่น เทอร์โมคัปเปิล (TC) ที่ใช้วัดอุณหภูมิจะให้สัญญาณไฟฟ้าออกมาเป็นแรงดันกระแสตรงขนาดมิลลิโวลต์ซึ่งจะต้องขยายให้มีขนาดที่เพียงพอสำหรับอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบต่อไป เป็นต้น ในบางกรณีถ้าระบบที่มีจำนวนของสัญญาณที่ต้องวัดหลายชนิดนั้นจะต้องมีอุปกรณ์การเลือกสัญญาณตามลำดับเวลา คือ อุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ เพื่อเป็นการประหยัดอุปกรณ์ส่วนการแปลงสัญญาณให้ใช้เพียง 1 ตัว สำหรับจำนวนสัญญาณหลายๆชนิดในขณะเดียวกันได้

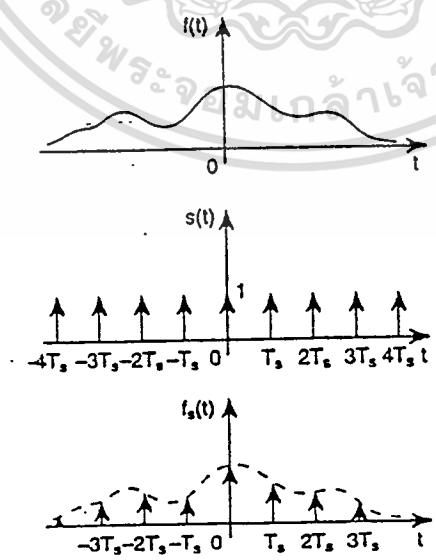
### 3.2.1.2 การซักรับตัวอย่างสัญญาณ (Sampling)

จากสัญญาณที่ได้จากส่วนการวัดจะถูกส่งไปยังส่วนของการซักรับตัวอย่างสัญญาณเพื่อให้ส่วนการแปลงค่าจากอะนาล็อกเป็นดิจิทัลสามารถทำงานได้ ในการซักรับตัวอย่างสัญญาณที่ต้องการแปลงค่า นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณ โดยเฉพาะความถี่ ในกรณีที่สามารถทราบค่าความถี่ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางอื่นได้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการแปลงค่าได้อย่างแน่นอนแล้วนั้น โดยอาศัยทฤษฎีการซัดตัวอย่างสัญญาณ [11] จะได้ว่า ความถี่ในการซัดตัวอย่างสัญญาณ  $f_s$  จะต้องไม่น้อยกว่า 2 เท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณที่ต้องการแปลงค่านั้นๆ จึงจะทำให้ไม่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ซัดตัวอย่างได้ ในกรณีที่มีการกรองสัญญาณนั้นๆกลับมา (Recovery Aliasing error) โครงสร้างของการซัดตัวอย่างสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3-4 ที่ประกอบด้วยตัวคูณสัญญาณที่แทน (Modeled) วงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีคาบเวลาในการปิดวงจรที่สั้นมาก (Short duty on period) เมื่อเทียบกับเวลาในการทำงานปิด-เปิดสวิตซ์ทั้งหมด (Period) ดังนั้นเมื่อผ่านสัญญาณอะนาล็อกที่ได้จากส่วนการตรวจวัดเข้าไปยังส่วนการซัดตัวอย่างสัญญาณแล้วจะได้ กลุ่มของค่าชั่วคราว (Instantaneous) ของสัญญาณต่อเนื่อง เป็นกลุ่มของพัลส์แคบๆ (Pulse Train) ที่มีแอมพลิจูด เป็นไปตามลักษณะแอมพลิจูดของสัญญาณเดิมตามรูป 3-5



รูป 3-4 การซัดตัวอย่างสัญญาณ



รูป 3-5 กลุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดเป็นสัญญาณที่ไม่มีรูปร่างหรือค่าความถี่ที่ปรากฏแน่นอนนั้นไม่สามารถใช้ความถี่ในการซัดตัวอย่างได้ตามทฤษฎี หรือในบางกรณีอาจมีการเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณที่ได้จากระบบการตรวจวัดให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการนำไปซัดตัวอย่างสัญญาณ เช่นการเรียงคลื่น (Rectifier) สัญญาณกระแสสลับ เป็นต้น ซึ่งในการซัดตัวอย่างสัญญาณลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการคำนวณทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างสัญญาณที่ซัดตัวอย่างมาได้เป็นชุดๆ เช่น อาจจะหาค่าเฉลี่ยของค่าที่ซัดตัวอย่างได้ 3 หรือ 5 ไปจนถึงหลายสิบค่าแล้วหาค่ากลางด้วยวิธีดังกล่าวก่อนนำค่าที่ได้นี้ไปทำการแปลงค่าเป็นดิจิตอลต่อไป

จากรูป 3-4 กำหนดให้สมการ  $S(t)$  แทนระบบการควบคุมจังหวะการปิดเปิดสวิตซ์ซัดตัวอย่างสัญญาณ

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - T_s) \quad (3.1)$$

เมื่อผ่านสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งเป็นสัญญาณต่อเนื่อง  $f(t)$  ใดๆเข้าไปยังสวิตซ์ซัดตัวอย่างสัญญาณจะได้

$$f_s(t) = f(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - T_s) \quad (3.2)$$

หรือ

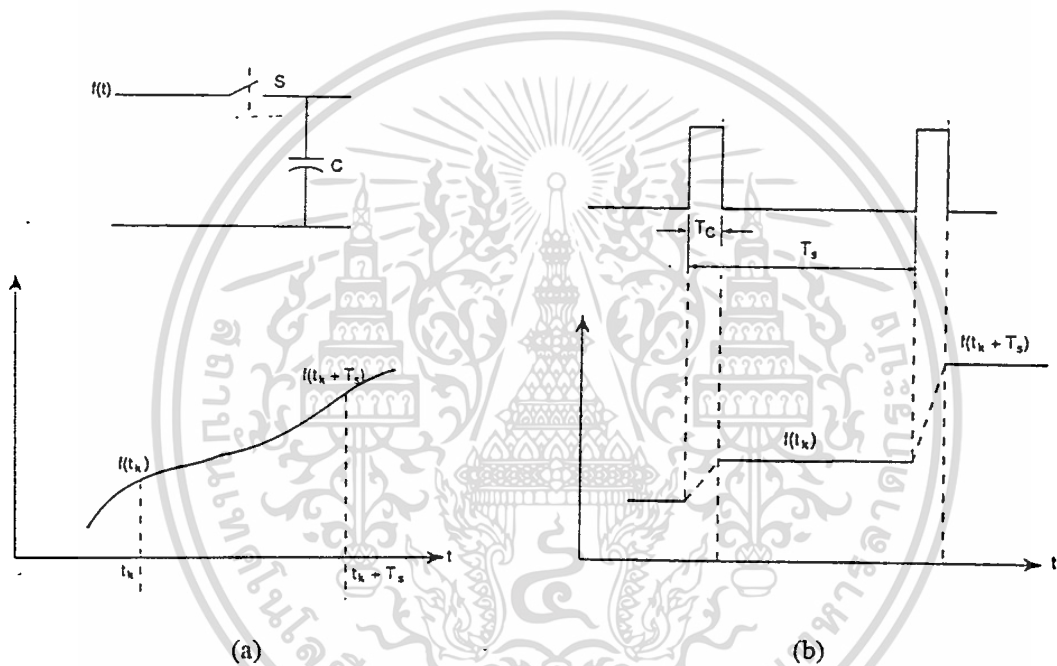
$$f_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \delta(t - nT_s) \quad (3.3)$$

ซึ่งเป็นกลุ่มของค่าสัญญาณ (Pulse train) ที่มีขนาดของแอมพลิจูดเป็นไปตามค่าขนาดสัญญาณต่อเนื่อง ณ ตำแหน่งที่ถูกซัดตัวอย่าง (Sampled) นั้นๆ และมีระยะห่างระหว่างค่าของแต่ละค่าสัญญาณเท่ากับคาบของการซัดตัวอย่างสัญญาณดังรูปที่ 3-5 เมื่อ  $S(t-T_s)$  เป็นอิมพัลส์ฟังก์ชัน (Impulse- function) ที่เป็นแบบ (Modeled) ของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์

### 3.2.1.3 การคงค่าตัวอย่างสัญญาณ (Sampled Signal holding)

เมื่อมีการซัดตัวอย่างสัญญาณแล้ว จะต้องคงค่าสัญญาณ ณ จุดที่ทำการซัดตัวอย่างนั้นไว้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะต้องยาวนานพอเพื่อให้กระบวนการแปลงสัญญาณที่อยู่ถัดไปนั้น สามารถดำเนินการได้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะทำการเริ่มต้นการแปลงสัญญาณในครั้งต่อไป ลักษณะของระบบการคงค่าสัญญาณดังรูปที่ 3-6 (a) จากรูปเมื่อสวิตซ์  $sw$ -ทำงาน จะปิด/เปิดวงจรตามจังหวะการทำงานของพัลส์ควบคุม  $P(t)$  ด้วยอัตราเร็ว  $f_p = 1/T_p$  ที่ช่วงเวลาปิดวงจรของพัลส์  $P(t) = t_{on}$  ขณะนี้ตัวเก็บประจุจะถูกต่อครบวงจรและถูกประจุมีแรงดัน  $V_c$  ขึ้นถึงค่า  $f(t_c)$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในระยะเวลา  $t_{on}$  และคงค่านี้ไว้ (Hold)จนกระทั่งสวิตช์  $sw$  เปิดวงจรออกเป็นเวลาเท่ากับ  $(T_p - t_{on})$  ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่กระบวนการแปลงค่าสัญญาณทำงานได้เสร็จสิ้น จากนั้นก็เริ่มกระบวนการใหม่ทั้งหมดสำหรับการซัดตัวอย่าง คงค่า และแปลงสัญญาณเป็นดิจิตอลสำหรับครั้งต่อไป ผลของกระบวนการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3-6 (b)

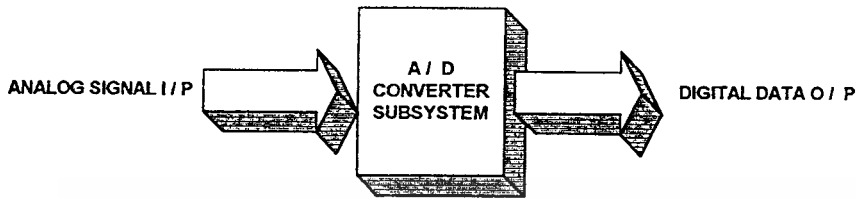


รูป 3-6 การคงค่าสัญญาณ

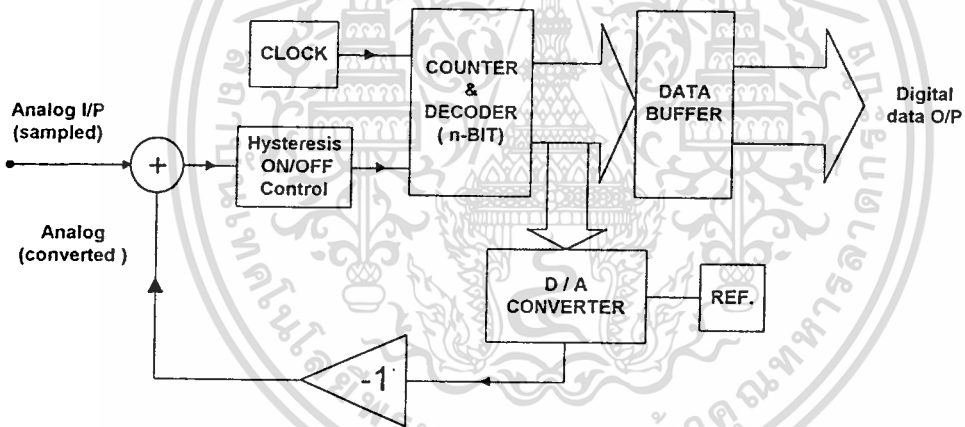
#### 3.2.1.4 การแปลงและจัดระดับค่าสัญญาณ (Conversion and Quantization)

ส่วนสุดท้ายของระบบการวัดสัญญาณและการแปลงเป็นข้อมูลดิจิตอลคือส่วนการแปลงค่าและจัดระดับค่าสัญญาณ ดังรูปที่ 3-7 จากรูประบบการแปลงจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอลนั้นเป็นระบบการแปลงที่อาศัยผลของการทำงานของการแปลงจากดิจิตอลเป็นอะนาล็อก ซึ่งในภาพรวมคือ การอาศัยผลจากการทำงานย้อนกลับของการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาล็อก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการประมาณค่า (Successive Approximation) ที่ได้จากชิพไอซีสำเร็จรูป (เบอร์ ADC0808) ซึ่งมีหลักการทำงานตามรูปที่ 3-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-7 การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล



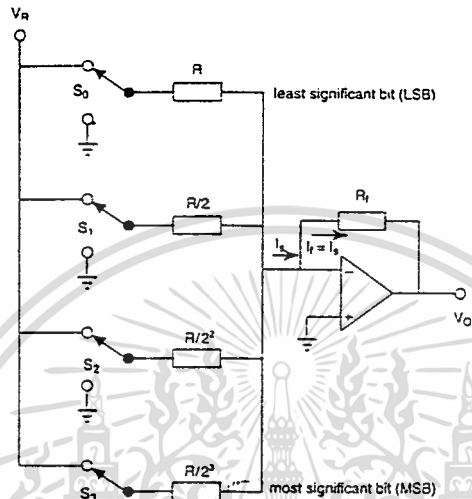
รูป 3-8 โครงสร้างภายในของ A/D

จากรูปที่ 3-8 กระบวนการแปลงค่าจะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างระหว่างสัญญาณอะนาล็อกที่ต้องการแปลงค่าจริงๆกับสัญญาณอะนาล็อกที่ได้จากบล็อกรหัส D/A ความแตกต่างนี้จะไปควบคุมการทำงานของวงจรรหัสและถอดรหัสดิจิทัล (Digital counter & Decoder) ซึ่งจะทำให้อินพุตของบล็อกรหัส D/A เปลี่ยนไปตามรหัสดิจิทัลนี้ ดังนั้นเอาต์พุตของบล็อกรหัส D/A ที่ได้เป็นสัญญาณอะนาล็อกจึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จนกว่าจะถึงค่าใกล้เคียง (Approximate) กับค่าอะนาล็อกที่ต้องการแปลงจริงๆจึงทำให้ค่าความแตกต่างนี้เป็นน้อยที่สุด และวงจรรหัสและถอดรหัสดิจิทัลหยุดทำงานและคงค่าสถานะของรหัสดิจิทัลนั้นไว้เป็นค่าของดิจิทัลที่เทียบเท่ากับการแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอนาล็อกเพื่อนำไปใช้ประมวลผลต่อไป สำหรับบล็อก D/A นั้นมีการทำงานที่ต้องอาศัยการจัดค่าระดับสัญญาณ (Quantization) ดังต่อไปนี้

ในรูปที่ 3-8 นั้นเฉพาะบล็อก D/A แสดงดังรูปที่ 3-9



รูป 3-9 โครงสร้างของ D/A

จากสวิทช์  $sw_0$  ถึง  $sw_n$  ถูกควบคุมด้วยวงจรรนับและถอดรหัส (Digital Counter & Decoder) ในลักษณะบิตควบคุม 1 บิตต่อสวิทช์ 1 ตัว ซึ่งแต่ละตัวมีสถานะได้ 2 แบบคือ “ปิด” และ “เปิด” วงจรแทนสถานะของระดับสัญญาณดิจิทัล (Logic) ควบคุมคือ “1” และ “0” ตามลำดับ โดยสวิทช์แต่ละตัวมีอิสระไม่ขึ้นแก่กันกับสวิทช์ตัวอื่นๆ ดังนั้นจึงมีสถานะรวม (Combination) ของสวิทช์ทั้งหมดได้  $2^n$  สถานะ เมื่อ  $n$  คือจำนวนบิตของข้อมูลดิจิทัลซึ่งก็คือจำนวนของสวิทช์ทั้งหมด  $n$  ตัว สถานะทั้งหมดของสวิทช์แต่ละตัวจะถูกรวมด้วยวงจรรวมผลสัญญาณ (Summing Amplifier) ทำให้ได้ค่าเอาต์พุต  $V_o$  ได้  $2^n$  ค่า ดังนี้

(โดยในสวิทช์แต่ละตัวจะมีค่าความต้านทานอินพุตประจำแต่ละตัวคือ  $R/2^n$ )

$$\text{ถ้า } sw_0 = \text{“1”} \text{ จะได้ } V_{o0} = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) \cdot 2^0 \quad (3.4)$$

$$\text{ถ้า } sw_1 = \text{“1”} \text{ จะได้ } V_{o1} = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) \cdot 2^1 \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ถ้า } sw_2 = "1" \text{ จะได้ } Vo_2 = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) 2^2 \quad (3.6)$$

$$\text{ถ้า } sw_n = "1" \text{ จะได้ } Von = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) 2^n \quad (3.7)$$

ถ้าให้  $S(n)$  แทนสถานะของสวิตช์ที่มีค่าได้ทั้ง "1" และ "0" แทนสถานะการ "ปิด" และ "เปิด" วงจรตามลำดับจะได้

$$Vo_\phi = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) 2^\phi \cdot s(\phi) \quad (3.8)$$

$$Vo_1 = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) 2^1 \cdot s(1) \quad (3.9)$$

$$Vo_2 = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) 2^2 \cdot s(2) \quad (3.10)$$

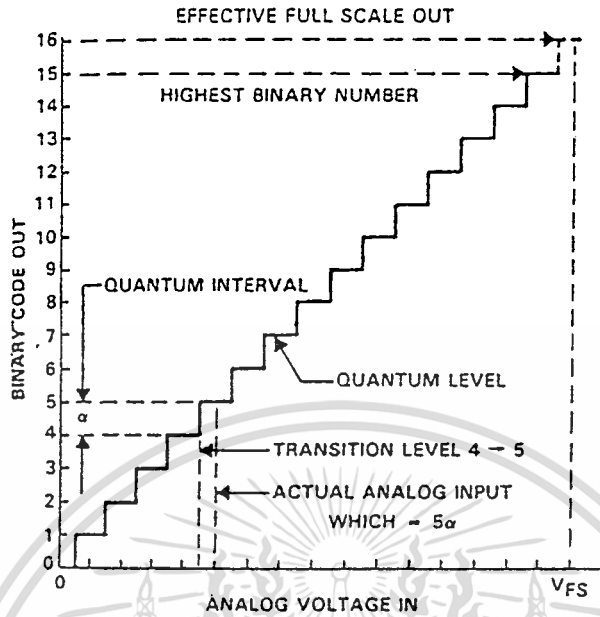
$$\vdots$$

$$Von = -\left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) 2^n \cdot s(n) \quad (3.11)$$

$$\text{ดังนั้น } Vo = \sum_{i=\phi}^n Voi(s_i) \quad (3.12)$$

$$= \sum_{i=\phi}^n \left(V_R \cdot \frac{R_f}{R}\right) 2^i \cdot S(i) \quad (3.13)$$

โดยทั่วไปแล้วจะให้  $R_f = R$  เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และ  $V_R$  คือแรงดันอ้างอิงเพื่อใช้สำหรับการกำหนดขนาดและช่วงของสัญญาณอนาล็อกต่อ 1 สถานะ (Step) ของรหัสดิจิทัลทั้งหมด  $n$ -บิต ซึ่งเป็นการแบ่งส่วนของแรงดันอ้างอิงออกเป็นจำนวนทั้งหมด  $2^n$  ส่วน เรียกว่า การจัดขั้น (Quantization) ดังนั้น จากรูปที่ 3-9 เราจะได้ค่าระดับ (Resolution) ของการเปลี่ยนแปลงค่าของสัญญาณอนาล็อกต่อ 1 Step คือ  $V_R/2^n$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนบิตของข้อมูลดิจิทัล ดังรูปที่ 3-10 เป็นตัวอย่างในกรณีที่  $n = 4$  บิต จะได้ระดับแรงดันอ้างอิงที่แบ่งระดับไว้ได้ 16 ระดับ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-10 การจัดค่าระดับสัญญาณในการแปลงค่า AD

3.2.1.5 หลักการที่ใช้ในการคำนวณ

ในการคำนวณจะอาศัยทฤษฎีการคำนวณเชิงเลข (Numerical Method) มาใช้ เมื่อเรามีกลุ่มหรือชุดของข้อมูลหรืออีกนัยหนึ่ง หมายถึงเรามีชุดของข้อมูลที่เป็นตัวแทน (samples) ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องใช้เป็นตัวกำหนดหรือตัดสินใจในการป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งชุดข้อมูลดังกล่าวจะเป็นตัวเลขที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับกันตามจังหวะการชักตัวอย่างสัญญาณ (Pulse Train) โดยสมมุติให้ค่าของสัญญาณ ณ ตำแหน่งใดๆเป็น  $f(x_k)$  ที่ตำแหน่งการชักตัวอย่าง  $x = x_k$  นอกเหนือจากตำแหน่งนี้แล้วตำแหน่งที่อยู่ติดกับ  $f(x_k)$  ได้แก่  $f(x_{k-1})$ ,  $f(x_{k+1})$  และตำแหน่งอื่นๆ ดังนี้

$$f(x_k) = f(x+kh) = f_k \dots \dots \dots \text{เมื่อ } h \text{ คือช่วงเวลาระหว่างการชักตัวอย่างสัญญาณ}$$

จากการคำนวณแบบ Forward Difference จะได้

$$\Delta f_k = f_{k+1} - f_k \tag{3.14}$$

$$\Delta^2 f_k = \Delta f_{k+1} - \Delta f_k \tag{3.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น } \Delta^n f_k = \Delta^{n-1} f_{k+1} - \Delta^{n-1} f_k \quad (3.16)$$

จากการคำนวณแบบ Backward Difference

$$\nabla f_k = f_k - f_{k-1} \quad (3.17)$$

$$\nabla^2 f_k = \nabla f_k - \nabla f_{k-1} \quad (3.18)$$

$$\text{ดังนั้น } \nabla^n f_k = \nabla^{n-1} f_k - \nabla^{n-1} f_{k-1} \quad (3.19)$$

การหาค่า ณ ตำแหน่งอื่นๆ

$$\text{Forward : กำหนด } E(f_k) = f(x_k+h) = f(k+1) \quad (3.20)$$

$$\text{ดังนั้น } \Delta f_k = f_{k+1} - f_k = E f_k - f_k \quad (3.21)$$

$$\Delta f_k = (E-1)f_k \quad (3.22)$$

$$\therefore \Delta = E-1 \quad (3.23)$$

$$\text{หรือ } E = 1+\Delta \quad (3.24)$$

$$\text{Backward : กำหนด } \nabla f_k = f_k - f_{k-1} \quad (3.25)$$

$$f_{k-1} = f_k - \nabla f_k = (1-\nabla)E f_{k-1} \quad (3.26)$$

$$f_{k-1} = E(1-\nabla)f_{k-1} \quad (3.27)$$

$$\therefore E^{-1} = 1-\nabla \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (3.29) การนำค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่าของ

ข้อมูลที่ตำแหน่งใดๆของชุดข้อมูล

Forward:  $f_{k+p} = E^p f_k$  แทนค่า  $E^p = (1+\Delta)^p$  และกระจายเทอมได้

$$f_{k+p} = (1+\Delta)^p f_k = [1+k_1\Delta+k_2\Delta^2+\dots+k_p\Delta^p]f_k \quad (3.30)$$

$$\text{เมื่อ } k_m = \frac{p(p-1)(p-2)\dots(p-m+1)}{m!}, \text{ เมื่อ } \phi \leq m \leq p$$

แทนค่า  $k_m$  ใดๆลงในสมการจะได้

$$f_{k+p} = f_k + p\Delta f_k + \frac{p(p-1)}{2!} \Delta^2 f_k + \frac{p(p-1)(p-2)}{3!} \Delta^3 f_k + \dots + \frac{p(p-1)(p-2)\dots(p-n+1)}{n!} \Delta^n f_k \quad (3.31)$$

Backward :  $f_{n+p} = E^p \cdot f_n$ , แทน  $E^p$  ด้วย  $(1-\nabla)^p$  และกระจายเทอมได้

$$f_{n+p} = (1-\nabla)^p f_n = [1-k_1\nabla - k_2\nabla^2 - k_3\nabla^3 + \dots + k_p\nabla^p]f_n \quad (3.32)$$

$$\text{เมื่อ } k_m = \frac{p(p+1)(p+2)\dots(p+m-1)}{m!} \text{ เมื่อ } \phi \leq m \leq p$$

ดังนั้น

$$f_{n+p} = f_n + p\nabla f_n + \frac{p(p+1)}{2!} \nabla^2 f_n + \frac{p(p+1)(p+2)}{3!} \nabla^3 f_n + \dots + \frac{p(p+1)(p+2)(p+n-1)\nabla^n f_n}{n!} \quad (3.33)$$

การคำนวณค่า Differential (จากทฤษฎีข้างต้น)

$$\text{Forward : } f(x_k+h) = f_r + r\Delta f_h + \frac{r(r-1)}{2!} \Delta^2 f_k + \frac{r(r-1)(r-2)}{3!} \Delta^3 f_k + \dots$$

คิดเฟอเรนเชียลเทียบกับ  $r(r \rightarrow \Delta t \rightarrow dt \rightarrow \phi)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ได้} \quad hf'(x_k + rh) = \Delta f_k + \frac{2r-1}{2} \Delta^2 f_k + \frac{3r^2-6r+2}{6} \Delta^3 f_k + \dots$$

และแทน  $r = \phi, (\Delta t \rightarrow \phi)$  ได้

$$\therefore f'_k = f'(x_k) = \frac{1}{h} \left( \Delta - \frac{1}{2} \Delta^2 + \frac{1}{3} \Delta^3 - \dots \right) f_k \quad (3.34)$$

$$\text{Backward :} \quad hf'(x_n + sh) = \nabla f_n + \frac{2s-1}{2!} \nabla^2 f_n + \frac{3s^2+6s+2}{3!} \nabla^3 f_n + \dots$$

ให้  $r \rightarrow \phi$  จะได้

$$\therefore f'_k = f'(x_k) = \frac{1}{h} \left( \nabla + \frac{1}{2} \nabla^2 + \frac{1}{3} \nabla^3 + \dots \right) f_k \quad (3.35)$$

ซึ่งเป็นกรณีทั่วไป

ถ้าใช้เฉพาะเทอมแรกจะได้  $f'_k \cong \frac{1}{h} (\nabla) f_k$  เป็นการประมาณค่าที่คำนวณได้ง่ายที่สุด

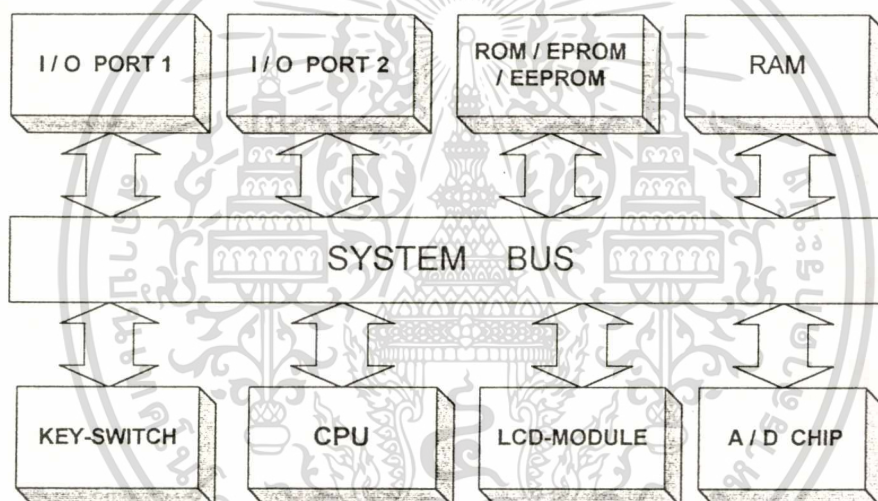
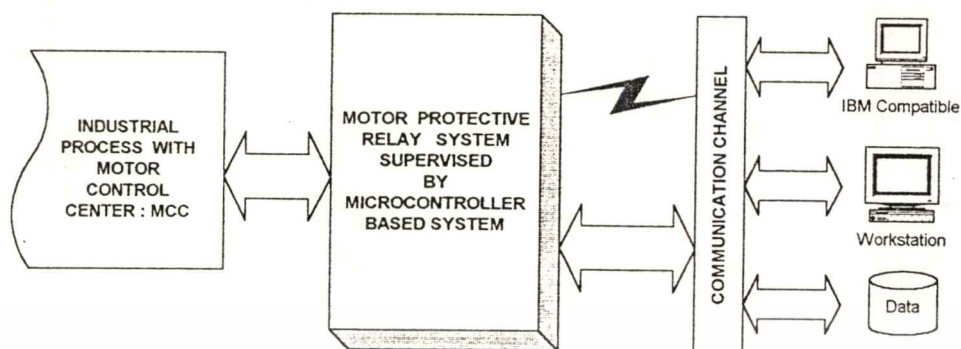
ผลสุดท้ายที่ได้จากหลักการคำนวณเชิงเลขพื้นฐานนี้จะนำไปใช้ใน โปรแกรมย่อยฟังก์ชันการป้องกันในหัวข้ออื่นๆต่อไป

### 3.2.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 3.2.2.1 ส่วนควบคุมและประมวลผล

ส่วนควบคุมและประมวลผลเป็นส่วนของชิปไมโครโปรเซสเซอร์ หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ชีพสนับสนุนการทำงานเพื่อให้เป็นศูนย์กลางควบคุมรีเลย์ทั้งหมด ได้แก่ หน่วยความจำชนิดถาวร หน่วยความจำที่อ่าน-เขียนค่าได้ พร้อมทั้งชีพสนับสนุนที่เป็นส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่จำเป็นในการใช้ติดต่อกับผู้ใช้งาน เช่น พอร์ตขนานสำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์คีย์สวิตช์และอุปกรณ์แสดงผลเป็นต้น ในบางกรณีอาจมีพอร์ตสำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เมื่อต้องใช้ระบบรีเลย์ป้องกันดังกล่าวในระบบขนาดใหญ่ เช่น การติดต่อสื่อสารข้อมูลต่างๆของมอเตอร์และข้อมูลของสถานะการทำงานฟังก์ชันการป้องกันมอเตอร์ระหว่างระบบรีเลย์ป้องกันกับระบบควบคุมอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น โครงสร้างต่างๆดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

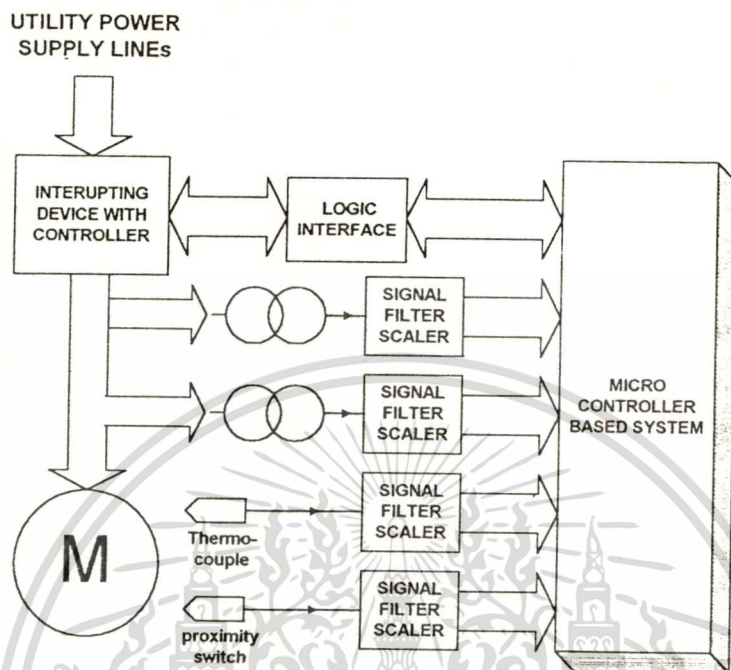


รูป 3-11 โครงสร้างระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.2.2.2 ส่วนควบคุมการเดินเครื่องมอเตอร์

การควบคุมการเดินเครื่องมอเตอร์มีหลายวิธี สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกวิธีการเดินเครื่องแบบต่อตรง (Direct On line Start : DOL) เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์น้อยที่สุดและประหยัดที่สุด นอกจากนั้นแล้วยังคงมีใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆเป็นจำนวนมากโดยสามารถใช้ได้กับมอเตอร์พิกัดขนาดเล็กตั้งแต่ไม่ถึง 1 กิโลวัตต์ไปจนถึงมอเตอร์พิกัดขนาดใหญ่ระดับหลายร้อยกิโลวัตต์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้า (Power Plant) ระบบอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและน้ำมัน เป็นต้น โครงสร้างดังกล่าวแสดงดังรูป 3-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-12 โครงสร้างส่วนควบคุมการเดินเครื่อง

จากโครงสร้างของระบบควบคุมการเดินเครื่องมอเตอร์และการป้องกันมอเตอร์จะถูกควบคุมการทำงานทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยอาศัยโปรแกรมควบคุมเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการกำหนดและออกแบบโปรแกรมควบคุมให้สอดคล้องกับโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์จึงจะสามารถทำให้ได้ระบบรีเลย์ป้องกันที่มีฟังก์ชันการทำงานที่เพียงพอต่อการป้องกันมอเตอร์ได้ในขนาดของระบบโดยรวมที่มีขนาดเล็กซึ่งเป็นแนวทางของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งในส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงานในรายละเอียดนั้นจะอยู่ในบทที่ 4 ในหัวข้อการออกแบบซอฟต์แวร์ควบคุมสำหรับในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงในเฉพาะหลักการของฟังก์ชันการป้องกันแต่ละแบบและโครงสร้างการทำงานในภาพรวม (Concept) ดังต่อไปนี้

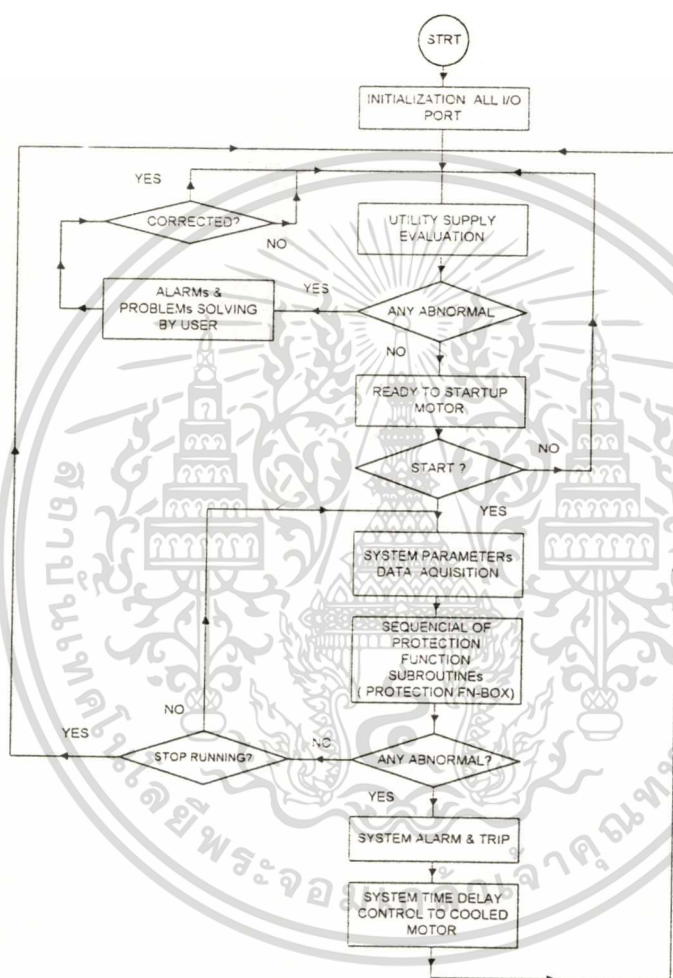
### 3.3 การทำงานของรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม(ซอฟต์แวร์)

#### 3.3.1 โครงสร้างหลัก

ในโครงสร้างหลัก ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องทำการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์เชื่อมต่อทุกตัว และตรวจสอบติดตามการทำงานแต่ละส่วนของโปรแกรมควบคุมโดยอาศัยการแสดงผลการทำงานของโปรแกรมย่อยแต่ละส่วนผ่านคำสั่งที่ควบคุมสถานะของบิตควบคุมและแจ้งผลการทำงานรวมทั้งสถานะของระบบรีเลย์เองให้ผู้ใช้งานทราบผ่านทางอุปกรณ์แสดงผล

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจอผลึกเหลว (LCD Module) ส่วนสถานะของอุปกรณ์เชื่อมต่อต่าง ๆ นั้นสามารถกำหนดบิตควบคุมที่แสดงสถานะประจำอุปกรณ์เชื่อมต่อแต่ละตัวได้ผ่านทางพอร์ตอินพุต (Hardware) และสามารถกำหนดให้โปรแกรมควบคุมหลักนำผลเหล่านี้มาแสดงให้ผู้ใช้งานทราบได้ทางจอผลึกเหลวได้เช่นเดียวกัน โครงสร้างหลักแสดงดังรูปที่ 3-13



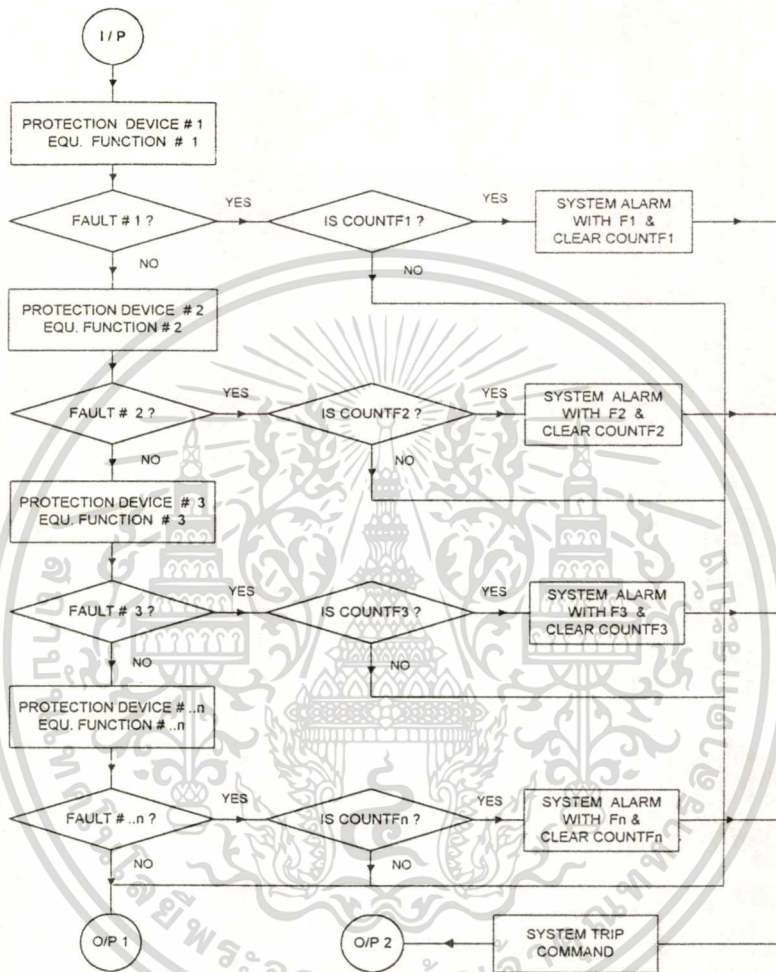
รูป 3-13 โครงสร้างโปรแกรมหลัก

### 3.3.2 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันมอเตอร์

จากโครงสร้างหลักในรูปที่ 3-13 นั้นโครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันมอเตอร์เห็นว่าจะเป็นส่วนย่อยๆ หลายส่วนประกอบกันขึ้นเป็นบล็อกที่ได้กำหนดให้เป็นบล็อกของชุดลำดับโปรแกรมย่อยฟังก์ชันการป้องกัน (Sequential of Protection Function Subroutine) ซึ่งมีรายละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียดของหลักการทำงานดังรูปที่ 3-14 และภายในโครงสร้างดังกล่าวนี้ประกอบด้วยบล็อกของโปรแกรมย่อยฟังก์ชันการป้องกันซึ่งมีรายละเอียดกล่าวถึงเฉพาะแต่ละฟังก์ชันต่อไป



