

การควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง
AUTOMATIC CONTROL FOR HIGH VOLTAGE TRANSFER SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมกลศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-060-167

การควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง

AUTOMATIC CONTROL FOR HIGH VOLTAGE TRANSFER SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-060-167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AUTOMATIC CONTROL FOR HIGHT VOLTAGE TRANSFER SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-EN-M-060-167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

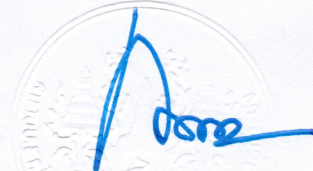
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง
Thesis Title Automatic Control for High Voltage Transfer System
นักศึกษา นายเชาวฤทธิ์ สุขรักษ์
รหัสประจำตัว 53611212
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-060-167

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
ดร.เกียรติศักดิ์	รุ่งพระแสง	
ดร.ยุทธพงศ์	ทัพผดุง	
รศ.ดร.นวกัทราร	หนูนาค	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื้อสัตย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-303

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง
นักศึกษา	นายเชาวฤทธิ์ สุขรักษ์
รหัสประจำตัว	53611212
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

บทคัดย่อ

งานวิทยานิพนธ์นี้วัตถุประสงค์เพื่อออกแบบชุดควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง โดยควบคุมการทำงานของ SF6 โหลดเบรกสวิตช์ ด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่สามารถโปรแกรมได้ จากระบบดั้งเดิมที่ชุดควบคุมเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์และรีเลย์ การตั้งค่าเพื่อกำหนดเงื่อนไขในการทำงานมีความซับซ้อน ดังนั้น การควบคุมเงื่อนไขการทำงานด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่สามารถโปรแกรมได้ จึงทำให้มีความน่าเชื่อถือ การซ่อมบำรุงและการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงานสะดวกยิ่งขึ้น ระบบควบคุมการสับเปลี่ยนสวิตช์อัตโนมัติ ประกอบด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่สามารถโปรแกรมได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสเกินหรือต่ำ โดยที่โปรแกรมการควบคุมจะสั่งการสับเปลี่ยนสวิตช์ให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด ระบบที่ออกแบบนี้ได้ถูกติดตั้งและใช้งานจริงที่พระตำหนักสิริยาลัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งยังไม่พบปัญหาใดๆจากการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Automatic Control for High Voltage Transfer System
Student	Mr. Chaowalite Sukrak
Student ID.	53611212
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweeapol Suesut

ABSTRACT

This thesis aims to design automatic control for high voltage transfer system by control the SF6 load break switch using programmable logic controller (PLC). The traditional control system uses electronic circuit relay and magnetic contractor to control the high voltage transfer switch which is difficult to adjust the control condition. Therefore, the proposed system is very flexible and easy to maintenance and can increase the reliability of distribution system. The automatic transfer switches consist of the PLC, Voltage and current sensor and SF6 load break switch. Our system has been installed and operated at SIRIYALAI Villa, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand since 2012 until present. There is no problem according to the operation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม และ รศ.ดร.นวกัทรภา หนูนาถ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ช่วยเหลือแนะนำและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้โอกาสในการออกแบบ ติดตั้ง ทดสอบระบบและใช้งานจริงที่พระตำหนักสิริยาลัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ยุทธพงศ์ ทัพผดุง รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทุกท่านที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่น่ารักทุกคนที่ให้อกำลังใจ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้านทั้งเรื่องการเรียน การเงินและเรื่องส่วนตัวจนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เชาวฤทธิ์ สุขรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ความน่าเชื่อถือของระบบ.....	4
2.1 ความน่าเชื่อถือของระบบ.....	4
2.2 การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์แบบต่างๆ	5
2.3 ระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง.....	12
2.4 การสวิตซ์ของระบบแบบโมดูลซ้ำสำรอง.....	13
2.5 ระบบโหวตคะแนน	14
2.6 การหาความน่าเชื่อถือระบบด้วยวิธีมินิมัลคัทเซ็ท	14
2.7 ความน่าเชื่อถือระบบซ้ำสำรองที่ทำงานแบบมีเงื่อนไข.....	16
2.8 ความน่าเชื่อถือระบบซ้ำสำรองที่ทำงานโดยลำดับ.....	19
2.9 ความน่าเชื่อถือในระบบคอมพิวเตอร์	21
2.10 การจัดโครงสร้างระบบที่ทนต่อความผิดพลาดในการทดลอง.....	27
2.11 ระบบทำงานทดแทนกันของพีแอลซี.....	35
บทที่ 3 การออกแบบและการติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	37
3.1 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ (Automatic Transfer Switch, ATS).....	37
3.2 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติด้วยเครื่องควบคุมที่โปรแกรมได้.....	38
3.3 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูง.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูงควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้.....	39
3.5 หลักการทำงาน.....	41
3.6 การออกแบบ.....	42
3.7 การกำหนดขั้นตอนการทำงาน.....	44
3.8 การติดตั้งระบบ.....	52
บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ.....	55
4.1 การทดสอบการทำงานของระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ.....	55
4.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของระบบและจุดคุ้มค่า.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การโหวตคะแนนของตัวโหวตคะแนนเอาท์พุท.....	9
2.2	เซตของโมดูลองค์ประกอบที่เป็นมินิมัลคัทเซต.....	15
2.3	ตัวอย่างการคำนวณอัตราการล้มเหลว ตามมาตรฐาน MIL-HDBK-217B.....	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	คุณลักษณะของอุปกรณ์แบบ Bathtub Curve.....	5
2.2	แบบจำลองระบบที่ต่ออนุกรมกันจำนวน n หน่วย.....	5
2.3	แบบจำลองของระบบที่ต่อขนานกันจำนวน n หน่วย.....	7
2.4	ระบบที่ต่อแบบอนุกรม - ขนาน และการลดรูปวงจร.....	8
2.5	การเชื่อมต่อระบบหรืออุปกรณ์แบบโมดูลซ้ำสำรองสามส่วน.....	9
2.6	ระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรองแบ่งตามลักษณะการทำงาน.....	12
2.7	การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์สำหรับการหาความน่าเชื่อถือแบบมินิมัลคัทเซต.....	15
2.8	สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดความล้มเหลวในระบบคอมพิวเตอร์.....	22
2.9	ระบบแบบโมดูลซ้ำสำรอง 3 โมดูลที่มีปฏิภูมิสถานะแบบซ่อมแซมได้.....	26
2.10	โมดูลซ้ำสำรอง 3 โมดูลพร้อมทั้งตัวโหวต 3 โมดูล.....	29
2.11	โมดูลซ้ำสำรองที่มีตัวโหวต 3 โมดูลที่มีความไวต่อการล้มเหลวของตัวโหวต.....	30
2.12	รูปแบบการโหวตลงคะแนน โดยเงื่อนไขต้องมีอินพุต 2 ใน 3 ทำงานได้.....	30
2.13	ฮาร์ดแวร์ของตัวโหวตที่มีการประสานเวลาของอินพุตและเอาท์พุต.....	31
2.14	แผนกำหนดเวลาการประสานเวลาของตัวโหวต.....	31
2.15	ช่วงเวลายอมรับได้ของกระบวนการโดยทั่วไป.....	34
2.16	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคอมพิวเตอร์.....	34
3.1	ระบบ ATS ที่ประกอบด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ตัว.....	37
3.2	วงจรจ่ายกำลังของระบบ ATS.....	38
3.3	วงจรควบคุมของระบบ ATS.....	38
3.4	ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูง.....	39
3.5	SF6 Load Break Switch.....	39
3.6	แผนภาพแสดงการทำงานของอุปกรณ์ในระบบATS.....	40
3.7	ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงสูงแบบอัตโนมัติควบคุมด้วย PLC.....	40
3.8	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบ ATS.....	41
3.9	การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุม.....	42
3.10	แผงหน้าปิดควบคุมการทำงาน.....	42
3.11	ขั้นตอนการทำงานแบบ Manual.....	42
3.12	ขั้นตอนการทำงานแบบ Auto – prefer เมื่อ Sw.Main Sourcee “P”.....	45
3.13	ขั้นตอนการทำงานแบบ Auto – prefer เมื่อ Sw.Main Sourcee “Q”.....	46
3.14	ขั้นตอนการทำงานแบบ Auto – Non-Perfer เมื่อ Sw.Main Sourcee “P”.....	47
3.15	ขั้นตอนการทำงานแบบ Auto – Non-Perfer เมื่อ Sw.Main Sourcee “Q”.....	48
3.16	ขั้นตอนเมื่อไฟดับ ทั้ง 2 Feeder เมื่อ Sw.Main Source “P”.....	49
3.17	ขั้นตอนเมื่อไฟดับ ทั้ง 2 Feeder เมื่อ Sw.Main Source “Q”.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.18	ขั้นตอนเมื่อการทำงานเมื่อเกิด Fault ด้าน Load	51
3.19	การติดตั้งทดสอบและใช้งานจริงที่พระตำหนักสิริยาลัย จ.พระนครศรีอยุธยา.....	52
3.20	การติดตั้งระบบตัดตอนแรงดันสูง.....	52
3.21	การติดตั้งระบบตัดตอนแรงดันสูง.....	53
3.22	การติดตั้งทดสอบเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้.....	53
3.23	การปรับแก้โปรแกรมในเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้.....	54
3.24	การติดตั้งและทดสอบการทำงานของระบบ ATS ขั้นตอนสุดท้าย.....	54
4.1	การสั่ง ATS ทำงานแบบ Manual.....	55
4.2	การสั่ง ATS ทำงานแบบ Auto	56
4.3	Transfer Timer “TT”	56
4.4	Restore Timer “TR”	57
4.5	Timer Delay “TD”	57
4.6	การทดสอบโดยการปลด Drop Fuse แรงสูง.....	57
4.7	การทดสอบการดึง Main Fuse ในตู้ควบคุม ATS.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่ในการจำหน่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้กระแสไฟฟ้าในส่วนภูมิภาค ได้แก่ประชาชน หน่วยงานภาครัฐ เอกชน นิคมอุตสาหกรรมในต่างจังหวัด การรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ การวางแผนบำรุงรักษา และปรับปรุงเครื่องมืออุปกรณ์ในระบบจำหน่ายให้มีความพร้อมในการใช้งานเหมาะสมกับสภาวะอากาศสำหรับเมืองไทยเป็นสิ่งที่หน่วยงานของ กฟภ. ให้ความสำคัญในการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของหน่วยงานหรือองค์กรที่มีความจำเป็นต้องรักษาความน่าเชื่อถือของระบบการจ่ายไฟฟ้าให้ให้มีเสถียรภาพสูง ได้แก่ โรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม และพระบรมมหาราชวังในต่างจังหวัดที่ กฟภ. รับผิดชอบ เช่น พระตำหนักภูพิงศ์ราชนิเวศ พระตำหนักศิริยาลัย พระราชวังไกลกังวล และพระตำหนักอื่นๆ เป็นต้น เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องขณะที่พระบรมวงศานุวงศ์ทรงประทับอยู่ ทาง กฟภ. ได้ติดตั้งระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายสายส่งแรงสูงแบบอัตโนมัติ (Automatic Transfer Switch, ATS) ที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยระบบดังกล่าวจะทำหน้าที่ถ่ายโอนจากระบบจ่ายไฟฟ้าหลักที่เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องไปยังระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองเพื่อลดผลกระทบทำให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายที่นำเข้าจากต่างประเทศผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลานานหลายสิบปี ซึ่งชิ้นส่วนสำคัญบางชิ้นได้เลิกการผลิตไป ทำให้มีปัญหาในการซ่อมบำรุง การสั่งนำเข้าระบบใหม่ที่ผลิตจากต่างประเทศมีราคาสูงมาก ดังนั้นการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงต้องการพัฒนาระบบระบบไฟฟ้าจึงต้องการพัฒนาระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูงดังกล่าว โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้งานเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าที่มีความยืดหยุ่น ทนทาน ง่ายต่อการตรวจสอบ แก้ไข และการบำรุงรักษา

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง แบบอัตโนมัติ (Automatic Transfer Switch, ATS) ที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนจากระบบจ่ายไฟฟ้าหลักที่เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องไปยังระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองและศึกษาแนวทางในการออกแบบพัฒนาระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูงอัตโนมัติ ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ (Programmable Logic Controller, PLC) ถูกออกแบบให้มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย เช่น ฟังก์ชันทางตรรก ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันตัวตั้งเวลา ตัวนับ การติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก และถูกออกแบบให้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ร้อนและชื้น ได้รับความนิยอย่างกว้างขวางในการควบคุมทำงานเครื่องจักรอัตโนมัติ ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมอัตโนมัติ งานวิจัยนี้จึงเลือก ระบบควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้มาใช้ในการควบคุมอัตโนมัติระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีทางด้านวิศวกรรมความน่าเชื่อถือ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการทำวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งกล่าวถึงวิธีการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานทดแทนกันได้ เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ รูปแบบการประยุกต์ทฤษฎีทางวิศวกรรมความน่าเชื่อถือในการวิจัยนี้ ได้ทำรูปแบบที่กล่าวไว้มาประยุกต์ให้เหมาะสมในแต่ละส่วนของระบบที่ถูกออกแบบขึ้นมา เพื่อให้ระบบมีการควบคุมอัตโนมัติโดยใช้ พีแอลซีทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นความเร็วในการควบคุม และฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยเป็นการนำเอาเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (Programmable logic Controller, PLC) ควบคุมระบบถ่ายโอนแรงดันสูง ผลที่ได้รับคือ เพื่อทดแทนระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายระบบเดิมที่นำเข้าจากต่างประเทศ มีการใช้งานมาเป็นเวลานานเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบในการที่มีความยืดหยุ่นทนทาน ง่ายต่อการตรวจสอบ แก้ไข และบำรุงรักษา