รูป 3-14 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันหลายๆฟังก์ชัน

### 3.3.2.1 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันแรงดันต่ำ

จากหลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันสภาวะแรงดันต่ำในบทที่ 2 นั้น สามารถกำหนดเป็นขั้นตอนการทำงานได้ โดยมีจุดพิจารณาในสภาวะดังกล่าวที่สำคัญคือ การพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน(อาจเป็นค่าเฉลี่ย, ค่าRMS, หรือค่ายอด) ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง และการพิจารณาค่าของระดับแรงดัน(อาจเป็นค่าเฉลี่ย, ค่าRMS, หรือค่ายอด)ที่ลดต่ำลงจากค่าปกติ ทั้งสองกรณีดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (3.36) โดยพิจารณาการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งจากการใช้ค่าความแตกต่างย้อนกลับเพียงเทอมเดียวจากสมการ (3.35) ดังนั้น

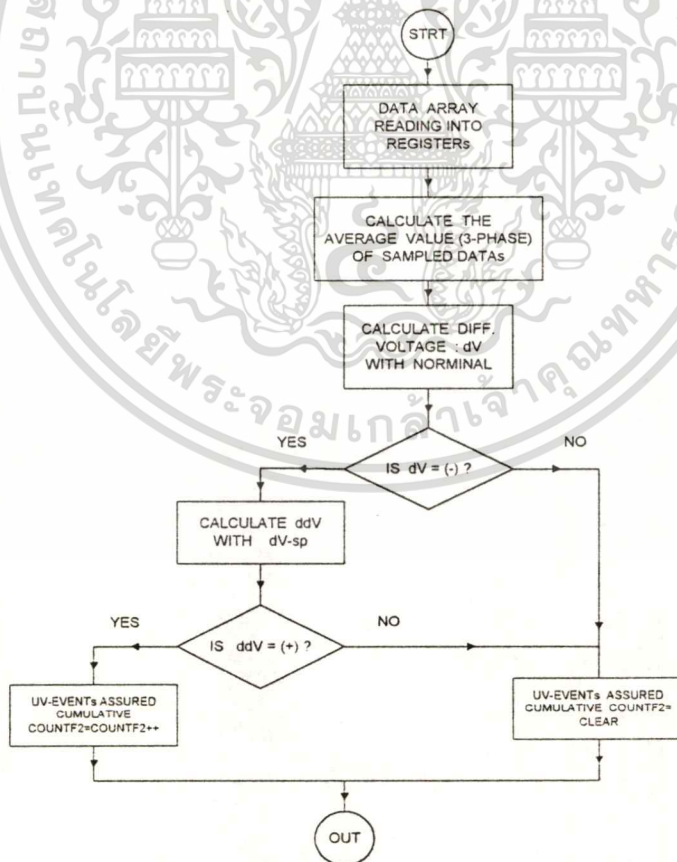
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f'_k = f'(x_k) \cong \frac{1}{h} (\nabla) f_k \quad (3.36)$$

เมื่อ  $h$  เป็นช่วงเวลาระหว่างการชักตัวอย่างสัญญาณ 2 ตำแหน่งที่อยู่ติดกันซึ่งเทียบได้กับอัตรา  $\Delta t$  ในการหาอนุพันธ์ ดังนั้นจะได้

$$f'(x_k) \cong \frac{\nabla f_k}{\Delta t} \cong \frac{f_k - f_{k-1}}{\Delta t} \quad (3.37)$$

ผลของ  $\nabla f_k$  จะให้ผลเป็นค่าบวก ลบหรือศูนย์ก็ได้ซึ่งผลของ  $f'_k$  จะเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นตามผังงานในรูปที่ 3.15 ส่วนการเปลี่ยนแปลงของระดับค่าพารามิเตอร์ที่อาจจะเพิ่มมากขึ้นลดลงก็มีผลในการใช้เป็นตัวบ่งชี้ร่วมในการตัดสินใจสถานะขณะนั้นๆ เพื่อการป้องกันอย่างใดผลสำหรับสถานะแรงดันต่ำที่มอเตอร์ โดยในผังงานได้ใช้สัญลักษณ์  $dv$  และ  $ddv$  แทนสัญลักษณ์  $\nabla$  และ  $\nabla^2$  ตามลำดับ

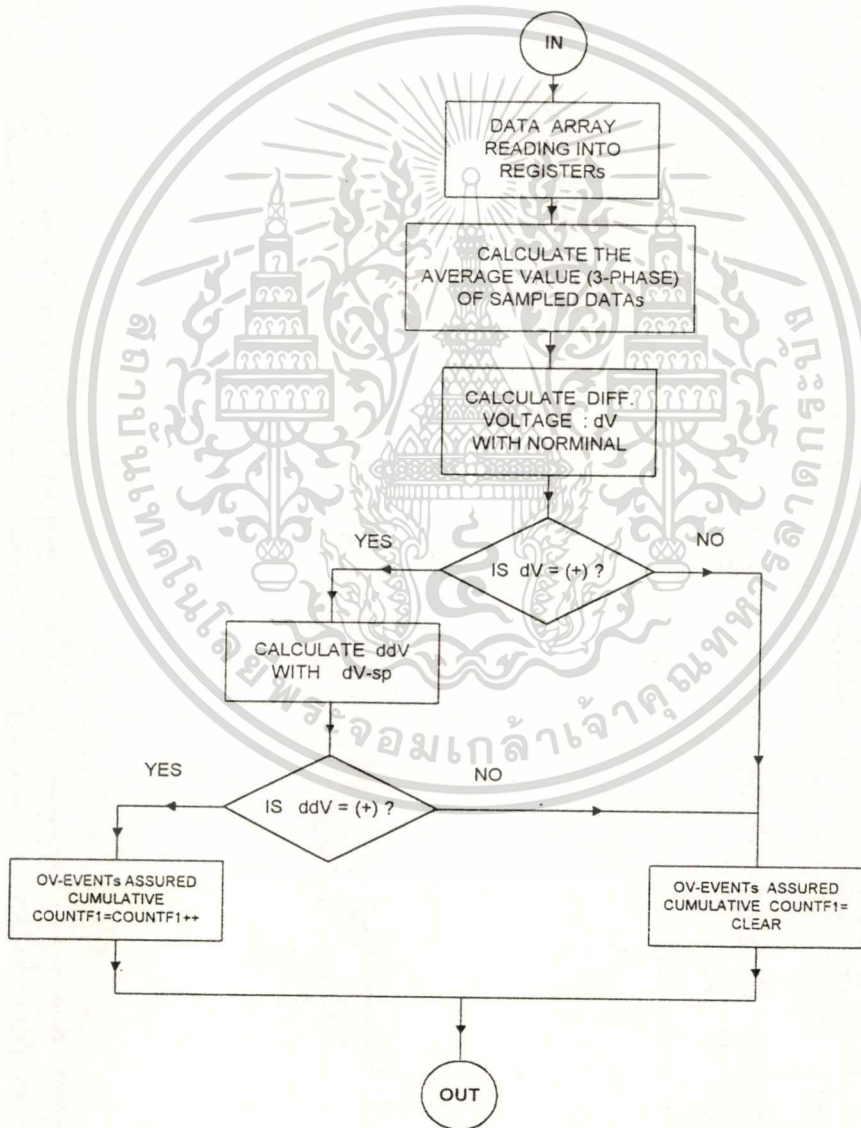


รูป 3-15 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.2 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดันเกิน

ใช้หลักการพิจารณาเช่นเดียวกันกับการป้องกันแรงดันต่ำ เพียงแต่เปลี่ยนเงื่อนไขในผังงานเท่านั้นเพื่อให้ทราบว่าสภาพแรงดันเกินจะตรงข้ามกับสภาพแรงดันต่ำแสดงดังรูปที่ 3-16



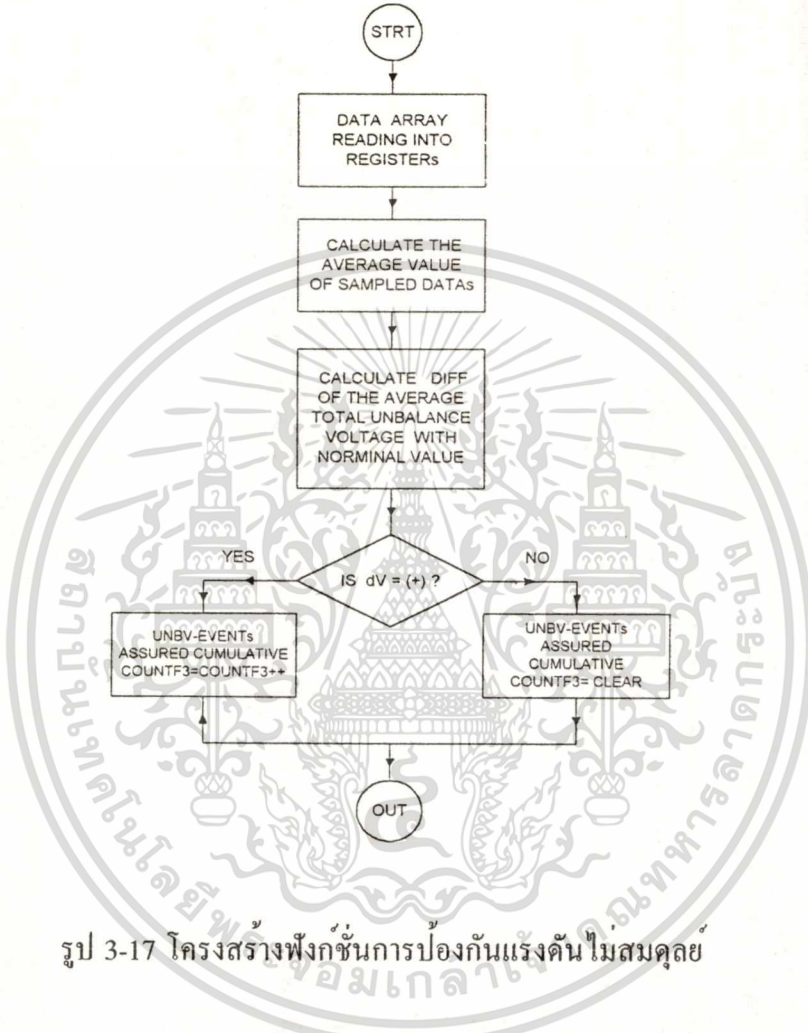
รูป 3-16 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดันเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.3 โครงสร้างการป้องกันแรงดันไม่สมดุลย์

ใช้หลักการพิจารณาเฉพาะระดับของสัญญาณหรือพารามิเตอร์ที่พิจารณานั้นๆตามผังงานรูป

ที่ 3-17



รูป 3-17 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันแรงดันไม่สมดุลย์

### 3.3.2.4 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันโหลดเกิน

สำหรับ โครงสร้างการป้องกัน โหลดเกินในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำวิธีการจำลองการสะสมของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไว้หน่วยความจำแบบอ่าน-เขียนค่าได้ (RAM) โดยการวัดค่าของกระแสมอเตอร์ผ่านหม้อแปลงกระแสแล้วคำนวณเป็นหน่วยของค่าพลังงานความร้อนสูญเสียภายในขดลวดสเตเตอร์ [12]

จากทฤษฎีการเพิ่มและลดอุณหภูมิในสสาร (บทที่ 2 หัวข้อ 2.2.3) สมการที่ (2-50) เราพิจารณาเฉพาะเทอมแรกซึ่งแสดงการเพิ่มอุณหภูมิของสสารซึ่งหมายถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำที่กำลังพิจารณา ดังนั้น

$$T_h(t) = T_{fin}(1 - e^{-t/\tau_m}) \tag{3.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมนั้น เราจะใช้วิธีการประมาณค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในตัวมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ขับโหลดทางกลต่างๆกันซึ่งหมายถึงการเพิ่มอุณหภูมิจะแปรตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ด้วยดังนั้นต้องเปลี่ยนความสัมพันธ์ตามสมการ (3.38) ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ ดังนี้

- กำหนดให้ที่กระแสมอเตอร์ที่พิกัด 100% คือ  $I_N$ , อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (Steady State-temperature) เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้องคือ  $T_{ho}$

- กำหนดให้ที่กระแสมอเตอร์ที่โหลดใดๆ (โหลดเกิน 100%) คือ  $I_M$ , อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้องคือ  $T_{hn}$

- แทนค่า  $T_{fn} = P/A\lambda$  เมื่อ  $P = 3I_M^2 R_w$  ดังนั้น

$$T_{ho}(t) = \frac{3I_N^2 R_w}{A\lambda} (1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (3.39)$$

และ 
$$T_{hn}(t) = \frac{3I_M^2 R_w}{A\lambda} (1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (3.40)$$

(3.40)/(3.39) ได้

$$T_{hn}(t) = \left( \frac{I_M}{I_N} \right)^2 \cdot T_{ho}(t) \quad (3.41)$$

หรือ

$$T_{hn} = \left( \frac{I_M}{I_N} \right)^2 \cdot T_{ho} \quad (3.42)$$

จากสมการ (3.42) อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวเมื่อมอเตอร์ขับโหลดทางกลใดๆที่เกินพิกัดจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสมอเตอร์ที่เกินพิกัดนั้นๆ โดยตรง ซึ่งเมื่อแปรค่ากระแส  $I_M$  ตั้งแต่ค่าพิกัด 100% ไปจนถึง 250% ของพิกัดแล้วจะได้ความสัมพันธ์ตามตารางต่อไปนี้

ตาราง 3-1

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมอเตอร์กับอุณหภูมิแตกต่างกันสูงสุด

$I_M$ (%)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200	220	250
MAX.DIFF	1.00 x	1.21 x	1.44 x	1.69 x	1.96 x	2.25 x	2.56 x	2.89 x	3.24 x	4.00 x	4.84x	6.25x
TEMP= $T_{fn}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$	$T_{bo}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางเราสามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ว่าที่กระแสเกินพิกัด  $I_M$  ใดๆจะสามารถทำให้เกิดอุณหภูมิสถานะคงตัวขึ้นไปได้สูงสุดเท่าใด โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.42) ดังนี้

จากตาราง ถ้ามอเตอร์ที่เรากำลังพิจารณานั้นสามารถขับโหลดที่ 110% ได้อย่างปลอดภัยเมื่อใช้ฉนวนชนิด A และมอเตอร์ตัวเดียวกันนี้สามารถขับโหลดที่ 120% ของพิกัดได้อย่างปลอดภัยถ้าใช้ฉนวนชนิด E ดังนั้น

$$T_{h1} = 1.21 T_{ho} \quad (3.43)$$

$$\text{และ } T_{h2} = 1.44 T_{ho} \quad (3.44)$$

ดังนั้น

$$T_{ho} = 0.76 (T_{h1} T_{h2})^{1/2} \quad (3.43)$$

เมื่อแทนค่า  $T_{h1}$  และ  $T_{h2}$  ด้วยค่าในตารางในรูปที่ 2-15 (ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2) ตามมาตรฐาน IEC-Publication 85/1984 จะได้ค่า  $T_{ho} \cong 55$  องศาเซลเซียส ซึ่งหมายถึงมอเตอร์จะมีอุณหภูมิที่สถานะคงตัวสูงสุดเท่ากับ  $55 + 40 = 95$  องศาเซลเซียส โดยประมาณเมื่อขับโหลดที่พิกัด 100% ดังนั้นเมื่อเราทราบค่า  $T_{ho}$  แล้วสามารถทราบค่าอุณหภูมิที่สถานะคงตัวสูงสุดของแต่ละค่ากระแสมอเตอร์  $I_M$  ได้ โดยนำค่า  $T_{ho}$  นี้ไปแทนค่าในตารางที่ (3-1)

เมื่อเราทราบค่าอุณหภูมิที่สถานะคงตัวสูงสุดของแต่ละค่ากระแสมอเตอร์แล้ว ต่อไปเราจะทำการหาค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งจะนำไปเป็นวิธีการหาอัตราเพิ่มค่าในหน่วยความจำตามหลักการที่ได้กล่าวถึงไว้ในตอนต้นของหัวข้อนี้ดังนี้

จากรูปที่ 2-20 (a) ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.3 และพิจารณาสมการ (3.38) จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง  $t \leq 4\tau_m$  นั้นค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง โดยเฉพาะที่  $t \leq \tau_m$  และเมื่อ  $t \leq 4\tau_m$  อุณหภูมิจะเข้าสู่สถานะคงตัว ดังนั้นเพื่อให้สามารถออกแบบโปรแกรมควบคุมอัตราการเพิ่มค่าในหน่วยความจำได้ง่ายไม่ซับซ้อนสำหรับการจำลองการเพิ่มอุณหภูมิในมอเตอร์จึงใช้วิธีการประมาณค่าด้วยอนุกรมกำลังดังนี้จาก

$$e^x = \sum_{m=0}^{\infty} x^m/m! \quad (3.46)$$

เมื่อทำการกระจายเทอมออกเป็นอนุกรมจะได้

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \text{เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ปรั้ง (3.47) ด้านการคำนวณ}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.38)  $T_h(t) = T_{fin}(1 - e^{-t/\tau_m})$  พิจารณาเทอม  $(e^{-t/\tau_m})$  ด้วยการกระจายอนุกรมกำลัง ดังนี้

$$e^{-t/\tau_m} = 1 - \frac{t}{\tau_m} + \frac{t^2}{\tau_m^2 \cdot 2!} - \frac{t^3}{\tau_m^3 \cdot 3!} + \dots \quad (3.48)$$

ใช้เฉพาะ 2 เทอมแรกแทนลงในสมการ (3.38) จะได้

$$T_{ho}(t) \cong T_{fin}(t/\tau_m) \quad (3.49)$$

เมื่อแทนค่า  $T_{fin} = P / A\lambda$ ,  $\tau_m = CM / A\lambda$ , และ  $P = 3I_M^2 R_w$  จะได้

$$T_{ho}(t) \cong KI_M^2 t \quad (3.50)$$

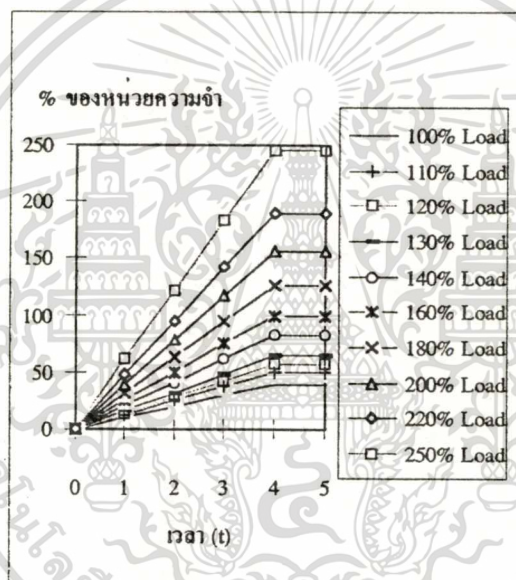
เมื่อ  $K = 3R_w/CM$ , จากสมการที่ (3.50) สามารถประมาณได้ว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของมอเตอร์แปรผันโดยตรงกับค่ากระแสมอเตอร์ยกกำลัง 2 และเวลา โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ  $T_{ho}(t)$  กับเวลา  $t$  เป็นแบบเส้นตรง จากสมการที่ (3.50) ถ้าเราเลือกกราฟความสัมพันธ์ของกระแส-เวลา ตามมาตรฐาน NEMA-Class 2 มาใช้โดยเลือกจุดตัดกราฟในช่วงโหลดเกินมา แทนค่าลงในสมการที่ (3.50) โดยให้ค่า  $T_{ho}(t)$  คงที่ เราจะได้ความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลาระหว่าง  $I_M^2$  กับ  $t$  ตามตารางที่ (3-2)

ตารางที่ 3-2

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา-กระแสตามมาตรฐาน NEMA-Class 2

กระแสมอเตอร์ ( pu.)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.50
กระแสมอเตอร์ <sup>2</sup>	1.00	1.21	1.44	1.69	1.96	2.56	3.24	4.00	4.84	6.25
เวลาหน่วง (วินาที)	1000	840	720	620	480	380	300	300	250	190
การเพิ่มค่า RAM 1 หน่วย	-	15ms	12ms	10ms	9ms	7ms	6ms	5ms	4ms	3ms

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.50) แสดงดังรูปที่ 3-18 เมื่อเรากำหนดให้ใช้ค่าหน่วยความจำขนาด 16 บิต (8 บิต×2) แทนค่าหน่วยพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงแบบสะสมภายในตัวมอเตอร์ ( $T_h(t).t$ ) จนทำให้มีอุณหภูมิ  $T_{ho}(t)$  เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นที่ค่ากระแสไหลดมอเตอร์ใดๆ  $I_M$  โดยมีค่าสูงสุดคือ  $2^{16} = 65,536$  หน่วย และแปรค่าได้ตั้งแต่ 0-65,536 หน่วย กำหนดให้เป็นเปอร์เซ็นต์หน่วยความจำตั้งแต่ 0-100% มีอัตราการเพิ่มค่าในหน่วยความจำ(Register 8 bit×2) ตามอัตราในตารางที่ 3-2

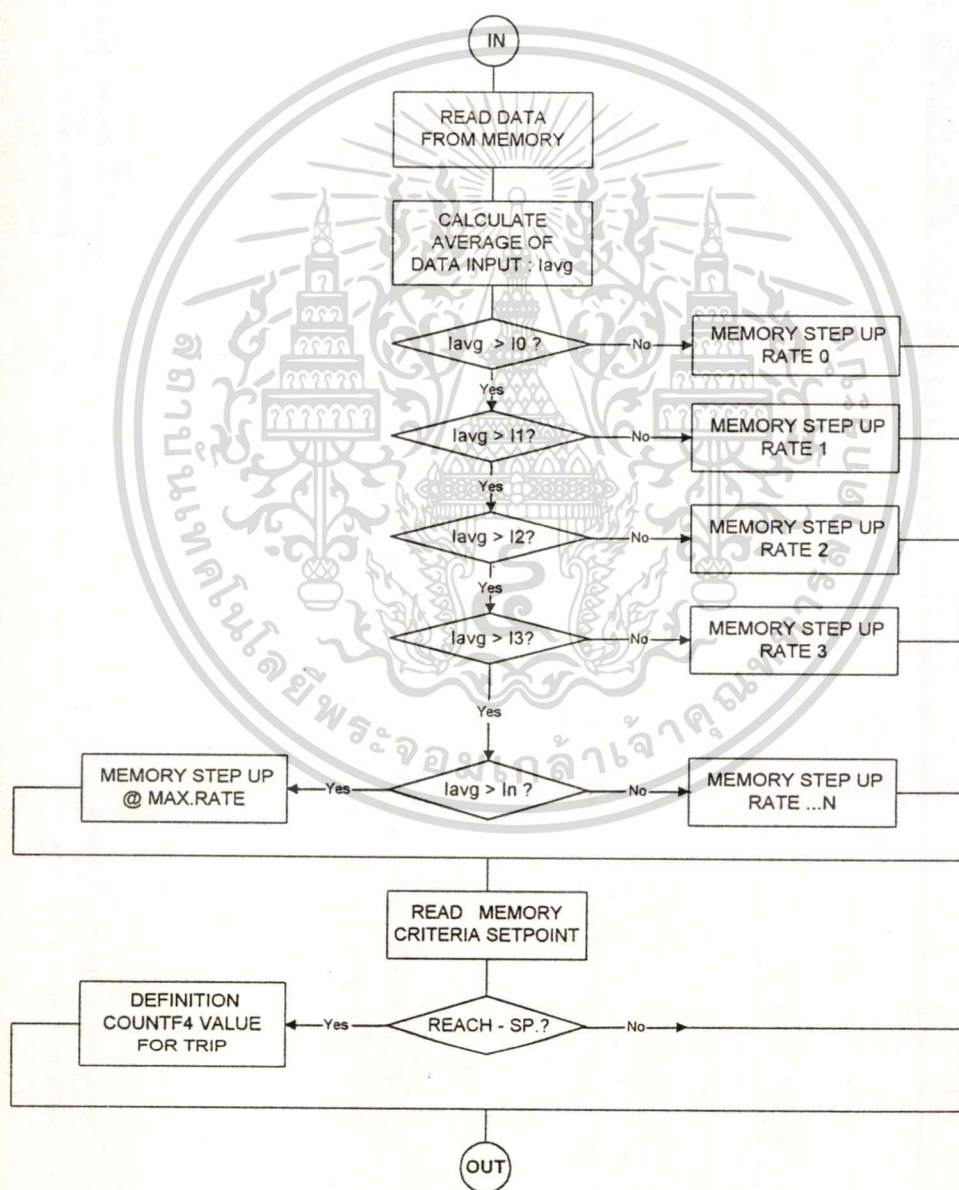


รูป 3-18 การกำหนดค่าในหน่วยความจำเป็น %

จากรูปที่ 3-18 หน่วยความจำ 16 บิตจะมีค่าเต็มคือ 65536 (ฐาน 16) เมื่อมอเตอร์ถูกขับเกินพิกัดที่ 160% ของพิกัด เป็นเวลานานประมาณ 380 วินาที ตามกราฟความสัมพันธ์ของ NEMA-Class 2 ด้วยอัตราการเพิ่มค่าในหน่วยความจำครั้งละ 1 ขั้น(Step) จนครบทั้ง 16 บิต โดยใช้เวลาประมาณ 7 ms. ต่อ 1 Step. สำหรับที่ค่ากระแสไหลด  $I_M$  ค่าอื่นๆ ที่เกินพิกัดมากกว่า 160% ขึ้นไป ค่าหน่วยความจำจะเต็ม 100% เร็วขึ้นด้วยอัตราการเพิ่มค่าที่เร็วขึ้น (ใช้เวลาน้อยกว่า 7 ms ต่อ 1 Step) ส่วนที่ค่ากระแสไหลดมอเตอร์ที่ต่ำกว่า 160% ของพิกัด ก็จะพิจารณาในหลักการเดียวกันแต่จะเกิดขึ้นตรงกันข้ามคือใช้เวลาในการเพิ่มค่าต่อ 1 Step มากขึ้น

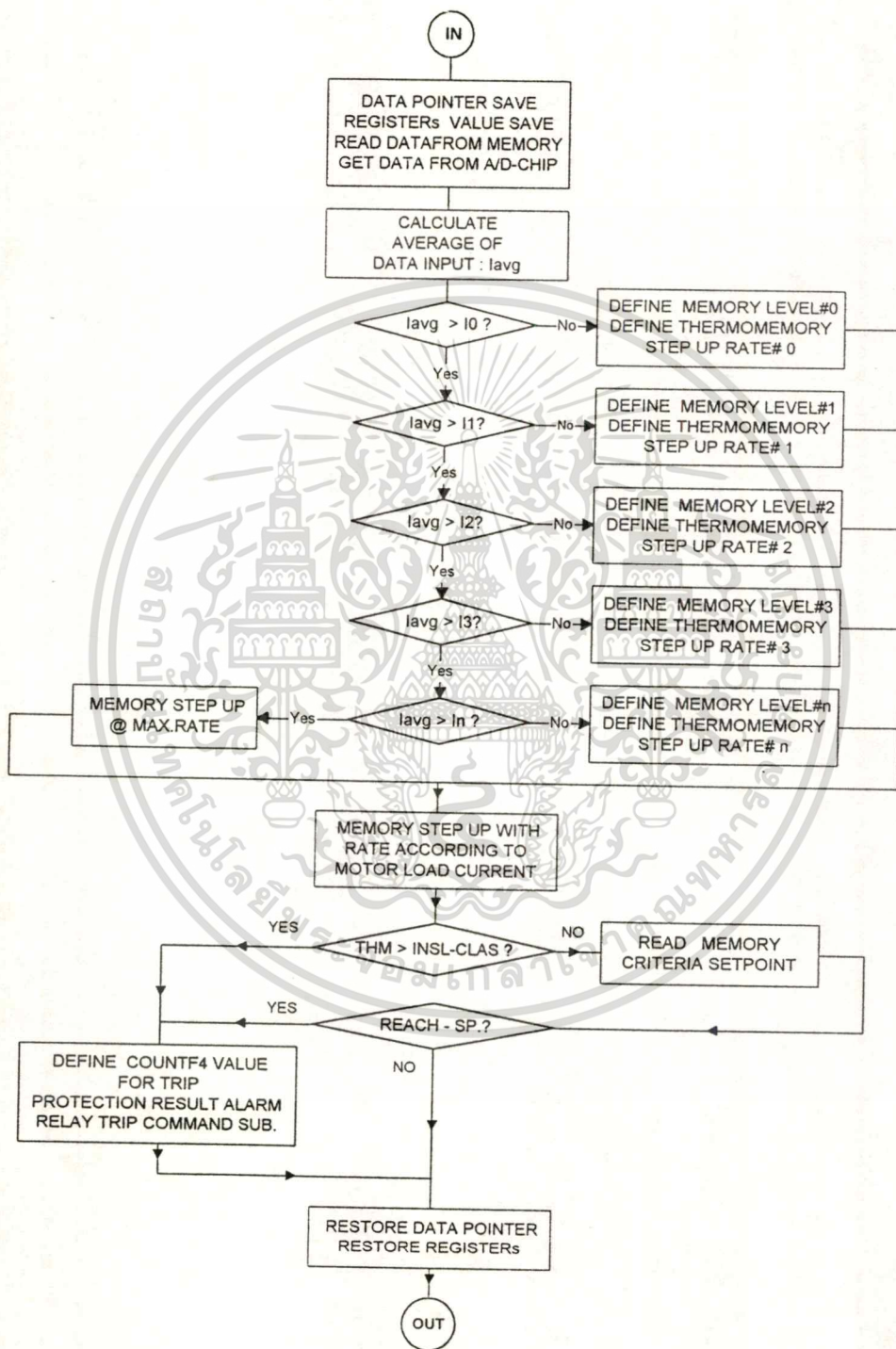
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการดังกล่าวข้างต้นได้สรุปเป็นขั้นตอนการทำงาน (Flow chart) ตามผังงาน รูปที่ 3-19 และสามารถที่จะปรับปรุงใหม่ได้ดังผังงานรูปที่ 3-20 ซึ่งระบบไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการสั่งปลดวงจรมอเตอร์ออกทันที (Trip) เมื่อค่าในหน่วยความจำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดปรับตั้งการทำงานหรือเกินพิกัดของชั้นฉนวน ซึ่งค่าการทนอุณหภูมิสถานะคงตัวสูงสุดสำหรับชั้นฉนวนแต่ละชนิดจะถูกโปรแกรมเก็บไว้ในหน่วยความจำชนิดถาวรไว้ด้วยเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกให้ตรงกับชนิดของชั้นฉนวนที่ใช้ในมอเตอร์นั้นๆ



รูป 3-19 โครงสร้างการป้องกันโหลดเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



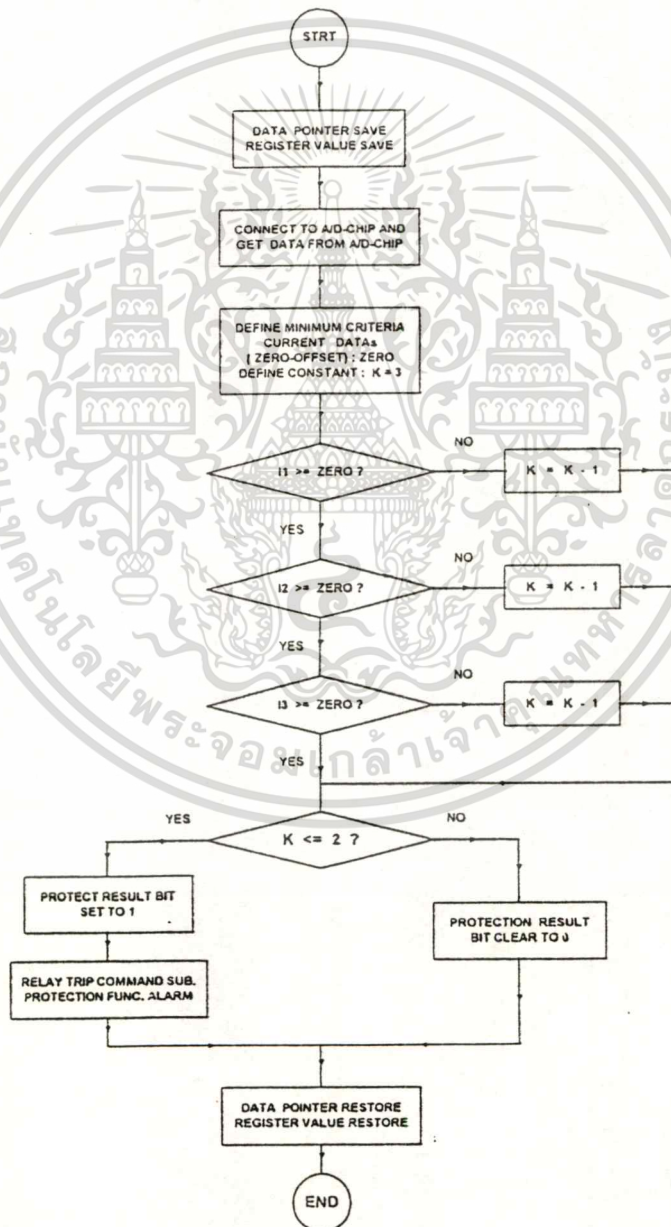
รูป 3-20 โครงสร้างการป้องกันโหลดเกินที่ปรับปรุงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.5 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันการขาดหายไปของกระแสเฟสใดเฟส

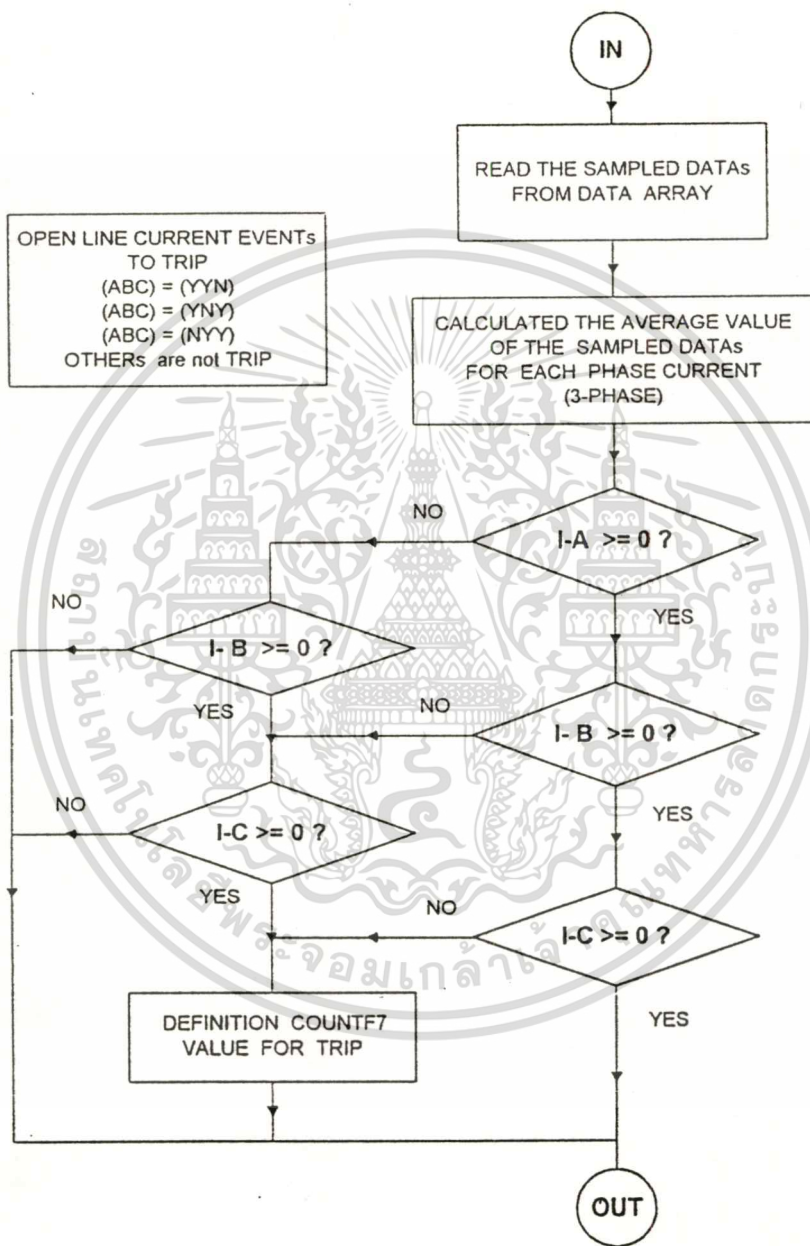
หนึ่ง

หลักการแสดงตามรูปที่ 3-21 ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญหลักการของความแตกต่างเฟสของสัญญาณไซน์ 3 เฟส ในระบบไฟฟ้ากำลังตามปกติ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีอื่นๆได้เพื่อให้มีผลในการทำงานได้เหมือนกันซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกวิธีที่สามารถโปรแกรมได้ง่ายไม่ซับซ้อนและใช้คำสั่งในการปฏิบัติการที่น้อยลงเพื่อผลในการทำงานที่เร็วและประหยัดหน่วยความจำที่ใช้เก็บโปรแกรมดังกล่าวในรูปที่ 3-22



รูป 3-21 โครงสร้างการป้องกันการขาดหายไปของเฟสใดเฟสหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-22 โครงสร้างในรูป 3-21 ที่ปรับปรุงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.6 โครงสร้างของฟังก์ชันการป้องกันการติดขัดของโหลดทางกล(Load-Jam)

ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำขับโหลดทางกลในบางกรณี อาจมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโหลดทางกล (Fluctuation) ในขณะที่มอเตอร์นั้นเดินเครื่องอยู่ หรืออาจมีการปลดโหลดทางกลออกอย่างกะทันหัน (ซึ่งจะกล่าวถึงในข้อต่อไป) หรือมีการเพิ่มโหลดเข้าไปอย่างทันที กรณีเหล่านี้เรียกว่า Load-Jam ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด (Pulsation Torque) และทำให้เกิดสภาพโหลดเกิน (กระแสเกิน) ในช่วงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ถ้าสภาพดังกล่าวนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานแล้วจะทำให้เกิดอุณหภูมิเกินพิกัดได้จึงต้องมีการตรวจสอบสภาพดังกล่าวโดยหลักการดังนี้

ในสภาวะโหลดต่อเนื่องปกติ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์เป็น  $I_N$  มีความเร็วรอบ  $N$  และเมื่อเกิดสภาพ Load-Jam จะมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์เป็น  $I_M$  มีความเร็วรอบ  $N_M$  ภายในระยะเวลา  $\Delta t = t_d$  ดังนี้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสคือ} \quad \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{(I_N - I_M)}{t_d} \quad (3.51)$$

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบคือ} \quad \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{(N - N_M)}{t_d} \quad (3.52)$$

เมื่อ  $\Delta t = t_d$  เป็นช่วงระยะเวลาของการเกิดสภาวะดังกล่าว ซึ่งแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณี ดังนี้คือ

เมื่อ  $\Delta t = t_d \gg 0$  สภาวะดังกล่าวนี้จะเข้าสู่สภาวะการเกิดโหลดเกิน ซึ่งหน้าที่ในการตรวจสอบสภาวะนี้จะเป็ของฟังก์ชันการตรวจสอบสภาพโหลดเกิน(ซึ่งได้กล่าวถึงแล้วในข้อ 3.3.2.4)

$\Delta t = t_d \rightarrow 0$  สภาวะดังกล่าวนี้ เรียกว่า การเกิด Load-Jam ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เป็นจำนวนมากทันทีที่ทำให้ความร้อน ( $3I_M^2 \cdot R_W$ ) อย่างมากในเวลาไม่กี่วินาที ดังนั้นจากสมการที่ (3.31) และ (3.52) จะได้

$$I' = \frac{dI}{dt} \gg 0 \text{ และมีค่าเป็นบวก (+) แทนด้วยสัญลักษณ์ (+)}$$

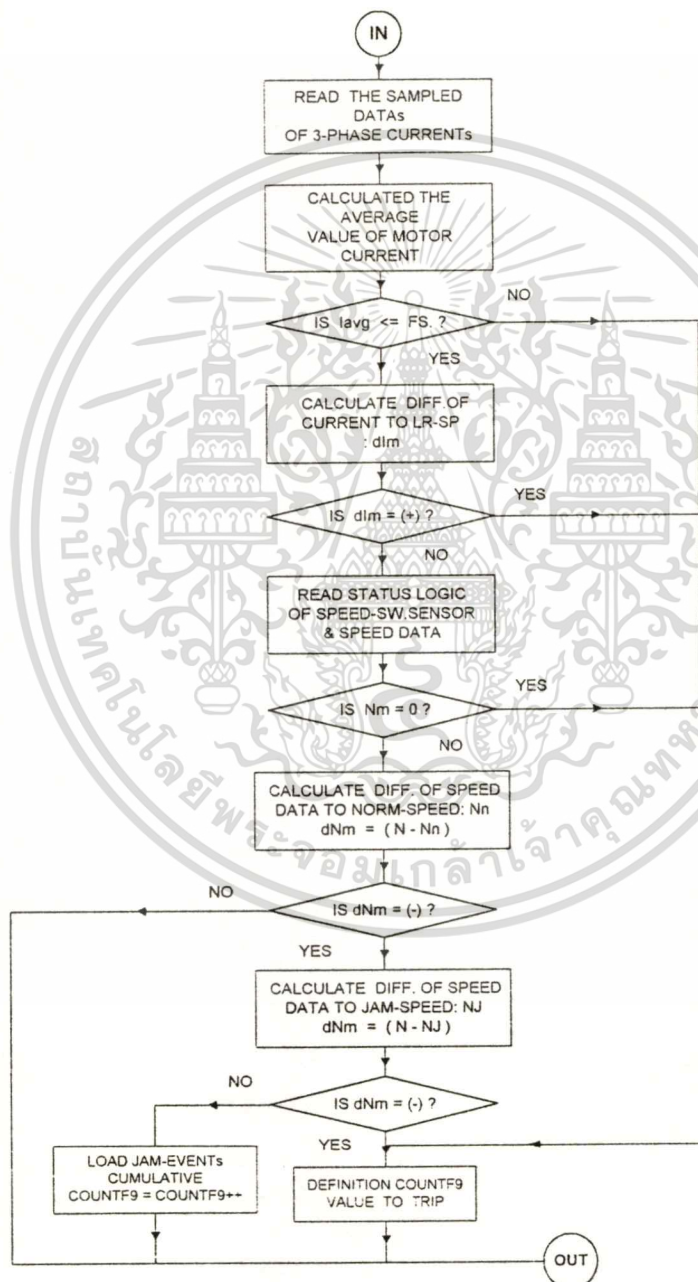
และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N' = \frac{dN}{dt} \ll 0 \text{ และมีค่าเป็นลบ (-) แทนด้วยสัญลักษณ์ (--)}$$

เมื่อเทียบค่ากระแสปกติ(I-nominal)และความเร็วรอบที่โหลดปกติ(N)ซึ่งนำไปใช้เป็นตัวตัดสิน (Criteria) สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้เป็นวิธีการ โปรแกรมป้องกันได้ ดังรูปที่ 3-

23



รูปที่ 2-23 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันโหลดคคคค (Load-Jam)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

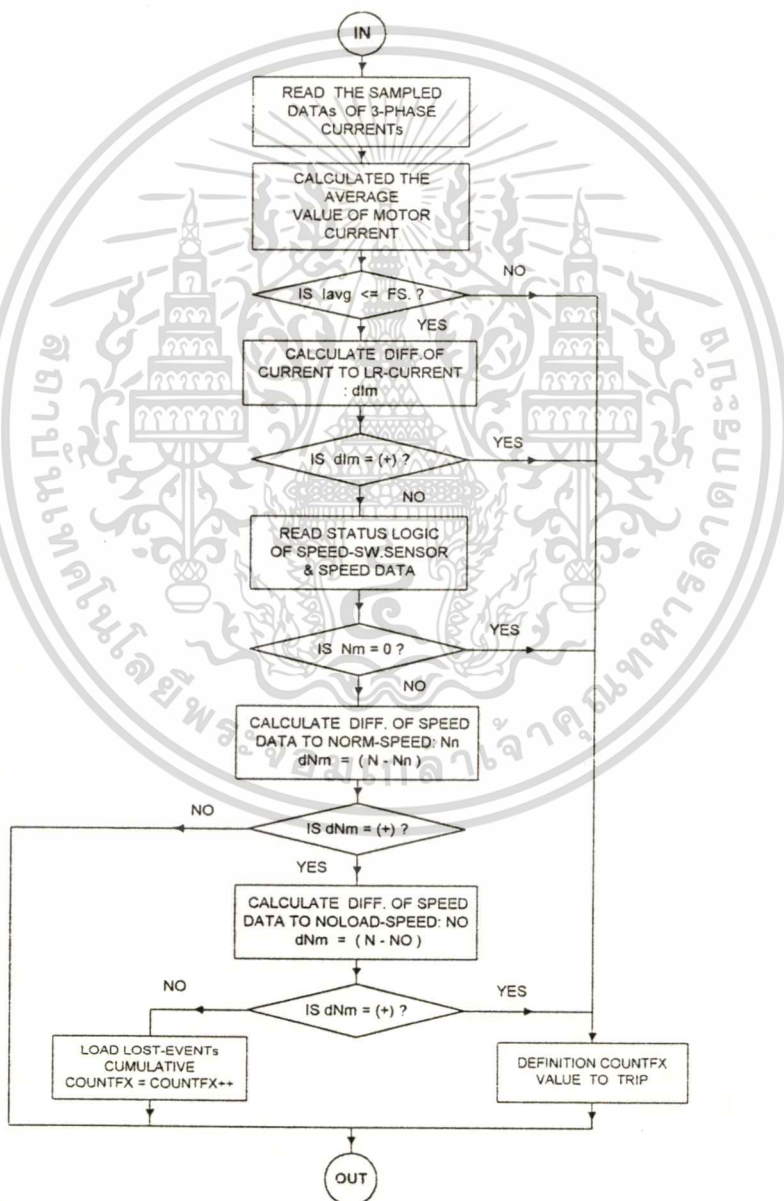
### 3.3.2.7 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการหายไปของโหลดทางกล (Load- Loose)

เป็นสถานะที่เกิดขึ้นตรงกันข้ามกับสถานะการติดขัดของโหลดทางกล โดยมีจุดตัดสินใจสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ตรงข้ามกับสถานะการติดขัดของโหลดทางกลเช่นเดียวกัน โดยที่

$$I' = \frac{dI}{dt} \ll 0 \text{ มีค่าเป็นลบ แทนด้วยสัญลักษณ์ (--)}$$

และ  $N' = \frac{dN}{dt} \gg 0 \text{ มีค่าเป็นบวก แทนด้วยสัญลักษณ์ (++)}$

โดยมีโครงสร้างตามผังงานรูปที่ 3-24

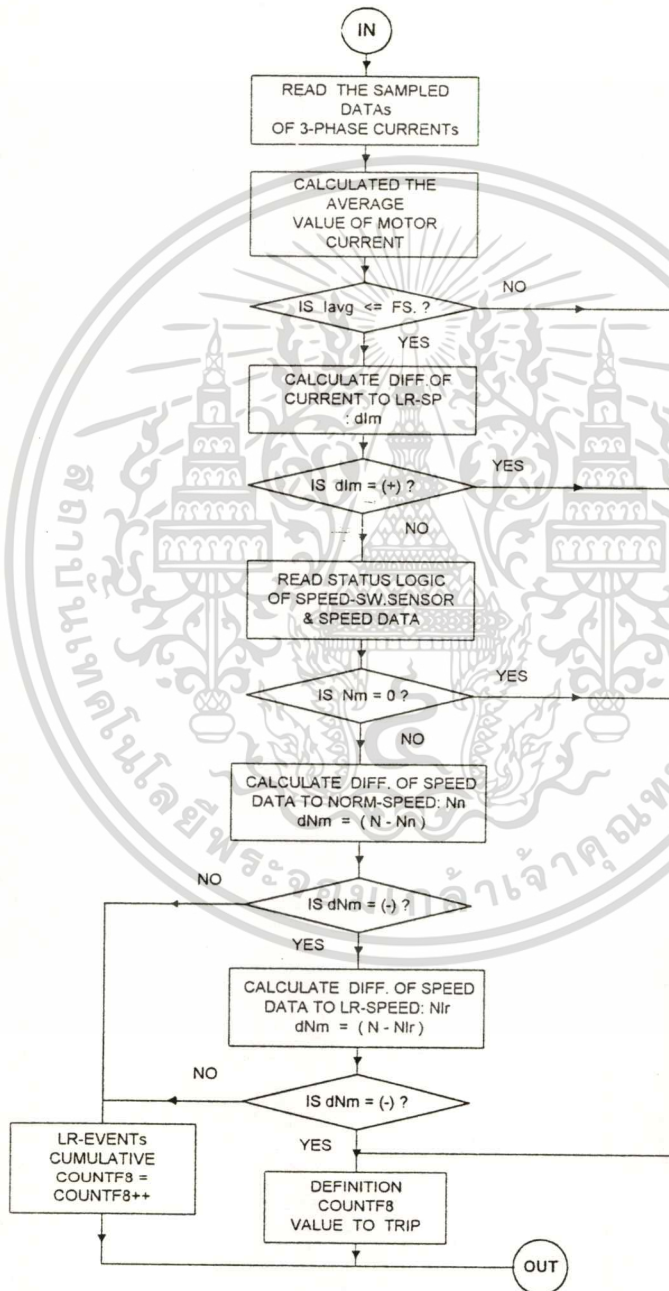


รูป 3-24 โครงสร้างการป้องกันการหายไปของโหลด (Load-Loose)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.8 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการลัดโรเตอร์

มีหลักการคล้ายกับการป้องกันสภาวะการติดขัดของโพลคทางกลแต่จะมีความแตกต่างในส่วนขอเวลาในการเกิดเหตุการณ์ที่ยาวนานต่างกัน และใช้ตรวจสอบในช่วงการเริ่มเดินเครื่อง (Starting) รวมกับการตรวจสอบกระแสและความเร็วรอบ ดังแผนผังดังรูปที่ 3-25

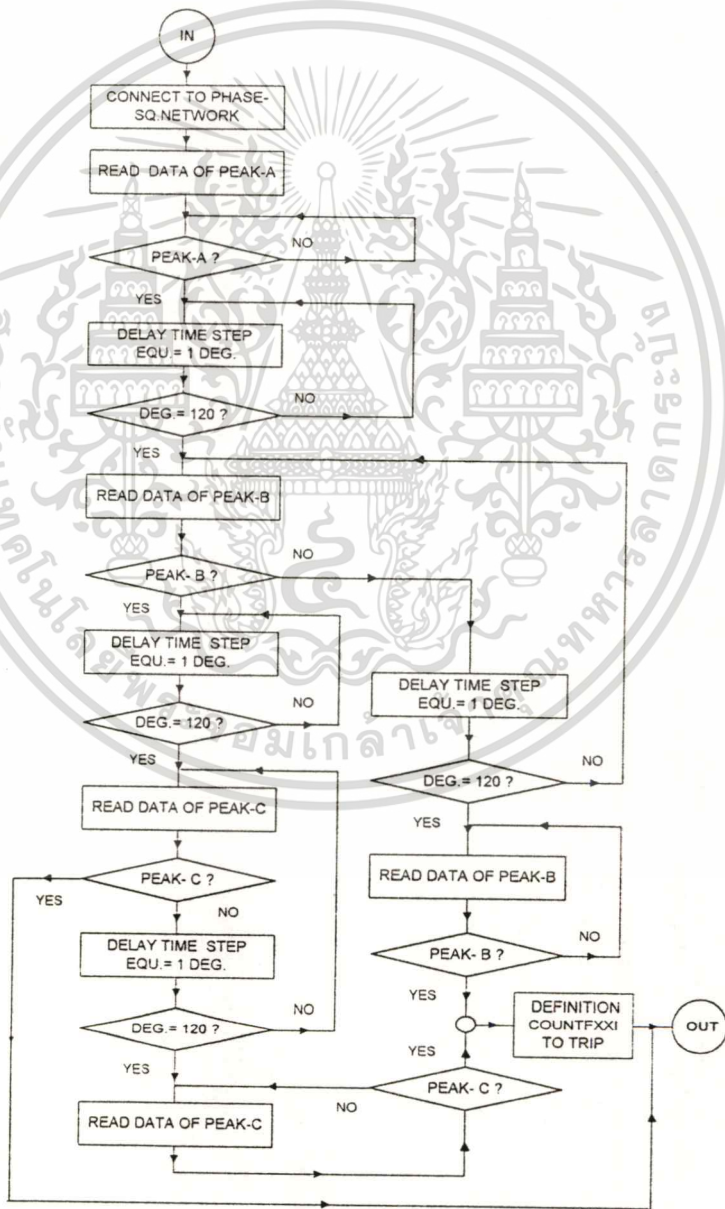


รูป 3-25 โครงสร้างการป้องกันการลัดโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

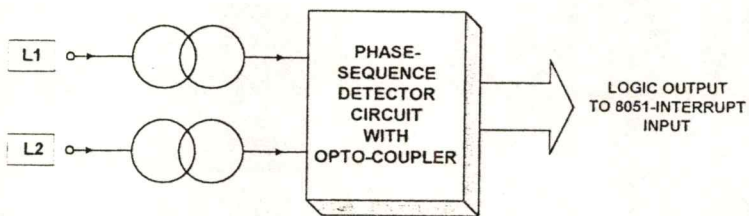
### 3.3.2.9 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันการสลับเฟส (Phase-Sequence)

มีโครงสร้างผังรูปที่ 3-26 ซึ่งเป็นหลักการที่สามารถสร้างได้ด้วยชุดคำสั่งที่ไม่มากนัก นอกจากนั้นแล้วยังสามารถใช้วิธีการอื่นๆได้ เช่น การใช้สาร์ตแวร์อินเตอร์พรีพร้อมทั้งชุดคำสั่งที่ตอบสนองต่ออินเตอร์พรีนั้น จะทำให้ใช้ชุดคำสั่งที่สั้นลงและมีความเร็วในการทำการป้องกันได้ทันต่อเหตุการณ์การสลับเฟสได้ทันทั่วทั้งที่ ซึ่งวิธีการหลังนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับหลักการวิธีแรกนั้นแสดงตามผังงานรูปที่ 3-26(a)และวิธีที่ใช้การอินเตอร์พรีแสดงผังรูป 3-26(b)

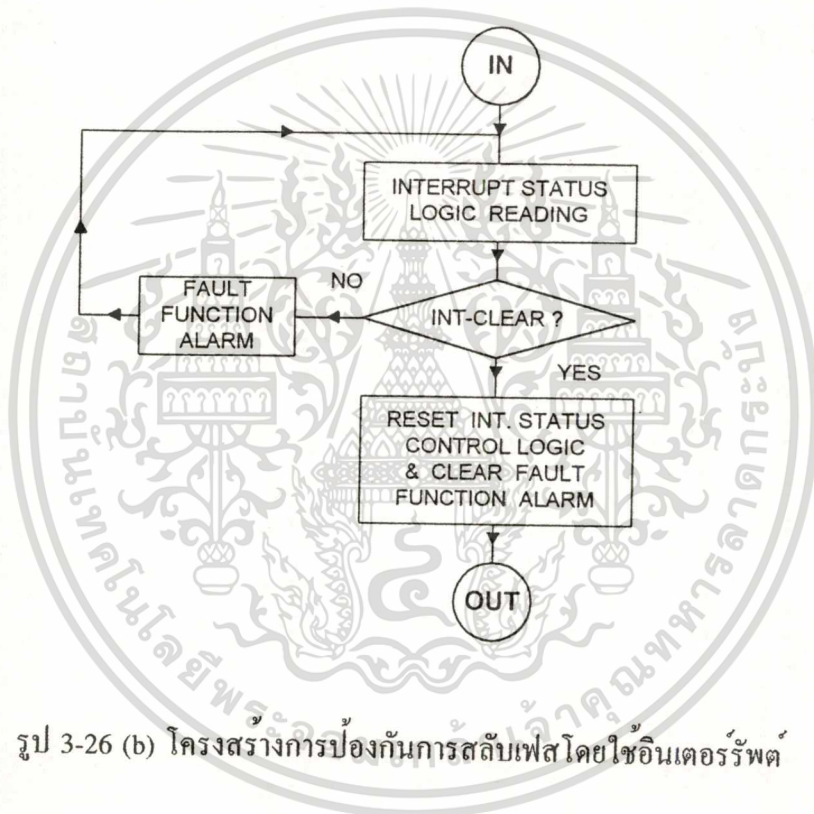


รูป 3-26 (a) โครงสร้างการป้องกันการสลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



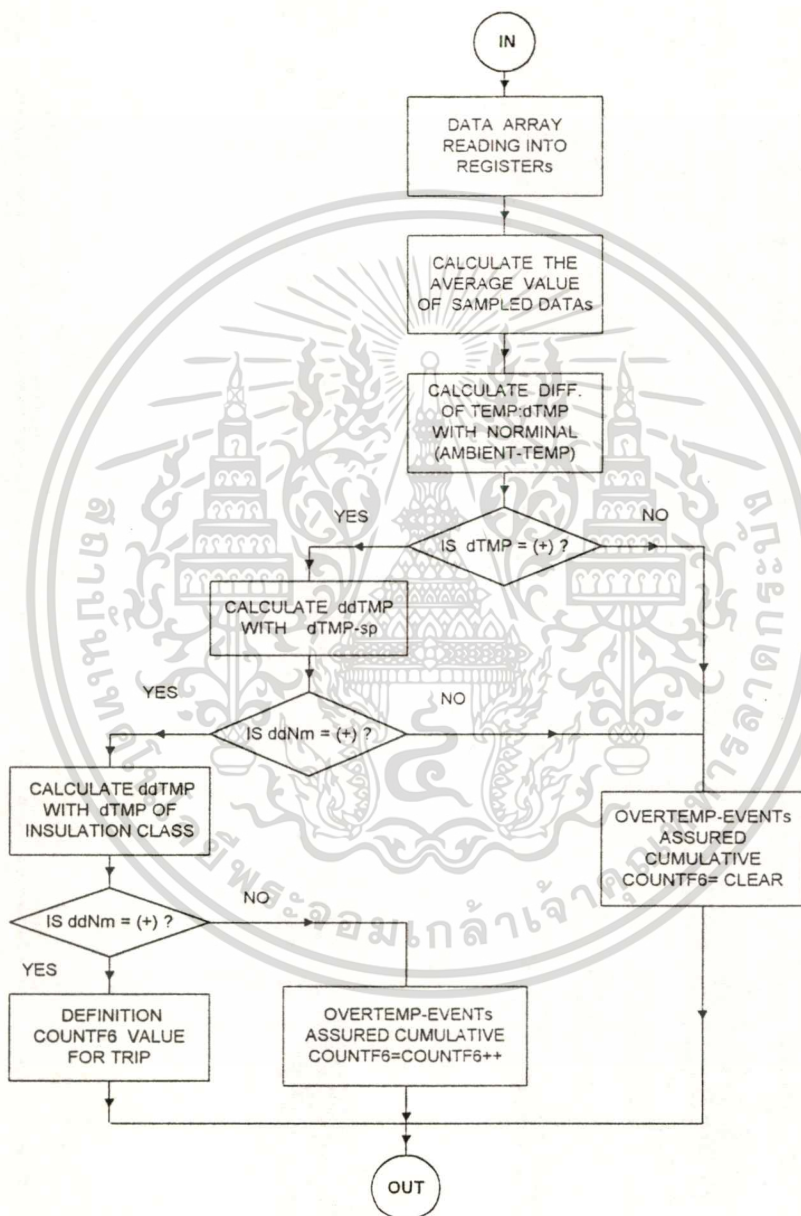
INTERRUPT SERVICE ROUTINE



รูป 3-26 (b) โครงสร้างการป้องกันการสลับเฟสโดยใช้อินเตอร์รัพต์

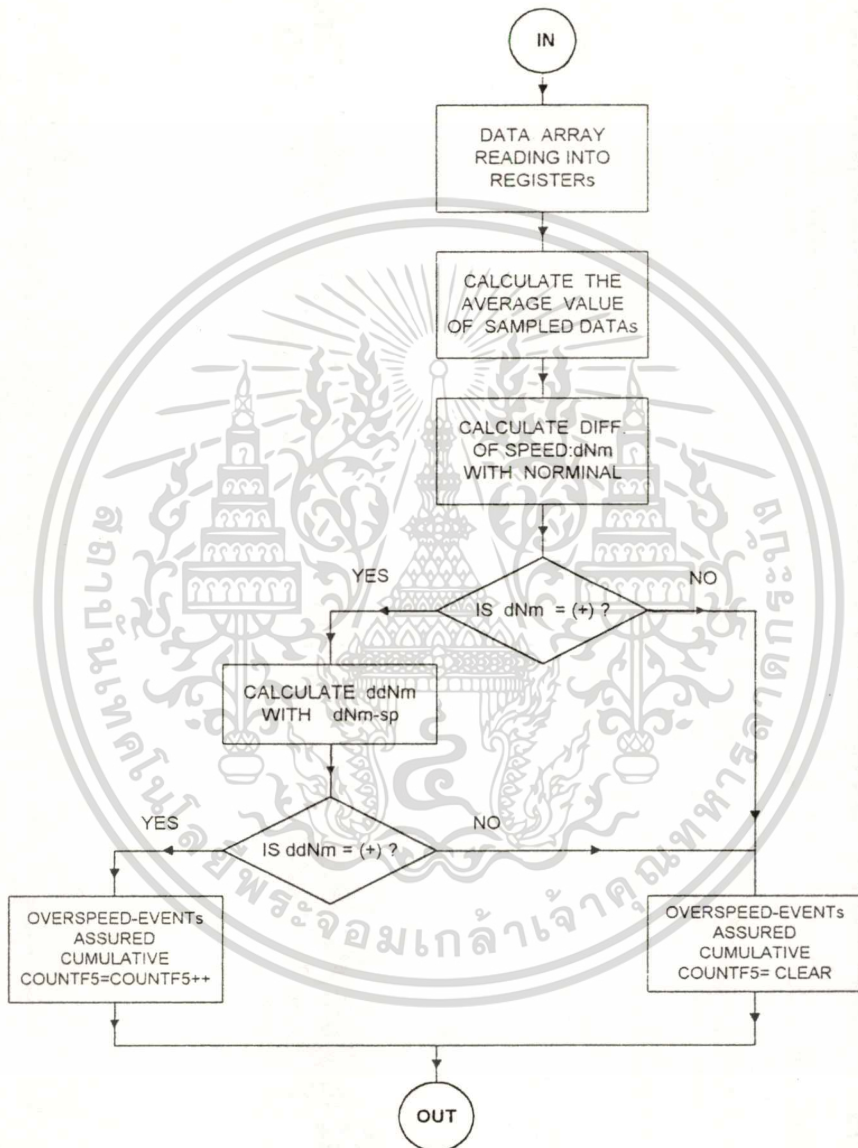
### 3.8.2.10 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันอุณหภูมิเกิน (Temperature-Protection)

หลักการได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3 สามารถสรุปลงเป็นหลักการตามผังงาน รูปที่ 3-27 ดังนี้



รูป 3-27 โครงสร้างการป้องกันอุณหภูมิเกิน

3.3.2.11 โครงสร้างฟังก์ชันการป้องกันความเร็วรอบเกิน (Over - Speed)  
แสดงได้ตามผังงานรูปที่ 3-28



รูป 3-28 โครงสร้างการป้องกันความเร็วรอบเกิน

## บทที่ 4

# การออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดโครงสร้างของระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้แนวทางตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Guide for AC Motor Protection (C37.96-1988)1995 ed (รูปที่ 2-31 บทที่ 2) ซึ่งตามมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดแนวทางอย่างกว้างๆเป็นหลักการสำหรับการป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยสามารถนำมาใช้ได้ทั้งหมดหรือใช้เพียงบางส่วนเท่าที่จำเป็นต่อการใช้งานได้ เมื่อเรากำหนดโครงสร้างของระบบป้องกันได้แล้ว จึงสามารถกำหนดและออกแบบรายละเอียดของฮาร์ดแวร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่ใช้ในการวัดสัญญาณอินพุตต่างๆที่ระบบรีเลย์ป้องกันต้องใช้ หลังจากนั้นจึงทำการออกแบบสร้างซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งในส่วน of ซอฟต์แวร์ที่เป็นฟังก์ชันการป้องกันมอเตอร์แต่ละชนิดนั้นได้กล่าวถึงหลักการและวิธีการทำงานไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับในบทที่ 4 นี้จะได้อธิบายถึงส่วนการควบคุมการทำงานอื่นๆเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้

### 4.1 การกำหนดโครงสร้างของระบบป้องกันโดยรวม

จากหลักการและวิธีการป้องกันมอเตอร์ในบทที่ 3 และแนวทางการเลือกใช้ระบบป้องกันตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Guide for AC Motor Protection (C37.96-1988) นั้นสามารถสรุปแนวทางการจัดกลุ่มของประเภทและชนิดของการป้องกันดังนี้

- 4.1.1 การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำจากสภาวะผิดปกติของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า
- 4.1.2 การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำจากสภาวะผิดปกติภายในตัวมอเตอร์เอง
- 4.1.3 การป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำจากสภาพการใช้งานที่ไม่เหมาะสม

ในข้อแรกนั้นได้แก่ การป้องกันแรงดันเกินปกติ, การป้องกันแรงดันต่ำกว่าปกติ, การป้องกันสภาพแรงดันไม่สมดุล, การป้องกันความถี่ของระบบที่ผิดปกติ และการป้องกันแรงดันเกินแบบ ทรานเซียนท์เป็นต้น ในข้อที่ 2 ได้แก่ การป้องกันอุณหภูมิเกิน, การป้องกันกระแสรั่วภายในขดลวดมอเตอร์, การป้องกันความแตกต่างของกระแสภายในขดลวดมอเตอร์ เป็นต้น และในข้อที่ 3 ได้แก่ การป้องกันการขับโหลดเกิน, การป้องกันการลัดของโรเตอร์, การป้องกันการติดขัดทางกลของโหลด รวมถึงการป้องกันการระบายความร้อนไม่เพียงพอ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกประเภทการป้องกันให้ครบทั้ง 3 ประเภทข้างต้นเพื่อให้มีความสามารถครอบคลุมได้ทั้งหมดและในแต่ละประเภทจะเลือกเพียงบางชนิดการป้องกันเท่านั้น เพื่อให้มีความสามารถได้ครบในขณะที่มีอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่น้อย และสามารถป้องกันได้เนื่องจากบางฟังก์ชันนั้นจะครอบคลุมได้ เช่น การป้องกันอุณหภูมิเกินที่เลือกไว้จะสามารถครอบคลุมการป้องกันมอเตอร์ไม่ให้มีอุณหภูมิเกินได้จากสาเหตุการระบายความร้อนที่ไม่เพียงพอจากประเภทต่างๆทั้ง 3 ประเภทนั้นมีการเลือกใช้ดังนี้

4.1.1 ได้แก่การป้องกันแรงดันเกิน, การป้องกันแรงดันต่ำ, การป้องกันแรงดันไม่สมดุล, การป้องกันการผิดพลาดดับเฟส, การป้องกันการขาดหายไปของเฟสใดเฟสหนึ่ง

4.1.2 ได้แก่ การป้องกันอุณหภูมิ

4.1.3 ได้แก่ การป้องกันอุณหภูมิเกินจากการขับโหลดเกินพิกัด การป้องกันการลัดตัวของมอเตอร์

ในข้อ 4.1.3 นั้นโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การป้องกันอุณหภูมิเกินจากการขับโหลดเกินพิกัดหรือการป้องกันโหลดเกินนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการจำลองการเพิ่มและลดปริมาณความร้อนที่สะสมภายในมอเตอร์ โดยอาศัยเทคนิคการเพิ่มและลดค่าในหน่วยความจำที่อ่านเขียนค่าได้ (RAM) ซึ่งจะแปรค่าตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ร่วมกับการตรวจวัดอุณหภูมิภายในมอเตอร์ด้วยเทอร์โมคัปเปิล [12] ดังรายละเอียดของหลักการในบทที่ 3

เมื่อกำหนดประเภทและชนิดการป้องกันมอเตอร์ที่จะใช้แล้ว ในส่วนของการวัดสัญญาณหรือพารามิเตอร์ต่างๆนั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป รวมทั้งอุปกรณ์ที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้งานซึ่งจำเป็นสำหรับระบบปรีเลย์ป้องกันคือ อุปกรณ์แสดงผลตัวอักษร (LCD-Module) เพื่อใช้สื่อความหมายการทำงานของระบบกับผู้ใช้ เช่น การปรับตั้งค่าการทำงาน (Set Point) ในแต่ละฟังก์ชัน การแจ้งผลการป้องกันในแต่ละฟังก์ชัน (Alarm) และการสื่อความหมายการทำงานของรีเลย์และระบบการเดินเครื่องมอเตอร์ เป็นต้น ซึ่งจะทำงานประสานกันกับอุปกรณ์การรับข้อมูลที่เป็นคีย์สวิตซ์ในการทำงานเปลี่ยนแปลงค่าและฟังก์ชันการทำงานต่างๆจากผู้ใช้

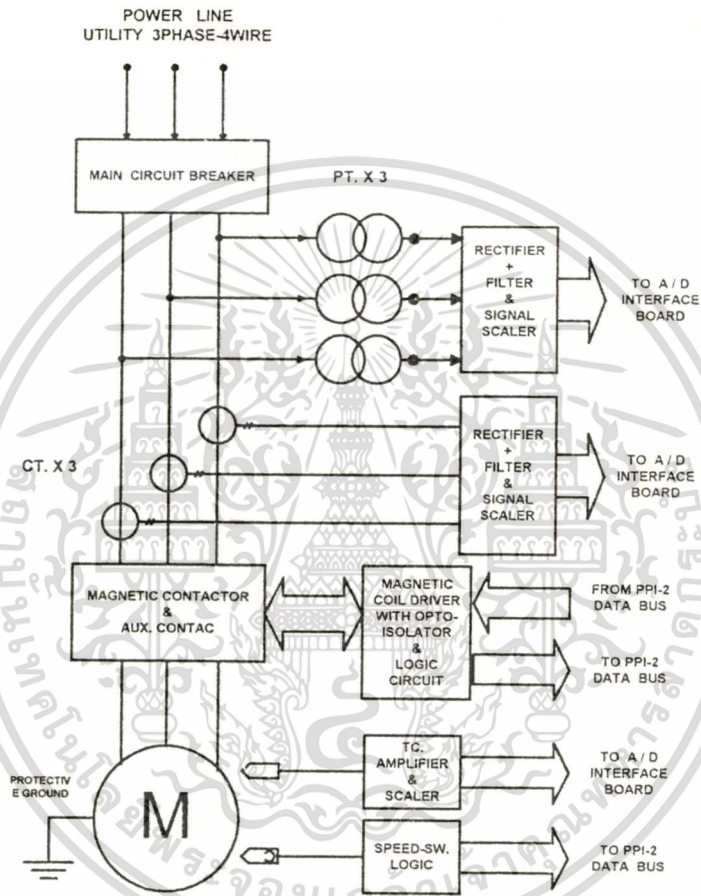
## 4.2 การออกแบบสร้างฮาร์ดแวร์

โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบปรีเลย์ป้องกันที่ออกแบบสร้างในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนควบคุมการเดินเครื่องและปลดวงจรมอเตอร์ ส่วนการวัดค่าสัญญาณหรือพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องใช้ในการป้องกัน และส่วนของระบบควบคุมศูนย์กลางที่เป็นระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในส่วนสุดท้ายนี้จะรวมเอาอุปกรณ์แสดงผลตัวอักษร (LCD) และอุปกรณ์รับข้อมูลแบบคีย์สวิตซ์เข้าไว้ด้วยกัน สำหรับแต่ละส่วนมีรายละเอียดต่อไปนี้

### 4.2.1 ส่วนควบคุมการเดินเครื่องและปลดวงจรมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการเดินเครื่องและปลดวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบต่อตรง (DOL: Direct On Line Starting) ดังเหตุผลที่ได้กล่าวถึงไว้แล้วในบทที่ 3 และบทนำและมีโครงสร้างดังรูปที่ 4-1



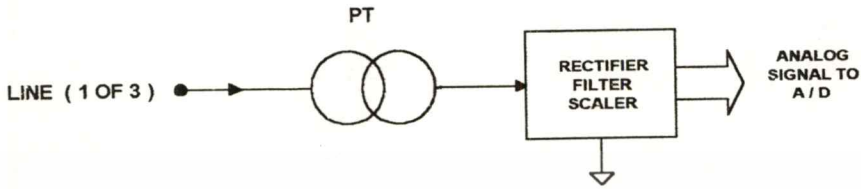
รูป 4-1 โครงสร้างวงจรการเดินเครื่องแบบต่อตรง

#### 4.2.2 ส่วนการวัดค่าสัญญาณหรือพารามิเตอร์ต่างๆ

จากข้อสรุปของหัวข้อ 4.1 นั้นต้องใช้อุปกรณ์วัดสัญญาณต่างๆ ดังนี้คือ หม้อแปลงแรงดัน (P.T.) สำหรับการวัดแรงดันในระบบ, หม้อแปลงกระแส (C.T.) สำหรับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์, เทอร์โมคัปเปิล (Tc) สำหรับการวัดอุณหภูมิของมอเตอร์, และสวิตช์ตรวจจับแม่เหล็ก (Magnetic Proximity SW.) สำหรับการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมีโครงสร้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการวัดแต่ละชนิดดังรูปที่ 4-2(a), (b), (c) ตามลำดับ และมีรายละเอียดตามรูปที่ 4-3,4-4 และ 4-5 ตามลำดับ



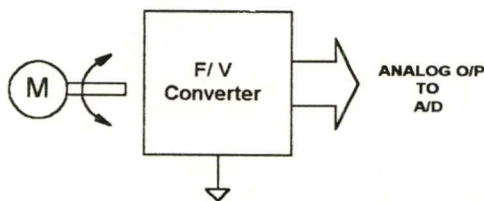
รูป 4-2 (a) การวัดค่าแรงดัน



รูป 4-2 (b) การวัดค่ากระแส



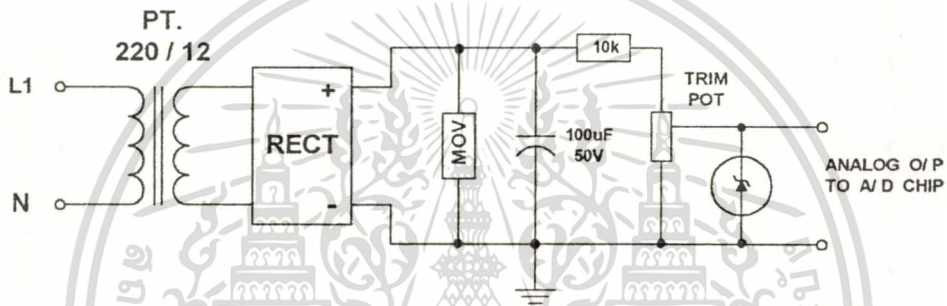
รูป 4-2 (c) การวัดอุณหภูมิ



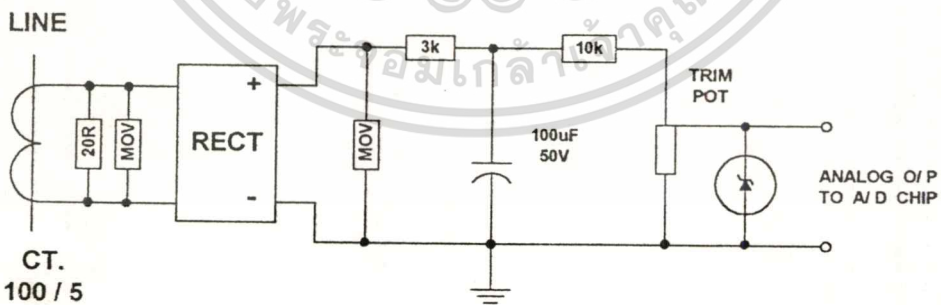
รูป 4-2 (d) การวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-2(a),(b) นั้น ค่าสัญญาณที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นค่าเฉลี่ยด้วยอุปกรณ์เรียงคลื่นและตัวเก็บประจุกรองสัญญาณ เพื่อให้สามารถเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D ได้โดยไม่ต้องทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัญญาณไซน์ที่วัดได้ด้วยซอฟต์แวร์ เพื่อให้โปรแกรมมีขนาดเล็กลง และมีความเร็วในการทำงานดีขึ้น ค่าสัญญาณเฉลี่ยที่ได้นี้จะถูกกรองให้เรียบและแบ่งสัดส่วน (Scaling) ให้เหมาะสมกับขนาดแรงดันอ้างอิงของอุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D ก่อนป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ A/D หลังจากนั้นขั้นตอนการแปลงสัญญาณก็จะมีวิธีการเช่นเดียวกันกับการวัดแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4



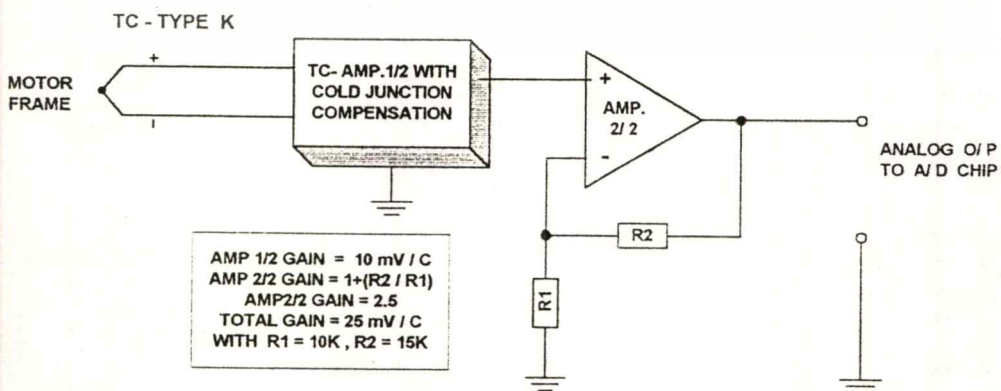
รูป 4-3 การปรับปรุงสัญญาณสำหรับการวัดแรงดันให้กับ A/D