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนในการศึกษา การควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- 1.6.1 ตั้งสมมุติฐานว่า สามารถใช้เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ ควบคุมระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูงได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดความล้มเหลวในการทำงานของระบบ
- 1.6.2 ศึกษากระบวนการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบควบคุม
- 1.6.3 ศึกษาความสามารถของ เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (Programmable logic Controller, PLC) ที่นำมาใช้ในการควบคุมระบบ
- 1.6.4 ออกแบบระบบการควบคุมโดยใช้เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (Programmable logic Controller, PLC)
- 1.6.5 ทดลองนำเอาระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ไปควบคุมกระบวนการ
- 1.6.6 สรุปผลการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความสำคัญและที่มาของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 ความน่าเชื่อถือของระบบ กล่าวถึง การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์แบบต่างๆ ระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง การสวิตช์ของระบบแบบโมดูลซ้ำสำรองระบบโหวตคะแนน การหาความน่าเชื่อถือระบบด้วยวิธีมินิมัลคัทเซ็ท ความน่าเชื่อถือระบบซ้ำสำรองที่ทำงานแบบมีเงื่อนไข ความน่าเชื่อถือระบบซ้ำสำรองที่ทำงานโดย ความน่าเชื่อถือในระบบคอมพิวเตอร์ การจัดโครงสร้างระบบที่ทนต่อความผิดพลาดในการทดลอง ระบบทำงานทดแทนกันของพีแอลซี

บทที่ 3 กล่าวถึง การออกแบบและการติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติ ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ (Automatic Transfer Switch, ATS) ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติด้วยเครื่องควบคุมที่โปรแกรมได้ ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูง ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูงควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ หลักการทำงาน การออกแบบขั้นตอนการทำงานและการติดตั้งระบบ ATS

บทที่ 4 การทดสอบการทำงานระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ กล่าวถึง การทดสอบการทำงานของระบบแบบ Manual / Auto การทดสอบความน่าเชื่อถือของระบบและการคำนวณค่าความคุ้มทุน

บทที่ 5 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ความน่าเชื่อถือของระบบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความน่าเชื่อถือของระบบในการวิจัย ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์แบบต่าง ๆ เช่น ระบบแบบอนุกรม (Series Structure) แบบขนาน (Parallel Structure) แบบอนุกรมและขนาน (Parallel Structure) แบบแยกความล้มเหลวร่วม (Triple Modular Redundancy) หรือการต่อหลาย ๆ แบบมารวมกัน เป็นต้น การหาค่าความน่าเชื่อถือของระบบแบบต่าง ๆ เช่น วิธีการลดรูปวงจรถนักระทั่งเหลืออุปกรณ์เพียงชุดเดียว การหาค่าความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ที่มีวงจรแบบซับซ้อน เช่น การใช้วิธีการคำนวณโดยใช้วิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขและแบบระบบมินิมัลคัทเซต (Minimal Cut Set Method) ตลอดจนระบบการทำงานทดแทนกันของระบบควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกใช้ในงานวิจัยนี้

2.1 ความน่าเชื่อถือของระบบ [5]

ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) คือ ความน่าจะเป็นของระบบหรืออุปกรณ์ที่กำลังพิจารณาว่าจะสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ภายในเวลาที่กำหนด [5] อุปกรณ์ที่นำมาประกอบขึ้นเป็นระบบจะมีความน่าเชื่อถือมากน้อยแตกต่างกันไป สามารถอธิบายความน่าเชื่อถือของระบบได้ตามสมการที่ (2.1)

$$R(t) + Q(t) = 1 \quad (2.1)$$

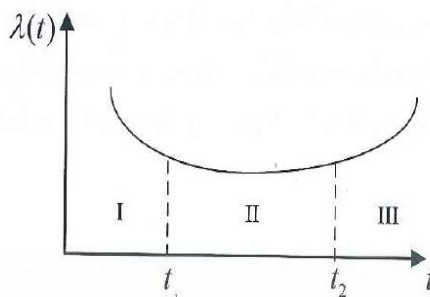
กำหนดให้

$R(t)$ คือ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าเชื่อถือ, ความน่าเชื่อถือ ณ เวลา t

$Q(t)$ คือ ฟังก์ชันแจกแจงความไม่น่าเชื่อถือ

จากสมการที่ (2.1) สามารถอธิบายพฤติกรรมของอุปกรณ์ ซึ่งประกอบขึ้นมาเป็นระบบได้ด้วยคุณลักษณะของเส้นโค้งรูปทรงอ่าง (Bathtub Curve) [5] ซึ่งแบ่งเป็น 3 ช่วงตามอัตราเสี่ยงต่อความล้มเหลว $\lambda(t)$ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 โดยช่วงแรกหรือแก้จุดบกพร่อง (De-bugging, I) เป็นช่วงที่มีอัตราความเสี่ยงต่อความล้มเหลวที่มีการลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วงนี้เป็นช่วงที่อุปกรณ์หรือระบบมีการควบคุมคุณภาพของอุปกรณ์เป็นอย่างดี เช่น ในกรณีของอุปกรณ์ซึ่งเพิ่งนำมาใช้ใหม่ ซึ่งมีการสอบเทียบค่าและมีการผ่านการควบคุมคุณภาพมาเป็นอย่างดี ช่วงที่สองหรือใช้งานปกติ (Useful life, II) เป็นช่วงที่มีอัตราเสี่ยงต่อความล้มเหลวมีค่าคงที่ สามารถอธิบายได้ว่า ช่วงนี้เป็นช่วงที่ใช้งานอุปกรณ์หรือระบบโดยมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวคงที่ ช่วงที่สามหรือช่วงเสื่อมสภาพ (Wear-out III) เป็นช่วงที่อุปกรณ์หรือระบบถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน อาจจะมีปัจจัยอื่นมา มีผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือระบบ ทำให้เกิดความล้มเหลวหรือความผิดพลาดในไม่ช้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานมากขึ้น เช่น การกีดคร่อน หรือการเปลี่ยนอุปกรณ์บางส่วน ในช่วงนี้อัตราเสี่ยงต่อความล้มจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วรูปร่าง Bathtub Curve ของแต่ละอุปกรณ์จะมีรูปร่างต่างกันไป



รูปที่ 2.1 คุณลักษณะของอุปกรณ์แบบ Bathtub Curve

2.2 การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์แบบต่าง ๆ

ระบบควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการจะมีความซับซ้อน เนื่องจากประกอบขึ้นจากระบบควบคุมหลายๆระบบที่มาทำงานให้สัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นแบบจำลองการเชื่อมต่อของระบบนั้น ให้สามารถเข้าใจและศึกษาได้ง่ายขึ้นดังนี้ คือ

2.2.1 ระบบหรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม

ระบบหรืออุปกรณ์พื้นฐานหากนำมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมตามรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาจะพบว่า อุปกรณ์หรือระบบที่เชื่อมต่อกันจะต้องสามารถทำงานได้ทุกหน่วย เพื่อที่จะทำให้ระบบโดยรวมอยู่ในสถานะที่ทำงานได้ ถ้าอุปกรณ์หรือระบบพื้นฐานส่วนหนึ่งไม่สามารถทำงานได้ก็จะทำให้ระบบทั้งหมดหยุดการทำงานไปด้วย[5] สามารถเขียนแบบจำลองความสัมพันธ์ได้ดังรูป



รูปที่ 2.2 แบบจำลองระบบที่ต่ออนุกรมกันจำนวน n หน่วย

ความน่าเชื่อถือของระบบหรืออุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม สามารถหาความน่าเชื่อถือของระบบทั้งหมดได้จากสมการ (2.2)

$$R_s = P(E_1 \times E_2 \times E_3 \times \dots \times E_n) \quad (2.2)$$

กำหนดให้ R_s คือ ความน่าเชื่อถือของระบบ

E_n คือ เหตุการณ์ที่ระบบพื้นฐานที่ n จะไม่เกิดความล้มเหลว

$P(E_1 \times E_2 \times E_3 \times \dots \times E_n)$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น E_1 ถึง E_n ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากระบบพื้นฐานที่ประกอบขึ้นเป็นอิสระต่อกัน คือ การที่ระบบพื้นฐานตัวหนึ่งหยุดการทำงานไป จะไม่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบพื้นฐานตัวอื่นที่ต่อร่วมกันระบบแบบอนุกรมนี้ระบบพื้นฐานทั้งสองต้องทำงานได้ตามหน้าที่ของมัน จึงจะทำให้ระบบสามารถทำงานได้ตามปกติ หากกำหนดได้ $R_i = P(E_i)$ โดยที่ i จะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n สามารถเขียนสามารถได้ว่า

$$\begin{aligned} R_s &= R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n \\ &= \prod_{i=1}^n R_i \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) หากพิจารณาคุณลักษณะของอุปกรณ์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเลขชี้กำลัง (Exponential Equation) นั่นคือกำหนดให้ $R = e^{-\lambda t}$ ซึ่งสมการเลขชี้กำลังมักถูกนำมาใช้ในการแสดงพฤติกรรมของอุปกรณ์ โดยกำหนดให้ λ_i อัตราส่วนความล้มเหลวคงที่ และ t_i คือช่วงเวลาทีพิจารณาซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการให้อุปกรณ์หรือระบบสามารถทำงานได้ไม่เกินความล้มเหลวเมื่อแทนเลขชี้กำลังด้วย F_i จะทำให้ได้สมการคือ $R_i = e^{-F_i}$ จากสมการที่ (2.3) หากแทนค่า $R_1 = e^{-F_1}, R_2 = e^{-F_2}, \dots, R_n = e^{-F_n}$ ลงในสมการที่ (2.3) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} R_s &= R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n \\ &= e^{-F_1} \times e^{-F_2} \times \dots \times e^{-F_i} \times \dots \times e^{-F_n} \\ &= e^{-(F_1+F_2+\dots+F_i+\dots+F_n)} \\ &= \exp\left(-\sum_{i=1}^n F_i\right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

หาก $t_1 = t_2 = \dots = t_n$ สามารถเขียนสมการที่ (2.4) ได้ใหม่ว่า

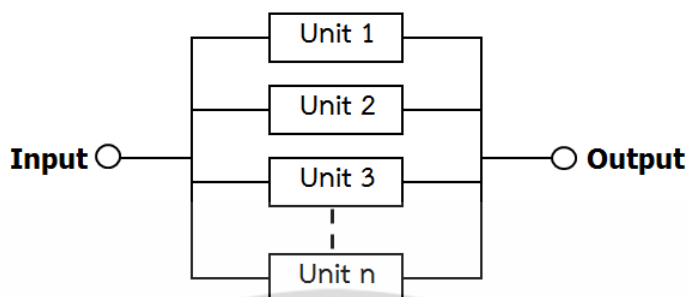
$$R_s = \exp\left(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \quad (2.5)$$

ค่าความน่าเชื่อถือรวมของระบบจะมีค่าไม่มากไปกว่าค่าความเชื่อถือน้อยที่สุดของระบบพื้นฐาน ดังนั้น ระบบที่มีรูปแบบการต่อแบบอนุกรมจึงต้องมีความน่าเชื่อถือของระบบพื้นฐานสูง โดยเฉพาะระบบที่มีจำนวนระบบหรืออุปกรณ์พื้นฐานต่อกันอยู่เป็นจำนวนมาก

2.2.2 ระบบหรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันแบบขนาน

เมื่อนำระบบหรืออุปกรณ์พื้นฐานที่มีหน้าที่เหมือนกันมาเชื่อมต่อขนานกัน สามารถเรียกการต่อแบบนี้ได้อีกอย่างว่า ระบบทำงานทดแทนกัน นิยามความน่าเชื่อถือของระบบหรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันแบบขนานกันคือ ระบบหรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันแบบขนานจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีระบบ

หรืออุปกรณ์พื้นฐานอย่างน้อยหนึ่งตัวสามารถทำงานได้แล้ว ระบบจะไม่เกิดความล้มเหลวสามารถเขียนแบบจำลองของระบบที่มีการเชื่อมต่อกันแบบขนานได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของระบบที่ต่อขนานกันจำนวน n หน่วย

การหาค่าความน่าเชื่อถือได้ของระบบที่มีการเชื่อมต่อกันของระบบหรืออุปกรณ์พื้นฐานแบบขนานสามารถหาได้จากสมการ (2.6)

$$Q_p = P(\bar{E}_1 \times \bar{E}_2 \times \bar{E}_3 \times \dots \times \bar{E}_n) \quad (2.6)$$

กำหนดให้ Q_p คือ ความน่าจะเป็นของระบบที่ต่ออุปกรณ์แบบขนานจะเกิดล้มเหลว

$P(\bar{E}_1 \times \bar{E}_2 \times \bar{E}_3 \times \dots \times \bar{E}_n)$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวของเหตุการณ์ $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3, \dots, \bar{E}_n$

ค่าความน่าเชื่อถือของระบบที่มีระบบที่มีระบบพื้นฐานจำนวน n ระบบต่อกันแบบขนานและระบบพื้นฐานทุกหน่วยเป็นอิสระต่อกันอาจเขียนสมการที่ (2.6) ใหม่ได้ว่า

$$Q_p = P(\bar{E}_1) \times P(\bar{E}_2) \times P(\bar{E}_3) \times \dots \times P(\bar{E}_n) \quad (2.7)$$

กำหนดให้ $P(\bar{E}_1 \times \bar{E}_2 \times \bar{E}_3 \times \dots \times \bar{E}_n)$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวของ

เหตุการณ์ ตั้งแต่ถึง \bar{E}_1 ถึง \bar{E}_n

Q_p คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบที่ต่อแบบขนานจะล้มเหลว

หากให้ $Q_i = P(\bar{E}_i)$ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ สามารถเขียนสมการที่ (2.7) ได้ใหม่ว่า

$$\begin{aligned} Q_p &= Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times \dots \times Q_n \\ &= \prod_{i=1}^n Q_i \end{aligned} \quad (2.8)$$

ค่าความน่าเชื่อถือของระบบแบบขนาน สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

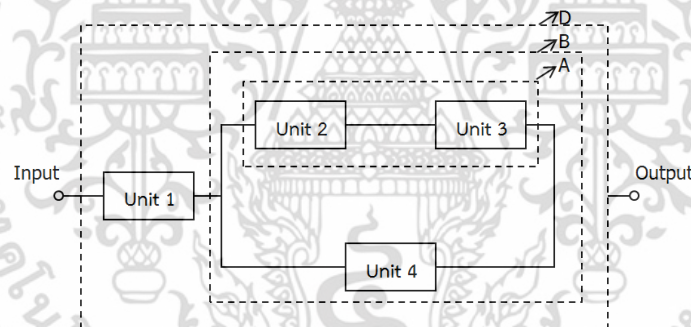
$$R_p = 1 - Q_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (2.9)$$

กำหนดให้ R_p คือความน่าเชื่อถือของระบบที่ต่อกันแบบขนาน

จากสมการที่ (2.8) หากกำหนดให้ $R = e^{-\lambda t}$ โดยกำหนดให้ λ_i อัตราส่วนความล้มเหลวคงที่ และ t_i คือ ช่วงเวลาที่พิจารณาซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ต้องการให้อุปกรณ์หรือระบบสามารถทำงานไม่เกิดความล้มเหลว เมื่อแทนเลขชี้กำลังด้วย F_i จะทำให้ได้สมการ $R_i = e^{-F_i}$ จากสมการที่ (2.8) หากแทนค่า $Q_1 = 1 - e^{-F_1}, Q_2 = 1 - e^{-F_2}, \dots, Q_n = 1 - e^{-F_n}$ ลงในสมการที่ (2.8) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า $Q_p = Q_1 \times Q_2 = (1 - e^{-F_1})(1 - e^{-F_2})$

2.2.3 ระบบหรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันแบบผสมระหว่างอนุกรมและขนาน

ในระบบจริงนั้น อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันเป็นระบบอาจจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันแบบขนานและต่อกันแบบอนุกรมมารวมกันเป็นระบบ ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าระบบที่มีการต่อเชื่อมของอุปกรณ์ที่มีเฉพาะแบบอนุกรมและขนาน โดยสามารถความน่าเชื่อถือของระบบได้ด้วยหลายวิธีการ เช่น การลดรูปของของระบบจนกระทั่งเหลือรูปวงจรบแบบเดียว



รูปที่ 2.4 ระบบที่ต่อแบบอนุกรม - ขนาน และการลดรูปวงจรบ

จากรูปที่ 2.4 R_i คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์หน่วยที่ i จะทำงานได้สำเร็จ

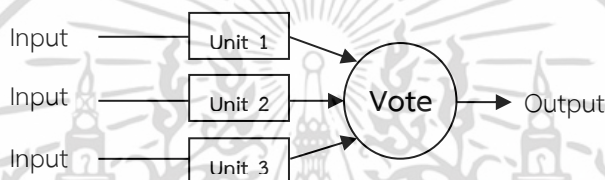
Q_i คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์หน่วยที่ i จะทำงานล้มเหลว

การลดรูปวงจรบทำได้เริ่มลดรูปวงจรบในส่วน A ซึ่งมีอุปกรณ์หน่วยที่ 2 และ 3 ต่ออนุกรมกัน อยู่สามารถหาความน่าเชื่อถือส่วน A ได้จากสมการ $R_A = R_2 R_3$ จากนั้นจะพบว่าวงจรบส่วน A ต่อเชื่อมขนานกันกับอุปกรณ์หน่วยที่ 4 กำหนดให้ส่วนนี้เป็นส่วน B ค่าความน่าเชื่อถือได้ส่วนนี้คือ $R_B = 1 - Q_4(1 - R_2 R_3)$ เมื่อลดรูปแล้วจะพบว่าเหลือส่วน C ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หน่วยที่ 1 และส่วน B สามารถหาความน่าเชื่อถือได้จากสมการ $R_T = R_D = R_1[1 - Q_4(1 - R_2 R_3)]$ ซึ่งเมื่อแทน $Q_4 = 1 - R_4$ จะทำให้ได้สมการ $R_T = R_D = R_1(R_2 R_3 + R_4 - R_2 R_3 R_4)$ และสามารถหาความน่าเชื่อถือรวมของระบบได้จากสมการ $Q_T = 1 - R_T = R_D$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ระบบหรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันแบบโมดูลซ้ำสำรองสามโมดูล

ระบบหรืออุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบโมดูลซ้ำสำรองสามโมดูล (Triple Modular Redundancy, TMR) เป็นระบบที่นิยมใช้ในการออกแบบระบบคอมพิวเตอร์ โดย Von Neumann [8] เป็นผู้เสนอเป็นครั้งแรกในปี 1956 พื้นฐานระบบนี้จะประกอบไปด้วยโมดูลที่เป็นอิสระต่อกันจำนวนสามโมดูลผ่านไปยังโมดูลสำหรับโหวตคะแนน (Voter) เพื่อเลือกโมดูลเพียงโมดูลเดียวที่จะนำออกเอาท์พุตข้อดีในการใช้ระบบที่ต่อแบบซ้ำซ้อนสำรองสามโมดูล คือ หากกรณีที่มีเอาท์พุตของหนึ่งในสามโมดูลเกิดความผิดพลาด แต่เอาท์พุตจะยังคงทำงานถูกต้องอยู่เนื่องจากการจะมีการทำงานโดยตัวโหวตคะแนน สามารถแสดงการต่อเชื่อมแบบโมดูลซ้ำสำรองสามโมดูลดังรูปที่ 2.5 และแสดงการทำงานโดยตัวโหวตคะแนนดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่อระบบหรืออุปกรณ์แบบโมดูลซ้ำสำรองสามส่วน

ตารางที่ 2.1 การโหวตคะแนนของตัวโหวตคะแนนเอาท์พุต

สถานะโมดูล			เอาท์พุตของตัวโหวต
โมดูลที่ 1	โมดูลที่ 2	โมดูลที่ 3	
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

ในตารางที่ 2.1 เป็นเงื่อนไขที่ตัวโหวตคะแนนใช้ลงคะแนนเพื่อเลือกเอาท์พุตของโมดูลซ้ำสำรองเพียงหนึ่งโมดูลเป็นเอาท์พุตรวมของระบบเพื่อควบคุมกระบวนการ กำหนดให้ 1 คือสถานะที่โมดูลนั้นสามารถทำงานได้สำเร็จ และ 0 คือสถานะที่โมดูลนั้นไม่สามารถทำงานได้โดยกำหนดเงื่อนไขว่าจะต้องมีอย่างน้อย 2 ใน 3 โมดูลที่สามารถทำงานได้สำเร็จ ระบบรวมจึงจะสามารถทำงานได้สำเร็จ ซึ่งตรรกในการโหวตเขียนเป็นสมการพีชคณิตได้ คือ $(A+B)C = AC+BC$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเอกสารนี้เผยแพร่เอกสารนี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ A, B และ C คือ สถานการณ์ทำงานของโหนดที่ 1,2 และ 3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.5 สามารถหาความน่าเชื่อถือรวมของระบบแบบโหนดซ้ำสำรอง 3 โหนด โดยใช้เงื่อนไขของตัวโหนดในตารางที่ 2.1 หาได้จากสมการ

$$R_{TMRV} = (3R_m^2 - 2R_m^3)R_v \quad (2.10)$$

กำหนดให้

R_{TMRV} คือ ความน่าเชื่อถือของระบบโดยรวมโหนดของการโหนด

R_v คือ ความน่าเชื่อถือของโหนดการโหนด

R_m คือ ความน่าเชื่อถือของโหนดที่ m

หากกำหนดให้เป็นการโหนดที่สมบูรณ์ จะทำให้ $R_v = 1$ ดังนั้น

$$R_{TMR} = (3R_m^2 - 2R_m^3) \quad (2.11)$$

กำหนดให้

R_{TMR} คือ ความน่าเชื่อถือของระบบที่ต่อแบบโหนดซ้ำสำรอง 3 โหนดที่มีการโหนดที่สมบูรณ์ (Perfect voter)

หากพิจารณาสมการที่ (2.11) จะพบว่าจำนวนองค์ประกอบที่ในระบบ และเงื่อนไขของการโหนดมีผลกับสมการการหาความน่าเชื่อถือของระบบ เลข 3 ที่พจน์แรกแสดงถึงจำนวนองค์ประกอบที่มีในระบบ เลข 2 คือ เงื่อนไขที่กำหนดให้มืองค์ประกอบอย่างน้อย 2 ตัวในระบบจะต้องสามารถทำงานได้ระบบรวมจึงจะทำงานได้สำเร็จ สามารถอธิบายที่มาด้วยทฤษฎีการจัดหมู่ (Combination Theorem) และทฤษฎีทวินาม (Binomial Theorem) ดังนี้

$$\text{เมื่อ } (a+b)^n = a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)a^{n-2}b^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)a^{n-3}b^3}{3!} + \dots + b^n$$

หากกำหนดให้ $a = b$ คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบจะสามารถทำงานได้สำเร็จ $b = q$ คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบจะไม่สามารถทำงานได้สำเร็จ ดังนั้น $(p+q) = (a+b) = 1$ จะทำให้ได้สมการที่ (2.12)

$$(p+q)^n = p^n + np^{n-1}q + \frac{n(n-1)p^{n-2}q^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)p^{n-3}q^3}{3!} + \dots + q^n = 1 \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเทอมของ r th คือ r th = $\frac{n!}{r!(n-r)!} p^{n-r} q^r$

โดยกำหนดให้ n คือ จำนวนเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น r คือ จำนวนของเหตุการณ์ที่เกิดความล้มเหลวขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติให้ระบบมีองค์ประกอบทั้งหมดจำนวน n โมดูลและกำหนดให้ p คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะสามารถทำงานได้สำเร็จ q คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์นั้นจะไม่สามารถทำงานได้สำเร็จ ซึ่งหาได้จาก $q = 1 - p$ และกำหนดเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นเพื่อพิจารณาโดยแทนค่าต่างๆ ลงในสมการในเทอมของ r th ดังนี้

กรณีที่สมมุติให้ระบบมีองค์ประกอบโมดูลเดียว นั่นคือ $n = 1$ ความน่าจะเป็นที่โมดูลจะสามารถทำงานได้สำเร็จคือ p

กรณีที่สมมุติให้ระบบมีองค์ประกอบจำนวน 2 โมดูล นั่นคือ $n = 2$ ความน่าจะเป็นที่โมดูลจะสามารถทำงานสำเร็จทั้งคู่คือ $p \times p = p^2$

กรณีที่สมมุติให้ระบบมีองค์ประกอบจำนวน 3 โมดูล นั่นคือ $n = 3$ ความน่าจะเป็นที่โมดูลจะสามารถทำงานได้สำเร็จทั้ง 3 โมดูลคือ $p \times p \times p = p^3$

ผลจากการแทนค่าจำนวนองค์ประกอบในระบบลงในสมการที่ 2.12 และเปรียบเทียบกับ การกระจายตามทฤษฎีบททวินามพบว่า เมื่อระบบมีองค์ประกอบจำนวน n โมดูล ความน่าจะเป็นที่ทุกองค์ประกอบจะสามารถทำงานได้สำเร็จคือ p^n นั่นคือพจน์แรกที่ได้จากการกระจายตามทฤษฎีบททวินาม

กรณีที่สมมุติให้ระบบมีองค์ประกอบอยู่ 2 โมดูล นั่นคือ $n = 2$ โดยกำหนดให้โมดูลแรก คือ A และโมดูลที่ 2 คือ B และกำหนดเงื่อนไขของเหตุการณ์เกิดขึ้นกับองค์ประกอบของระบบ 2 โมดูล คือ หากโมดูลหนึ่งทำงานได้สำเร็จแล้วอีกโมดูลหนึ่งจะต้องไม่ทำงานไม่สำเร็จ เช่น โมดูล A สามารถทำงานได้สำเร็จแต่โมดูล B ทำงานไม่สำเร็จ สามารถหาค่าความน่าเชื่อถือได้คือ $(p \times q)$ และเมื่อโมดูล A ทำงานไม่สำเร็จแล้วโมดูล B ทำงานได้สำเร็จ สามารถหาค่าความน่าเชื่อถือได้ คือ $(q \times p)$ นั่นคือ $(p \times q) = (q \times p)$ จะเห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์ตามเงื่อนไขดังกล่าวแล้ว จะเกิดเหตุการณ์ไม่เกิดร่วม (Mutually Exclusive) และเมื่อพิจารณาต่อไปอีกว่าระบบนี้มีองค์ประกอบอยู่ 2 โมดูลเมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่เกิดร่วมแล้ว สามารถหาความน่าจะเป็นที่โมดูลหนึ่งจะทำงานสำเร็จ และอีกโมดูลหนึ่งจะทำงานไม่สำเร็จได้จาก $2pq$ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ การกระจายตามทฤษฎีบททวินาม ก็จะพบว่า ตรงกับพจน์กลางของการกระจาย $(p + q)^2 = p^2 + 2pq + q^2$