รูป 4-4 การปรับปรุงสัญญาณการวัดกระแสให้กับ A/D

ส่วนการวัดอุณหภูมินั้นใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K) ซึ่งมีย่านการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ -270°C ไปจนถึง 1370°C ซึ่งครอบคลุมตลอดช่วงของการวัดอุณหภูมิของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

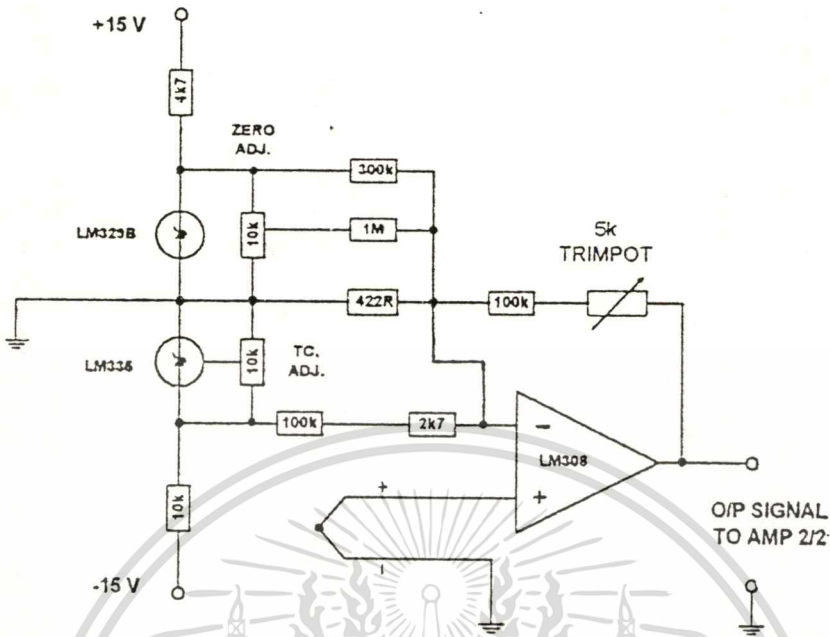
มอเตอร์เหนี่ยวนำและครอบคลุมถึงค่าการทนอุณหภูมิสูงสุดของชั้นฉนวนชนิด H ซึ่งเป็นฉนวนที่ทนอุณหภูมิได้สูงสุดในชั้นฉนวนทั้ง 5 ชนิด (A,E,B,F และ H) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นแรงดัน คือ  $40.5 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  เมื่อใช้วัดอุณหภูมิตั้งแต่  $0^{\circ}\text{C}$  ไปจนถึง  $200^{\circ}\text{C}$  จะได้แรงดันเอาต์พุตคือ 0 mV ถึง 8.1 mV เมื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณอินพุตสำหรับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D ที่มีแรงดันอ้างอิงที่ 5 V (Full Scale) แล้วต้องขยายแรงดันเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลนี้ด้วยอัตราขยายประมาณ 617 เท่า จึงจะทำให้ได้สัญญาณอะนาล็อกเอาต์พุตที่มีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 5 V เพื่อให้สามารถเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D ได้พอดี แต่เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลนั้นเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่ทำงานโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ (Difference) ระหว่างจุดปลายสาย(Tip)ที่ใช้วัดอุณหภูมิของวัตถุกับจุดปลายสายที่มีจุดอ้างอิงของอุณหภูมิศูนย์องศาเซลเซียส(Cold-Junction Reference Point) ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างจุดอุณหภูมิอ้างอิงที่  $0^{\circ}\text{C}$  ให้กับเทอร์โมคัปเปิล โดยในปัจจุบันนี้ได้มีการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างแรงดันชดเชยที่จุดอุณหภูมิอ้างอิง  $0^{\circ}\text{C}$  แทนอุปกรณ์ที่เป็นเตารักษาอุณหภูมิ(oven) โดยในที่นี้คือห้องรักษาอุณหภูมิที่จุด  $0^{\circ}\text{C}$  (Thermoelectric-Refrigeration) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีราคาแพงและไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนจึงทำให้มีความสะดวกในการใช้งานจริงและมีราคาที่ถูกกว่ามารายละเอียดของการชดเชยแรงดันที่  $0^{\circ}\text{C}$  และการขยายแรงดันที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลแสดงดังรูป 4-5(a) ในบล็อกไดอะแกรมนี้คือวงจรชดเชย แรงดันที่  $0^{\circ}\text{C}$  และมีอัตราขยาย  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  และถูกขยายต่อด้วยวงจรขยายที่ 2.5 เท่า เพื่อให้ได้อัตราขยายรวมเป็น  $25 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  (หรือ 617 เท่าของสัมประสิทธิ์อัตราสร้างแรงดันต่ออุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลคือ  $40.5\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ) รายละเอียดของบล็อกแสดงดังรูป 4-5 (b) ในส่วนของการวัดอุณหภูมิห้องที่ใช้งานมอเตอร์นั้นได้ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นวงจรรวมสำเร็จรูปเบอร์ LM335 ดังรูปที่ 4-5 (c) เพื่อให้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถตรวจวัดอุณหภูมิแวดล้อมมอเตอร์ในขณะที่ใช้งานได้



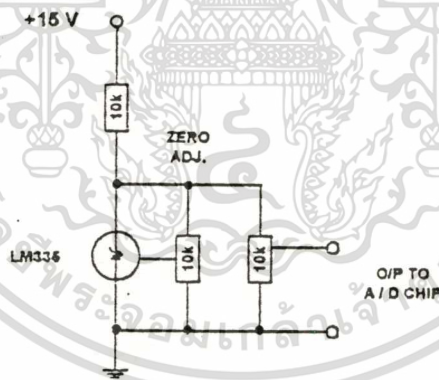
รูป 4-5 (a) การขยายสัญญาณจาก TC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



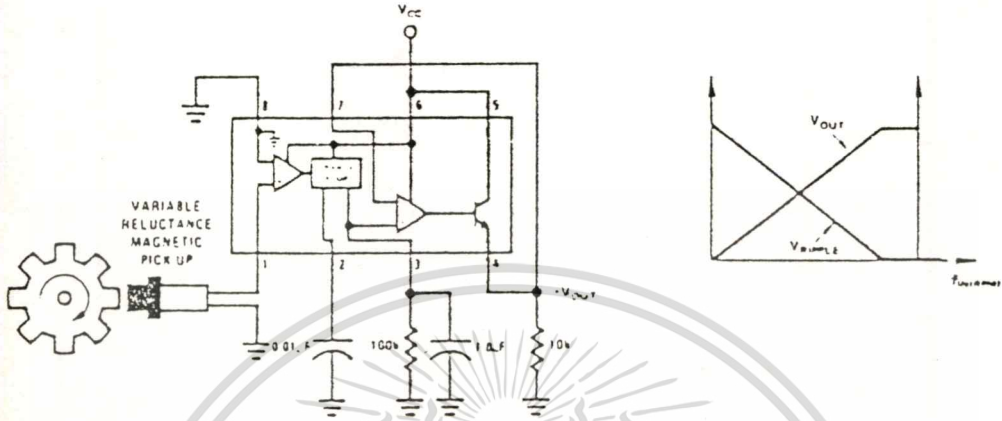
รูป 4-5 (b) การวัดเซย์แรงดันที่อุณหภูมิจุดศูนย์กลาง (°C)



รูป 4-5 (c) การสร้างแรงดันจากอุณหภูมิห้อง

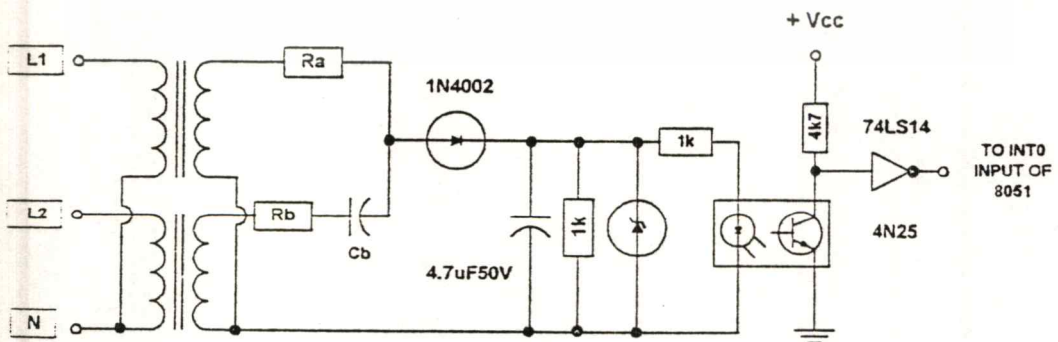
และในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นใช้ได้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบแม่เหล็ก คือ ฟร็อกซิ มิติสวิตช์ (Magnetic Proximity Switch) ทำการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์โดยให้สัญญาณเอาต์ พุดออกมาเป็นพัลส์ ซึ่งจำนวนพัลส์จะแปรโดยตรงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ จากนั้นนำ สัญญาณพัลส์ที่ได้ไปแปลงเป็นสัญญาณแรงดันกระแสตรงโดยใช้อุปกรณ์วงจรรวมที่แปลงจาก ความถี่เป็นแรงดัน (f/V converter) ซึ่งให้แรงดันเอาต์พุดเป็นกระแสตรงแปรผันโดยตรงกับความถี่ หรือจำนวนพัลส์ใน 1 หน่วยเวลา (วินาที) จากนั้นจึงนำไปเป็นสัญญาณอินพุตให้กับอุปกรณ์แปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ A/D ต่อไปดังรูปที่ 4-6 โดยอุปกรณ์วงจรรวมนั้น ใช่วงจรรวมสำเร็จรูป เบอร์ LM2907  
ต่อร่วมกับพรีอักษิมิตส์วิทซ์โดยตรง



รูป 4-6 วงจรรวมการแปลงสัญญาณ F/V

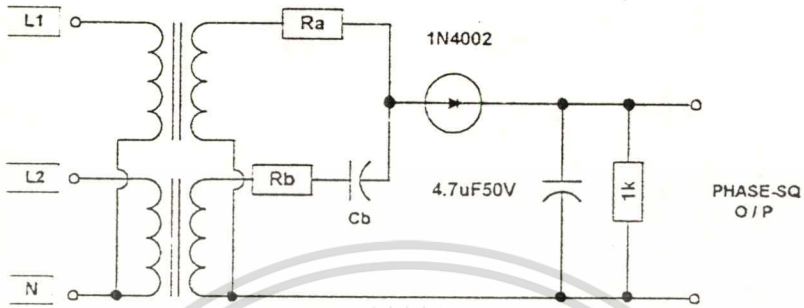
สำหรับการป้องกันสภาวะผิดปกติระดับเฟสที่ใช้ในการออกแบบสร้างระบบป้องกันมอเตอร์ใน  
วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การตรวจจับสภาพผิดปกติด้วยวงจรรวมผลลัพท์ทางภาคเรขาคณิตด้วยความต้าน  
ทานและตัวเก็บประจุ แล้วผลลัพท์ที่ได้จะนำไปเป็นสัญญาณอินเทอร์รัพท์ให้กับระบบไมโครคอน  
โทรลเลอร์โดยผ่านการเชื่อมโยงทางแสง(Opto-Coupler) ดังรูปที่ 4-7 ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดความยาว  
ของโปรแกรมและเป็นการเพิ่มความเร็วให้กับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการตรวจสอบ  
สภาวะผิดปกติระดับเฟสได้ในขณะเดียวกัน



รูป 4-7(a) วงจรการตรวจวัดค่าดับเฟส

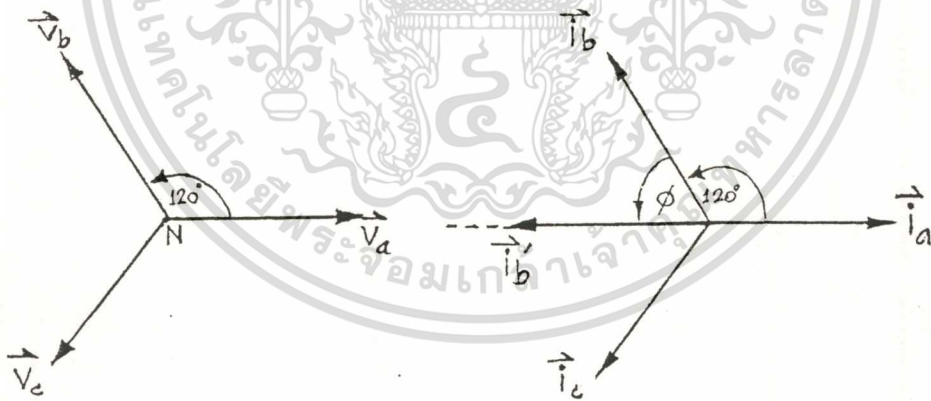
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4-7 พิจารณาเฉพาะส่วนของวงจรการรวม เวกเตอร์  $R_A$  กับ  $R_B+C_B$  ตามรูปที่ 4-7 (b)



รูป 4-7(b) วงจรการรวมเวกเตอร์ระหว่าง 2 เฟสใดๆ

ในสภาวะปกติจะมีเวกเตอร์ของแรงดันและกระแสดังรูป 4-7 (c)

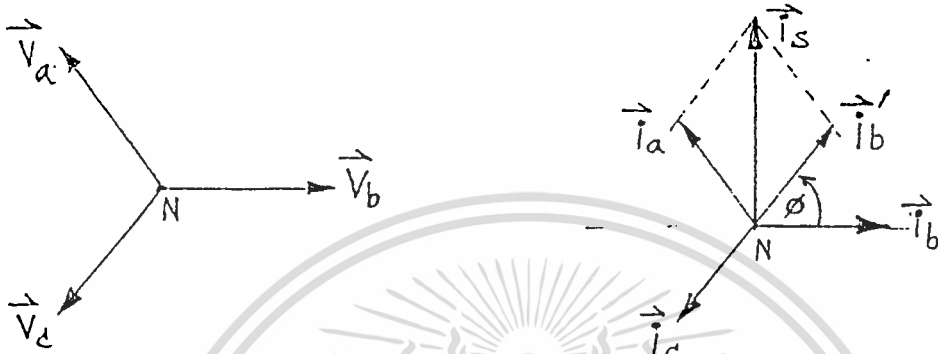


รูป 4-7 (c) เวกเตอร์แรงดันและกระแสที่ได้ในสภาวะปกติ

จากแผนภาพเวกเตอร์ ที่สภาวะปกติ ค่ากระแส  $i_b$  จะถูกเลื่อนเฟสหน้าแรงดัน  $v_b$  ไป  $60^\circ$  ด้วยวงจรเลื่อนเฟส  $R_B-C_B$  ดังนั้นผลลัพธ์ของเวกเตอร์กระแส  $i_s = i_a + i_b' = i_a - i_b = 0$  ถ้าเราให้  $L_1$  เป็นเฟส a และ  $L_2$  เป็นเฟส b ส่วนในสภาวะผิดปกติลำดับเฟส ซึ่งหมายถึงการสลับตำแหน่งระหว่าง

$L_1$  กับ  $L_2$  กลายเป็น  $L_1$  เป็นเฟส b และ  $L_2$  เป็นเฟส a ดังนั้นจะได้แผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 4-7

(d)



รูป 4-7 (d) เวกเตอร์แรงดันและกระแสที่ได้เมื่อผิดปกติ

จากรูป 4-8 (b) จะได้ว่าผลลัพธ์  $\vec{I}_s = \vec{i}_a + \vec{i}'_b = |\vec{i}_b| \cos(\phi / 2) = 2|\vec{i}_b| \cos 30^\circ$  เมื่อกำหนด  $\phi = \text{Phaseshift} = 60^\circ$  , ดังนั้นเงื่อนไขการทำงานจะให้ผลดังนี้คือ

(1) เมื่อลำดับเฟสเป็นปกติ คือ  $\vec{V}_a, \vec{V}_b$  และ  $\vec{V}_c$  ตามลำดับจะได้  $\vec{I}_s = 0$  ทำให้สัญญาณ  $\overline{INT\phi} = "1"$

(2) เมื่อลำดับเฟสผิดปกติคือ  $\vec{V}_b, \vec{V}_a$  และ  $\vec{V}_c$  ตามลำดับจะได้  $\vec{I}_s \neq 0$  ( $\vec{I}_s = 2|\vec{i}_b| \cos 30^\circ$ ) ทำให้สัญญาณ  $\overline{INT\phi} = "\phi"$  โดยทั้งสองกรณีจะเกิดขึ้นได้เมื่อกำหนดให้การเลื่อนเฟสที่เกิดจาก  $R_B$  และ  $C_B$  มีค่าเป็น  $60^\circ$  และโดยทั่วไปแล้วค่าของ  $|\vec{i}_a| \cong |\vec{i}_b| \cong |\vec{i}_c|$  กรณีของ (1) และ (2) จึงเป็นจริง

ดังนั้นเราสามารถออกแบบค่าของ  $R_A, R_B$ , และ  $C_B$  ในวงจรได้โดยเงื่อนไขต่างๆดังกล่าวโดยกำหนด  $\phi = 60^\circ$  จากวงจรจะได้

$$|\vec{i}_a| = \frac{|\vec{v}_a|}{R_a} \quad 0^\circ$$

$$|\vec{i}_b| = \frac{|\vec{v}_b|}{|Z_B|} \angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_B}{R_B}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด  $|\bar{i}_a| \cong |\bar{i}_b|$  แล้ว, เมื่อ  $|\bar{v}_a| \cong |\bar{v}_b|$  ดังนั้น ต้องกำหนดให้  $|z_B| \cong R_A$

และ 
$$z_c = \frac{1}{j\omega C} = jx_c \text{ โดยที่ } x_c = \frac{-1}{\omega C}$$

หรือ 
$$z_B = |z_B| e^{j \left( \tan^{-1} \left( \frac{-|X_B|}{R_B} \right) \right)} \text{ แทน } |\bar{v}_b| \text{ ด้วย } |\bar{v}_b| \angle 120^\circ$$

ดังนั้น 
$$i_h = \frac{|\bar{v}_b| \angle 120^\circ}{|z_B| \angle \tan^{-1} \left( \frac{X_B}{R_B} \right)}$$

$$= \frac{|\bar{v}_b| \angle 120^\circ - \left( \tan^{-1} \left( -1 / \omega C_B R_B \right) \right)}{\sqrt{R_B^2 + (1 / \omega C)^2}}$$

$$= \frac{|\bar{v}_b|}{\sqrt{R_B^2 + (1 / \omega C)^2}} \angle 120^\circ + \tan^{-1} (1 / \omega C_B R_B)$$

ถ้า  $\phi = \angle \tan^{-1} (1 / \omega C_B R_B) = 60^\circ$  แล้ว จะมีผลดังนี้คือ

(1) เมื่อลำดับเฟสถูกต้องจะทำให้ผลรวมเวกเตอร์  $\bar{I}_s = \bar{I}_a + \bar{I}_b = 0$  เนื่องจากกระแส  $\bar{I}_b$  เดิมถูกเลื่อนเฟส (Shift) ไป  $60^\circ$  เป็น  $180^\circ$  ( $120^\circ + 60^\circ$ ) ทำให้  $\bar{I}_b = -\bar{I}_a$  ดังนั้นจะทำให้เอาต์พุตของวงจร Phase-Sequence detector คือ สัญญาณ  $\overline{INT\phi} = "1"$

(2) เมื่อลำดับเฟสผิดปกติจะทำให้ผลรวมเวกเตอร์  $\bar{I}_s = \bar{I}_a + \bar{I}_b \cong 2|\bar{I}_a| \cos 30^\circ \neq 0$  เนื่องจากกระแส  $\bar{I}_a$  ถูกเลื่อนเฟสไปจาก  $60^\circ$  เป็น  $180^\circ$  เป็น  $60^\circ$  ( $0^\circ + 60^\circ$ ) ทำให้  $\bar{I}_a \cong \bar{I}_b$  ทำมุมกัน  $60^\circ$  ดังนั้นทำให้ผลรวมของเวกเตอร์ทั้งสองเป็น  $2|\bar{I}_a| \cos 30^\circ$  และเอาต์พุตของวงจร Phase-Sequence Detector ที่ได้ คือสัญญาณ  $\overline{INT\phi} = "0"$

จากเงื่อนไข, และ 
$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = \tan^{-1} (1 / \omega C_B R_B) = 60^\circ \\ |z_B| = R_A \end{array} \right\}$$

ดังนั้น 
$$R_B = \frac{1}{\omega C_B (\tan 60^\circ)} = \frac{X_B}{\sqrt{3}}$$

แทนค่า  $\omega = 2\pi f_s$ , เลือกค่า  $C_B = 0.033 \mu F$   
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกิจการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$R_B = \left( \frac{1}{2\pi(50)(\sqrt{3})0.033\mu F} \right) = 55.68 K$$

หาค่า  $R_A = |Z_B|$

$$\begin{aligned} \therefore R_A &= \sqrt{R_B^2 + X_B^2} = \sqrt{R_B^2 + (\sqrt{3}R_B)^2} \\ &= R_B \sqrt{1 + (\sqrt{3})^2} = 2R_B \end{aligned}$$

แทนค่า  $R_B$  จะได้

$$R_A = 112 K.$$

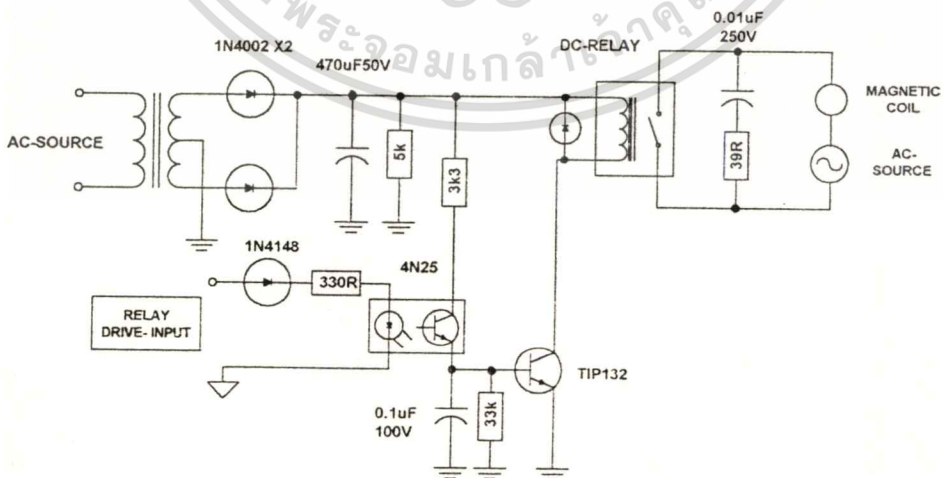
ดังนั้นใช้

$$C_B = 0.033\mu F$$

$$R_B = 56 K.$$

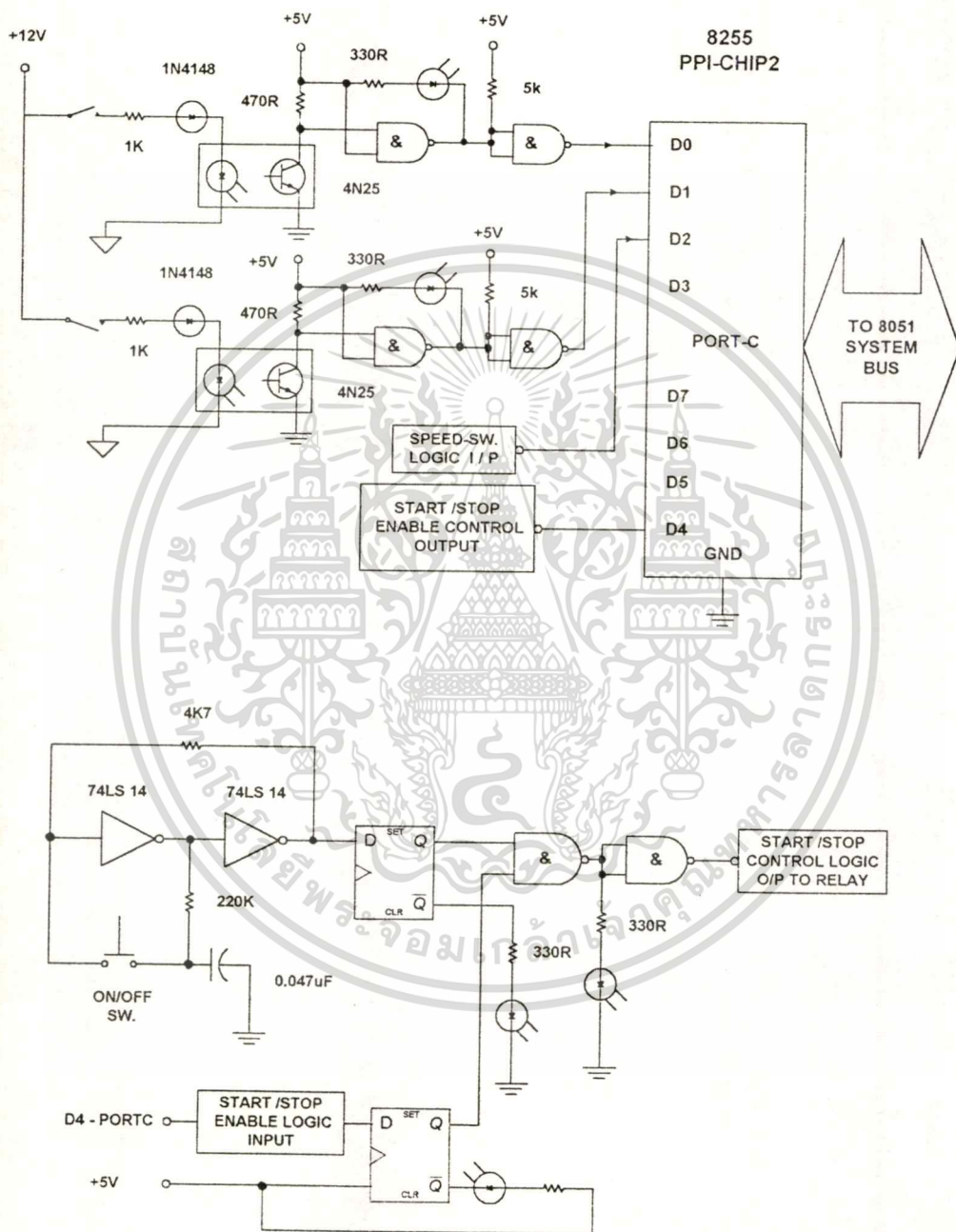
$$R_A = 92 K. + 20K.$$

ส่วนที่สำคัญต่อมาคือ ส่วนของการควบคุมการปลดวงจรมอเตอร์และส่วนเชื่อมต่อเพื่อตรวจสอบสถานะทางตรรก (Logic) ของส่วนควบคุมการเดินเครื่องและปลดวงจรมอเตอร์ โดยใช้ตัวแยกทางแสง (Opto-Isolator) ทำการเชื่อมโยงสัญญาณทางตรรกะทางระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนควบคุมการเดินเครื่องและปลดวงจรมอเตอร์ที่ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง(เมื่อเทียบกับระบบควบคุม) ดังรูปที่ 4-8 และ 4-9



รูป 4-8 วงจรควบคุมขดลวดแม่เหล็กในสวิตช์แม่เหล็ก

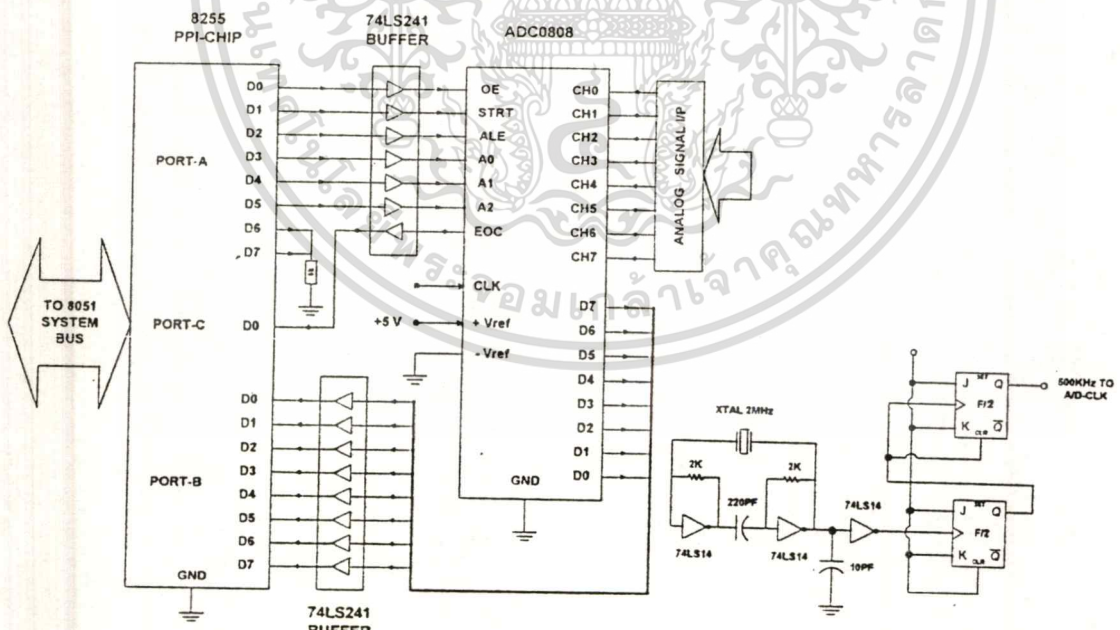
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อผู้ซื้อได้หันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-9 ส่วนควบคุมการเดินเครื่องและการสั่งปลดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากส่วนของระบบการวัดสัญญาณหรือพารามิเตอร์ทุกชนิดทั้งหมดจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D) ที่มีส่วนการเลือกช่องสัญญาณ (Multiplex) ภายในตัว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ชิพแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลเบอร์ ADC0808 ซึ่งมีอุปกรณ์เลือกช่องสัญญาณภายในแบบ 8 ช่อง โดยชิพเบอร์ ADC0808 นี้มีการทำงานโดยเฉพาะส่วนกระบวนการแปลงสัญญาณจากอะนาล็อกเป็นดิจิทัลแบบประมาณค่า (Successive-Approximation) ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับที่ได้กล่าวถึงไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.1.4 จากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อเข้ากับส่วนของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านชิพการเชื่อมต่อแบบขนาน (Parallel Peripheral Interface : PPI-Chip) โดยแสดงดังรูปที่ 4-10 การทำงานของชิพแปลงสัญญาณ A/D นั้นจะถูกควบคุมการทำงานผ่านชิพเชื่อมต่อแบบขนานทั้งการส่งสัญญาณควบคุม คำสั่งการจัดการรูปแบบการทำงานภายใน (Control Word) และการตอบรับสัญญาณของ A/D เมื่อทำการแปลงสัญญาณเสร็จโดยจะส่งค่าสัญญาณดิจิทัลที่ได้กลับเข้าสู่ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านบัสข้อมูลของชิพเชื่อมต่อแบบขนาน

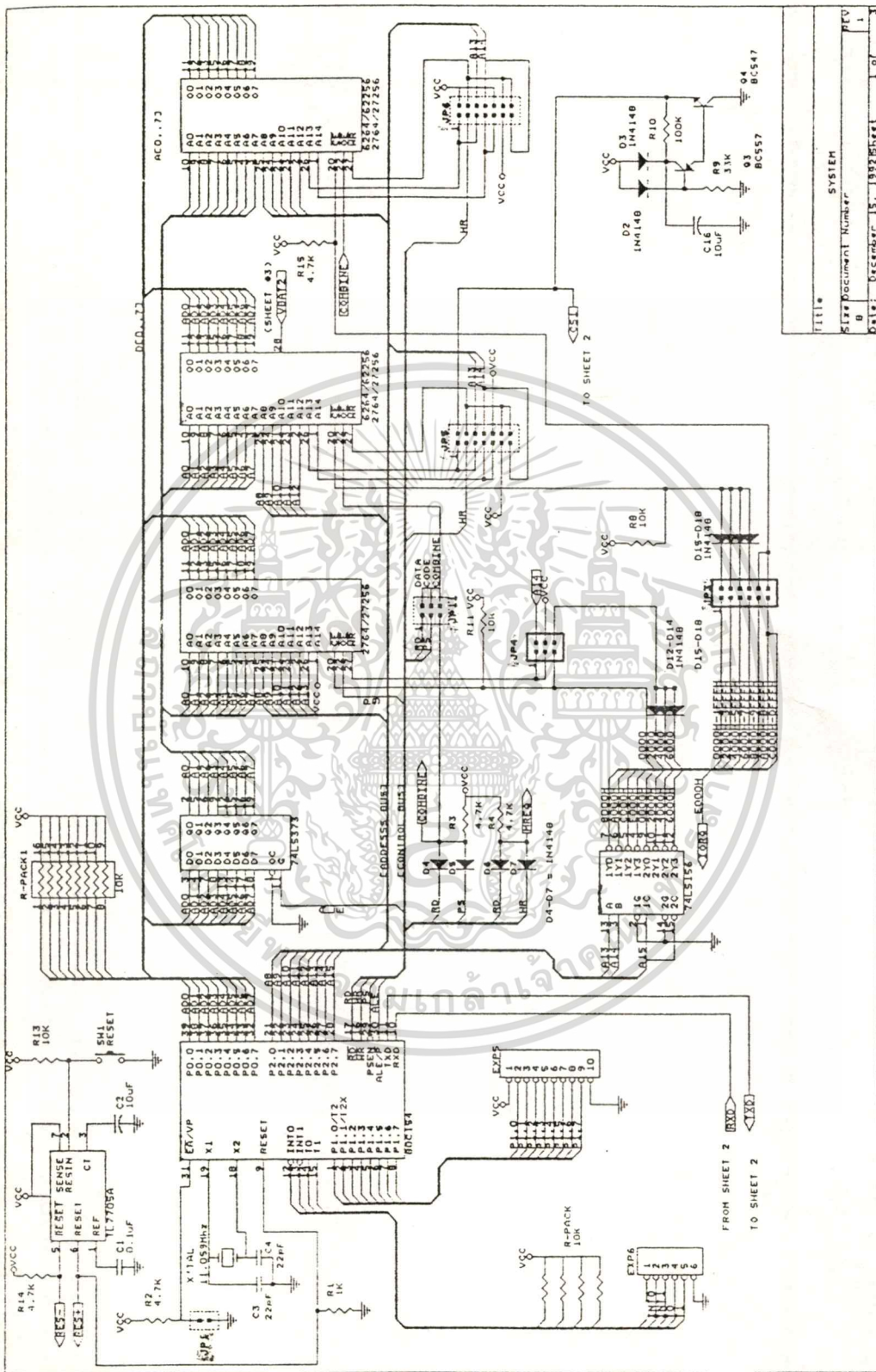


รูป 4-10 การเชื่อมต่อระหว่าง A/D กับไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ส่วนของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์รับค่า-แสดงผลข้อมูล

ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ทั้งหมดจากข้อ 4.2.1 และหัวข้อ 4.2.2 จะถูกเชื่อมต่อและควบคุมการทำงาน และส่วนข้อมูลให้กับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการพัฒนาแบบเอนกประสงค์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบหน่วยความจำต่างๆ และพอร์ตเชื่อมต่อวงจรภายนอกแบบขนาน (PPI) ที่มีการจัดสรรตำแหน่ง (Address-decoder) ต่างๆทั้งหน่วยความจำและตำแหน่งของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางฮาร์ดแวร์อื่นๆ สำหรับการพัฒนาระบบแบบเอนกประสงค์ ดังนั้นจึงทำให้สามารถลดเวลาในการพัฒนาระบบไร้เลย์บ็อกกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดระบบของชิพสนับสนุนไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมทั้งระบบหน่วยความจำลงได้อย่างมาก ทำให้การพัฒนาระบบทั้งหมดจึงไปอยู่ที่ระบบการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและการพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดซึ่งในส่วนของซอฟต์แวร์ควบคุมระบบจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 4.3 สำหรับโครงสร้างของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นแสดงดังรูปที่ 4-11 และ 4-11(b) ส่วนระบบที่ใช้เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแสดงผลแสดงดังรูปที่ 4-11(c) , และ 4-11(d) โดยที่รูปที่ 4-11(c) เป็นส่วนของการติดต่อกับผู้ใช้ผ่านคีย์สวิตช์ และจอแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD) ส่วนรูปที่ 4-11(d) นั้นเป็นอุปกรณ์แสดงผลสถานะของการตั้งฟังก์ชันการป้องกัน (F1-F8) และผลของการป้องกัน (TRIP) ในแต่ละฟังก์ชัน(F1-F8 TRIP- Indicator)

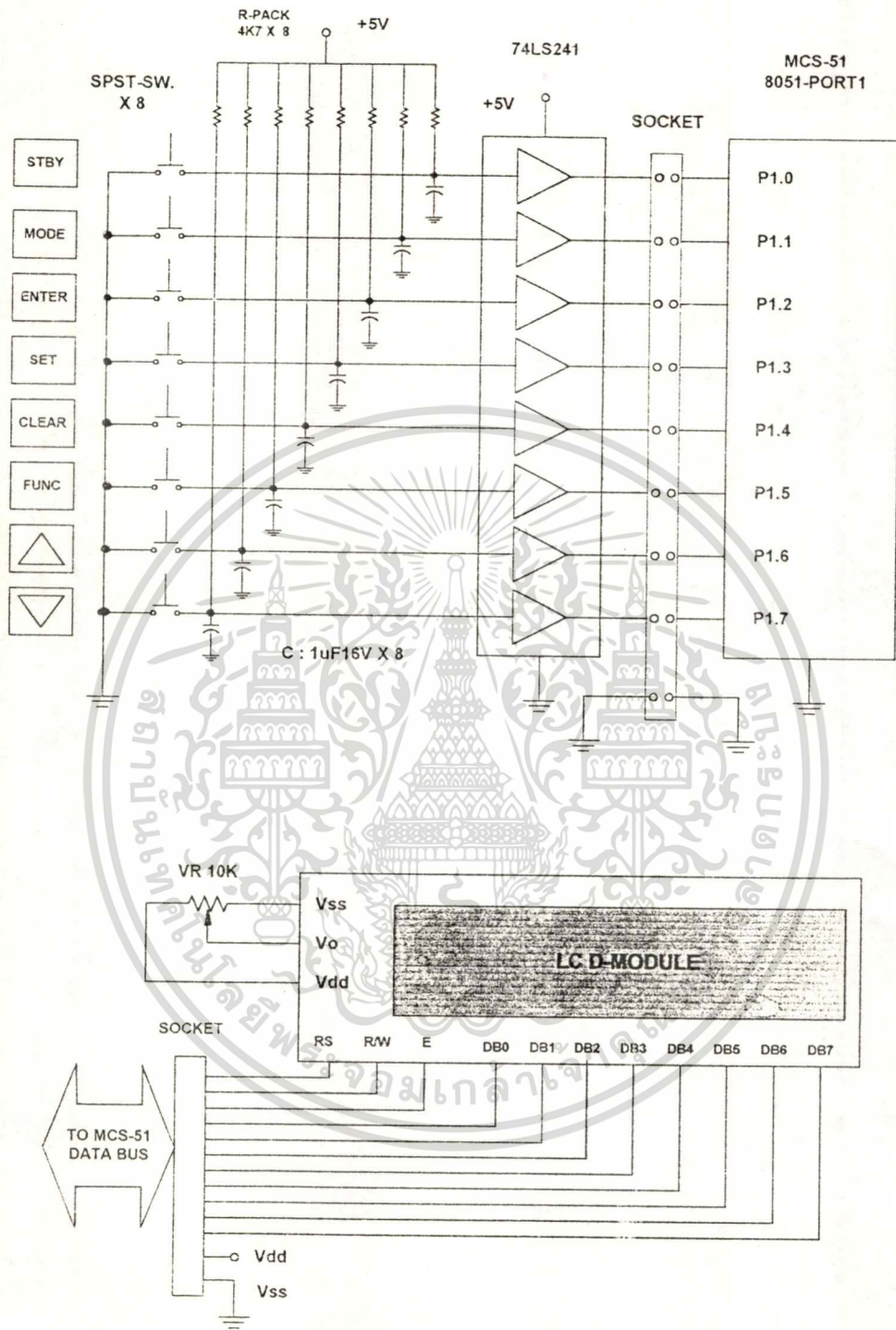


รูป 4-11 (a) ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม -1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

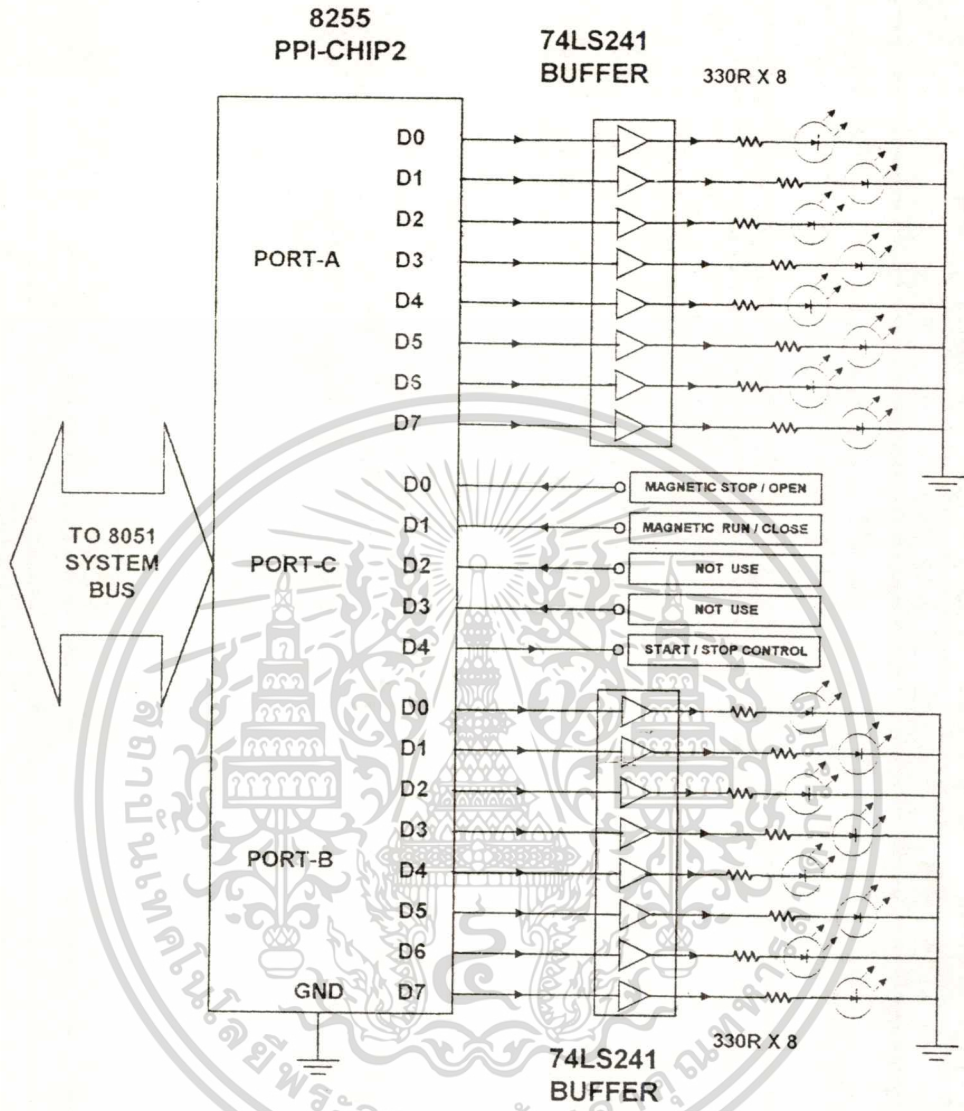
Title	SYSTEM
Size	Document Number
Date	December 5, 1992
Sheet	07
REV	1





รูป 4-11(c) ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

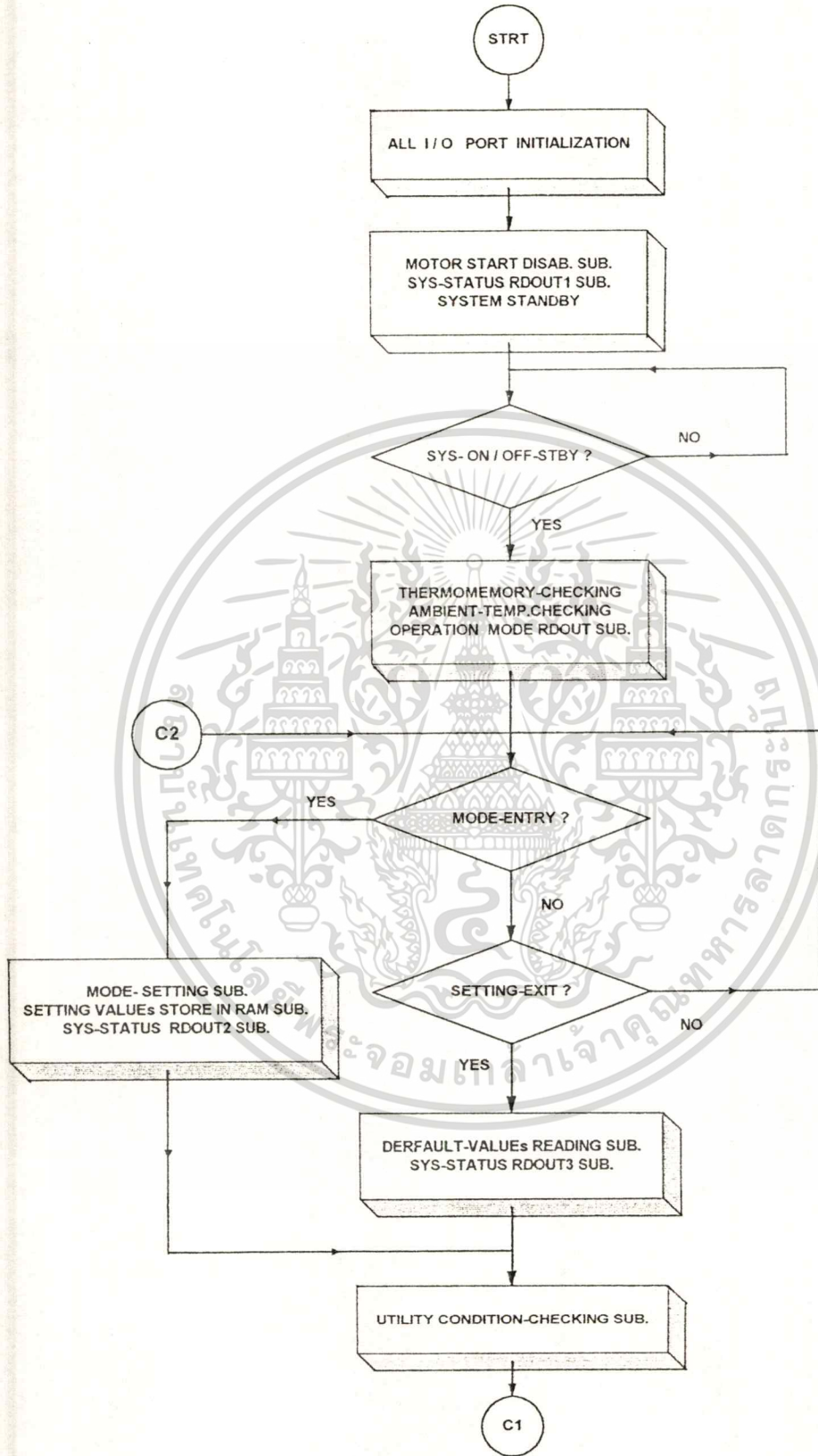


รูป 4-11 (d) ส่วนของการแสดงผลการป้องกัน (Alarms)

4.3 การออกแบบสร้างซอฟต์แวร์

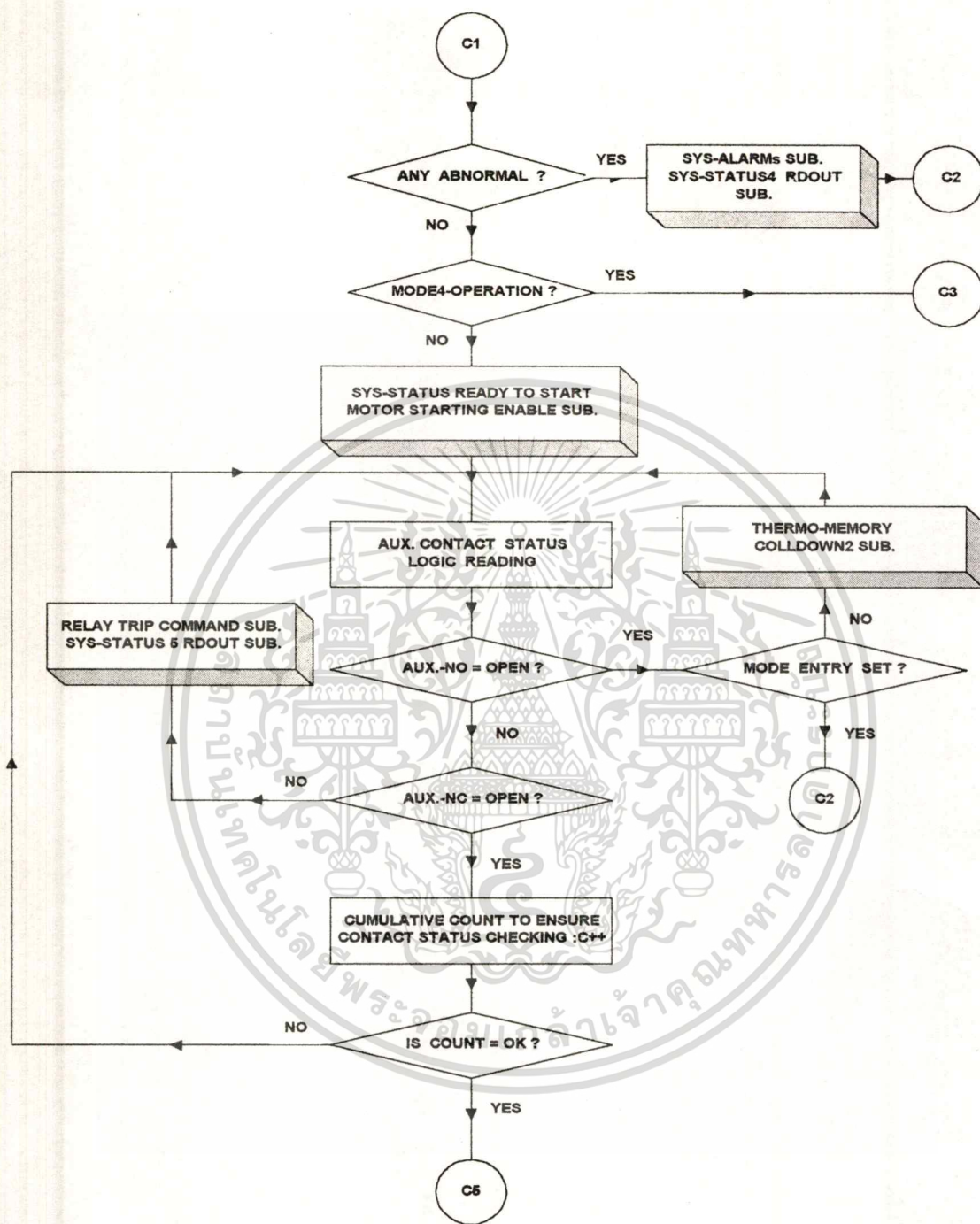
ในหัวข้อนี้จะกำหนดโครงสร้างของซอฟต์แวร์ที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดและหลักการของซอฟต์แวร์ควบคุมจะอธิบายแยกที่ละส่วนๆ โดยแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์กันในลักษณะของการเรียกใช้โปรแกรมบริการ (Subroutines) ส่วนต่างๆ การส่งผ่านค่าการทำงานในส่วนของโปรแกรมบริการต่างๆ ให้กับโปรแกรมหลัก เป็นต้น จากนั้นจะแสดงหลักการ (Concept) ของแต่ละส่วนที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ในรูปของแผนผังการทำงาน (Flowcharts) ของโปรแกรมแต่ละส่วนต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



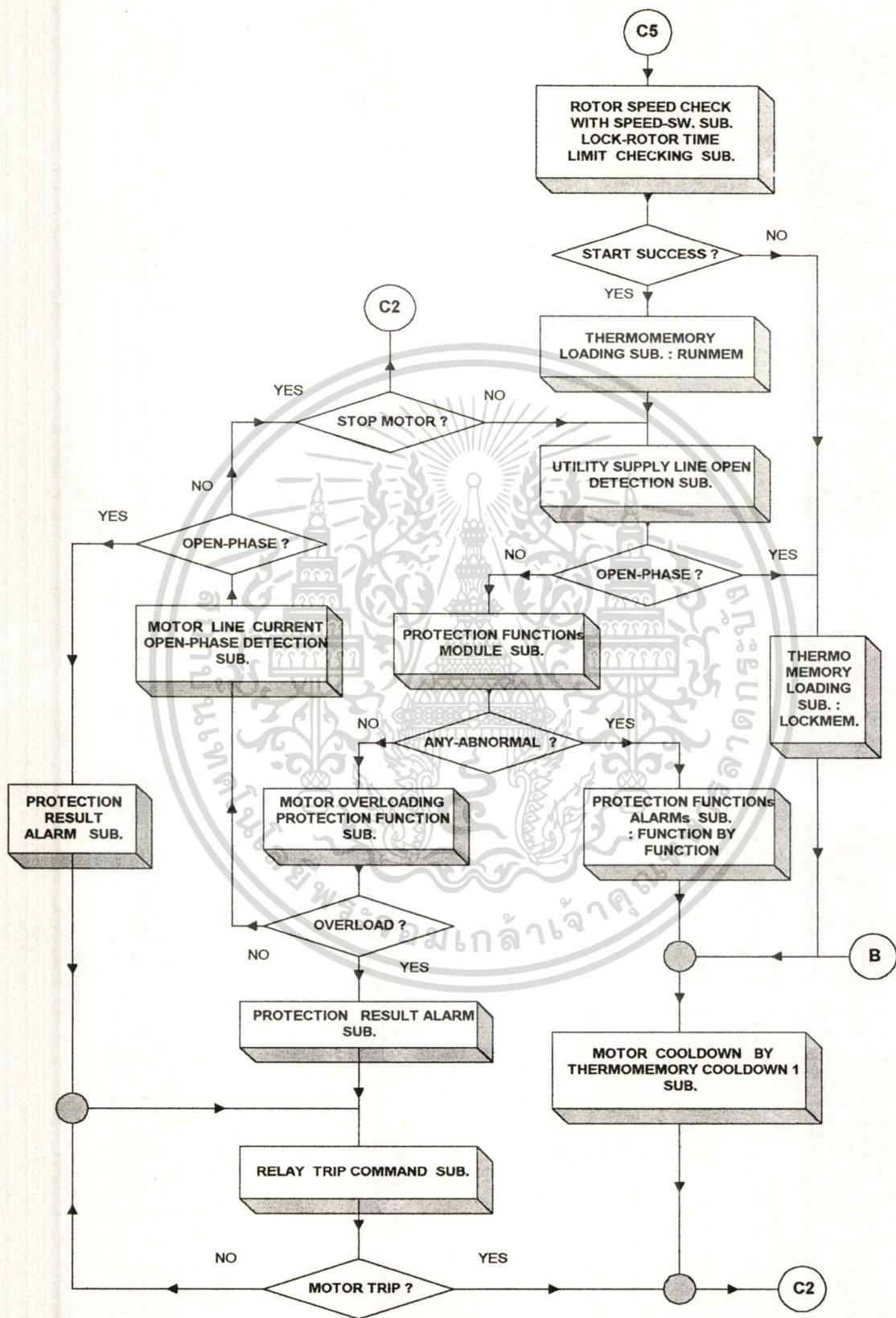
รูป 4-12(a) โปรแกรมหลัก 1/4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



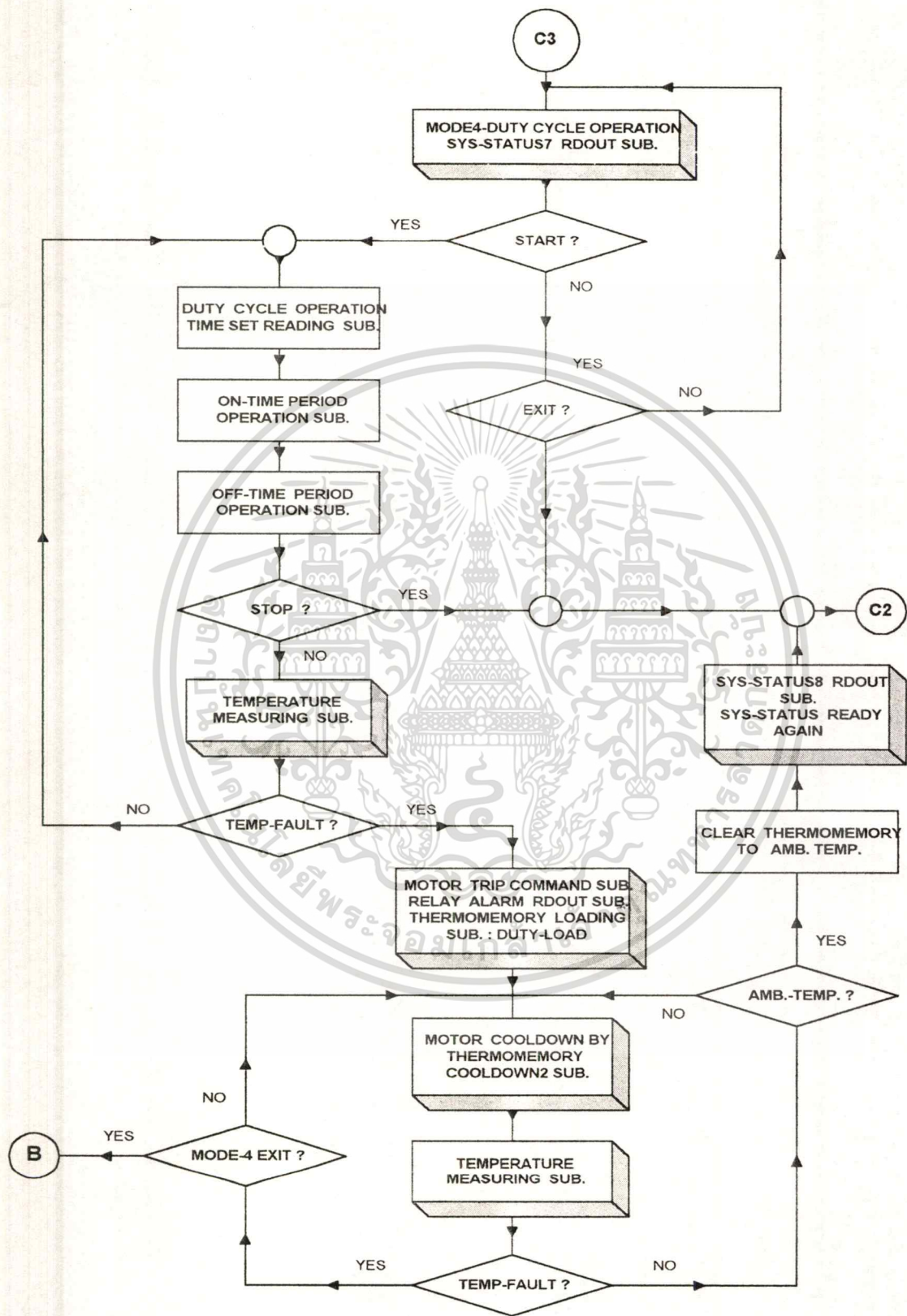
รูป 4-12 (b) โปรแกรมหลัก 2 / 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



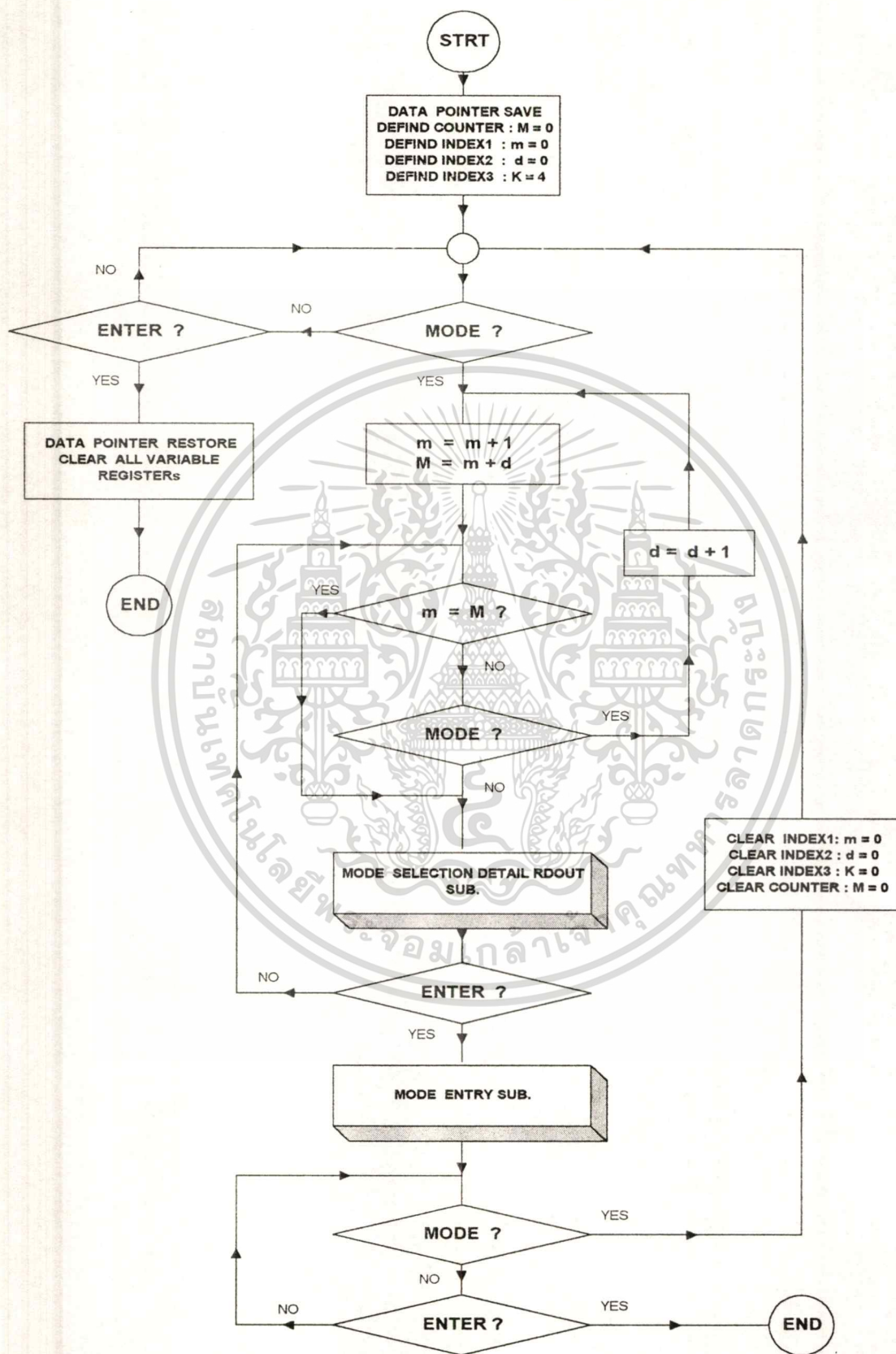
รูป 4-12 (c) โปรแกรมหลัก 3 / 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-12 (d) โปรแกรมหลัก 4 / 4

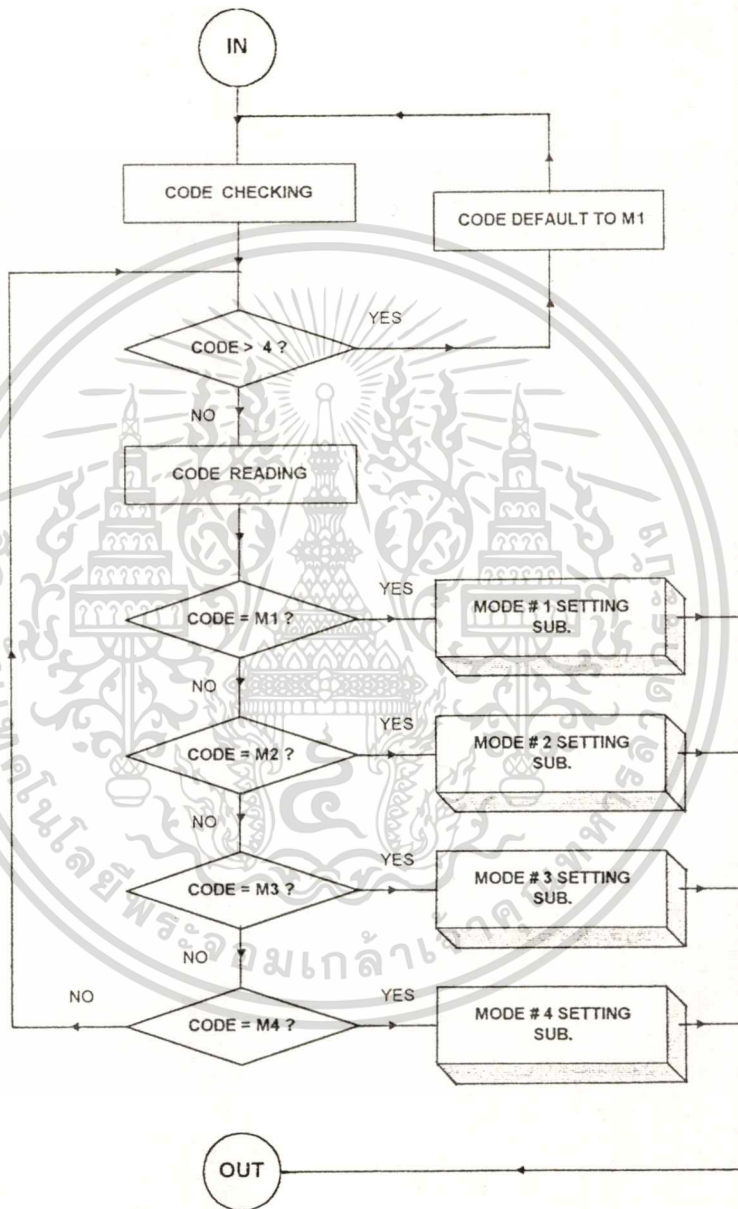
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-13 (a) โปรแกรมย่อยเลือกการทำงาน (MODE) 1/2

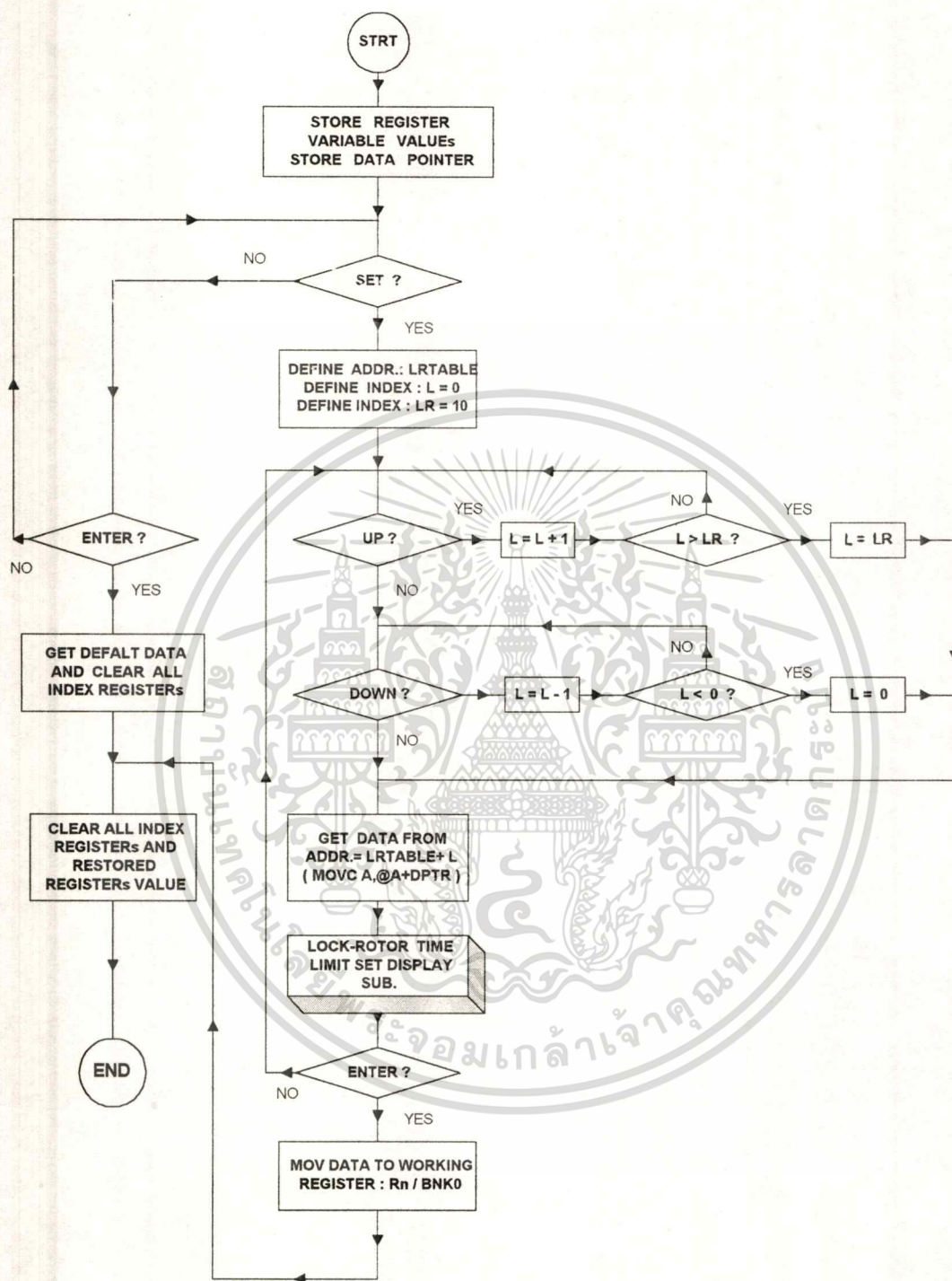
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

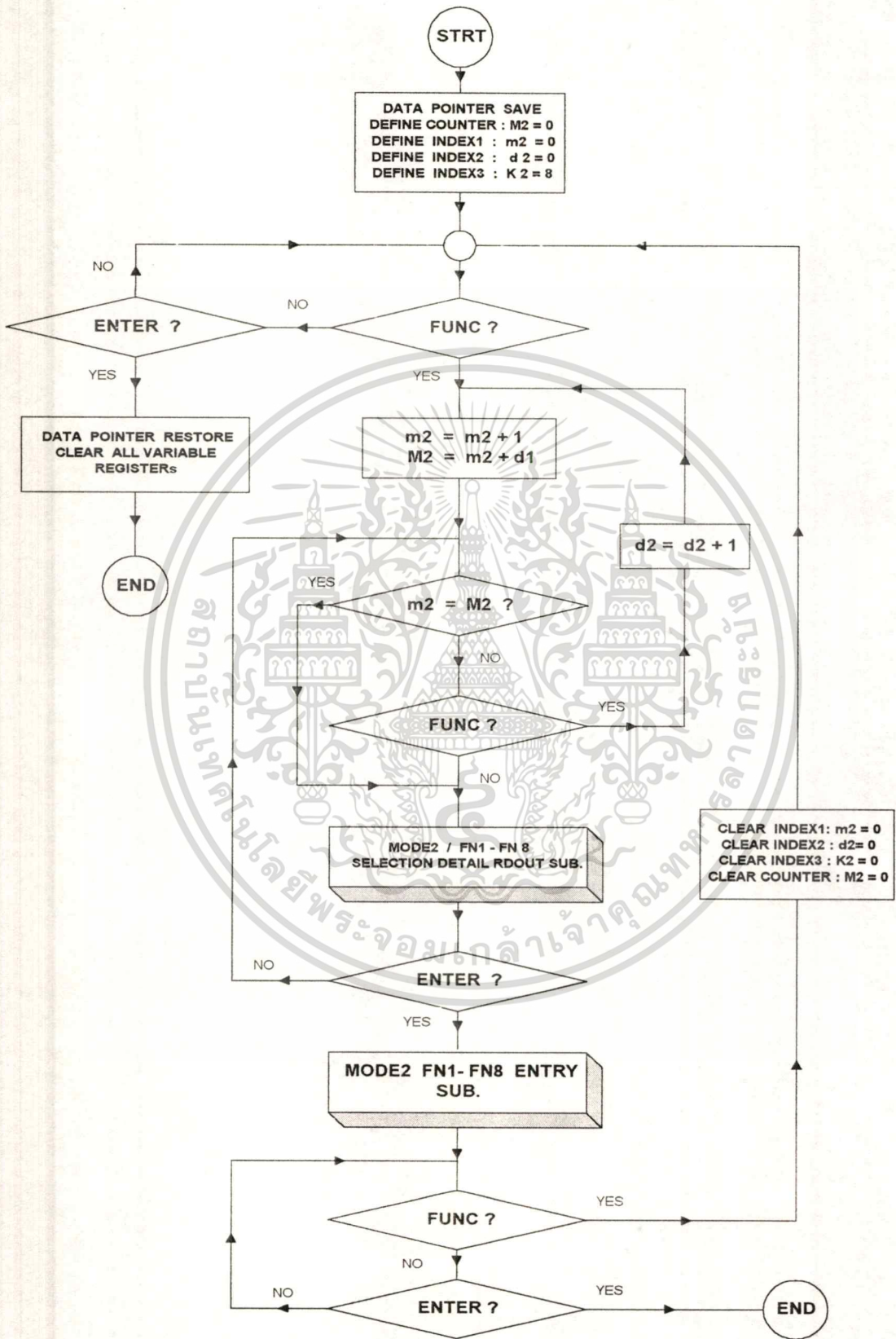


รูป 4-13(b) โปรแกรมย่อยเลือกการทำงาน (MODE) 2/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

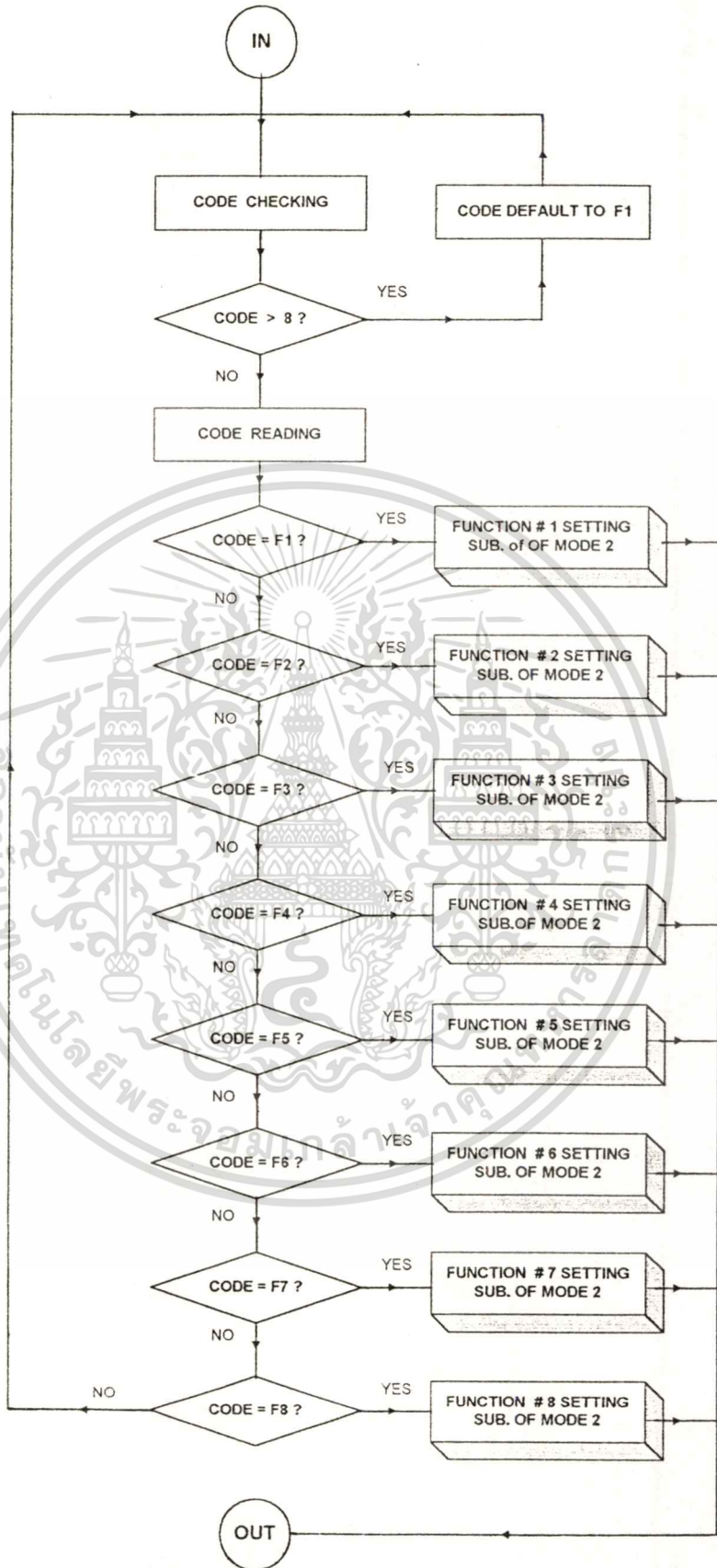


รูป 4-14 โปรแกรมย่อยการเลือกค่าเวลาต็อครอเตอร (MODE 1)