กรณีที่สมมุติให้ระบบมีองค์ประกอบอยู่ 3 โมดูล นั่นคือ $n = 3$ โดยกำหนดให้โมดูลแรก คือ A, B และ C ตามลำดับ และกำหนดเงื่อนไขของเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นกับองค์ประกอบของระบบ 3 โมดูลคือ ต้องมีโมดูลอย่างน้อย 2 ใน 3 โมดูล ระบบรวมจึงจะสามารถทำงานได้สำเร็จ เช่น กรณีที่โมดูล A และ B สามารถทำงานได้สำเร็จและโมดูล C ไม่สามารถทำงานได้สำเร็จ กรณีที่โมดูล A และ C สามารถทำงานได้สำเร็จและโมดูล B ไม่สามารถทำงานได้สำเร็จและกรณีที่โมดูล B และ C ทำงานได้สำเร็จและโมดูล A ไม่สามารถทำงานได้สำเร็จ จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขเช่นนี้ก็จะเกิดเหตุการณ์ไม่เกิดร่วมเช่นเดียวกัน โดยสามารถหาความน่าจะเป็นที่มีอย่างน้อย 2 ใน 3 โมดูลจะทำงานสำเร็จได้

จาก $3p^2q$ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ การกระจายตามทฤษฎีบททวินามของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(p+q)^3 = p^3 + 3p^2q + 3pq^2 + q^3$ ก็จะพบว่าตรงกับพจน์ที่สองของการกระจาย การความน่าเชื่อถือของระบบที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 โมดูลโดยมีเงื่อนไขว่า 2 ใน 3 โมดูลจะต้องสามารถทำงานได้สำเร็จจึงสามารถหาได้จากสมการ $p^3 + 3p^2q$ โดยที่ p^3 หมายถึงกรณีที่เกิดเหตุการณ์โมดูลทั้ง 3 หากแทนค่า $q = 1 - p$ ก็จะทำให้ได้สมการที่ (2.11)

2.3 ระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง

ระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง (Redundant Systems) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบ โดยใช้ระบบจะประกอบด้วยโมดูลที่ซ้ำกันเพื่อให้สามารถทำงานทดแทนกัน เมื่อเกิดกรณีโมดูลที่กำลังทำงานอยู่ไม่สามารถทำงานได้ โมดูลซ้ำที่สำรองจะต้องสามารถทำงานทดแทนได้ทันที การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์ในระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรองนั้น ตามหลักของวิศวกรรมความน่าเชื่อถือมีหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งการเชื่อมต่อแต่ละแบบก็จะเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมที่ต่างกันออกไป หากแบ่งลักษณะการทำงานของโมดูลซ้ำสำรองอาจแบ่งได้โมดูลที่เชื่อมกันแบบขนานได้ 2 ลักษณะคือแบบทำงานพร้อมกัน (Active Parallel) และแบบสำรองรอทำงาน (Stand-by) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6



(ก) Active Redundancy

(ข) Stand-by Redundancy

รูปที่ 2.6 ระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรองแบ่งตามลักษณะการทำงาน

2.3.1 การทำงานของโมดูลซ้ำสำรองแบบทำงานพร้อมกัน (Active Parallel)

โมดูลซ้ำสำรองที่ทำงานแบบทำงานพร้อมกัน บางครั้งเรียกว่า Hot Stand-by พบมาในการใช้ควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม มีลักษณะคล้ายกันกับโมดูลซ้ำสำรองที่ทำงานแบบสำรองรอทำงาน โดยแต่โมดูลที่ซ้ำสำรองแบบทำงานพร้อมกันนี้ จะทำงานควบคู่ไปกับโมดูลหลัก และคอยตรวจจับการหยุดการทำงานของโมดูลหลัก ถ้าหากโมดูลหลักหยุดทำงานลง โมดูลซ้ำสำรองแบบทำงานพร้อมกันจะเข้าไปทำงานแทนที่โมดูลหลักเองอย่างอัตโนมัติ ด้วยความรวดเร็ว เพราะโมดูลสำรองแบบทำงานพร้อมกันทำงานควบคู่ไปกับโมดูลหลักอยู่แล้ว ดังนั้นสภาวะการทำงานของระบบจะทำงานต่อเนื่องกันได้ทันที แต่เอาต์พุตของตัวควบคุมก็ยังคงการช่วงเวลาหนึ่งในการสร้างสภาวะของเอาต์พุต ถ้าหากค่าเวลาก่อนที่กระบวนการจะหยุดทำงานมีค่าน้อยกว่า ๆ น้อยเกินกว่าช่วงเวลาที่ต้องการสร้างสภาวะของเอาต์พุตแล้ว กระบวนการก็จะหยุดทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การทำงานของโมดูลที่ซ้ำสำรองรอทำงาน (Stand-by Redundancy)

การทำงานของโมดูลที่ซ้ำสำรองแบบสำรองรอทำงานหรือบางครั้งเรียกว่า Cold Stand-by Redundancy ซึ่งเป็นระบบที่ง่ายที่สุด โดยจะมีโมดูลซ้ำสำรองที่สามารถต่อเข้าทำงานทดแทนโมดูลหลักได้อย่างรวดเร็ว เมื่อโมดูลหลักเกิดความล้มเหลวเนื่องจากเกิดความผิดพลาดบางอย่างขึ้น วิธีการนี้จะช่วยลดเวลาในการเปลี่ยน หรือซ่อมแซมโมดูลที่เกิดความล้มเหลวขึ้น เนื่องจากโมดูลสำรองสามารถทำงานทดแทนโมดูลหลักได้ทันที ไม่เสียเวลาในการตรวจวิเคราะห์หาสาเหตุการหยุดการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถหาได้ในภายหลังอีกทั้งไม่เสียเวลาในการติดตั้งชิ้นส่วนสำรองให้ระบบ แต่วิธีนี้จะเสียค่าใช้จ่ายมาก เพราะต้องสร้างระบบสำรองขึ้นมาอีกระบบหนึ่งรอไว้ รวมด้วยค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ตัดต่อให้ระบบสำรองเข้ามาทำงานแทนระบบหลักด้วย ระบบนี้เหมาะกับกระบวนการที่มีค่าเวลาก่อนที่กระบวนการจะหยุดทำงานมาก ๆ

2.4 การสวิตช์ของระบบแบบโมดูลซ้ำสำรอง

ในกรณีที่โมดูลซ้ำสำรองทำงานแบบพร้อมกัน ทุกโมดูลในระบบจะทำงานพร้อมๆกัน ซึ่งต่างกับโมดูลซ้ำสำรองที่ทำงานแบบสำรองรอทำงาน โมดูลซ้ำสำรองจะทำงานก็ต่อเมื่อโมดูลหลักที่ทำงานอยู่เกิดความผิดพลาดบางอย่างจนไม่สามารถทำงานได้ จะเห็นการสับเปลี่ยนจากโมดูลหลักไปสู่โหมดการทำงานของโมดูลสำรอง จำเป็นต้องพิจารณาในส่วนของรูปแบบการสับเปลี่ยนโมดูล สามารถแบ่งรูปแบบการสับเปลี่ยนได้ 2 ชนิด คือ การสับเปลี่ยนที่สมบูรณ์ (Perfect Switching) และการสับเปลี่ยนที่ไม่สมบูรณ์ (Imperfect Switching)

2.4.1 การสับเปลี่ยนของโมดูลที่สมบูรณ์แบบ

การสับเปลี่ยนของโมดูลที่สมบูรณ์แบบ คือ เมื่อโมดูลหลักเกิดความล้มเหลวในการทำงานแล้ว การสับเปลี่ยนไปใช้โมดูลสำรองจะต้องไม่ติดขัด จากรูปที่ 2.6 (ข) หากสมมุติมีการสับเปลี่ยนเป็นแบบสมบูรณ์แบบ และอัตราการล้มเหลวของการสับเปลี่ยนเป็นศูนย์ จะพบว่าระบบจะเกิดความล้มเหลวได้ก็ต่อเมื่อ โมดูล B กำลังอยู่ในโหมดของการทำงานแล้วเกิดความล้มเหลวขึ้น นั่นคือเกิดเหตุการณ์ที่โมดูล A ซึ่งเป็นโมดูลหลักเกิดความล้มเหลวในการทำงาน แล้วมีการสับเปลี่ยนให้โมดูล B ทำงานทดแทนจากนั้นระบบจะล้มเหลวทันทีเมื่อโมดูล B สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้นในระบบจากสมการที่ (2.13)

$$Q = Q(A)Q(B|\bar{A}) \quad (2.13)$$

หากโมดูล A และ B เป็นอิสระต่อกันสามารถเขียนสมการที่ (2.3) ใหม่ได้ว่า

$$Q = Q(A)Q(B) = Q_A Q_B \quad (2.14)$$

โดยที่ Q คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวกับระบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q_A คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวในโมดูล A

Q_B คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวในโมดูล B

2.4.2 การสับเปลี่ยนของโมดูลแบบไม่สมบูรณ์แบบ

ในกรณีของการสับเปลี่ยนของโมดูลแบบไม่สมบูรณ์แบบนี้ จะนำความน่าจะเป็นที่จะสับเปลี่ยนจากโมดูล A ไปสู่โมดูล B แล้วสามารถเกิดความล้มเหลวขึ้นมาพิจารณาด้วย จากรูปที่ 2.6 (ข) หากกำหนดให้ P_s คือ ความน่าจะเป็นที่มีการสับเปลี่ยนจากโมดูล A ไปสู่โมดูล B ได้สำเร็จ สามารถหาความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดความล้มเหลวได้คือ

$$\begin{aligned} Q &= Q_A Q_B P_s + Q_A (1 - P_s) \\ &= Q_A - Q_A P_s (1 - Q_B) \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.5 ระบบโหวตคะแนน

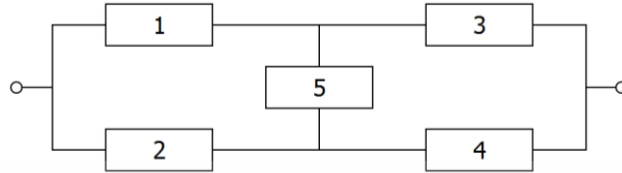
ในระบบควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ (Computer Control System) ถูกนำมาใช้สำหรับการควบคุมกระบวนการให้มีความต่อเนื่องและปลอดภัยในการปฏิบัติงาน โดยในระบบที่เข้าสำรองจะมีโมดูลของการโหวตคะแนน (Voting System) เพื่อเลือกเอาท์พุตเพียงหนึ่งเอาท์พุตใช้ควบคุมกระบวนการ เงื่อนไขการโหวตที่เหมาะสมและนิยมใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมแบบโมดูลสำรอง [16] คือ ระบบโหวต 2 ใน 3 โมดูล หมายถึง มีคอมพิวเตอร์ควบคุมกระบวนการจำนวน 3 โมดูลหรือเครื่องมือวัดคุมซึ่งทำงานแบบขนานกัน จากนั้นจะมีการเปรียบเทียบเอาท์พุตของทั้ง 3 โมดูล หากมีเพียงหนึ่งเอาท์พุตที่ต่างไปจากเอาท์พุตอีกสองโมดูล โมดูลนั้นจะถูกเพิกเฉยไปจากระบบการโหวตคะแนน การหาความน่าเชื่อถือของระบบที่ใช้เงื่อนไข 2 ใน 3 ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (2.10) และ (2.11) ระบบควบคุมที่ดีควรมีโมดูลการโหวตคะแนนที่มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวน้อยมาก ๆ

2.6 การหาความน่าเชื่อถือระบบด้วยวิธีมินิมัลคัทเซต

การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์ในระบบที่มีความซับซ้อน (Complex Systems) ซึ่งในระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันมากมายหลายโมดูล อาจทำให้ยากต่อการลดรูปการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปพื้นฐานคือ การเชื่อมกันของอุปกรณ์แบบขนาน และการเชื่อมต่อแบบอนุกรม วิธีการมินิมัลคัทเซต (Minimal Cut Set Methods) ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้โดยให้หลักการพิจารณา กลุ่มของโมดูลองค์ประกอบที่มีความสำคัญกับระบบซึ่งแต่ละโมดูลมีความสัมพันธ์กัน และมีผลต่อการทำงานของระบบว่าจะเกิดความล้มเหลวหรือไม่ หากเกิดโมดูลใดโมดูลหนึ่งในกลุ่มเกิดความล้มเหลวในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คัทเซ็ท เป็นเซ็ทของโมดูลองค์ประกอบในระบบที่มีเส้นทางเดินตั้งแต่ด้านอินพุตของระบบ ไปสู่ด้านเอาต์พุตของระบบ หากขาดโมดูลใดโมดูลหนึ่งในเส้นทางนั้นแล้วจะทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวขึ้น หากพิจารณาในรูปที่ 2.7 สามารถเขียนเป็นเซ็ทของมินิมัลคัทเซ็ทได้ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์สำหรับการหาความน่าเชื่อถือแบบมินิมัลคัทเซ็ท

ตารางที่ 2.2 เซ็ทของโมดูลองค์ประกอบที่เป็นมินิมัลคัทเซ็ท

Minimal Cut Set	Component in the set
C_1	1, 2
C_2	3, 4
C_3	1, 4, 5
C_4	2, 3, 5

หากกำหนดให้ \bar{C}_i คือความน่าจะเป็นที่จะทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวในการทำงาน โดยคิดด้วยวิธีคัทเซ็ทที่เส้นทางเดิน i สามารถเขียนเป็นสมการเพื่ออธิบายได้ดังนี้

$$P_f = P(\bar{C}_1 \cup \bar{C}_2 \cup \bar{C}_3 \cup \dots \cup \bar{C}_m) \quad (2.16)$$