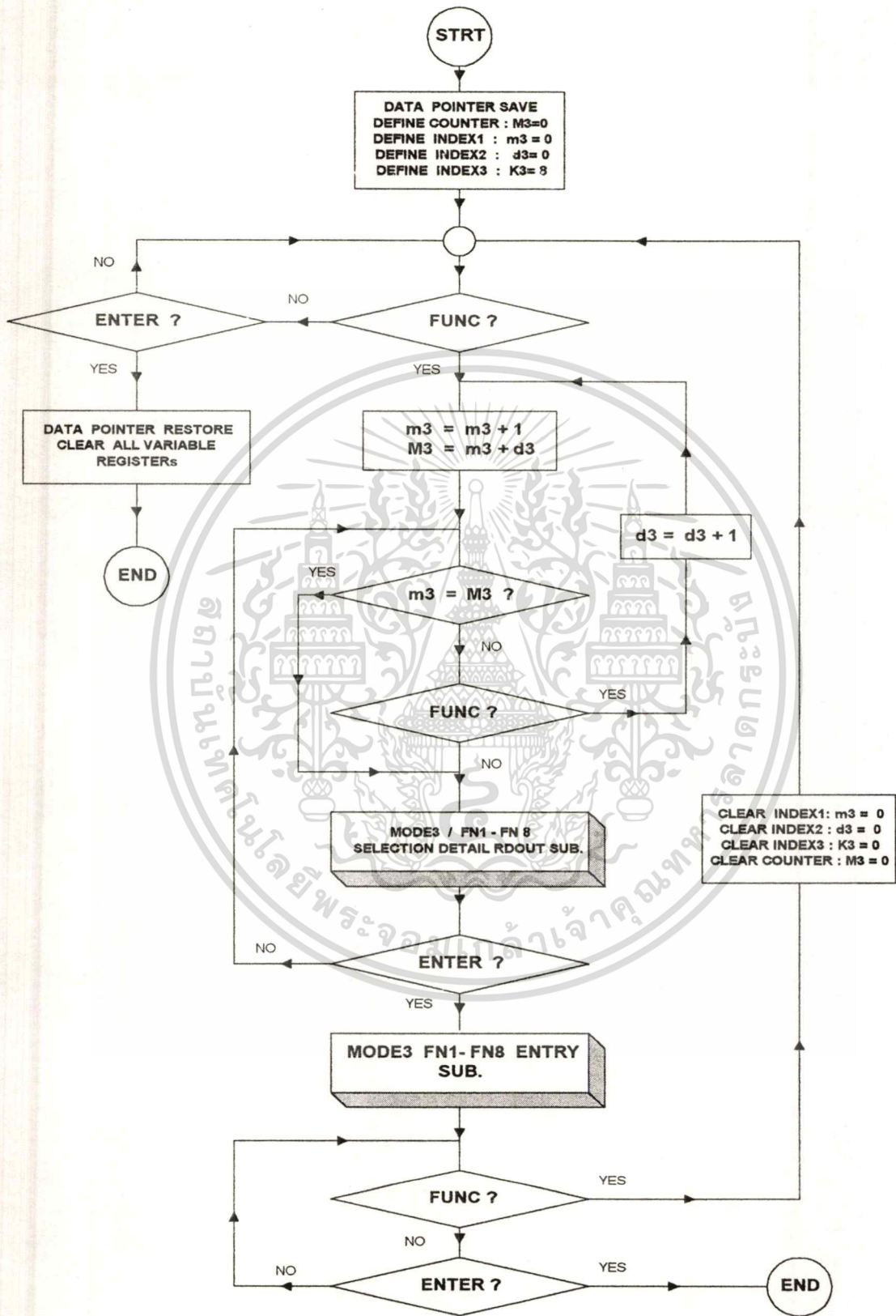
รูป 4-15 (a) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE2) 1/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



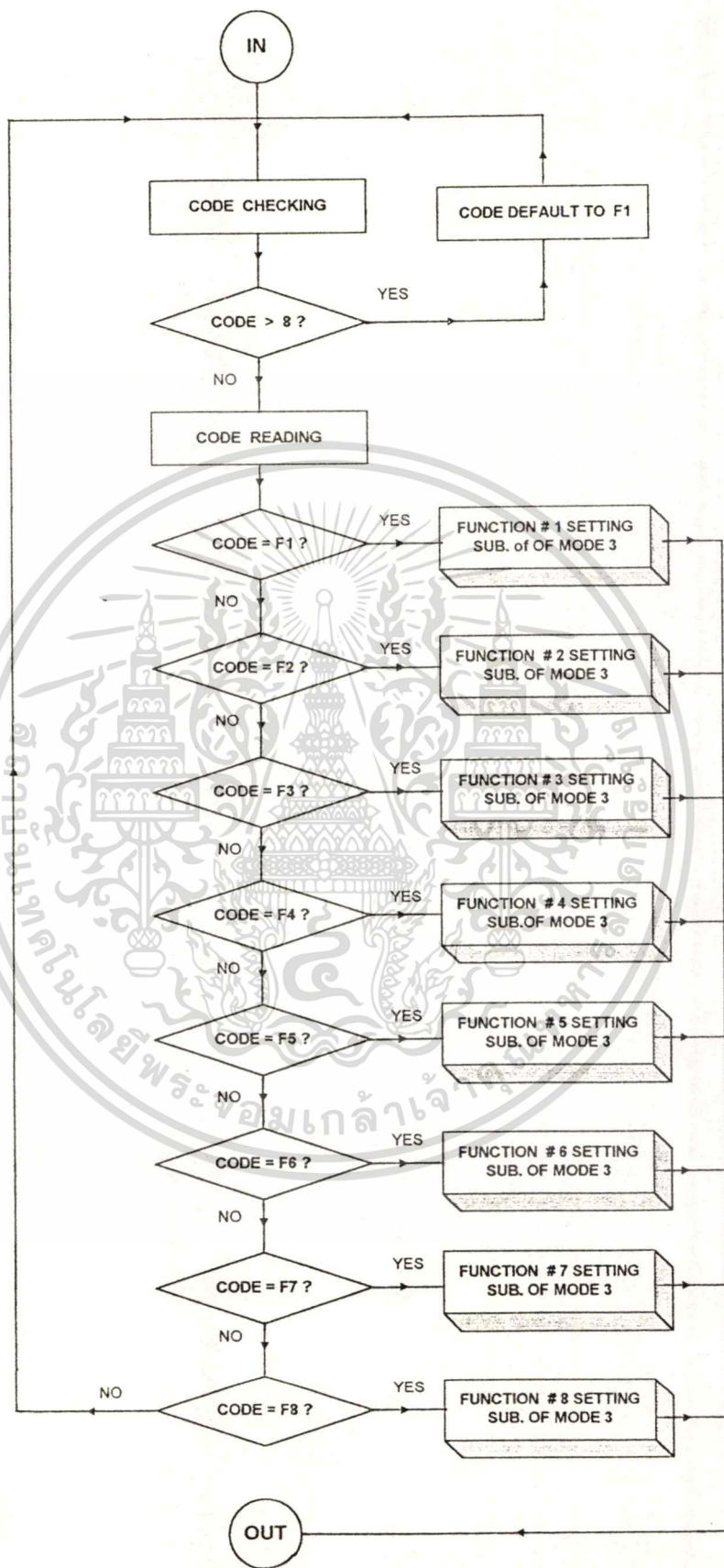
รูป 4-15(b) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE2) 2/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



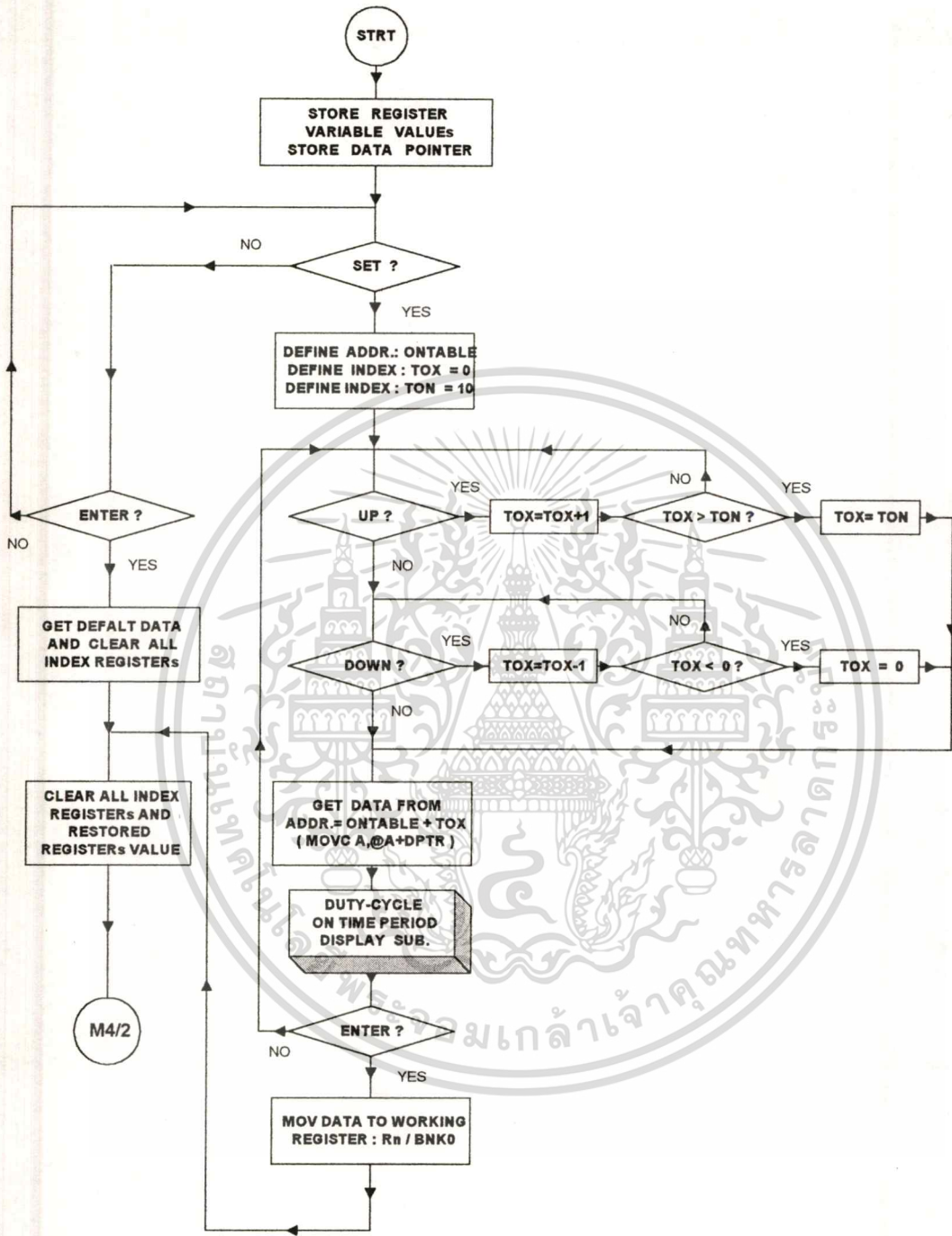
รูป 4-16 (a) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE 3) 1 / 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

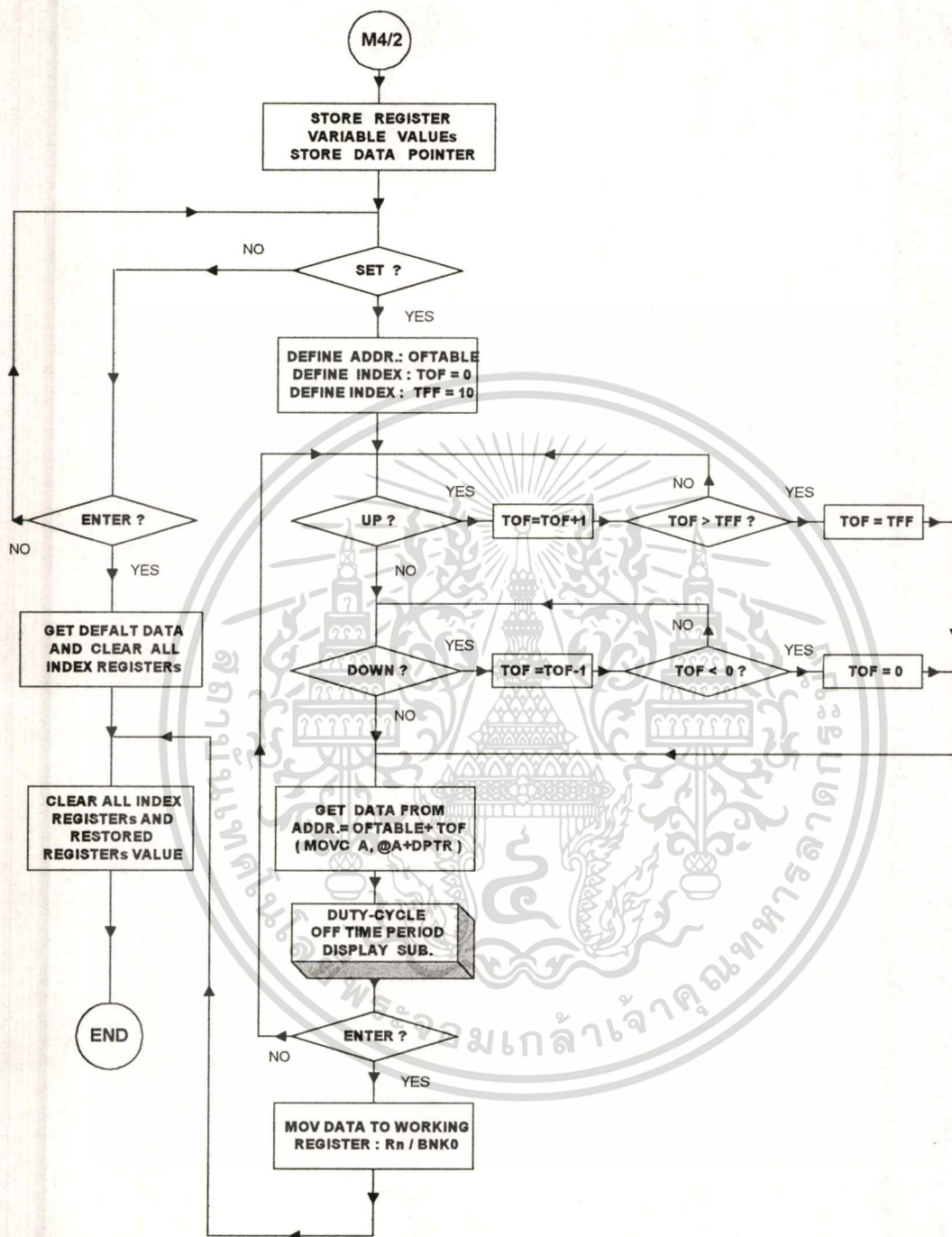


รูป 4-16(บ) โปรแกรมย่อยการเลือกฟังก์ชัน (MODE3) 2/2

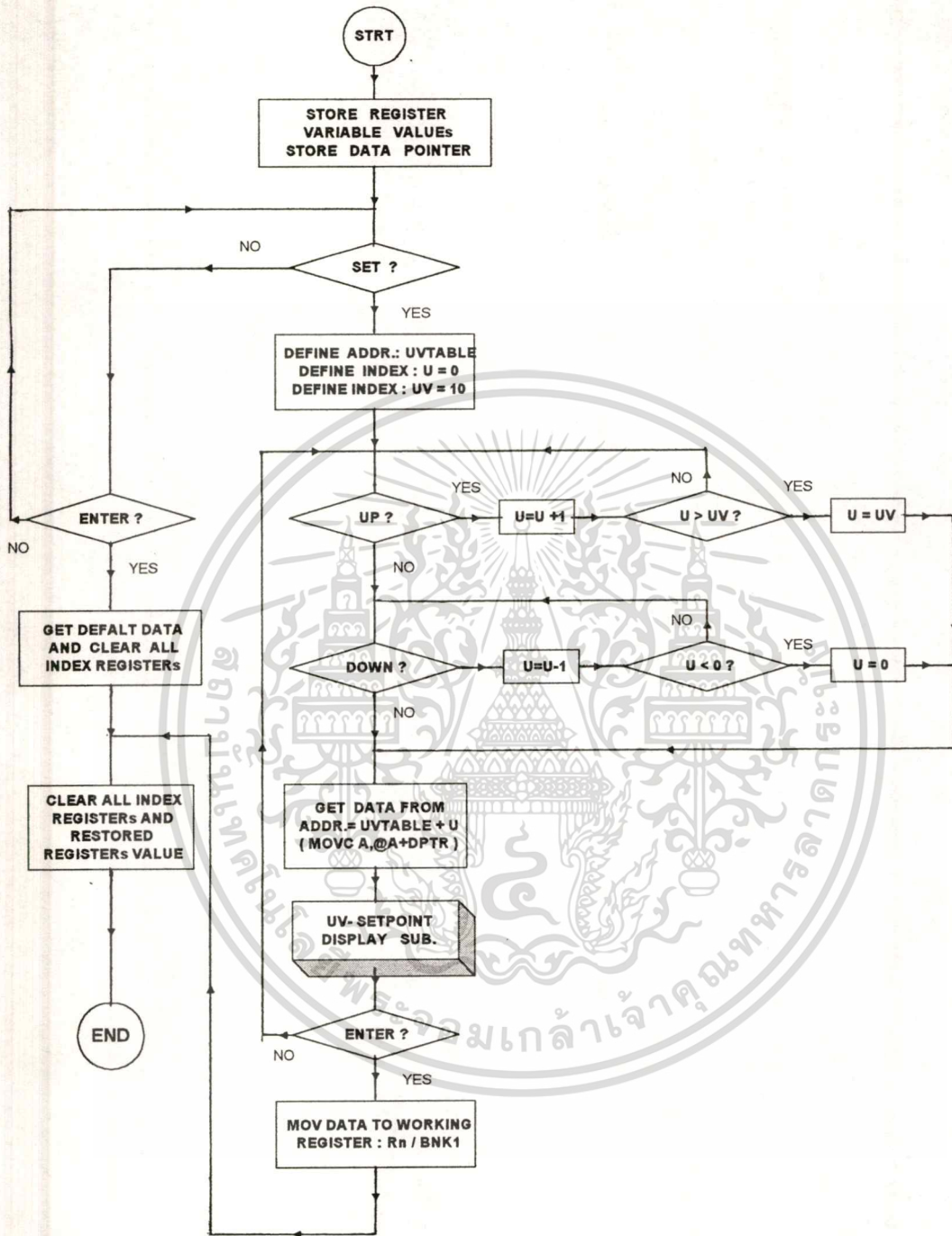
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโครงการวิจัยที่ดำเนินการโดยศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เมื่อผู้ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



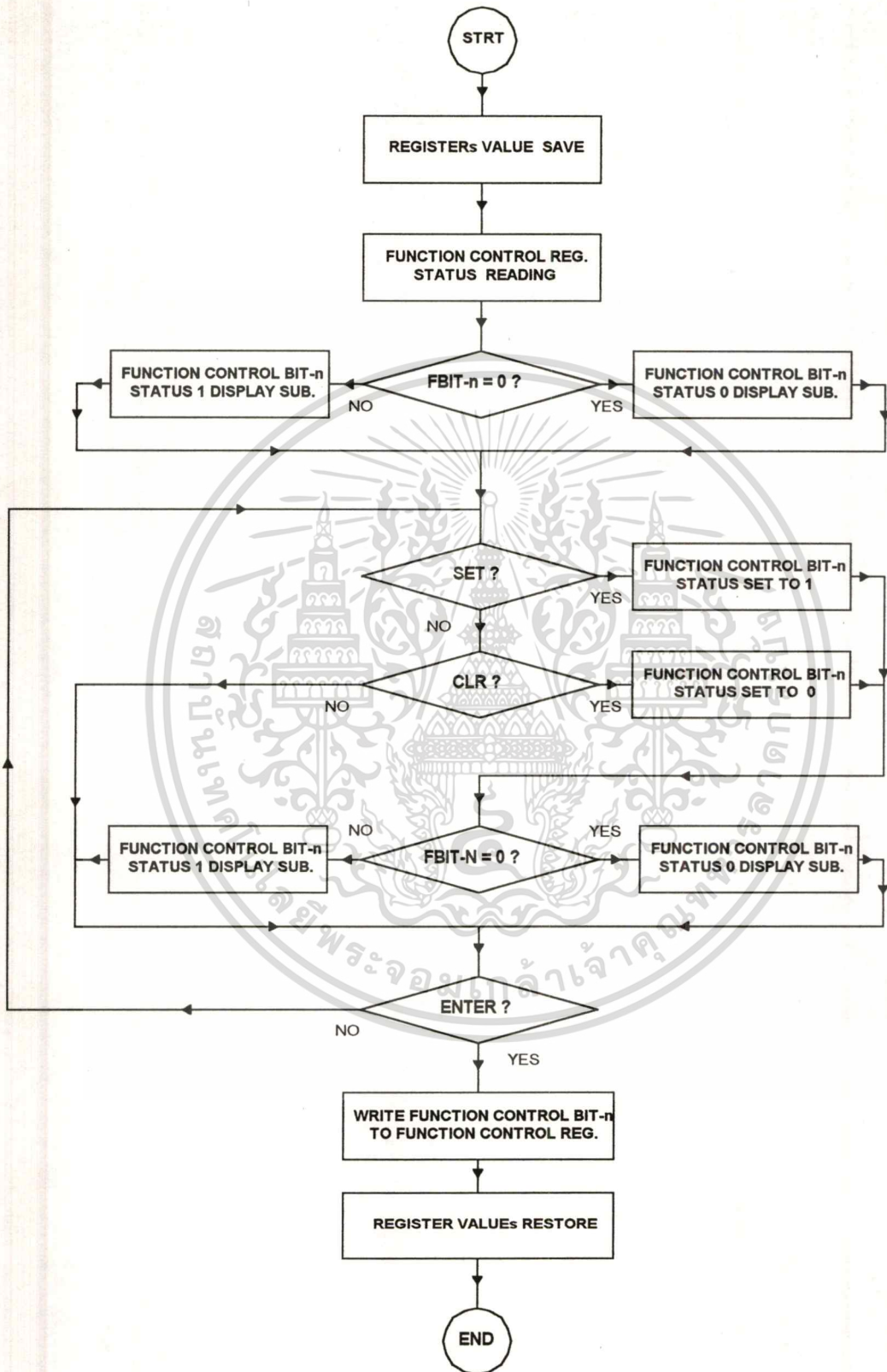
รูป 4-17 (a) โปรแกรมย่อยการตั้งค่าใน MODE 4 1 / 2



รูป 4-17 (b) โปรแกรมย่อยการตั้งค่าใน MODE4 2 / 2

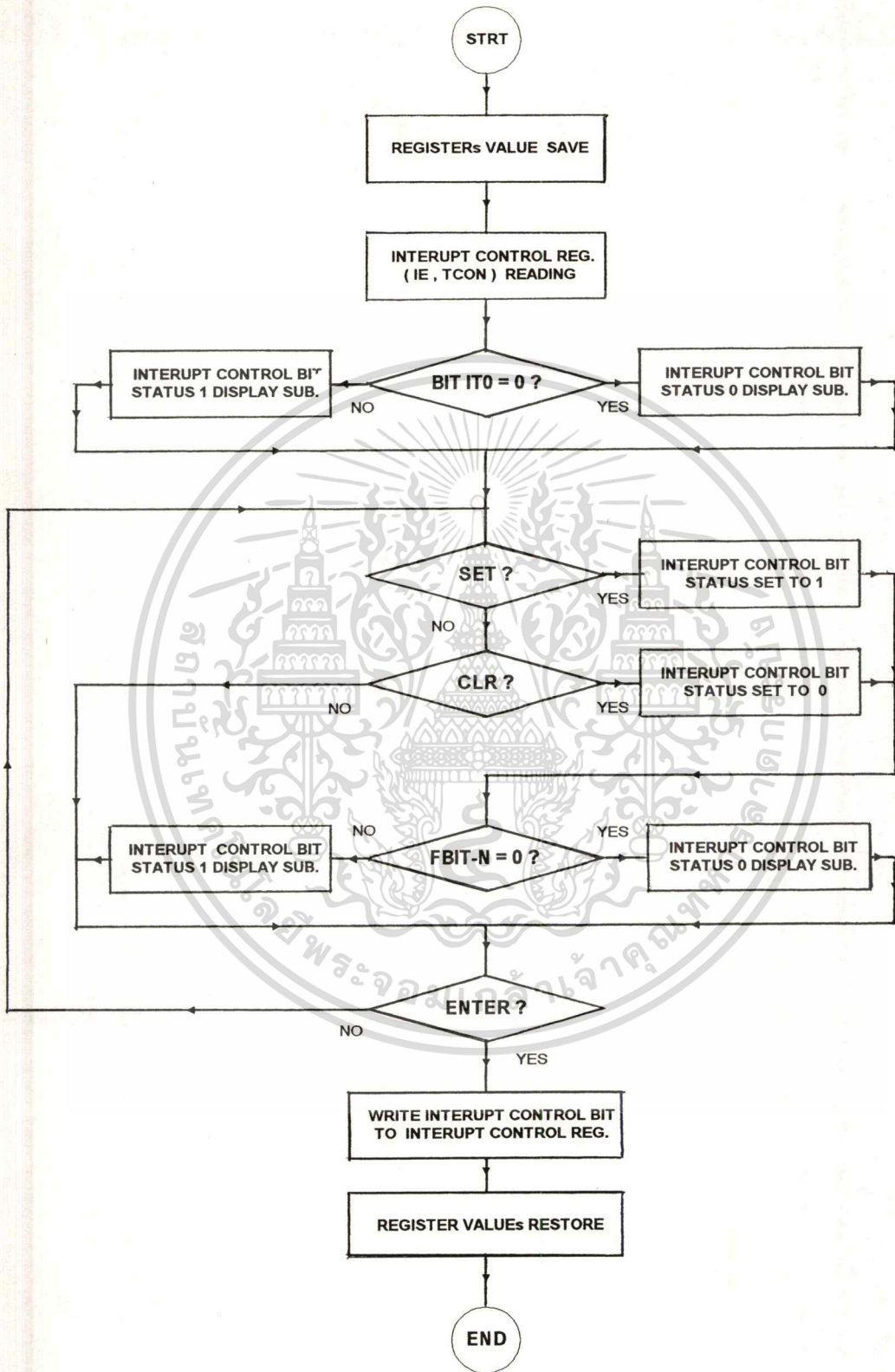


รูป 4-18 โปรแกรมย่อยการตั้งค่าสำหรับการป้องกันแรงดันต่ำ (Function Setting)



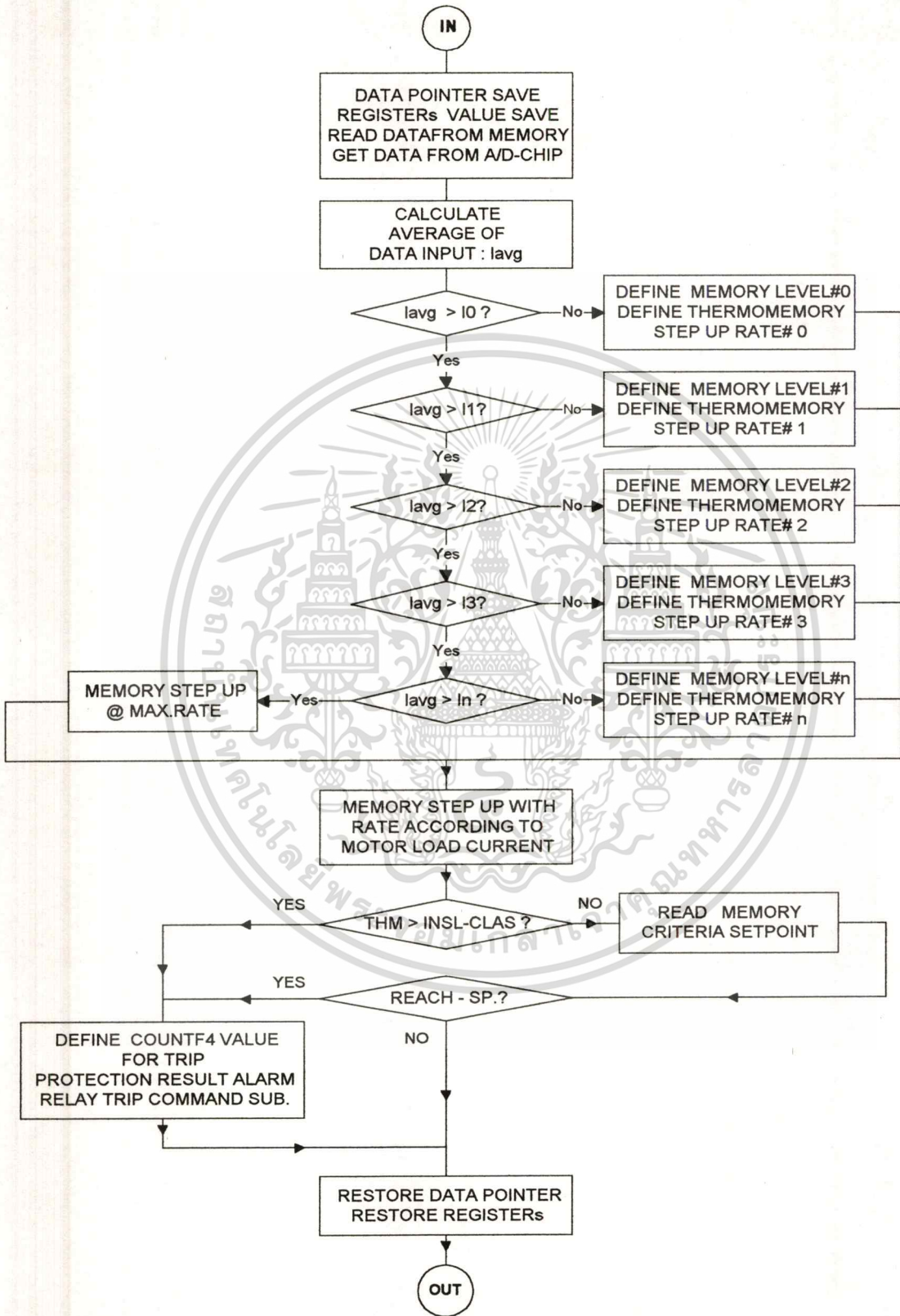
รูป 4-19 โปรแกรมย่อยการตั้งค่าสำหรับการทำงาน / ไม่ทำงานในแต่ละฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



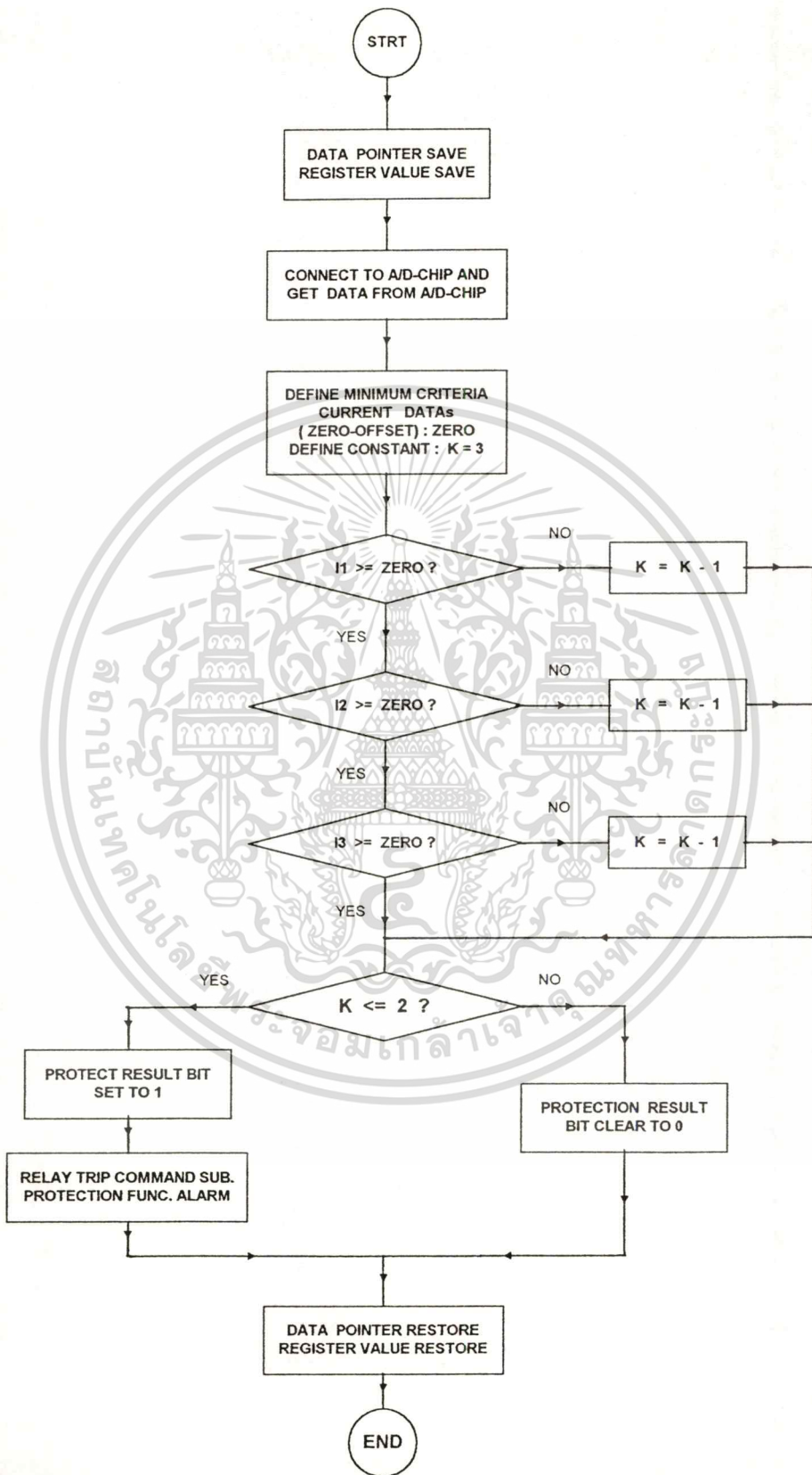
รูป 4-20 โปรแกรมย่อยการตั้งค่าการทำงานอินเตอร์รัพต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

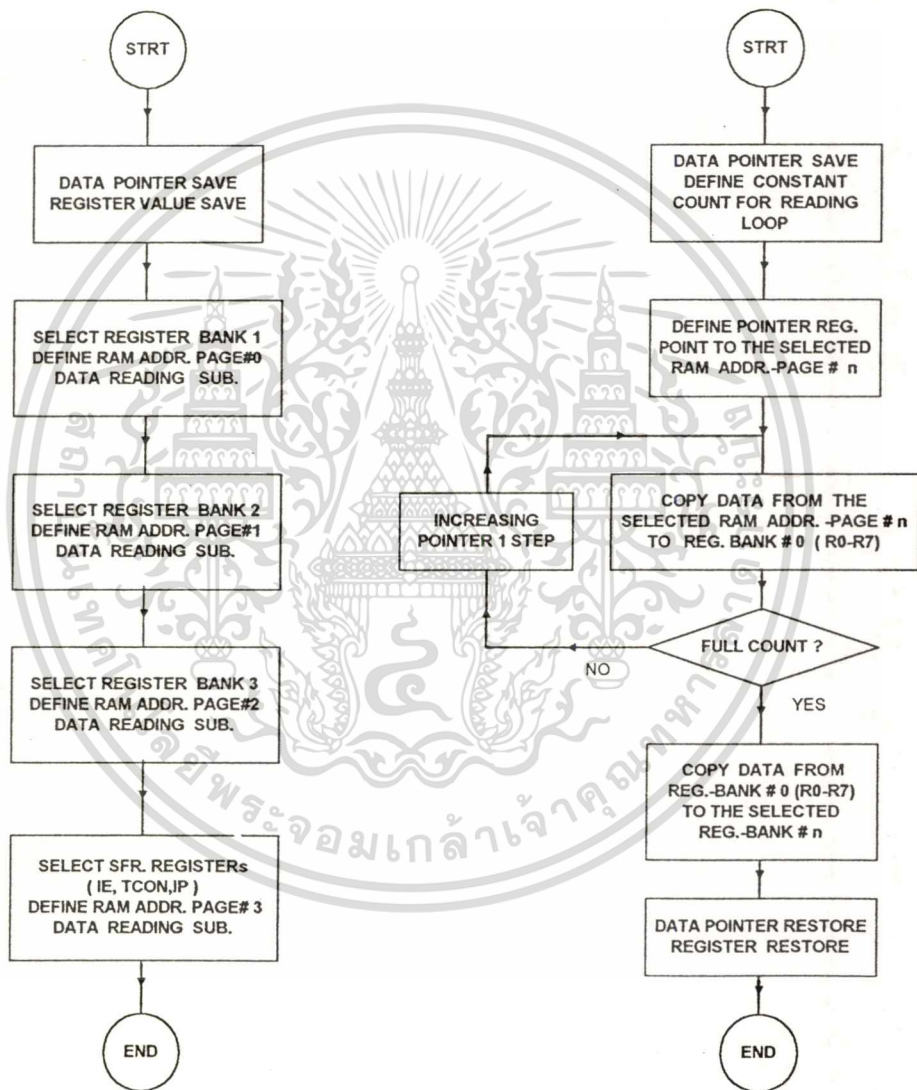


รูป 4-21 โปรแกรมย่อยฟังก์ชันการป้องกันโหลดเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

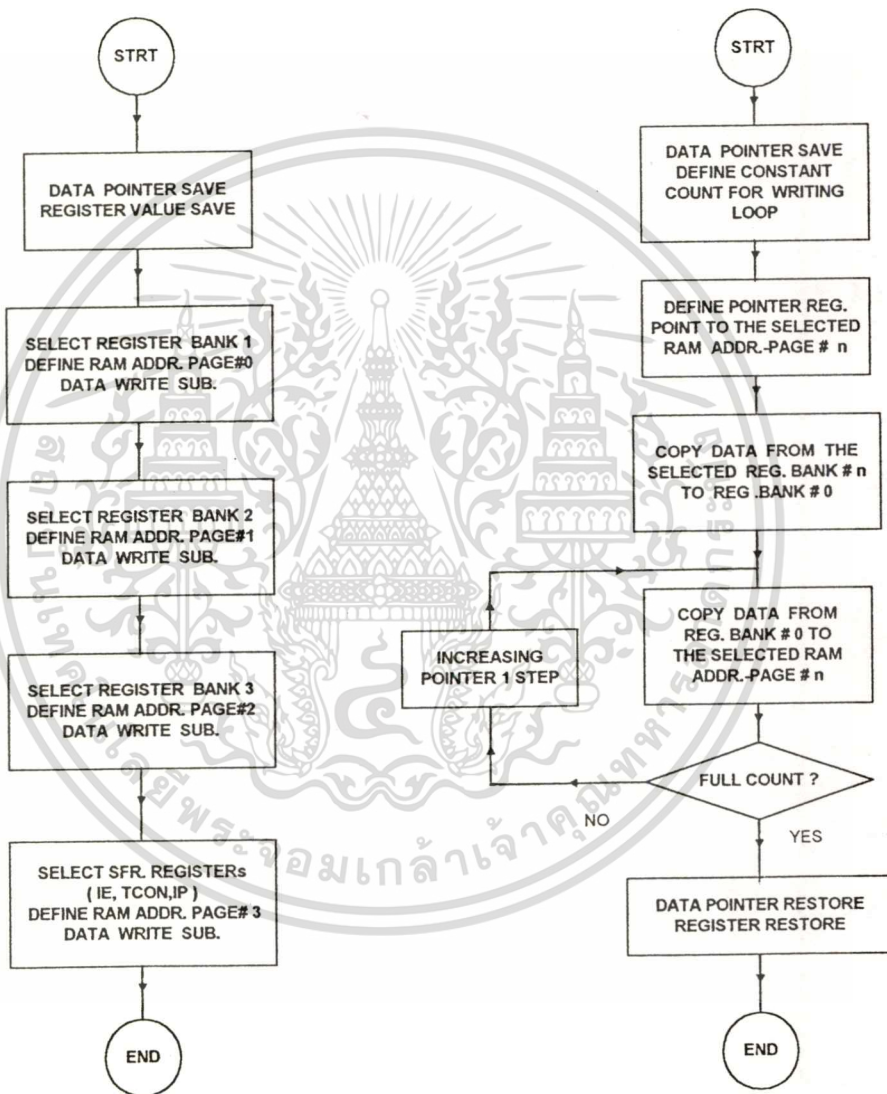


รูป 4-22 โปรแกรมย่อยฟังก์ชันการป้องกันการขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



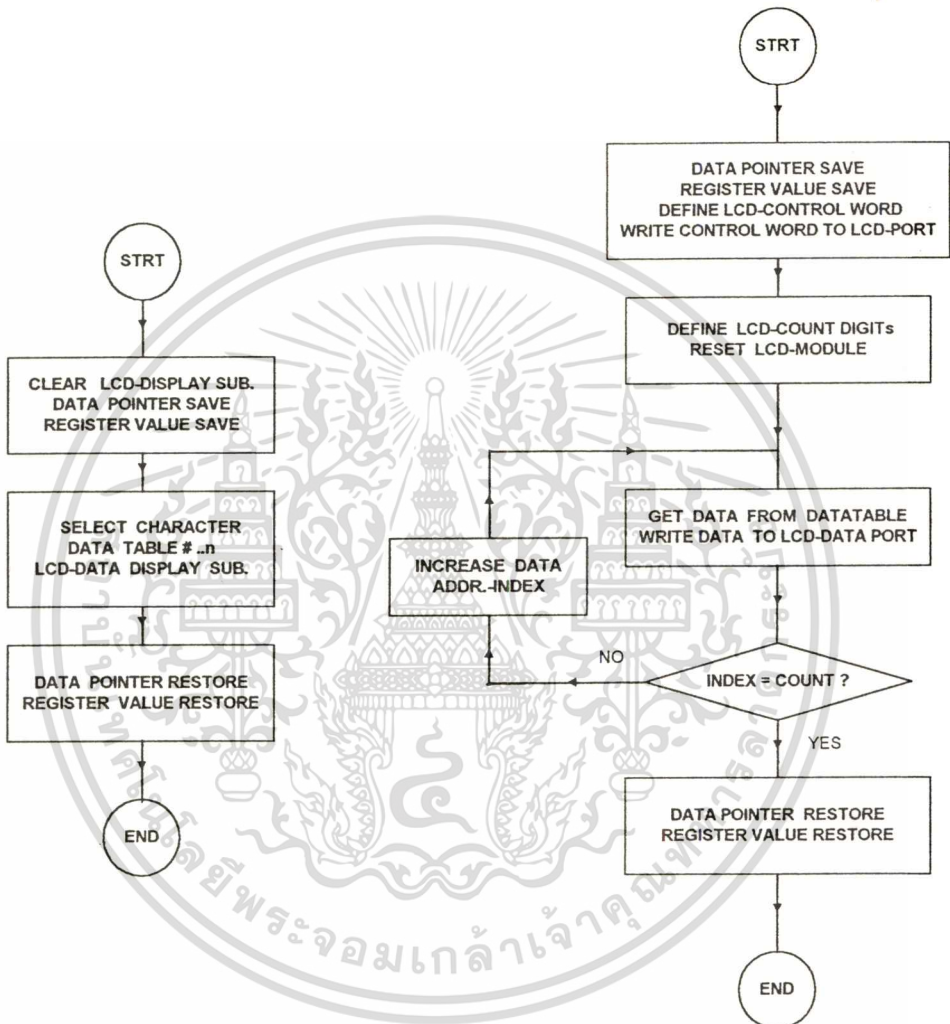
รูป 4-23 โปรแกรมข้ชอการอ่านค่าปรับตั้งของแต่ละฟังก์ชันจาก RAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

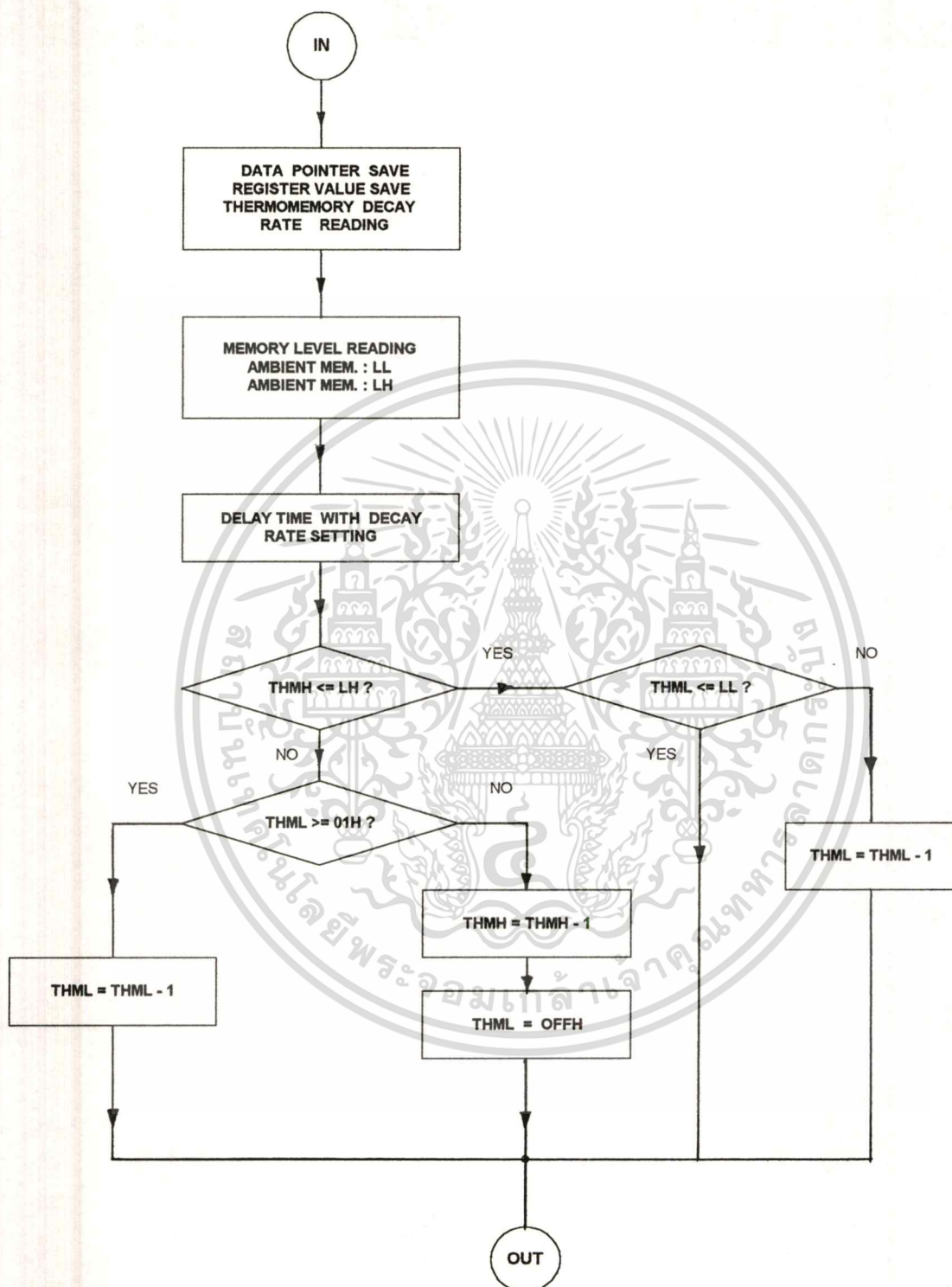


รูป 4-24 โปรแกรมช่วยการเขียนค่าปรับตั้งแต่ละฟังก์ชันลงใน RAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-25 โปรแกรมย่อยการแสดงผลการทำงานด้วย LCD สำหรับใน-  
แต่ละสถานะการทำงานของระบบปริ้นท์



รูป 4-27 โปรแกรมย่อยจำลองการลดค่าในหน่วยความจำความร้อน (COOLDOWN2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

จากผังงานฟังก์ชันการป้องกันในบทที่3และผังงานโครงสร้างหลักของการควบคุมการทำงานทั้งหมดในบทที่4ได้ทำการเขียนโปรแกรมขึ้นด้วยภาษาเครื่องของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8051 (MCS-51 Assembly Language) แล้วทำการแปลงให้เป็นรหัสคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 (Machine Code) ที่สามารถทำงานได้ทันที ด้วยการใช้โปรแกรมการแปลงคำสั่ง (Cross Assembler) C32D จะทำให้ได้ชุดคำสั่ง ภาษาเครื่องเป็นเลขฐาน 16 (Object Code) จากนั้นนำไปบันทึกลงในหน่วยความจำถาวรชนิด EPROM ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้นำชุดคำสั่งนี้ไปประมวลผลต่อไป, ในส่วนของบอร์ดที่ใช้ควบคุมนั้นใช้บอร์ดสำเร็จรูปที่มีอุปกรณ์ชีพสนับสนุนการทำงานหลายชนิดในบอร์ดเดียวกันเช่น พอร์ตขนาน (8255-PPI), หน่วยความจำชั่วคราวที่อ่านเขียนได้ (RAM) ซึ่งแสดงไว้แล้วในรูปที่ 4-11(a) และ (b), ส่วนบอร์ดอุปกรณ์การแปลงสัญญาณจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอลนั้นได้สร้างขึ้นโดยใช้ชีพสำเร็จรูปเบอร์ ADC-0808 แสดงดังรูปที่ 4-10, ในส่วนของการใช้ติดต่อกับผู้ใช้งานได้ใช้สวิทช์และอุปกรณ์แสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD) แสดงดังรูปที่ 4-11(c) ซึ่งทั้งหมดแสดงไว้ในบทที่ 4

สำหรับการทดลองที่จะใช้ทดสอบระบบรีเลย์ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนั้นมีการจัดวางดังนี้คือใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ3เฟสขนาด 1 แรงม้า (0.75kW), 4 ขั้วแม่เหล็ก (pole), ชั้นฉนวนชนิด E, ระบายความร้อนด้วยอากาศ (TEAC) ติดตั้งอยู่กับชุดตราชั่งน้ำหนักวัดแรง, ทำการทดสอบที่อุณหภูมิตั้ง 28 องศาเซลเซียส, ในการทดสอบนั้นใช้หม้อแปลงปรับค่าแรงดันได้ 3 เฟส และ 1 เฟสเพื่อใช้เป็นตัวปรับแรงดันในสถานะต่างๆซึ่งจะอ่านค่าจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์, ขณะเดียวกันจะทำการบันทึกสัญญาณพารามิเตอร์ต่างๆที่เกิดขึ้นในการทดสอบนั้นด้วยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Signal Recorder) ซึ่งทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5-1

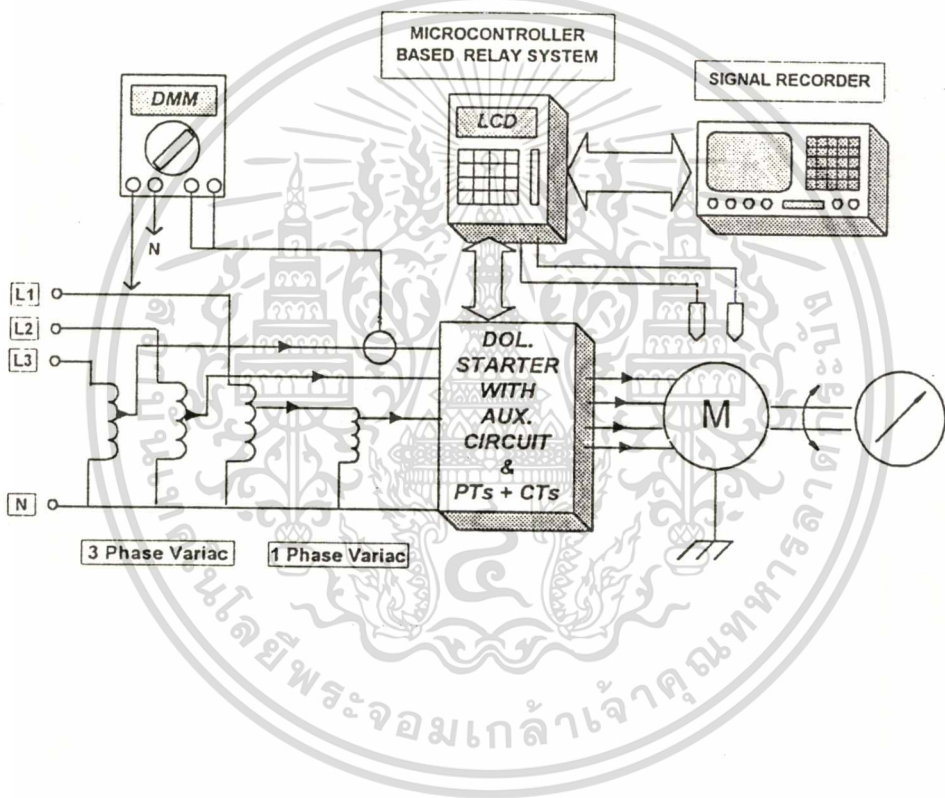
รายการที่จะใช้ทดสอบนั้นมีดังนี้

1. สถานะแรงดันต่ำกว่าปกติ
2. สถานะแรงดันสูงกว่าปกติ
3. สถานะแรงดันไม่สมดุล
4. สถานะโหลดเกิน และ อุณหภูมิเกิน
5. สถานะการลัดโรเตอร์

6. สถานะการขาดหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง

7. สถานะการผิดลำดับเฟส

โดยผลการทดลองแสดงด้วยแถบบันทึกสัญญาณจากเครื่องบันทึกสัญญาณตามลำดับดังนี้



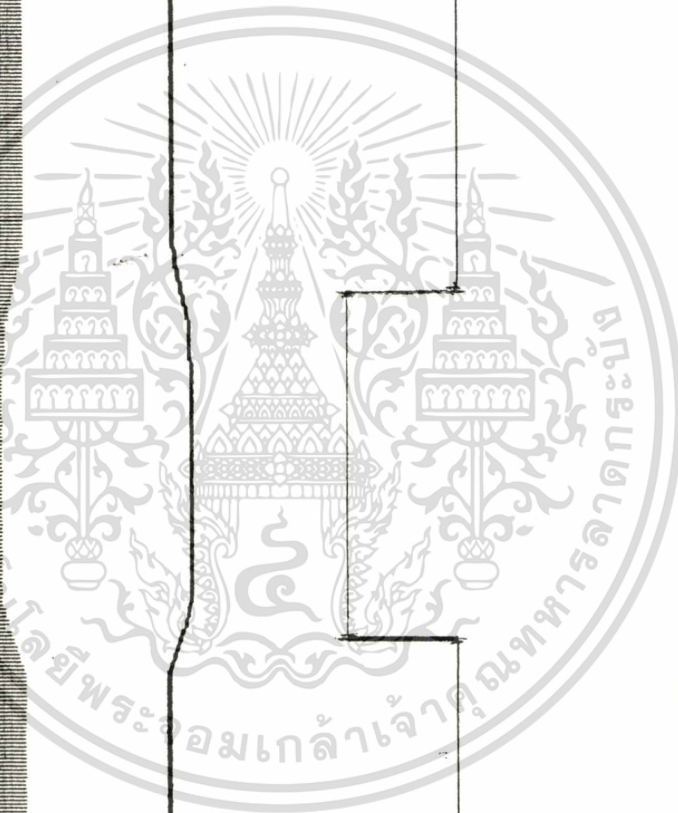
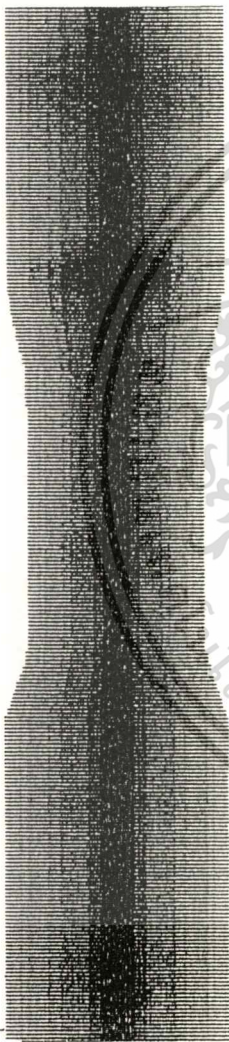
รูปที่ 5-1 การจักระบบทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CH1 : 12.00  
CH2 : 23.00V  
CH4 : 30.00V

CH1 : Range 50V  
CH2 : Range 50V  
CH4 : Range 50V

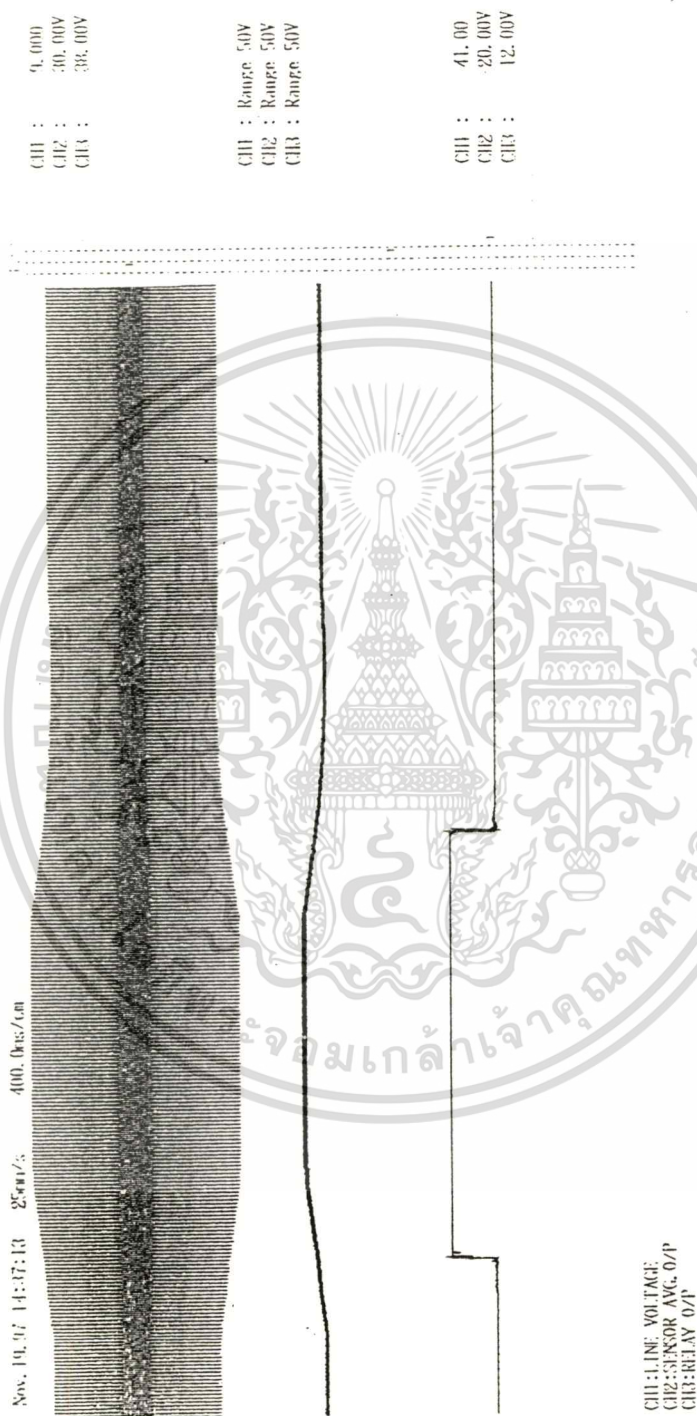
Jan. 11. 98 14:49:03 25mm/s 400.0ms/div



CH1:LINE VOLTAGE  
CH2:SENSOR AVG.0/P  
CH4:RELAY OUTPUT

รูป 5-2 ผลการทดสอบสภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



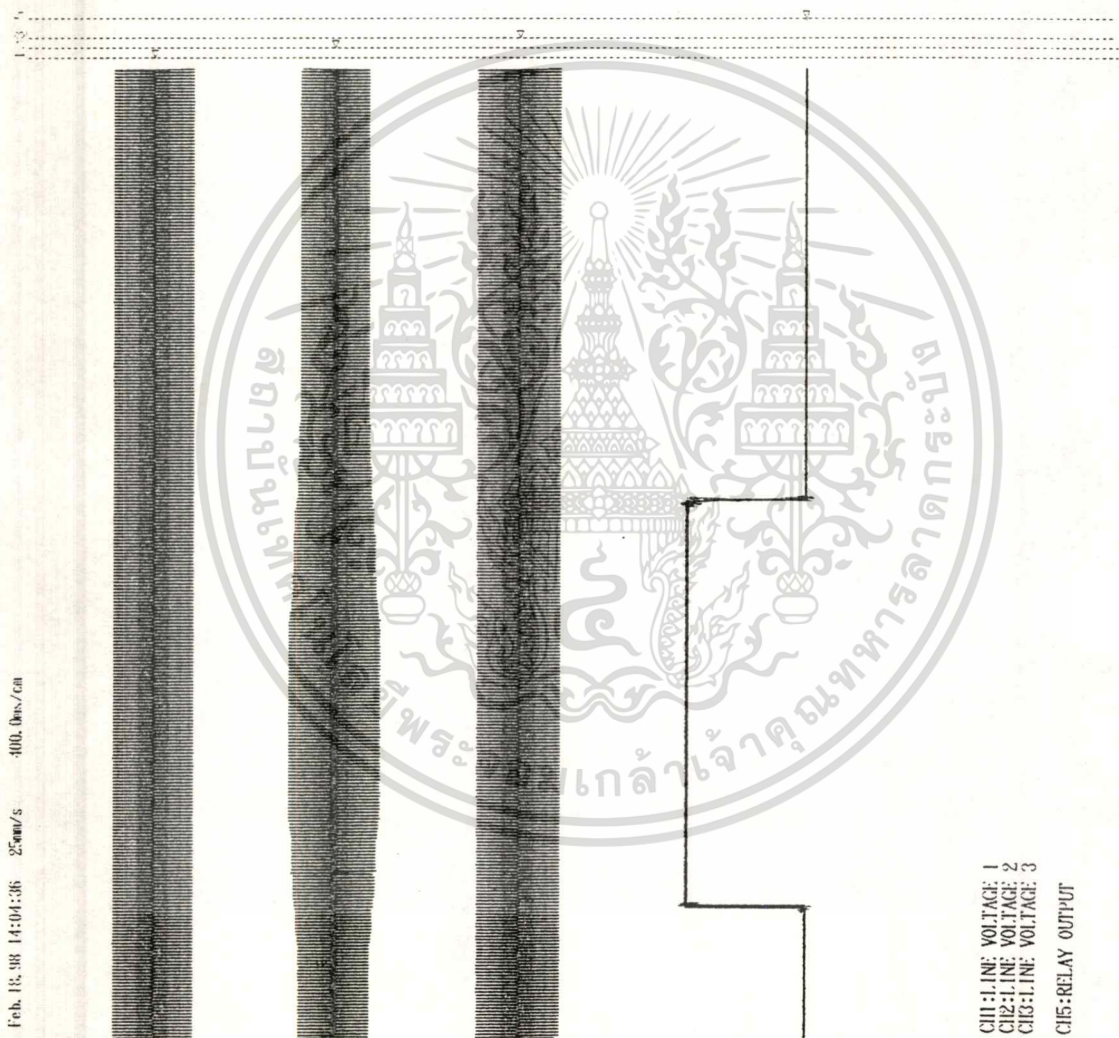
รูป 5-3 ผลการทดสอบสภาวะแรงดันเกินปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CH1 : 5.00V  
 CH2 : 12.00V  
 CH3 : 19.00V  
 CH5 : 30.00V

CH1 : Range 50V  
 CH2 : Range 50V  
 CH3 : Range 50V  
 CH5 : Range 50V

CH1 : -45.00  
 CH2 : -38.00V  
 CH3 : -31.00V  
 CH5 : -20.00V



Feb. 18. 98 14:04:36 25mm/s 400.0ms/cm

CH1:LINE VOLTAGE 1  
 CH2:LINE VOLTAGE 2  
 CH3:LINE VOLTAGE 3  
 CH5:RELAY OUTPUT

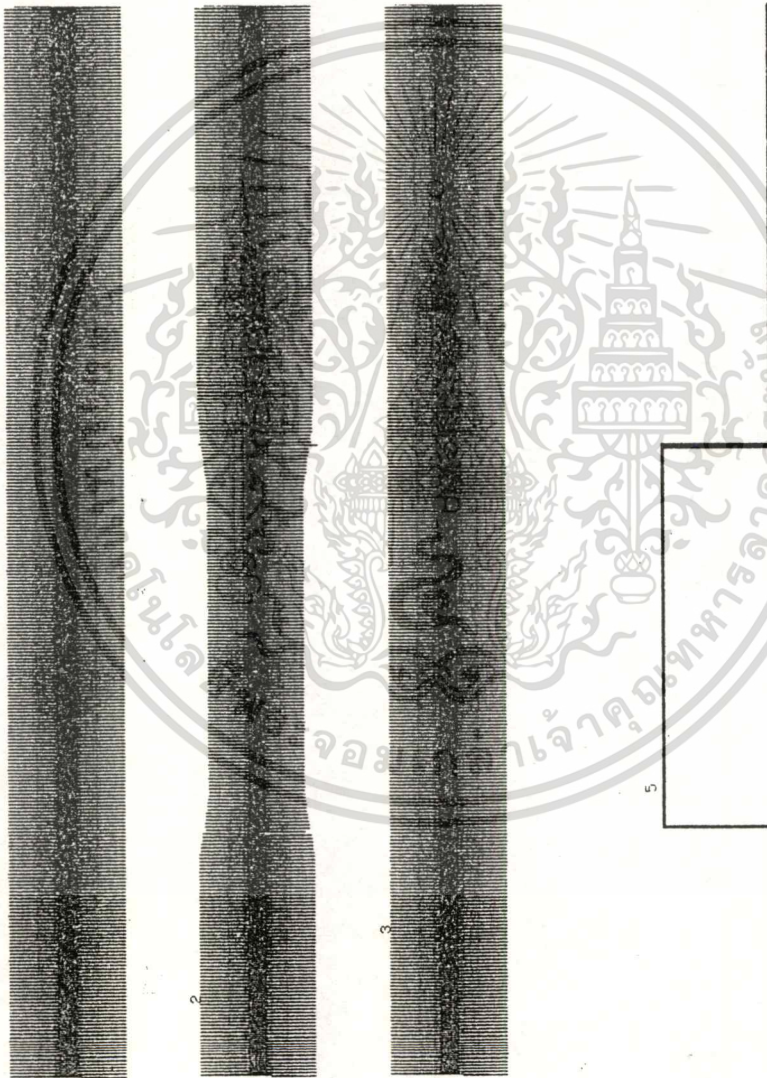
รูป 5-4 ผลการทดสอบสถานะแรงดันไม่สมดุลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CH1 : 8.000  
 CH2 : 15.00V  
 CH3 : 22.00V  
 CH5 : 34.00V

CH1 : Range 50V  
 CH2 : Range 50V  
 CH3 : Range 50V  
 CH5 : Range 50V

CH1 : 42.00  
 CH2 : 35.00V  
 CH3 : 28.00V  
 CH5 : 16.00V



Jun. 04. 98 21:11:53 2.5mm/s 400.0ms/cm

รูป 5-4 ผลการทดสอบสถานะไม่สมดุลย์-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Feb. 17. 98 16:54:06 25mm/

Feb. 17. 98 16:54:00 25mm/s 400.0ms/cm



C11: LINE CURRENT 1  
 C12: LINE CURRENT 2  
 C13: LINE CURRENT 3  
 C14: TMP. SENSOR OUTPUT  
 C15: RELAY OUTPUT

C11: LINE CURRENT 1  
 C12: LINE CURRENT 2  
 C13: LINE CURRENT 3  
 C14: TMP. SENSOR OUTPUT  
 C15: RELAY OUTPUT

รูป 5-5 ผลการทดสอบสภาวะโหลดเกินและอุณหภูมิเกิน

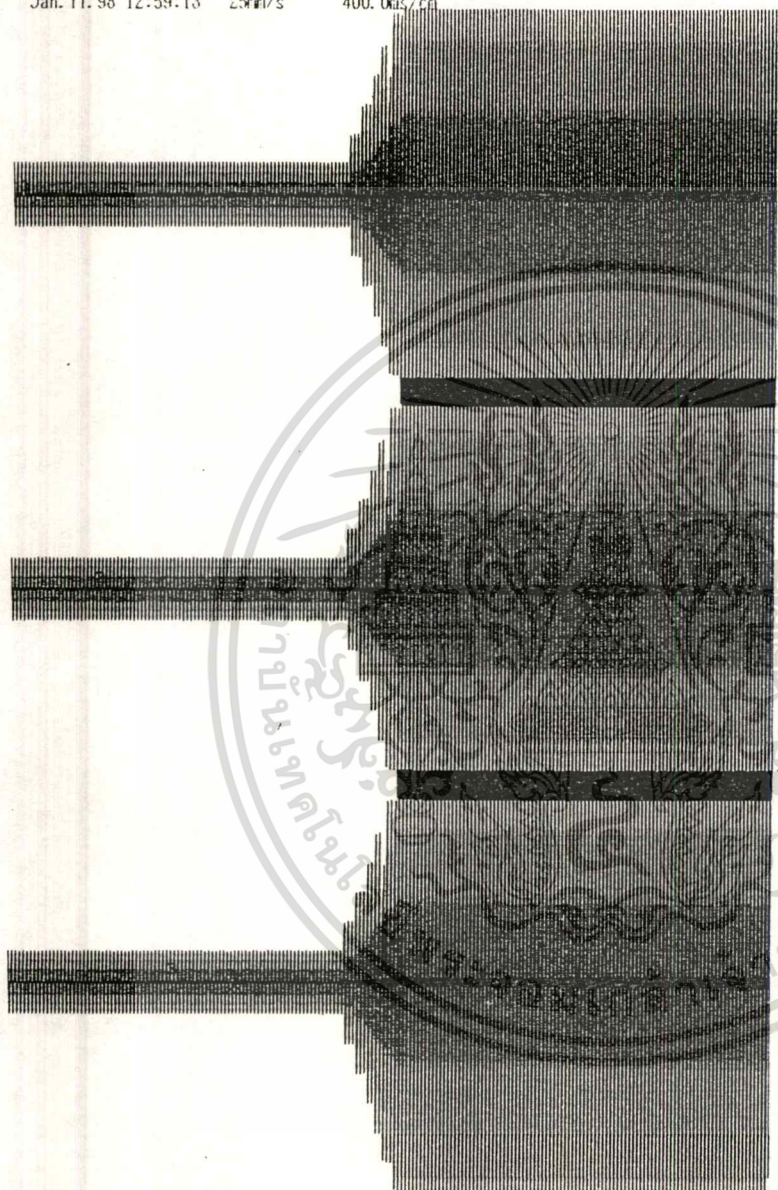
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jan. 11. 98 12:59:13 25mm/s

400.00us/cm

1.000

CH1 : 6.000  
 CH2 : 19.00V  
 CH3 : 32.00V  
 CH4 : 45.00V



CH1 : Range 50V  
 CH2 : Range 50V  
 CH3 : Range 50V  
 CH4 : Range 50V

CH1 : -44.00  
 CH2 : -31.00V  
 CH3 : -18.00V  
 CH4 : -5.00V

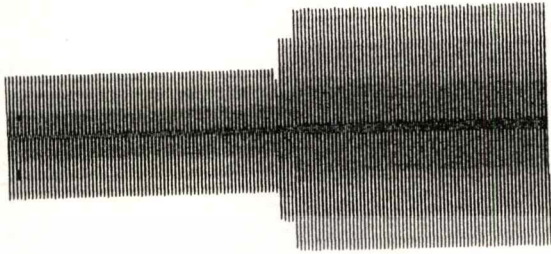
CH1:LINE CURRENT  
 CH2:LINE CURRENT  
 CH3:LINE CURRENT  
 CH4:RELAY OUTPUT

รูป 5-6 ผลการทดสอบสถานะการล๊อคโรเตอร์

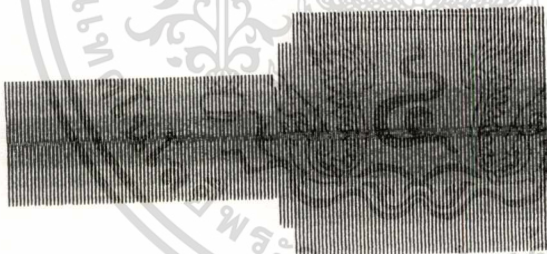
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jan. 11. 98 13:31:08 25mm/s 400. 0ms/cm

CH1 : 7.000  
CH2 : 20.00V  
CH3 : 32.00V  
CH4 : 45.00V

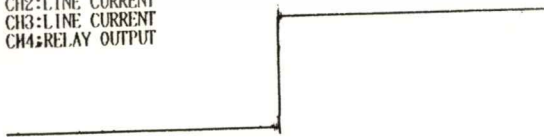


CH1 : Range 50V  
CH2 : Range 50V  
CH3 : Range 50V  
CH4 : Range 50V



CH1 : -43.00  
CH2 : -30.00V  
CH3 : -18.00V  
CH4 : -5.00V

CH1:LINE CURRENT  
CH2:LINE CURRENT  
CH3:LINE CURRENT  
CH4:RELAY OUTPUT



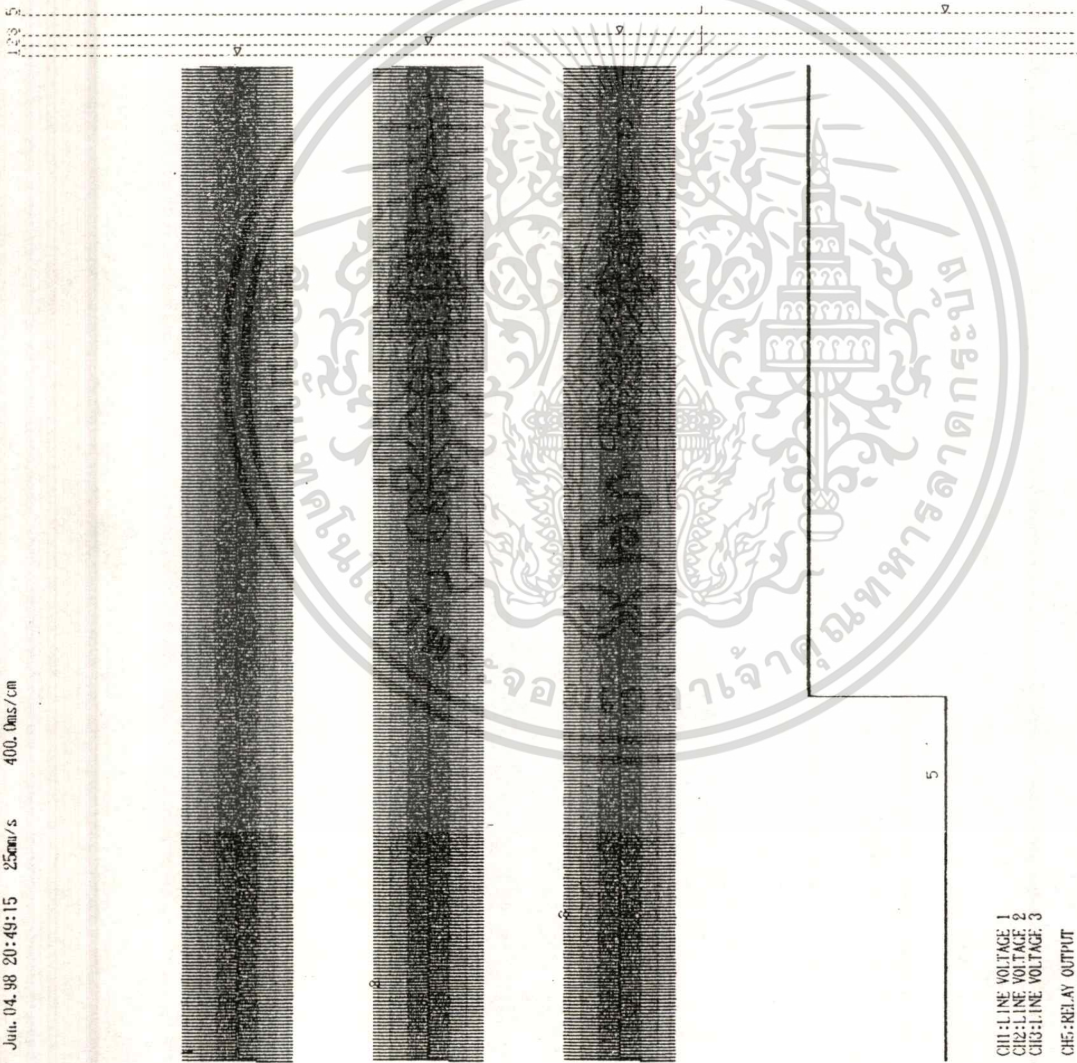
รูป 5-7 ผลการทดสอบสถานะการขาดหายไปของเฟสใดเฟสหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CH1 : 8.00V  
CH2 : 15.00V  
CH3 : 22.00V  
CH5 : 34.00V

CH1 : Range 50V  
CH2 : Range 50V  
CH3 : Range 50V  
CH5 : Range 50V

CH1 : 42.00  
CH2 : 35.00V  
CH3 : 28.00V  
CH5 : 16.00V



### รูป 5-8 ผลการทดสอบสถานะการผิดพลาดดับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คำอธิบายผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดนั้น ได้แยกอธิบายผลที่ได้ในแต่ละประเภทตามรูปดังต่อไปนี้

#### 1. ผลการทดสอบสภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ

จากรูปที่ 5-2 ทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพียงเฟสเดียว(จาก3เฟส) ที่หม้อแปลงแรงดัน แสดงที่ช่องสัญญาณที่1 (Ch1), สัญญาณที่ได้จากส่วนการวัด( Transducer) แสดงที่ช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2),และสัญญาณจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตอบสนองต่อสภาวะแรงดันต่ำที่เกิดขึ้น(เมื่อสภาวะแรงดันต่ำเกิดขึ้นนานกว่า 0.3sec)แสดงที่ช่องสัญญาณที่4 (Ch4) เป็นสัญญาณใช้ในการสั่งปลดวงจร ( Enable to Tripping circuit )

#### 2. ผลการทดสอบสภาวะแรงดันเกินปกติ

จากรูปที่ 5-3 ทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพียงเฟสเดียว(จาก3เฟส)ที่หม้อแปลงแรงดัน แสดงที่ช่องสัญญาณที่1 (Ch1), สัญญาณที่ได้จากส่วนการวัด( Transducer)แสดงที่ช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2),และสัญญาณจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตอบสนองต่อสภาวะแรงดันเกินที่เกิดขึ้น(เมื่อสภาวะแรงดันเกินเกิดขึ้นนานกว่า 0.3sec)แสดงที่ช่องสัญญาณที่3 (Ch3) นั้นเป็นสัญญาณใช้ในการสั่งปลดวงจร ( Enable to Tripping circuit )