โดยกำหนดให้ P_f คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดความล้มเหลว จากรูปที่ 2.7 สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\begin{aligned} P_f &= P(\bar{C}_1 \cup \bar{C}_2 \cup \bar{C}_3 \cup \bar{C}_4) \\ &= [P(\bar{C}_1) + P(\bar{C}_2) + P(\bar{C}_3) + P(\bar{C}_4)] - [P(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_2) \\ &\quad + P(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_3) + P(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_4) + P(\bar{C}_2 \cap \bar{C}_3) + P(\bar{C}_3 \cap \bar{C}_4) \\ &\quad + P(\bar{C}_2 \cap \bar{C}_4)] + [P(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_2 \cap \bar{C}_3) + P(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_2 \cap \bar{C}_4) \\ &\quad + P(\bar{C}_2 \cap \bar{C}_3 \cap \bar{C}_4) + P(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_3 \cap \bar{C}_4)] \\ &\quad - [P(\bar{C}_1 \cap \bar{C}_2 \cap \bar{C}_3 \cap \bar{C}_4)] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ความน่าเชื่อถือระบบซ้ำสำรองที่ทำงานแบบมีเงื่อนไข

อัตราการล้มเหลว (Failure Rate : λ) และค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลว (Mean Time to Failures : MTF) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาหาความน่าเชื่อถือของระบบ โดยทั้งสองตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กัน ในหัวข้อนี้เป็นการหาความน่าเชื่อถือระบบที่มีการทำงานแบบมีเงื่อนไขของอัตราการล้มเหลว และค่าเฉลี่ยเวลาที่จะล้มเหลว

ความน่าเชื่อถือหรือความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดความล้มเหลวขึ้นในระบบ สามารถอธิบายคุณลักษณะของอุปกรณ์นั้นได้จากสมการ

$$R = e^{-\lambda t} = e^{-t/m} \quad (2.17)$$

$$m = MTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.18)$$

โดยที่ R คือ ค่าความน่าเชื่อถือที่ระบบจะไม่เกิดความล้มเหลวในเวลา t
 λ คือ ค่าอัตราการล้มเหลว
 m คือ ค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลว

2.7.1 ความน่าเชื่อถือระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรองเชื่อมต่อกันแบบขนาน 2 โมดูล

จากสมการที่ (2.8) ซึ่งเป็นสมการที่มีโมดูลซ้ำสำรองเชื่อมต่อกันแบบขนาน สมมติให้ระบบที่กำลังพิจารณาประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 โมดูลสามารถหาค่าความไม่น่าเชื่อถือของระบบได้จากสมการ $Q_1 \times Q_2$ หากแทน $Q_1 = 1 - R_1 = 1 - e^{-F_1}$ และ $Q_2 = 1 - R_2 = 1 - e^{-F_2}$ จะทำให้ได้สมการ $Q_1 \times Q_2 = (1 - e^{-F_1}) \times (1 - e^{-F_2}) = 1 - e^{-F_1} - e^{-F_2} + (e^{-F_1} \times e^{-F_2})$ นั่นคือสามารถหาความน่าเชื่อถือของระบบได้จากสมการดังนี้

$$R_T = e^{-F_1} - e^{-F_2} - e^{-(F_1+F_2)} \quad (2.19)$$

สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปความน่าเชื่อถือแต่ละโมดูลจะได้สมการ

$$R_T = R_1 + R_2 \times R_1 R_2 \quad (2.20)$$

หรือสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปความไม่น่าเชื่อถือได้คือ

$$R_T = 1 - (Q_1 \times Q_2) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากทั้ง 2 โมดูลมีอัตราการล้มเหลวเท่ากัน สามารถเขียนสมการที่ (2.19) ถึง (2.21) ได้ใหม่ว่า $R_T = 2e^{-F} - e^{-2F}$; $R_T = 2R - R^2$; $R_T = 1 - Q^2$ ตามลำดับค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลว Mean time to failure (MTTF) สามารถหาได้จากการอินทิเกรตฟังก์ชันความน่าจะเป็นในสมการที่ (2.19)

$$\begin{aligned}
 m &= \int_0^{\infty} R_T dt = \int_0^{\infty} (e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}) dt \\
 &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} dt - \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} dt \\
 &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} \frac{-\lambda_1}{-\lambda_1} dt + \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} dt - \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \frac{-(\lambda_1 + \lambda_2)}{-(\lambda_1 + \lambda_2)} dt \\
 &= -\frac{1}{\lambda_1} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} d(-\lambda_1 t) - \frac{1}{\lambda_2} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} d(-\lambda_2 t) + \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)} \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} d(\lambda_1 + \lambda_2)t \\
 &= -\frac{1}{\lambda_1} [e^{-\lambda_1 t}]_0^{\infty} - \frac{1}{\lambda_2} [e^{-\lambda_2 t}]_0^{\infty} + \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)} [e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}]_0^{\infty} \\
 &= -\frac{1}{\lambda_1} (0 - 1) - \frac{1}{\lambda_2} (0 - 1) + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} (0 - 1) \\
 &= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}
 \end{aligned}$$

หากทั้ง 2 โมดูลมีอัตราการล้มเหลวเท่ากันจะทำให้ได้สมการ

$$m = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2\lambda} \quad (2.22)$$

2.7.2 ความน่าเชื่อถือระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรองเชื่อมต่อกันแบบขนาน 3 โมดูล

การทำงานแบบมีเงื่อนไขของระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรองจำนวน 3 โมดูล อาจแยกการทำงานแบบมีเงื่อนไขได้คือ กรณีที่ต้องมีอย่างน้อย 1 ใน 3 โมดูลทำงานสำเร็จระบบจึงจะไม่ล้มเหลวในการทำงาน และในกรณีที่ต้องมีอย่างน้อย 2 ใน 3 โมดูลทำงานสำเร็จระบบจึงจะไม่เกิดความล้มเหลวในการทำงาน และในกรณีที่ต้องมีอย่างน้อย 2 ใน 3 โมดูลทำงานสำเร็จระบบจึงจะไม่เกิดความล้มเหลวในการทำงาน อาจแยกการพิจารณาได้ดังนี้

กรณีที่ต้องมีอย่างน้อย 1 ใน 3 โมดูลต้องทำงานสำเร็จ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 และสมมุติให้มีโมดูลแบบซ้ำสำรองในระบบจำนวน 3 โมดูล ดังนั้นสามารถหาความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดความล้มเหลว คือ

$$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 = (1 - e^{-F_1}) \times (1 - e^{-F_2}) \times (1 - e^{-F_3}) = 1 - e^{-F_1} - e^{-F_2} - e^{-F_3} + (e^{-F_1} \times e^{-F_2}) + (e^{-F_1} \times e^{-F_3}) + (e^{-F_2} \times e^{-F_3}) - (e^{-F_1} \times e^{-F_2} \times e^{-F_3})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ สามารถหาความน่าเชื่อถือของระบบได้จากสมการ

$$R_T = e^{-F_1} + e^{-F_2} + e^{-F_3} - e^{-(F_1+F_2)} - e^{-(F_1+F_3)} - e^{-(F_2+F_3)} + e^{-(F_1+F_2+F_3)} \quad (2.23)$$

$$= R_1 + R_2 + R_3 - (R_1 \times R_2) - (R_1 \times R_3) - (R_2 \times R_3) + (R_1 \times R_2 \times R_3) \quad (2.24)$$

$$= 1 - (Q_1 \times Q_2 \times Q_3) \quad (2.25)$$

หากโมดูลทั้ง 3 มีค่าอัตราการล้มเหลวเท่ากันสามารถเขียนสมการที่ (2.23) ถึง (2.25) ใหม่ได้คือ $3e^{-F} - 3e^{-2F} + e^{-3F}$; $3R - 3R^2 + R^3$ และ $1 - Q^3$ ตามลำดับ ค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลว (Mean time to failure MTTF) สามารถหาได้จากการอินทิเกรตฟังก์ชันความน่าจะเป็นในสมการที่ (2.23) ซึ่งจะให้ได้ค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลวคือ

$$m = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (2.26)$$

หากทั้ง 3 โมดูลมีอัตราการล้มเหลวเท่ากัน สามารถเขียนสมการที่ (2.26) ใหม่ได้ว่า

$$m = \frac{3}{\lambda} - \frac{3}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} = \frac{18}{6\lambda} - \frac{9}{6\lambda} + \frac{2}{6\lambda} = \frac{11}{6\lambda} \quad (2.27)$$

กรณีที่ต้องมีอย่างน้อย 2 โมดูลต้องทำงานสำเร็จ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 และสมมติให้มีโมดูลแบบซ้ำสำรองในระบบจำนวน 3 โมดูล หากพิจารณาเงื่อนไขที่ 2 ใน 3 โมดูลจะต้องทำงานสำเร็จจะพบว่าหาก โมดูล A เกิดความล้มเหลวในการทำงานแล้วโมดูล B และ C จะต้องทำงานสำเร็จ หากโมดูล B เกิดความล้มเหลวแล้วโมดูล A และ C จะต้องทำงานสำเร็จ หากโมดูล C เกิดความล้มเหลวในการทำงานแล้ว โมดูล A และ B จะต้องทำงานสำเร็จ และจะพบว่าหากทั้ง 3 โมดูลสามารถทำงานได้สำเร็จระบบรวมทั้งจะทำงานได้สำเร็จเช่นกัน ความน่าเชื่อถือของระบบสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} R_T &= (R_1 \times R_2 \times R_3) + (Q_1 \times R_2 \times R_3) + (R_1 \times Q_2 \times R_3) + (R_1 \times R_2 \times Q_3) \\ &= (R_1 \times R_2 \times R_3) + (Q_1 \times R_2 \times R_3 \times \frac{R_1}{R_1}) + (R_1 \times Q_2 \times R_3 \times \frac{R_2}{R_2}) + (R_1 \times R_2 \times Q_3 \times \frac{R_3}{R_3}) \\ &= (R_1 \times R_2 \times R_3) + (Q_1 \times R_2 \times R_3 \times \frac{Q_1}{R_1}) + (R_1 \times Q_2 \times R_3 \times \frac{Q_2}{R_2}) + (R_1 \times R_2 \times Q_3 \times \frac{Q_3}{R_3}) \\ &= (R_1 \times R_2 \times R_3) \times (1 \times \frac{Q_1}{R_1} \times \frac{Q_2}{R_2} \times \frac{Q_3}{R_3}) \end{aligned} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากแต่ละโมดูลมีค่าอัตราการล้มเหลวเท่ากันจะทำให้ได้สมการ

$$R_T = R^3(1 + 3\frac{Q}{R}) = R^3 + 3R^2Q \quad (2.29)$$

$$= R^3 + 3R^2(1-R) = R^3 + 3R^2 - 3R^3 = 3R^2 - 2R^3$$

ค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลว (Mean time to failure MTTF) สามารถหาได้จากการอินทิเกรตฟังก์ชันความน่าจะเป็นในสมการที่ (2.28) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลวคือ

$$\begin{aligned} R_T &= \int_0^{\infty} (R_1 x R_2 x R_3) + (Q_1 x R_2 x R_3) + (R_1 x Q_2 x R_3) x (R_1 x R_2 x Q_3) dt \\ &= \int_0^{\infty} [e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} + (1 - e^{-\lambda_1 t}) e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} + (1 - e^{-\lambda_2 t}) e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t} + (1 - e^{-\lambda_3 t}) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}] dt \\ &= \int_0^{\infty} (e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} - 2e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}) dt \\ &= \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \end{aligned} \quad (2.30)$$

หากแต่ละโมดูลมีค่าอัตราการล้มเหลวเท่ากันสามารถเขียนสมการที่ (2.30) ใหม่ได้ว่า

$$m = \frac{3}{2\lambda} + \frac{2}{3\lambda} - \frac{5}{3\lambda} \quad (2.31)$$

2.8 ความน่าเชื่อถือระบบซ้ำสำรองที่ทำงานโดยลำดับ

ในการศึกษาการเกิดความล้มเหลวขึ้นในระบบซึ่งเป็นการเกิดเหตุการณ์แบบสุ่ม ที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาโดยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนั้น ไม่สามารถกำหนดจำนวนได้ เช่น การเกิดความล้มเหลวขึ้นกับระบบควบคุมแบบซ้ำสำรองจำนวน 2 โมดูลภายในระยะเวลา 6 เดือน หากกำหนดให้ n คือจำนวนโมดูล จำนวนโมดูล q คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวของโมดูล สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของการแจกแจงแบบปัวส์ซอง (Poisson distribution) คือ

$$e^{-c} + ce^{-c} + \frac{c^2 e^{-c}}{2!} + \dots = 1 \quad (2.32)$$

โดยที่ c คือ ผลคูณ ผลคูณระหว่าง nq คือค่าคงที่ของจำนวนหรือความน่าจะเป็นที่ล้มเหลว หากพิจารณาเทอมของการแจกแจงแบบปัวส์ซอง จะพบว่าต่างกับการแจกแจงทวินาม ในส่วนค่า n ซึ่งการแจกแจงแบบปัวส์ซองนั้นไม่สามารถกำหนดได้ ในสมการที่ (2.32) พจน์แรกหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

e ของสมการจะแทนความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดความล้มเหลวขึ้นในระบบ พจน์ที่ 2 หรือ ce คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลว 1 ครั้งในระบบ โดยผลรวมความน่าจะเป็นทั้งหมดก็จะเท่ากับหนึ่งนั่นเอง เมื่อโมดูลหนึ่งเกิดความล้มเหลวในการทำงาน มันจะถูกซ่อมแซมและเมื่อใช้งานได้แล้วก็จะถูกส่งกลับเข้าไปในระบบเพื่อใช้งานต่อไป การทำงานแบบนี้เรียกว่า ระบบแบบมีโมดูลซ้ำซ้อนที่ทำงานโดยลำดับ (Sequential Redundancy) ซึ่งมีความแตกต่างกับระบบแบบมีโมดูลซ้ำซ้อนสำรองแบบทำงานพร้อมกัน ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบทวินาม หากใช้การแจกแจงแบบปัวส์ของหาความน่าเชื่อถือของระบบแบบมีโมดูลซ้ำสำรองที่ทำงานโดยลำดับ สามารถเขียนสมการที่ (2.32) ได้ใหม่ดังในสมการที่ (2.33) ในเทอมแรกมีความสำคัญมาก เพราะใช้แทนความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดความล้มเหลวขึ้นในระบบ

$$e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^2 e^{-\lambda t}}{2!} + \dots = 1$$

$$e^{-\lambda t} (1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots) = 1 \quad (2.33)$$

กำหนดให้ λ คือ อัตราการล้มเหลว

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง

หากพิจารณาให้แต่ละโมดูลเหมือนกันโดยมีโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวเท่ากัน และตัวโหวตสามารถสับเปลี่ยนการทำงานของโมดูลอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ ค่าอัตราการล้มเหลวมีค่าเป็นศูนย์ สมมุติให้ระบบมีโมดูลจำนวน 2 โมดูลเชื่อมต่อกันแบบขนานโดยมีโมดูลหนึ่งเป็นโมดูลซ้ำสำรองและทำงานโดยลำดับ สามารถหาความน่าเชื่อถือของระบบได้จากสมการ

$$R_T = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t) \quad (2.34)$$

กรณีที่โมดูลในระบบมีจำนวน 3 โมดูล โดยกำหนดให้มี 2 โมดูลเป็นโมดูลซ้ำสำรองแบบทำงานโดยลำดับ สามารถหาความน่าเชื่อถือได้จากสมการ

$$R_T = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2} \right] \quad (2.35)$$

กรณีที่โมดูลในระบบมีจำนวน n โมดูล โดยกำหนดให้มี n - 1 โมดูลเป็นโมดูลซ้ำสำรองแบบทำงานโดยลำดับ สามารถหาความน่าเชื่อถือระบบได้จากสมการ

$$R_T = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2} + \frac{(\lambda t)^3}{6} + \dots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \right] \quad (2.36)$$

หากต้องการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลว สามารถหาได้ด้วยการอินทิเกรตสมการที่ (2.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง (2.36) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลวในแต่ละกรณีคือ กรณีที่มีระบบซ้ำสำรอง 2 โมดูล โดยมีโมดูลซ้ำสำรอง 1 โมดูล กรณีที่มีระบบซ้ำสำรอง 3 โมดูล โดยมีโมดูลซ้ำสำรอง 2 โมดูล และในกรณีที่ระบบซ้ำสำรองจำนวน n โมดูล โดยมีโมดูลซ้ำสำรองจำนวน $n-1$ โมดูลโดยหาค่าเวลาเฉลี่ยที่จะล้มเหลวได้ตามลำดับกรณี ดังนี้

$$m = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} \quad (2.37)$$

$$m = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{3}{\lambda} \quad (2.38)$$

$$m = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} + \dots + \frac{1}{\lambda} = \frac{n}{\lambda} \quad (2.39)$$

2.9 ความน่าเชื่อถือในระบบคอมพิวเตอร์

ระบบคอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนาให้มีศักยภาพทางด้านเทคโนโลยีให้สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาระบบคอมพิวเตอร์มาใช้ในการระบบควบคุม เพื่อที่จะให้ได้ระบบควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ที่มีความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการที่มีความสำคัญสูงเพื่อให้กระบวนการนั้นมีความต่อเนื่อง ระบบคอมพิวเตอร์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันนั่นคือ ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ฉะนั้นการพิจารณาความน่าเชื่อถือของระบบคอมพิวเตอร์นั้น ก็จำเป็นจะต้องพิจารณาทั้งด้านคือ ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ความน่าเชื่อถือของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

2.9.1 คำจำกัดความของความน่าเชื่อถือในระบบคอมพิวเตอร์

ความผิดพลาดของชุดคำสั่ง (Software Error) ความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนในชุดคำสั่งอาจเกิดจากแนวคิดของผู้ออกแบบซอฟต์แวร์ ผู้ปฏิบัติงาน ที่ไม่ตรงกับจุดมุ่งหมายของการออกแบบหรือใช้งาน เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากความขัดแย้งของวากยสัมพันธ์ นั้นอาจเกิดจากผู้ออกแบบซอฟต์แวร์ไม่เข้าใจในไวยากรณ์ของภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้รูปแบบ

ความผิดพลาด (Fault) ความผิดพลาดตามนิยามแล้วกำหนดว่า ทุกอย่างที่ตรงกันข้ามที่ทำให้เกิดความไม่น่าเชื่อถือ ให้ถือว่าเป็นความผิดพลาด

ความผิดพลาดที่ครอบคลุม (Covered fault) คือ ความผิดพลาดที่เกิดจากสิ่งซึ่งพิจารณาแล้วว่าสามารถกลับคืนสู่สถานะที่สามารถใช้งานได้โดยอัตโนมัติ

ความผิดพลาดที่ไม่ครอบคลุม (Uncovered fault) คือ ความผิดพลาดที่เกิดจากสิ่งซึ่งพิจารณาแล้วว่าไม่สามารถกลับคืนสู่สถานะที่สามารถใช้งานได้โดยอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้จุดบกพร่อง (Debugging) คือ กระบวนการซึ่งต้องการกำจัดความผิดพลาดอันจะเกิดขึ้นกับชุดคำสั่ง

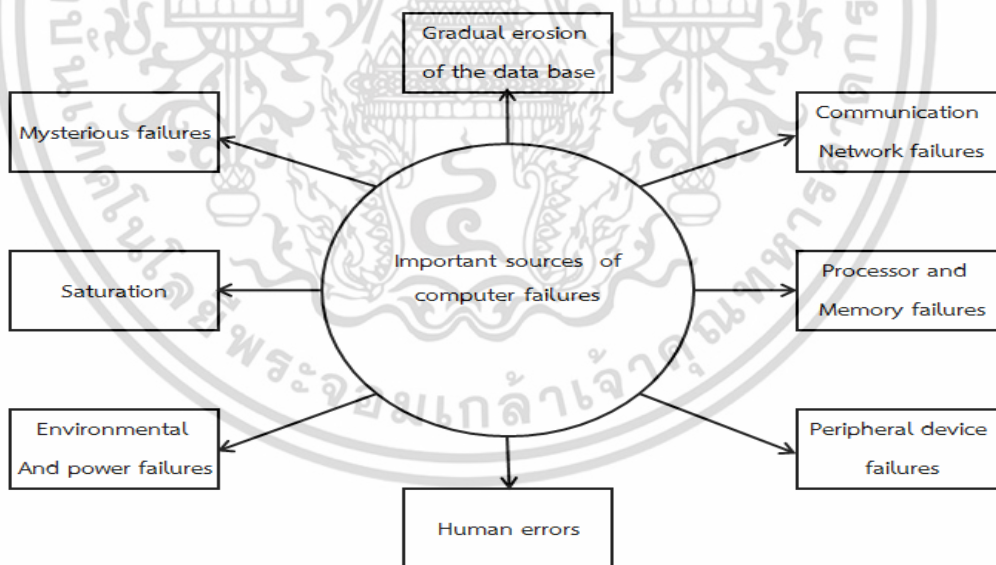
ความทนต่อความผิดพลาด (Fault tolerant computing) คือ ความสามารถของระบบที่จะทำงานตามเป้าหมาย หรือจุดประสงค์ให้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ ปราศจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งที่เกิดกับฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

ความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์ (Software reliability) คือ ความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์จะทำงานตามจุดประสงค์ภายในช่วงเวลาและเงื่อนไขที่กำหนด โดยปราศจากความผิดพลาด

การทดสอบซอฟต์แวร์ (Software testing) คือ กระบวนการทดสอบสำหรับการทำงานของซอฟต์แวร์ เพื่อต้องการผลลัพธ์ว่าซอฟต์แวร์ที่ได้ถูกต้องตามเงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่

2.9.2 สาเหตุความล้มเหลวในระบบคอมพิวเตอร์ (Computer Failure Causes)

ระบบมีความไม่น่าเชื่อถือนั้นหรือ ระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจากเกิดความล้มเหลว สาเหตุที่ก่อให้เกิดความล้มเหลว ในระบบคอมพิวเตอร์ก็มีอยู่หลายสาเหตุไม่เพียงแต่ สาเหตุที่เกิดจากซอฟต์แวร์ หรือฮาร์ดแวร์ อาจเกิดความผิดพลาดที่เกิดจากผู้ใช้งานระบบ โดยสาเหตุหลักที่ทำให้ระบบคอมพิวเตอร์เกิดความล้มเหลวสามารถแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดความล้มเหลวในระบบคอมพิวเตอร์

จากสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลวในระบบคอมพิวเตอร์จะเห็นได้ว่า มีหลายสาเหตุด้วยกัน ที่ทำให้เกิดความล้มเหลว เช่น ความผิดพลาดของมนุษย์ (Human Errors) ได้แก่ การทำงานที่ผิดวิธี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดพลาด การขาดความดูแลเอาใจใส่ ยกตัวอย่างเช่น การเริ่มต้นระบบ การทำงานและการหยุดระบบที่ผิดวิธี ความผิดพลาดของหน่วยประมวลผลและหน่วยความจำ (Processor and memory failures) เป็นความล้มเหลวที่มีความรุนแรงมากถึงแม้ว่าจะไม่เกิดบ่อย ๆ ก็ตาม สาเหตุของการเกิดมีได้หลายสาเหตุ ในปัจจุบันความล้มเหลวในการทำงานของหน่วยประมวลผลและหน่วยความจำบริษัทผู้ผลิตได้ให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะจะเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับฮาร์ดแวร์ของตน ความล้มเหลวปราศจากร่องรอย (Mysterious Failures) เป็นความล้มเหลวหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยมิได้คาดไว้ ดังนั้นในระบบแบบเวลาจริงจึงไม่ได้มีการกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติของความล้มเหลวชนิดนี้ เช่น ขณะทำงานตามปกติการทำงานจากระบบก็หยุดกระทันหันโดยไม่มีสาเหตุว่าเกิดจากสาเหตุใด การเกิดเหตุการณ์ความล้มเหลวแบบนี้เรียกว่า ความผิดพลาดล้มเหลวโดยปราศจากร่องรอย ความล้มเหลวที่เกิดจากระบบเครือข่ายในการติดต่อสื่อสารล้มเหลว (Communication network failures) ในบางครั้งความล้มเหลวที่เกิดจากการติดต่อสื่อสารอาจเกิดขึ้นช่วงขณะซึ่งอาจเป็นคุณลักษณะของอุปกรณ์นั้น เช่น การหากมีการปิดและเปิดอุปกรณ์ใหม่ อาจจะต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการปรับสัญญาณ ทำให้ส่วนๆ ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ในส่วนนี้ได้ ความล้มเหลวที่เกิดจากภาวะแวดล้อมและแหล่งจ่ายกำลังล้มเหลว (Environmental and power failures) อาจเกิดจากผลกระทบที่มาจากสภาวะแวดล้อม เช่น สนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือตัวประกอบอื่นๆ เช่น แรงดัน กระแส หรืออาจจะเป็นเรื่องของความถี่ในระบบ ความล้มเหลวที่เกิดจากอุปกรณ์ต่อพ่วง (Peripheral device failures) การล้มเหลวของระบบที่เกิดจากอุปกรณ์ต่อพ่วงแล้วทำให้ระบบล้มเหลว เป็นเหตุการณ์ที่เกิดไม่บ่อยครั้งแต่ก็มีความสำคัญ ความถี่ในการเกิดนั้นอาจเป็นการเกิดช่วงขณะหรือชั่วคราว สาเหตุนั้นอาจจะมาจากในตัวอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าเอง ความล้มเหลวแบบค่อยเป็นค่อยไปของฐานข้อมูล (Gradual erosion of the data base) เช่น การเพิ่มความสัมพันธ์ของระบบฐานข้อมูลจนทำให้แนวความคิดที่ออกแบบความสัมพันธ์ของฐานข้อมูลในเริ่มแรกติดเพี้ยนไปจากเดิม ทำให้ไม่สามารถจัดการฐานข้อมูลนั้นได้ทั้งหมด ความล้มเหลวที่เกิดจากการอิ่มตัวในระบบ (Saturation) เป็นความล้มเหลวที่เกิดจากการอิ่มตัวของระบบเช่น มีปริมาณข้อมูลจำนวนมากจนหน่วยประมวลผลประมวลผลเพื่อส่งผลลัพธ์ให้ส่วนที่ร้องขอไม่ทัน

2.9.3 วิธีการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์

การจัดรูปแบบหรือแบ่งวิธีการปรับปรุงความน่าเชื่อถือซอฟต์แวร์ (Software Reliability Improvement Methods) มี 3 ขั้นตอนของวิธีการดังนี้คือ วิธีการออกแบบซอฟต์แวร์ที่ไว้วางใจได้ วิธีการออกแบบซอฟต์แวร์ที่ทนต่อความผิดพลาด และวิธีการทดสอบความน่าเชื่อถือ

การออกแบบซอฟต์แวร์ที่ไว้วางใจได้ (Reliable Software Design Methods) เป็นวิธีการและเทคนิคที่ช่วยนักเขียนโปรแกรมให้สามารถเขียนโปรแกรม ที่มีความวางใจได้ สามารถแบ่งวิธีการหรือเทคนิคนี้ออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ 1.การออกแบบโปรแกรมเชิงโครงสร้าง(Structured Programming) มีวัตถุประสงค์ที่จะป้องกันความขัดแย้งหรือสับสนในแนวคิดของความต้องการของโปรแกรม เพื่อให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง่ายต่อความเข้าใจในการออกแบบ และพัฒนาโปรแกรม ว่าแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์กันอย่างไรบ้าง มีตัวแปรอะไรบ้างที่จำเป็นต้องใช้ ตลอดจนรูปแบบของภาษาที่ใช้ในการเขียน เช่น GOTO ซึ่งจะต้องออกแบบว่าในโปรแกรมที่พัฒนาจะต้องใช้คำสั่งอะไรบ้าง มีการซับรูทีน และจะเรียกใช้ซับรูทีนนั้นเมื่อไร 2.การออกแบบโปรแกรมจากบนลงล่าง (Top-Down Programming) เพื่อแยกกระบวนการทำงานของโปรแกรมออกเป็นส่วนๆ เพื่อใช้ในการควบคุม โครงสร้างของโปรแกรมหรือควบคุมการไหลของโปรแกรม การออกแบบโปรแกรมจากบนลงล่างจะเริ่มจากแทนโมดูลของฟังก์ชันต่างๆ ในโปรแกรมโดยอาจจะแยกเป็นซับรูทีน และจะแยกว่าแต่ละซับรูทีนนั้นจะทำงานจะถึงสถานะใดถึงจะออกจากซับรูทีนนั้น ซึ่งในภาคปฏิบัติอาจจะแทนฟังก์ชันต่างๆ เหล่านี้ด้วยแผนภาพวงจร หรือแผนภาพต้นไม้ก็ได้ หรือแม้กระทั่งแผนภาพที่เป็นภาษาทางคอมพิวเตอร์ การออกแบบโปรแกรมจากบนลงล่างนี้มีประโยชน์ในการลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบซอฟต์แวร์ และการเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับซอฟต์แวร์ 3. การออกแบบโปรแกรมเชิงโครงสร้างข้อมูล (Data Structure Programming) มีลักษณะเป็นการกำหนดความสัมพันธ์และความเชื่อมโยงทางตรรกะ (Logical Linkage) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในโปรแกรม ค่าแต่ละค่าของกลุ่มข้อมูลเหล่านี้ อาจจะเป็นข้อมูลเชิงเดี่ยว (Atomic or Scalar Data Type) เช่น จำนวนเต็ม จำนวนจริงหรือชนิดข้อมูลเชิงโครงสร้าง (Structured Data Type) เช่น สตริง อาร์เรย์ การออกแบบโปรแกรมเชิงโครงสร้างข้อมูลที่ดีและเหมาะสมจะช่วยให้โปรแกรมที่เขียนประมวลผลได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

วิธีออกแบบซอฟต์แวร์ที่ทนต่อความผิดพลาด(Fault Tolerant Software Design Methods) เพื่อที่จะออกแบบซอฟต์แวร์ที่สามารถกู้กลับคืนสู่สถานะที่สามารถใช้งานได้ เมื่อเกิดความผิดพลาดในการทำงาน ซึ่งสาเหตุที่จะต้องทำให้ออกแบบซอฟต์แวร์ที่ทนต่อความผิดพลาดนี้ก็เนื่องมาจากว่า ซอฟต์แวร์ที่ทำการพัฒนาขึ้นมาั้นเราจะพบว่า ไม่มีซอฟต์แวร์ใดเลยที่ไม่มีผิดพลาด หรือในบางครั้งอาจจะไม่เจอความผิดพลาดในขณะที่ทำการทดสอบและตรวจหาความผิดพลาดแต่อาจจะพบในขณะที่นำไปใช้งาน ด้วยเหตุผลนี้จึงต้องใช้วิธีการของการออกแบบซอฟต์แวร์ที่ทนต่อความผิดพลาด เพื่อที่จะสามารถใช้งานซอฟต์แวร์นั้นได้อย่างต่อเนื่อง ปัญหาหลักของวิธีการออกแบบซอฟต์แวร์ที่ทนต่อความผิดพลาดนั้นคือ ราคาผลิตภัณฑ์ที่สูง ฉะนั้นวิธีการออกแบบดังกล่าวถึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการ หรือใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญสูง มีความอันตรายหรือมีราคาสูง เช่น ซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมกระบวนการที่ต้องการความต่อเนื่องซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมดาวเทียม เราสามารถแบ่งวิธีออกแบบซอฟต์แวร์ที่ทนต่อความผิดพลาดได้ 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่

1. บล็อกสำหรับกู้ (Recovery-block) คือ วิธีการออกแบบในเรื่องที่พัฒนาชุด ซอฟต์แวร์ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ซอฟต์แวร์แต่ละชุดนั้นมีความต้องการในการสร้างเหมือนกัน และมีออกแบบตามสมมุติฐานที่ว่าแต่ละชุดของซอฟต์แวร์มีความเป็นอิสระต่อกันดังนั้น ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวของซอฟต์แวร์นั้นก็จะมีเพียงเล็กน้อย การปฏิบัติของวิธีบล็อกสำหรับกู้อาจแบ่งลำดับการทำงานได้ สามขั้นตอนนั้นคือ การกู้คืนของสถานะอินท์พุตการกระทำของซอฟต์แวร์ที่ เชื่อถือได้ และการคืนค่าสถานะอินท์พุต การยอมรับสถานะของเอาท์พุต 2. ชุดโปรแกรมที่มีหลายชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(N-version programming) เป็นการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่มีหลายๆ ชุดและเป็นอิสระต่อกันซึ่งการทำงานจะทำงานแบบขนานกันไป ผลลัพธ์ของจะออกเอาท์พุทจะเกิดจากการเปรียบเทียบโดยโปรแกรมสุดท้าย เอาท์พุทที่ได้จะถูกตัดและกระบวนการที่ต่อเนื่อง 3. บล็อกกู้คืนที่มีความสอดคล้อง (Consensus recovery block) วิธีการนี้เป็นการ รวมเอาวิธีการของบล็อกสำหรับกู้ และวิธีชุดโปรแกรมที่มีหลายชุดเข้าด้วยกัน โดยจะเพิ่มในส่วนก่อนที่จะออกเอาท์พุทนั้นคือ ส่วนของการโหวตโดยผลลัพธ์ที่ได้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการโหวต วิธีการนี้อาจจะพูดได้ว่าเป็นวิธีการที่มีความน่าเชื่อถือกว่าแบบบล็อกกู้คืน และแบบชุดโปรแกรมที่มีหลายชุด

วิธีการทดสอบ (Testing) เพื่อทดสอบกระบวนการทำงานของซอฟต์แวร์ที่จะลดสิ่งที่ไม่ต้องการในการทำงานอันก่อให้เกิดความล้มเหลวในการทำงานนั้นมีหลายวิธีการ ซึ่งแต่ละวิธีการก็แตกต่างกันไป ซึ่งก็จำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของซอฟต์แวร์ที่ทำการออกแบบ ได้แก่

1. โมดูลทดสอบ (Module Testing) เป็นการทดสอบที่มุ่งพิจารณาทีละโมดูลโดย แยกออกจากโมดูลที่เหลืออยู่ในระบบ โดยปกติแล้วโมดูลที่ทำการทดสอบโปรแกรมจะถูกพัฒนาด้วยการเขียนโปรแกรมขึ้นมาใหม่เพื่อการทดสอบโดยเฉพาะแต่ละโมดูล เนื่องจากง่ายในการค้นพบข้อผิดพลาดได้ง่ายการทดสอบโมดูลที่โดยทั้งหมด
2. การทดสอบแบบบนลงล่าง (Top-Down Testing) เป็นการทดสอบโปรแกรมโดยรวมโปรแกรมทั้งหมดจากบนไปสู่ด้านล่างของโปรแกรมตามโครงสร้าง ข้อดีของการทดสอบแบบบนลงล่างคือ มีประสิทธิภาพในการกำหนดปัญหาของโปรแกรมด้านบนกว่าซึ่งง่ายในการทดสอบการแทนกรณีต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นได้หลังจากเพิ่มอินพุตและเอาท์พุท
3. การทดสอบแบบล่างสู่บน (Bottom-Up Testing) เป็นการทดสอบโปรแกรมจากล่างสู่ด้านบนของโปรแกรมตามโครงสร้าง โดยแยกโมดูลที่ถูกทดสอบออกจากโมดูลอื่นในระบบ การทำสอบจะแทนค่าอินพุตที่ในโมดูลที่ทดสอบเพื่อดูฟังก์ชันการทำงานและความสัมพันธ์กับโมดูลด้านบน นอกจากโมดูลที่กำลังทดสอบและโมดูลอยู่ลำดับที่สูงกว่าแล้ว จะไม่มีการเรียกใช้งานโมดูลอื่นที่ไม่ใช่สองโมดูลนี้ ข้อดีของการทดสอบแบบนี้คือ มีประสิทธิภาพในการกำหนดปัญหาของโปรแกรมด้านล่างกว่า หรือโมดูลที่อยู่ด้านล่างกว่านั้นคือ เมื่อแทนกรณีต่างๆ ในโมดูลทดสอบซึ่งอยู่ต่ำกว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันการทำงานโมดูลที่สูงกว่าตามลำดับ ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตของอินพุตในโมดูลทดสอบได้ดี เพื่อให้โมดูลที่สูงกว่าตามลำดับทำงานได้ถูกต้องและได้เอาท์พุทที่ต้องการ
4. การทดสอบแบบแซน-วิช (Sandwich Testing) เป็นการทดสอบที่รวมการทดสอบแบบบนลงล่าง และแบบล่างสู่บนเข้าด้วยกัน การทดสอบแบบนี้จะเห็นได้ชัดว่าเป็นความต้องการที่จะรวมข้อดีและต้องการกำจัดข้อเสีย ของการทดสอบแบบบนลงล่าง และแบบล่างสู่บนนั่นเอง

2.9.4 แบบจำลองความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Modes)

แบบจำลองความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์นั้น สามารถแบ่งเป็นกลุ่มออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่เกี่ยวกับการก่อความผิดพลาด (Fault seeding) กลุ่มที่เกี่ยวกับการนับจำนวนความผิดพลาด (Failure count) กลุ่มที่เกี่ยวกับระยะเวลาระหว่างความล้มเหลว (Times between failures)

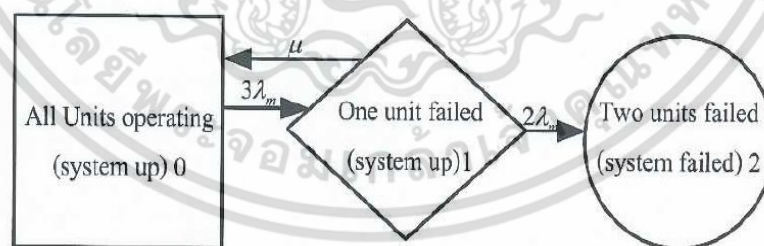
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับโดเมนของตัวป้อน (Input domain based) โดยแต่ละกลุ่มก็มีแบบจำลองต่างๆ ให้เลือกใช้ที่เหมาะสมต่างกันไป เช่น แบบจำลองของมิลล์ (Mills Model) แบบจำลองของมุซา (Musa Model) แบบจำลองของชูแมน (Shooman Model) แบบจำลองกำลัง (Power Model) แบบจำลองของอากาศยาน (Air Force Model)

2.9.5 การป้องกันความล้มเหลวในระบบคอมพิวเตอร์ (Fault Masking)

การป้องกันความล้มเหลวที่มีในระบบคอมพิวเตอร์นั้น จะเป็นกล่าวถึงการทำให้ระบบคอมพิวเตอร์มีส่วนที่เรียกว่า โมดูลซ้ำสำรอง (Redundancy Modular) ซึ่งเป็นการนำหลักการที่ได้กล่าวไว้แล้วในเรื่องของแบบจำลองและการหาความน่าเชื่อถือของระบบ แบบจำลองที่มีโมดูลซ้ำสำรอง 3 โมดูล (Triple Modular Redundancy , TMR) ให้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยแบบจำลองดังกล่าวมีลักษณะคือ ประกอบด้วยองค์ประกอบจำนวน 3 องค์ประกอบที่เป็นอิสระต่อกันแต่มีเป้าหมายในการทำงานที่เป็นส่วนซ้ำซ้อนเหมือนกัน ส่วนออกขององค์ประกอบทั้งสามจะเข้าสู่หน่วยของการเปรียบเทียบด้วยการโหวต การทดลองแบบจำลองดังกล่าวถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Von Neumann แบบจำลองการต่อมีลักษณะดังรูปที่ 2.5

เมื่อพิจารณาระบบที่มีความซ้ำซ้อนแบบสามส่วนว่า มีการโหวตแบบสมบูรณ์และแต่ละโมดูลเป็นอิสระต่อกันและสามารถทำการซ่อมแซมเมื่อเกิดความล้มเหลวได้ เมื่อมีโมดูลหนึ่งเกิดความล้มเหลวในระบบที่มีความซ้ำซ้อนสามส่วน โมดูลนั้นจะถูกซ่อมแซมทันที หากว่ามีมากกว่าหนึ่งโมดูลที่เกิดความล้มเหลวในระบบ ระบบแบบที่มีความซ้ำซ้อนสามส่วนจะไม่ถูกซ่อมแซมสามารถแสดงปริภูมิสถานะของระบบ (System state space) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ระบบแบบโมดูลซ้ำสำรอง 3 โมดูลที่มีปริภูมิสถานะแบบซ่อมแซมได้

จากรูปที่ 2.9 จะสามารถพิจารณาได้ว่า ระบบที่ถูกสร้างขึ้นมาจากโมดูลองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนนั้น เป็นอิสระต่อกันและมีคุณลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ ระบบจะสามารถทำงานได้ไม่ล้มเหลวจนกระทั่งมีองค์ประกอบที่ล้มเหลวมากกว่าหนึ่งโมดูล อัตราส่วนความล้มเหลวและอัตราส่วนการซ่อมแซมมีค่าคงที่ เมื่อองค์ประกอบที่เกิดความล้มเหลวแล้ว เมื่อซ่อมแซมเสร็จนั้น เสมือนว่าองค์ประกอบนั้นเป็นองค์ประกอบใหม่ การพิจารณาแบบนี้เราใช้เทคนิคที่เรียกว่าเทคนิคของมาร์คอฟ

เอกซารัน (Markov technique) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ j คือ เป็นภาวะที่เกิดในระบบโดยที่

$i = 0$ (ระบบเริ่มต้นทำงาน)

$i = 1$ (จำนวนหนึ่งโมดูลเกิดความล้มเหลว แต่ระบบยังคงทำงานอยู่)

$i = 2$ (โมดูลมากกว่าหนึ่งเกิดความล้มเหลว และระบบก็เกิดความล้มเหลว)

$P_i(t)$ คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง 3 โมดูลจะอยู่ในภาวะ

j ที่เวลา t โดยที่ $j = 0, 1, 2$

λ_m คือ อัตราส่วนการล้มเหลวของโมดูล (Failure rate)

μ คือ อัตราส่วนการซ่อมแซม (Repair rate)

สามารถเขียนสมการสมการเชิงอนุพันธ์ได้คือ

$$P_0'(t) = \mu P_1(t) - 3\lambda_m P_0(t)$$

$$P_1'(t) = 3\lambda_m P_0(t) - (2\lambda_m + \mu)P_1(t)$$

$$P_2'(t) = 2\lambda_m P_1(t)$$

กำหนดให้เวลาที่ $t = 0, P_0(0) = 1$ และ $P_1(0) = 0$ สามารถหาความน่าเชื่อถือของระบบที่มีการซ่อมแซมได้โดย

$$P_{TMR} = P_0(t) + P_1(t)$$

2.10 การจัดโครงสร้างระบบที่ทนต่อความผิดพลาดในการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง พื้นฐานคุณสมบัติที่ควรมีของระบบที่ทนต่อความผิดพลาด การประยุกต์ใช้งานระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง 3 โมดูล วิธีการโหวต และวิธีการคำนวณค่าอัตราการล้มเหลวตามมาตรฐาน MIL-HDBK-217B [6] ตลอดจนการนำหลักการของระบบที่ทนต่อความผิดพลาดไปการออกแบบโครงสร้างการทดลอง

2.10.1 พื้นฐานระบบที่ทนต่อความผิดพลาด

การออกแบบและพัฒนาระบบให้มีคุณสมบัติทนต่อความผิดพลาด ต้องพิจารณาประเด็นต่างๆ ตามเงื่อนไขความต้องการของระบบที่ทนต่อความผิดพลาด เช่น การตรวจจับความผิดพลาด (Fault Detection) สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาด (Fault Containment) ตำแหน่งความผิดพลาด (Fault Location) การกู้คืนจากความผิดพลาด (Fault Recovery) การปิดความผิดพลาด (Fault Masking) เป็นต้น ในประเด็นต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกนำมาใช้พิจารณาร่วมกับหลักการหลักระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง (Concept of Redundancy) [6] เพื่อให้ระบบที่ออกแบบเป็นระบบที่ทนต่อความผิดพลาด

ในปัจจุบันการออกแบบระบบที่ทนต่อความผิดพลาด โดยใช้หลักการของการมีโมดูลซ้ำสำรองในระบบ และอาจแยกชนิดของโมดูลซ้ำสำรองตามลักษณะของโมดูลได้ 2 ชนิด ได้แก่โมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ้ำสำรองที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware Redundancy) และโมดูลซ้ำสำรองที่เป็นซอฟต์แวร์ นอกจากนี้ยังมีโมดูลซ้ำสำรองส่วนที่เป็นสารสนเทศ (Information Redundancy) และโมดูลซ้ำสำรองส่วนของเวลา (Time Redundancy) ซึ่งอยู่ที่เงื่อนไขความต้องการของระบบและผู้ออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้โมดูลซ้ำสำรองส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์เป็นหลัก ในการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบ

โมดูลซ้ำสำรองที่เป็นฮาร์ดแวร์ มี 3 ชนิดที่เป็นพื้นฐาน [6] คือ แพลสซีฟ (Passive) แอ็กทีฟ (Active) และแบบลูกผสม (Hybrid) โดยแบบแพลสซีฟจะใช้เทคนิคของหลักการปิดความผิดพลาดเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดที่ขึ้น และป้องกันความผิดพลาดจากความผิดพลาดด้วย อาจกล่าวได้ว่า การมีโมดูลซ้ำสำรองที่เป็นฮาร์ดแวร์แบบแพลสซีฟ เพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติที่ทนต่อความผิดพลาดนั้น ไม่ต้องการทำอะไรเพิ่มเติมจากระบบเดิม เพราะเป็นใช้เป็นพื้นฐานในการป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับระบบในขณะที่ออกแบบอยู่แล้ว โมดูลฮาร์ดแวร์ที่ซ้ำสำรองแบบแอ็กทีฟ บางครั้งเรียกว่าวิธีการแบบพลวัต (Dynamic Method) [6] ใช้เทคนิคการตรวจหาความผิดพลาดในช่วงเวลาการทำงาน เมื่อพบความผิดพลาดจะมีการกระทำบางอย่าง เช่น การตัดส่วนที่เกิดความผิดพลาดนั้นออกจากระบบ แล้วมีการกู้คืนจากความผิดพลาด โมดูลซ้ำสำรองที่เป็นฮาร์ดแวร์แบบสุดท้ายคือแบบลูกผสม ได้นำข้อดีของแบบแพลสซีฟและแอ็กทีฟมาใช้ งาน การปิดบังความผิดพลาดถูกนำมาใช้ป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น การตรวจจับความผิดพลาดการกู้คืนจากความผิดพลาด คุณสมบัติเหล่านี้ล้วนถูกนำมาใช้ในระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรองที่เป็นฮาร์ดแวร์แบบผสม วิธีการแบบลูกผสมนี้บ่อยครั้งถูกนำมาใช้ในกระบวนการที่มีความสำคัญ ที่ต้องการไม่ให้เกิดความล้มเหลวในการทำงานหรือต้องการความน่าเชื่อถือสูงๆ

โมดูลซ้ำสำรองที่เป็นซอฟต์แวร์ โดยถูกประยุกต์ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งทำงานโดยผ่านทางซอฟต์แวร์ เช่น การตรวจจับความผิดพลาด หรือการทำงานให้ระบบทนต่อความผิดพลาด เป็นต้น หลักการของโมดูลซ้ำสำรองที่เป็นแบบซอฟต์แวร์อาจแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือการตรวจสอบความต้องกัน (Consistency Checks) การตรวจสอบสมรรถภาพ (Capability Checks) และวิธีการทำซ้ำซอฟต์แวร์ (Software Replication Methods) [6] การตรวจสอบความต้องกันใช้ การพิสูจน์ความถูกต้องของสารสนเทศ โดยพิจารณาความรู้ด้านในคุณสมบัติของสารสนเทศนั้น การตรวจสอบแบบง่ายๆ ส่วนใหญ่จะใช้ฮาร์ดแวร์เป็นตัวตรวจสอบ แต่ก็จำนวนมากที่ใช้ซอฟต์แวร์เป็นตัวตรวจสอบ เช่น ในกระบวนการควบคุมที่มีการสุ่มตัวอย่างและเก็บข้อมูลจากตัวตรวจจับในกระบวนการจำนวนมาก แต่ละตัวจับจะถูกตรวจสอบความถูกต้องให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับค่าได้ ค่าความต้องกันนั้นอาจถูกใช้เปรียบเทียบเพื่อเป็นตัวชี้วัดการปฏิบัติงานของระบบได้อีกด้วย โมดูลซ้ำสำรองที่เป็นซอฟต์แวร์ชนิดต่อมาคือ ชนิดตรวจสอบสมรรถภาพ ถือเป็น การตรวจพิสูจน์ยืนยันว่าระบบมีความสามารถในการทำงานได้ตามที่กำหนดหรือไม่ เช่น หากระบบมีหน่วยประมวลผลหลายโมดูลเมื่อ

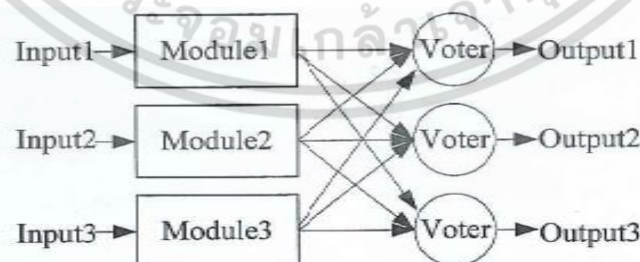
ทำงานแล้ว ประสิทธิภาพของแต่ละหน่วยประมวลผลมีค่าเป็นเท่าไรและผลอย่างไรกับระบบเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน นีเมอญญาตริเนนาไปเซประเชยชานการการการไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับการมีหน่วยประมวลผลเดี่ยว ส่วนนี้สามารถตรวจสอบผ่านทางซอฟต์แวร์ได้ โมดูลซ้ำสำรอนที่เป็นแบบซอฟต์แวร์ชนิดสุดท้ายคือ การทำซ้ำซอฟต์แวร์ หรือการทำซอฟต์แวร์หลายชุดนั่นเอง (N-Version Programming) [6] การทำโมดูลซอฟต์แวร์ซ้ำสำรอนจำนวน N ชุดนั้นอาจไม่ได้ผล เนื่องจาก หากแต่ละชุดถูกพัฒนามาเหมือนกัน ฉะนั้นเมื่อเกิดความพ้องอย่างหนึ่งเกิดขึ้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดทุกๆ โมดูลเช่นกัน ดังนั้นหากต้องการนำโมดูลซอฟต์แวร์ซ้ำสำรอนไปใช้งานแล้ว จำเป็นต้องออกแบบให้มีการป้องกันความผิดพลาดเป็นอย่างดี หลักการของการใช้โปรแกรมจำนวน N ชุด ได้ถูกนำเสนอโดย Auizieniz ในปี 1978 [6] โดยมีการออกแบบและเขียนโปรแกรมจำนวน N ชุด ซึ่งแต่ละชุดแบ่งกลุ่มการออกแบบไปโดยโปรแกรมเมอร์ แต่ละกลุ่มจะออกแบบโปรแกรมภายใต้ข้อกำหนด และความต้องการของระบบเดียวกัน

2.10.2 ระบบที่ทนต่อความผิดพลาดแบบมีโมดูลซ้ำสำรอน 3 โมดูล

พื้นฐานการทำงานของระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอน 3 โมดูลจะประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ หรือซอฟต์แวร์จำนวน 3 โมดูลทำงานโดยมีตัวโหวตทำหน้าที่เลือกเอาท์พุทของระบบ ถ้ามีโมดูลหนึ่งใดเกิดความล้มเหลวอีก 2 เอาท์พุทของโมดูลที่เหลือจะถูกเลือกไปใช้งาน การทำงานและการต่อเชื่อมของระบบหรืออุปกรณ์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในทางปฏิบัติโมดูลแต่ละโมดูลอาจแทนด้วยหน่วยประมวลผล หน่วยความจำ หรือหน่วยของซอฟต์แวร์ก็ได้ซึ่งโมดูลซอฟต์แวร์ทั้ง 3 โมดูลจะมีการพัฒนาคนละรุ่นกัน แต่มีข้อกำหนดในการทำงานเดียวกัน เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.5 จะพบว่า หากตัวโหวตเกิดความล้มเหลวในการทำงานแล้วก็จะทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้เหมือนกัน ดังนั้นตัวโหวตคะแนนควรต้องมีความน่าเชื่อถือสูง

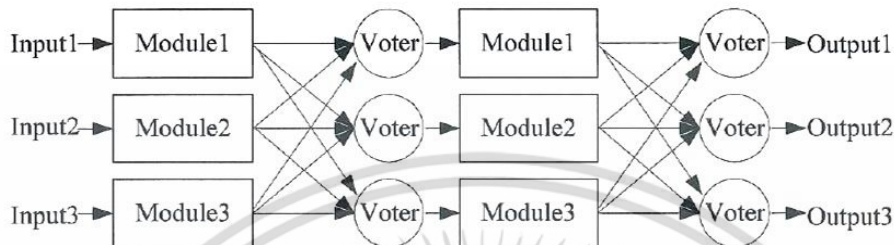
ระบบที่ทนต่อความผิดพลาดแบบมีโมดูลซ้ำสำรอน 3 โมดูลยังสามารถประยุกต์นำไปใช้งานดังรูปที่ 2.10 ซึ่งระบบประกอบด้วยโมดูลที่เป็นอิสระจำนวน 3 โมดูลโดยแต่ละโมดูลจะรับอินพุตแล้วนำไปประมวลผลแต่ละโมดูล ผลลัพธ์ที่ได้จากการโหวตคะแนนแต่ละโมดูลก็จะเหมือนกันจนกว่าจะมีอินพุตหนึ่ง เกิดความล้มเหลวขึ้นจึงจะทำให้เอาท์พุทต่างไป ทำให้สามารถเปรียบเทียบสภาวะที่อาจเกิดความล้มเหลวได้หลายสภาวะ



รูปที่ 2.