#### 3. ผลการทดสอบสภาวะแรงดันไม่สมดุลย์

จากรูปที่ 5-4 ทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทั้ง 3 เฟส จากหม้อแปลง แรงดันทั้ง3ตัว แสดงที่ช่องสัญญาณที่ 1,2และ3 (Ch1,Ch2,Ch3) ส่วนช่องที่ 4 เป็นสัญญาณจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตอบสนองต่อการเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุลย์สำหรับสั่งปลดวงจรมอเตอร์

#### 4. ผลการทดสอบสภาวะโหลดเกินและอุณหภูมิเกิน

จากรูปที่ 5-5 ทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ทั้ง 3 เฟสจากหม้อแปลงกระแสทั้ง 3 ตัว แสดงที่ช่องสัญญาณที่ 1, 2 และ 3 (Ch1,Ch2,Ch3), ช่องสัญญาณที่ 4 (Ch4) แสดงสัญญาณ ของอุณหภูมิที่ได้จากอุปกรณ์วัดและแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าก่อนป้อนเข้าสู่ A / D ( TC-Amplifier O/P), และช่องสัญญาณที่ 5 (Ch5) แสดงสัญญาณจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตอบสนองต่อสภาวะโหลด เกินร่วมกับสภาวะอุณหภูมิเกิน ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการสั่งปลดวงจร ( Enable to Tripping circuit )

#### 5. ผลการทดสอบสถานะการลัดโรเตอร์

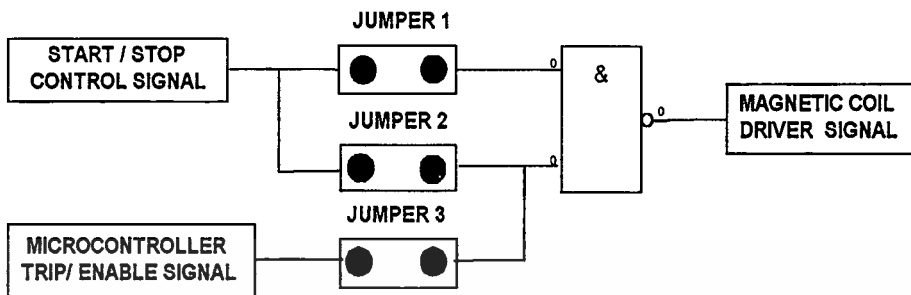
จากรูปที่ 5-6 ทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ทั้ง 3 เฟสจากหม้อแปลงกระแสทั้ง 3 ตัว แสดงที่ช่องสัญญาณที่ 1, 2 และ 3 (Ch1, Ch2, Ch3), ช่องสัญญาณที่ 4 (Ch4) แสดงสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตอบสนองต่อสถานะการลัดโรเตอร์ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการสั่งปลดวงจรมอเตอร์ (Enable to Tripping circuit), สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการตัดสัญญาณการสั่งปลดวงจรจากไมโครคอนโทรลเลอร์ออกจากวงจรควบคุมการปลดวงจรมอเตอร์เพื่อแสดงให้เห็นว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ตรวจพบกระแสที่ผิดปกติ (มากกว่า 6 เท่า ของค่าที่ปกติ) และส่งสัญญาณการปลดวงจรออกมาตลอดเวลาทราบเท่าที่สถานะผิดปกติดังกล่าวยังคงเกิดขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 5-6 จะเห็นว่าช่องสัญญาณที่ 1 ถึง 3 ยังคงแสดงกระแสที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์อยู่ เนื่องจากได้ทำการตัดสัญญาณสั่งปลดวงจรที่จะป้อนให้กับขดลวดของแม่เหล็กคอนแทคเตอร์ ( ดังนั้นจึงหมายความว่า ระบบรีเลย์จะสั่งปลดวงจรมอเตอร์ทันที ถ้าเชื่อมต่อกับสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับวงจรควบคุมการปลดมอเตอร์) โดยมีรายละเอียดวิธีการดังรูปที่ 5-9

#### 6. ผลการทดสอบสถานะการขาดหายไปของเฟสใดเฟสหนึ่ง

จากรูปที่ 5-7 ทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ทั้ง 3 เฟสจากหม้อแปลงกระแสทั้ง 3 ตัว แสดงที่ช่องสัญญาณที่ 1, 2 และ 3 (Ch1, Ch2, Ch3), ช่องสัญญาณที่ 4 (Ch4) แสดงสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตอบสนองต่อสถานะการขาดหายไปของกระแสในเฟสใดเฟสหนึ่ง ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการสั่งปลดวงจรมอเตอร์ (Enable to Tripping circuit)

#### 7. ผลการทดสอบสถานะการผิดลำดับเฟส

จากรูปที่ 5-8 ทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทั้ง 3 เฟส จากหม้อแปลงแรงดันทั้ง 3 ตัว แสดงที่ช่องสัญญาณที่ 1, 2 และ 3 (Ch1, Ch2, Ch3) ส่วนช่องที่ 4 (Ch4) เป็นสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตอบสนองต่อสถานะการผิดลำดับเฟส ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการสั่งปลดวงจรมอเตอร์ (Enable to Tripping circuit) โดยเป็นสัญญาณที่ได้จากการออกแบบให้ตอบสนองต่อการเกิดอินเวอร์รัปต์ จากส่วนของวงจรตรวจจับการผิดลำดับเฟส ซึ่งมีความเร็วสูงในการทำงานที่เหมาะสมกับฟังก์ชันการป้องกันชนิดนี้



การใช้งานปกติ : ต่อ JUMPER 1, JUMPER 3 , ส่วน JUMPER 2 ไม่ใช้

ทดสอบ Lock Rotor : ต่อ JUMPER 1, JUMPER 2 , ส่วน JUMPER 3 ไม่ใช้

รูป 5-9 ตำแหน่งของจุดต่อสัญญาณควบคุมการปลดวงจรมอเตอร์

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

จากการวางแผนการทำงานของโปรแกรมควบคุม และการทำการเขียนโปรแกรมทั้งหมดแล้วแปลงรหัสคำสั่งให้เป็นภาษาเครื่องของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 บรรจุไว้ในหน่วยความจำถาวร EPROM จากนั้นทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 0.75kW, 380 VLL ได้ผลการทดลองในบทที่ 5 ซึ่งจากการทดลองพบว่าระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมและประมวลผลนั้น สามารถทำการป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เกือบทุกฟังก์ชันตามหลักการ(Concepts) ที่ได้กำหนดขึ้นมา แต่มีบางฟังก์ชันเท่านั้นที่พบว่ายังคงมีปัญหาบางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนในการจำลองการลดค่าความร้อนในมอเตอร์โดยการลดในหน่วยความจำ (RAM)ลง ซึ่งไม่สามารถจะทำให้ได้ใกล้เคียงกับอัตราการเย็นตัวของมอเตอร์จริงๆเนื่องจากมอเตอร์มีค่าคงตัวเวลา(Time Constant)ในการระบายความร้อนมาก ซึ่งเมื่อใช้ชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์เขียนแบบการหน่วงเวลาดังกล่าวนี้แล้วไม่สามารถทำได้, ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เสียเวลาในการทำงานมากเกินไป ดังนั้นจึงแก้ปัญหาในส่วนนี้ด้วยการเพิ่มชุดคำสั่งในการตรวจวัดอุณหภูมิมอเตอร์ร่วมกับการลดค่าในหน่วยความจำ (RAM) ลง แทนที่การใช้วิธีการลดค่าในหน่วยความจำลงแต่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ถูกปลดออกจากวงจรแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะลดค่าในหน่วยความจำจนถึงค่าปกติแล้วจะยังคงตรวจวัดอุณหภูมิของมอเตอร์ต่อไปจนแน่ใจว่ามีค่าปกติที่อุณหภูมิห้องหรือมีค่าที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องและปลดคัทซ์สำหรับการเดินเครื่องในครั้งต่อไป ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงจะทำการอนุญาต (Enable) ให้กับวงจรตรรกสำหรับการเดินเครื่องต่อไป

เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยภาพรวมแล้ว สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบสร้างระบบรีเลย์ป้องกันดังกล่าวนี้สามารถทำได้ตามวัตถุประสงค์และความมุ่งหมายในการทำวิจัยได้ โดยระบบที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ได้รวมเอาความสามารถในการป้องกันของรีเลย์แต่ละฟังก์ชันเข้ามาไว้ด้วยกันและเชื่อมโยงการทำงานร่วมกันทุกฟังก์ชัน (Function Coordination) ในลักษณะเรียงลำดับตามความสำคัญและทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่มอเตอร์ทำการขับโหลดเพื่อให้การป้องกันมอเตอร์เป็นไปอย่างพอเพียง ( Sufficiency Protection ) ในขณะที่ต้องไม่ทำให้เกิดการปลดวงจรมอเตอร์ออกโดยไม่จำเป็น ( Nuisance Trip ) และสามารถแจ้งเหตุของความผิดปกติในแต่ละชนิดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการป้องกันได้โดยอิสระจากกัน ( Individual Fault Alarms ) ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับข้อเสนอแนะในการพัฒนาเพื่อให้ระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวแทนควบคุมและประมวลผลนี้ สามารถทำได้อีกมากเท่าที่ความเร็วในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์(ที่ความถี่นาฬิกา 11 MHz)นี้สามารถรองรับได้ เช่น การเพิ่มชุดคำสั่งเพื่อให้สามารถเลือกรูปแบบของรีเลย์โพลคิกอินได้หลายๆแบบ (Multiple time-current curves selection) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงานมากขึ้น, การเพิ่มเติมชุดคำสั่งเพื่อทำการป้องกันในส่วนของคุณสมบัติรอบเช่น ความเร็วรอบต่ำหรือสูงกว่าปกติเป็นต้น, การเพิ่มเติมชุดคำสั่งในการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่กำลังเกิดขึ้นจริงขณะนั้นเช่น กระแสแรงดัน ความเร็วรอบและอุณหภูมิเป็นต้น, การเพิ่มเติมชุดคำสั่งเพื่อเพิ่มความสามารถในการสื่อสารข้อมูลให้กับระบบอื่นๆที่ระบบรีเลย์ป้องกันนี้ต้องทำงานร่วมด้วย เช่น ระบบควบคุมตรรก (PLC), ระบบควบคุมแบบแยกส่วน (DCS) โดยสื่อสารทั้งในแบบอนุกรม (Rs232) และแบบขนาน (GPIB 488) เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังอาจพัฒนาต่อไปให้เป็นระบบการเฝ้าระวังและติดตามการทำงาน (System Monitoring) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่กำลังมีการพัฒนาและวิจัยอยู่ในต่างประเทศ ทั้งยังมีการนำระบบดังกล่าวนี้มาใช้งานบ้างแล้วในอุตสาหกรรมบางประเภทที่การใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำในกระบวนการนั้นมีความสำคัญมากๆ (Critical and Sensitive process) ซึ่งระบบการเฝ้าระวังและติดตามการทำงานดังกล่าวนี้ถือได้ว่ามีความก้าวหน้ามากขึ้น เมื่อเทียบกับระบบป้องกันทั่วไปจากการที่ได้มีการพัฒนาวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์และติดตามเก็บข้อมูลต่างๆของมอเตอร์ ให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลข่าวสาร (Information) มากขึ้น นอกจากนี้แล้วยังเป็นเครื่องมือหลักในการใช้วิเคราะห์สภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สำหรับการวางแผนซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งในอนาคตอันใกล้นี้ ระบบดังกล่าวจะเข้ามาแทนที่ระบบป้องกันแบบดั้งเดิมที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำทุกๆ ไปมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] Robert J. Lawrie. Electric Motor Manual: Application, Installation, Maintenance and Troubleshooting, McGrawhill, P110-112, 1987
- [2] J. Shepherd, A.H. Morton, L.F. Spence. Higher Electrical Engineering, 2nd ed. New York : Pitman, 1970
- [3] G.C. Stone et al., "Investigation of turn Insulation failure mechanisms in large AC Motors", IEEE Trans. on Power App. System, P2588 Sept. 1984
- [4] J. Lewis Blackburn. Symmetrical Components for Power Systems Engineering, Marcell Dekker, Inc. 1993
- [5] K.K. Schwarz. Design of Industrial Electric Motor Drives : Butterworth Heinemann, P189-190, 1991
- [6] Fitzgerald, Kingsley, Umans. Electric Machinery. 4th ed.: McGraw Hill, P409-429, 1983
- [7] Fitzgerald, Kingsley, Umans. Electric Machinery. 4th ed.: McGraw Hill, P1-60, 1983
- [8] M. Kostenko, L. Piotrovski. Electric Machines, Vol.2 : Alternating Current Machines, Moskow: Mir Publisher, 1977
- [9] Smeaton. Switchgear and Control Handbook: Motor & Motor branch circuit Protection, P13-19, 2nd ed. McGrawhill, 1987
- [10] พิรศักดิ์ วรสุนทรโรสด, มานูชิ มาการิชาวา. เทคนิคการซ่อมแซม เลือกรประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ : บ. ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, หน้าที่ 151 - 166 และ หน้าที่ 125 - 137, พศ. 2521
- [11] A.T. Johns and S.K. Salman. Digital Protection For Power Systems, IEE Series: UK., Peter Peregrinus Ltd., 1995
- [12] นิรุช จิรสวรรณกุล, พิชิต ลำยอง, " การแก้ปัญหาหรีเลย์ไหลตกเกินชนิดความร้อนด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ", เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 , โรงแรมโซลทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร พฤศจิกายน 2540, หน้า 373-379
- [13] Peter J. Tavner, James Penman. Condition Monitoring of Electrical Machines: John Wiley & Sons Inc., 1987

เอกสารนี้ใช้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

บทความวิชาการเรื่อง

การแก้ปัญหาเลย์โอดเกินชนิดความร้อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

( Thermal Overload Relay 's Problem solved by Microcontroller Based System )

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 20

ณ. โรงแรม โซลทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การประชุมวิชาการ

ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20

20th Electrical Engineering Conference  
(EECON-20)

วันที่ 13-14 พฤศจิกายน 2540

ณ โรงแรมโซลทวิน ทาวเวอร์ ถนนพระราม 6 ตัดใหม่  
กรุงเทพมหานคร

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การแก้ปัญหาของรีเลย์โหลดเกินชนิดความร้อน ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

### Thermal Overload Relay's Problem Solved By Microcontroller-Based System

นิรุช จิรสุวรรณกุล และ พีจิต ถ้ำของ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนน ลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

#### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาของรีเลย์โหลดเกินชนิดความร้อน(Thermal Overload relay) ที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำในปัจจุบัน ซึ่งยังคงมีปัญหามิสามารถป้องกันความเสียหายของชั้นฉนวนของขดลวดในมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันเนื่องมาจากการสะสมพลังงานความร้อนภายในตัวมอเตอร์จนเกินพิกัดของชั้นฉนวน โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการบันทึกสภาพการเพิ่มและลดค่าพลังงานความร้อนลงในหน่วยความจำแบบเขียนและอ่านค่าได้(RAM)ขนาด 16บิตรวมกับการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลซึ่งควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และโปรแกรมควบคุมทำให้สามารถติดตามสภาพการเพิ่มและลดพลังงานความร้อนของมอเตอร์ได้ใกล้เคียงสภาพจริงดีกว่ารีเลย์โหลดเกินชนิดความร้อนแบบเดิมสำหรับใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กไม่เกิน10 กิโลวัตต์.

#### Abstract

This paper presents the method of microcontroller-based system to solve the major problem of conventional thermal overload relay which can not protect the induction motor's winding properly one caused by an excessive heat from overloading. The proposed technique uses microcontroller-based

system with CT's and temperature sensor (thermocouple) to track the motor loading currents and its temperature by updating the contents of a 16 bits RAM according to motor's dynamical heat generated from loading currents, that can be protected properly compared to the conventional protective device and suitably designed for using with a small induction motor rated not greater than 10 kW.

#### 1. บทนำ

ปลัดมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความทนทานสูงหากใช้งานมอเตอร์นั้นเป็นไปตามพิกัดและอยู่ในสภาพแวดล้อมตามข้อกำหนดของผู้ผลิตโดยสภาพการใช้งานทั่วไปแล้วเราสามารถใช้งานมอเตอร์เกินพิกัดได้ทั้งนี้จะต้องพิจารณาข้อจำกัดอื่นประกอบด้วย สำหรับ มอเตอร์พิกัดหนึ่งๆที่เลือกได้เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการขับแล้วสามารถที่จะขับเกินกำลังพิกัดได้ในช่วงเวลา, โหลดที่เกินได้จำกัด, การยอมให้มีการขับมอเตอร์เกินกำลังได้นั้นจะทำให้อายุการใช้งานมอเตอร์ลดลง[1],ซึ่งหมายถึงการทำให้อายุการใช้งานของฉนวนของขดลวดในมอเตอร์ลดลงอันเนื่องมาจากปริมาณความร้อนที่สะสมภายในตัวมอเตอร์สูงเกินพิกัดของ

ชั้นฉนวน(Insulation Class) ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมการใช้มอเตอร์ขับโหลดเกินและจำกัดช่วงเวลาการขับโหลดเกินให้อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ผลิตมอเตอร์แนะนำจึงทำให้อายุการใช้งานมอเตอร์อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมที่สุด ปัจจุบันการใช้รีเลย์ป้องกันโหลดเกินแบบความร้อนนั้นยังไม่สามารถป้องกันโหลดเกิน,จำนวนครั้งที่เกิดโหลดเกินและการป้องกันการเดินเครื่องขณะร้อน(Hot-Start) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ[2].จากการศึกษา[3],แสดงถึงอายุการใช้งานของมอเตอร์ที่แปรผกผันกับจำนวนครั้งของการเดินเครื่องใน1ช่วงเวลา,ซึ่งการใช้รีเลย์โหลดเกินแบบความร้อนจะไม่สามารถจำกัดจำนวนครั้งของการเดินเครื่องในลักษณะดังกล่าวได้ซึ่งมีสาเหตุมาจากโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพความร้อนของรีเลย์โหลดเกินมีความแตกต่างจากโครงสร้างของมอเตอร์อย่างมาก ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าคงตัวเวลาในการเพิ่มและลดพลังงานความร้อน (Thermal time constant) ระหว่างรีเลย์กับมอเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้การป้องกันมอเตอร์ในลักษณะดังกล่าวอย่างได้ผลจะต้องให้อุปกรณ์ป้องกันมีคุณลักษณะทางความร้อนโดยเฉพาะค่าคงตัวเวลาทางความร้อนเท่ากันหรือใกล้เคียงกับมอเตอร์มากที่สุด ซึ่งในบทความวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการจำลองค่าคงตัวเวลาทางความร้อนของมอเตอร์แทนรีเลย์แบบเดิมด้วยการใช้โมเดลคอนโทรลเลอร์มาทำการติดตามและบันทึกสภาพอุณหภูมิในตัวของมอเตอร์ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลแล้วบันทึกการเปลี่ยนแปลงค่าด้วยหน่วยความจำแบบRAM 16 บิต โคออดิเคชันของอุณหภูมิและการเพิ่มและลดอุณหภูมิตั้งคือ ไปได้

2.ทฤษฎี

พิจารณาของมอเตอร์เหล่านี้ว่ามีที่กึ่งกำลังค่าหนึ่งๆ สมมุติว่าโครงสร้างมอเตอร์และวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบนั้นพิจารณาเป็นสารเนื้อเดียว (Uniforms and Homogenius Materials) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยใช้หลักการสมดุลย์ของพลังงานในสสาร[1] ดังนี้

2.1 พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในมอเตอร์ในช่วงเวลาใดๆคือ P (Watts) เป็นเวลา dt

2.2 พลังงานสูญเสียออกจากมอเตอร์ในรูปของภาระบคายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกซึ่งแปรตามค่า

สภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เป็นโครงสร้างมอเตอร์λ,พื้นที่ผิวภายนอกมอเตอร์A,ความแตกต่างของอุณหภูมิTขณะระบายความร้อนเป็นเวลา dt

2.3 พลังงานสะสมในตัวมอเตอร์ซึ่งแปรตามค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุโครงสร้างมอเตอร์ C, มวลของมอเตอร์M และส่วนความแตกต่างอุณหภูมิขนาด dT<sub>m</sub> ที่เปลี่ยนแปลง, จาก(2.1)ถึง (2.3) เขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของสมดุลพลังงานความร้อนคือ

$$Pdt = A\lambda T_m dt + C M dT_m \tag{1}$$

จากสมการที่(1), P หมายถึงกำลังสูญเสียจากความต้านทานภายในของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อให้มอเตอร์ขับโหลดที่ค่ากระแสของมอเตอร์ขณะใดๆ ,ในกรณีนี้คือค่ากระแสที่กึ่งกำลังหมายถึงการใส่พลังงานจนกระทั่งมีอัตราการระบายความร้อนสมดุลกับอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานความร้อนแล้ว dT<sub>m</sub> = 0 ,และ T<sub>m</sub> = P/Aλ , จากสมการที่ (1) จะได้

$$(P/A\lambda)dt - T_m dt = (CM)/(A\lambda)dT_m \tag{2}$$

โดยกำหนดให้ T<sub>fn</sub> = P/Aλ , τ<sub>m</sub> = CM / Aλ เมื่อτ<sub>m</sub> คือค่าคงตัวเวลาของอุณหภูมิของมอเตอร์ที่กำลังพิจารณา, จากสมการ(2)เป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่ง ซึ่งมีผลเฉลยคือ

$$T_m(t) = T_{fn} (1 - e^{-t/\tau_m}) + T_{sm} e^{-t/\tau_m} \tag{3}$$

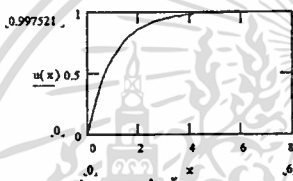
เทอมแรกของสมการ(3)คือ สมการการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมอเตอร์,กำหนดเป็น T<sub>h</sub> ,เทอมที่สองของสมการ(3)คือ สมการการลดลงของอุณหภูมิมอเตอร์ กำหนดเป็น T<sub>c</sub> . ดังนั้น

$$T_h(t) = T_{fn} (1 - e^{-t/\tau_m}) \tag{4}$$

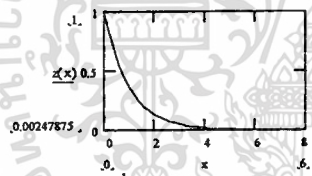
เมื่อ T<sub>fn</sub> เป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุด จากอุณหภูมิปกติขึ้นไปถึงสภาวะคงตัว เมื่อ t ≥ 4τ<sub>m</sub> , และ

$$T_c(t) = T_{sm} e^{-t/\tau_m} \tag{5}$$

เมื่อ  $T_{sm}$  เป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุด จากอุณหภูมิสูงสุดที่สภาวะคงตัวลดลงสู่อุณหภูมิปกติเมื่อ  $t \geq 4\tau_m$  . เมื่อให้มอเตอร์ขับ โหลดที่ที่กักจนมีอุณหภูมิขึ้นไปถึงสภาวะคงตัว (steady state) แล้วหตุมอเตอร์จนอุณหภูมิลดลงสู่ปกติ ค่า  $T_{fm} = T_{sm}$ , ตามสมการ(4)และ(5)จึงรูปที่(1)และ(2)



รูปที่(1) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ



รูปที่(2) การลดลงของอุณหภูมิ

**3. หลักการที่นำเสนอโดยไซโมโครคอนโทรลเลอร์**

จากหลักทฤษฎีในหัวข้อที่(2)จะเห็นว่าในมอเตอร์ที่พิจารณาที่กักหนึ่งๆเราจะได้อาหารามิตอร์ต่างๆตามสมการที่(2)คือ  $\tau_m, M, C, A$  และ  $\lambda$  มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยมากถือได้ว่าคงเดิมไม่ว่าจะมีการเพิ่มหรือลดพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์ Pd<sub>t</sub> ซึ่งแปรตามสภาวะโหลดมอเตอร์โดย P ขึ้นอยู่กับกระแสของมอเตอร์  $I_M$ , ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์  $R_w$  และเวลาในการทำงาน  $t$  ,ดังนั้นเราสามารถคำนวณเพื่อคาดการณ์ล่วงหน้าได้ว่าที่แต่ละค่ากระแสของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง( $T_{ho}$ )จะขึ้นไปถึงใดเท่าใด,หลังจาก

นั้นจะนำค่าเหล่านี้ไปโปรแกรมบันทึกไว้ในหน่วยความจำให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงที่แต่ละค่ากระแสของมอเตอร์, แล้วไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตัดสินใจว่าควรให้มอเตอร์ทำการขับโหลดต่อไปหรือไม่,รวมทั้งตัดสินใจว่าจะอนุญาตให้มีการทำสาร์ทใหม่หลังจากการเกิดโหลดเกินไปแล้วหรือไม่, โดยหน้าที่ทั้งหมดดังกล่าวจะถูกโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานและแสดงผลคิดคอกับผู้ใช้งานผ่านอุปกรณ์แสดงผลแบบจอฮกิกเหลวร่วมกับสวิชส์สำหรับใช้ปรับตั้งจุดทำงานของกระแสของมอเตอร์ตั้งแต่ 100% ถึง 250%ของกระแสที่กักคิด. หลักการนี้แยกพิจารณาออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการคำนวณหาค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดที่จะเกิดขึ้นได้ในแต่ละค่ากระแสโหลด, ส่วนที่สองเป็นการประมาณค่าความสัมพันธ์ของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลแทนด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นดังกล่าวข้อต่อไป

**3.1 การคำนวณหา  $T_{sm}$  สำหรับกระแสมอเตอร์ที่โหลดแต่ละค่า**

พิจารณาจากสมการที่(4)  $T_{sm} = P/A\lambda$  ,โดย  $P = 3I_M^2 R_w$  ที่กระแสที่กัก 100% และที่ค่ากระแสใดๆ n % , จะได

$$T_{ho}(t) = T_{ho}(1 - e^{-t/\tau_m}) \tag{6}$$

และ

$$T_{ho}(t) = T_{ho}(1 - e^{-t/\tau_m}) \tag{7}$$

ดังนั้น

$$T_{ho} = T_{ho}(I_M/I_N)^2 \tag{8}$$

จากสมการที่(8) เมื่อแปรค่ากระแสโหลดตั้งแต่100% ไปจนถึง 250% ของค่าที่กัก  $I_M$  แล้วเราจะได้ความสัมพันธ์ของความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุด  $T_{sm}$  สำหรับแต่ละค่ากระแสของมอเตอร์ที่โหลดแต่ละค่าดังตารางที่(1)

ง่ายไม่ซับซ้อนจึงต้องใช้วิธีประมาณค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  
ด้วยอนุกรมกำลังดังนี้ จาก

$$e^x = \sum_{m=0}^{\infty} x^m / m! \quad (12)$$

ดังนั้น

$$e^{-t/\tau_m} = 1 - t/\tau_m + t^2/\tau_m^2 - t^3/\tau_m^3 + \dots \quad (13)$$

จากสมการที่(6)  $T_{ho}(t) = T_{fm}(1 - e^{-t/\tau_m})$  พิจารณาเทอม  
 $e^{-t/\tau_m}$  ด้วยการกระจายอนุกรมกำลัง, ใส่มหาคะสองทอมแรก  
ของ(13)แทนลงใน(6)จะได้

$$T_{ho}(t) \cong T_{fm}(t/\tau_m) \quad (14)$$

แทนค่า  $T_{fm} = P / \lambda$ ,  $\tau_m = CM / \lambda$ , และ  $P = 3I_M^2 R_w$   
จะได้

$$T_{ho}(t) \cong K I_M^2 t \quad (15)$$

เมื่อ  $K = 3 R_w / CM$ , จากสมการที่(15) ประมาณได้ว่าอัตรา  
การเพิ่มอุณหภูมิของเคอร์แปรตามค่ากระแสเคอร์ยกกำลัง  
สองและเวลาโดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวลาโดยประมาณ,  
เมื่อขับโหลดด้วยกระแส  $I_M$ , จากสมการที่(15)ถ้าเราเลือกกราฟ  
ความสัมพันธ์ของกระแสแฉเวลา ตามมาตรฐาน NEMA- Class  
2 มาใช้โดยเลือกจุดตัดกราฟในช่วงโหลดเกินมาแทนค่าลงใน  
สมการที่(15)โดยให้ค่า  $T_{ho}(t)$  คงที่ เราจะได้ความสัมพันธ์  
แบบไฮเพอโบลาร์ระหว่าง  $I_M$  กับ  $t$  ดังตารางที่ ( 3 )

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา-กระแสตามมาตรฐาน NEMA- Class 2

กระแสเคอร์ ( pu )	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.50
กระแสเคอร์ <sup>2</sup>	1.00	1.21	1.44	1.69	1.96	2.56	3.24	4.00	4.84	6.25
เวลาหน่วง (วินาที)	1000	840	720	620	480	380	300	300	250	190
การเพิ่มค่า RAM 1 หน่วย	-	15ms	12ms	10ms	9ms	7ms	6ms	5ms	4ms	3ms

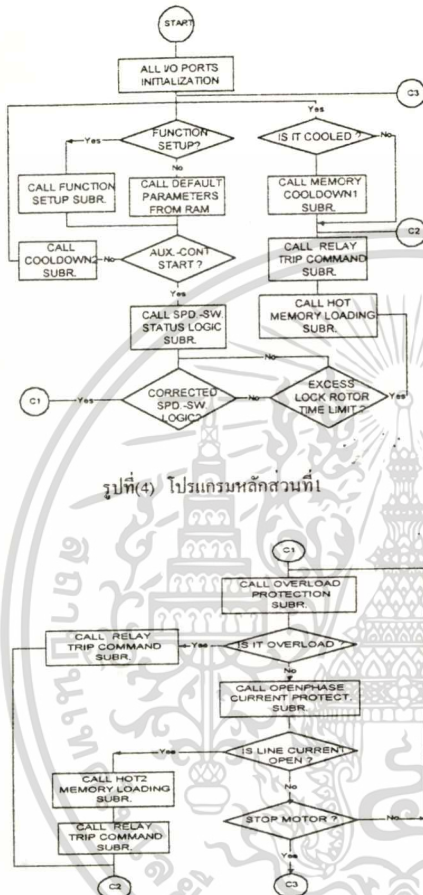
#### 4.แผนผังการทำงาน

โปรแกรมควบคุมมีหลักการทำงานตามผังงานรูปที่(4)และ  
(5), ส่วนสำคัญคือการใช้รีจิสเตอร์ภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ ขนาด 8 บิต 2 ตัวเป็นตัวบันทึกอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของมอเตอร์ โดยมีอัตราการเพิ่มตามตารางที่(3), ส่วนอัตราการลดค่าจะเท่ากับอัตราการเพิ่มที่โหลด100%ของพิกัดความถี่ซึ่งควบคุมโดยโปรแกรมย่อย cool down ซึ่งสามารถปรับอัตราลดค่านี้ได้ตามสภาพการติดตั้งใช้งานมอเตอร์และส่วนสุดท้ายคือรีจิสเตอร์สำหรับใช้เป็นตัวเปรียบเทียบอีก 2 ตัวซึ่งใช้กับค่าปรับตั้งจุดโอเวอร์โวลต์ที่เลือกค่าได้จากโปรแกรมควบคุมในส่วนนี้ของโปรแกรมย่อย function setup, โดยทั้งหมดจะทำการติดต่อกับผู้ใช้ผ่านอุปกรณ์แสดงผลแบบจอสีเหลี่ยมและ

คือสวิทช์จำนวน 8 ตัว

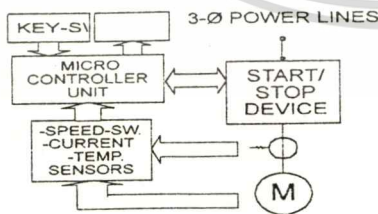
#### 5. ระบบที่ออกแบบสร้าง

ระบบที่ได้ออกแบบสร้างและทดลองแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนควบคุมประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์8051, หน่วยความจำ, จีพีแอลสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 8 ช่องสัญญาณ, อุปกรณ์แสดงผลแบบจอสีเหลี่ยม และ คีย์สวิทช์, ส่วนที่สองเป็นวงจรไฟฟ้าสำหรับการเดินมอเตอร์แบบตรง, อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแสเคอร์, เทอร์โมกับเบสวัดอุณหภูมิและสวิทช์ตรวจวัดความเร็วรอบแบบสนามแม่เหล็ก( magnetic proximity switch ), โดยมีโครงสร้างดังรูปที่(6)



รูปที่(4) โปรแกรมหลักส่วนที่ 1

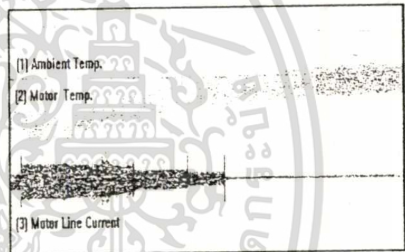
รูปที่ (5) โปรแกรมหลักส่วนที่ 2



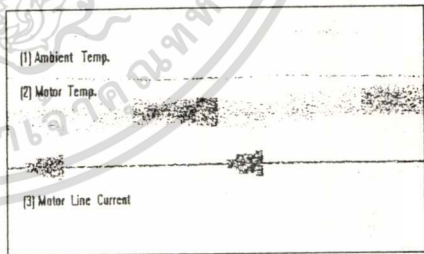
รูปที่(6) โครงสร้างของระบบที่ออกแบบสร้างขึ้น

6.ผลการทดลอง

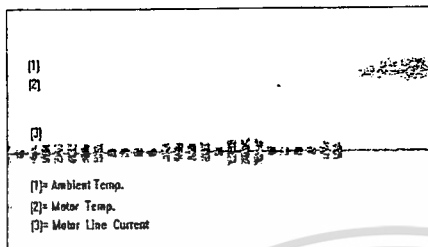
จากการทดลองโดยใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่ติดตั้งพร้อมชุดทดลองไหลลดค่าน้ำหนักและตาชั่ง, โดยอ่านค่ากระแสจากแคลมป์เคอร์, และบันทึกค่าสัญญาณกระแสของมอเตอร์, อุณหภูมิของมอเตอร์จากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งบนเฟรมมอเตอร์, ด้วยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Signal Recorder), ก่อนการทดลองได้ทำการปรับตั้งจุดทำงาน (Pick Up Setpoint) จากโปรแกรมย่อย Function Setup โดยเลือกที่จุดไหลเกิน 120%, อัตราการระบายความร้อนปกติที่อุณหภูมิห้อง 35 องศาเซลเซียส, ชั้นฉนวนชนิด E โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ (7) ,(8)และ(9)



รูปที่ (7) การทดลองเดินมอเตอร์ควยไหลเกิน 120% ของค่ากระแสมอเตอร์ที่ปกติ



รูปที่(8) การเดินมอเตอร์ซ้ำ (Restart) ที่ค่ากระแสมอเตอร์ 50%, 100% และ 120% ของปกติ



รูปที่(9) การเดินมอเตอร์เป็นช่วงคาบเวลา(Duty Cycle) ที่ค่ากระแสมอเตอร์ 50%, 100% และ 150% ของที่กัก

7.สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่(7),(8)และ(9),ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการหยุดเดินมอเตอร์ทันทีที่ค่าในหน่วยความจำเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสของมอเตอร์จนถึงค่าจุดปรับตั้ง (Setpoint), จากนั้นจะทำการลดค่าในหน่วยความจำลงตามอัตราการผลิตที่เลือกซึ่งเป็นการหน่วงเวลาเพื่อให้อัตราการเดินตัวลงในระดับที่สามารถทำการเริ่มเดินใหม่(Restart) ได้อย่างปลอดภัย, ในกรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิของมอเตอร์ต่อไปพร้อมทั้งแสดงผลแจ้งสถานะให้ผู้ใช้งานเพื่อรอรับคำสั่งจากผู้ใช้งานดำเนินการอื่นๆต่อไปได้เช่นการเปลี่ยนจุดปรับตั้งการทำงานใหม่หรือรอทำการเดินเครื่องใหม่(Restart)

8.วิจารณ์ผลการทดลอง

8.1 จากการที่ได้ออกแบบโปรแกรมควบคุมทำการตรวจวัดค่ากระแสไหลของมอเตอร์แล้วกำหนดอัตราการผลิตเพิ่มค่าในหน่วยความจำเพื่อเลียนแบบการเพิ่มอุณหภูมิและการกำหนดอัตราการผลิตค่าในหน่วยความจำเพื่อเลียนแบบการลดลงของอุณหภูมินั้น, ในส่วนของการเลียนแบบการลดอุณหภูมินั้น ไม่

สามารถที่จะทำการเลียนแบบโดยยาวนานพอเนื่องจากมอเตอร์มีอัตราการลดค่าอุณหภูมิที่ช้ามาก, ดังนั้นจึงต้องเพิ่มโปรแกรมย่อยเพื่อตรวจวัดค่าอุณหภูมิของมอเตอร์ต่อเนื่องหลังจากที่โปรแกรมย่อย cool down1 ได้ทำการลดค่าในหน่วยความจำเสร็จสิ้นแล้ว

8.2 สัญญาณของเทอร์โมคัปเปิลที่วัดอุณหภูมิของมอเตอร์นั้นจะถูกติดตั้งอยู่กับเฟรมมอเตอร์ทำให้ถูกเหนี่ยวนำจากสัญญาณไฟฟ้าความถี่50เฮิรตซ์(ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ (7), (8)และ(9)สัญญาณหมายเลข2), ซึ่งในการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบธรรมดาที่ไม่มีวงจขยายสัญญาณส่วนหน้าแบบการขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier), ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ควรจะใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบที่เข้ากับเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier)แทน

เอกสารอ้างอิง

[1]A.J.Spisak, "Heating,Cooling and Ventilating". Handbook of Electric Machine.McgrawHill,Inc.,1987  
 [2] R.J Brighton and P.N.Ranade "Why Overload relay do not always protect motors", IEEE Trans on Ind. Appl., vol.IA-18,1982  
 [3] Sam,F.Farag,Robert G.Batheld and William E.May "Electronically Enhanced Low Voltage Motor Protection and Control"IEEE Trans. on Ind. Appl.,vol.30,no.3, 1994  
 [4] Norris Woodruff "Economical Motor Protection Using Microcomputer Technology",IEEE Trans.on Ind. Appl.,vol. IA-20,no.5, 1995  
 [5] ANSI/IEEE "Guide for AC. Motor Protection", ANSI/IEEE C.37.96-1988, Standard for Relays and Relay System Associated with Electric Power Apparatus,1995

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นายนิรุช จิรสวรรณกุล  
 วันเดือนปีเกิด วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2512  
 สถานที่เกิด จังหวัดมุกดาหาร  
 วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถานที่สำเร็จการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ปีที่สำเร็จการศึกษา ปีการศึกษา 2534

### ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. การแก้ปัญหาของรีเลย์โหลดเกินชนิดความร้อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์  
 (Thermal Overload Relay's Problem Solved by Microcontroller Based System)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20  
 จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### รางวัลหรือทุนที่เคยได้รับ

ประสบการณ์การทำงาน 2534-2535 วิศวกรไฟฟ้า 4 / โครงการแม่เมาะระยะที่ 2  
 หมวกระบบอุปกรณ์ไฟฟ้าและแผง, กองไฟฟ้า  
 ฝ่ายก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังความร้อน  
 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย  
 2536-2537 วิศวกรไฟฟ้า  
 โครงการขยายโรงถ่านแอสโซะระยะที่ 2  
 แผนกโครงการพิเศษ  
 บริษัท เอบีบี เซอร์วิส จำกัด  
 2537-ปัจจุบัน เจ้าหน้าที่วิจัย  
 ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง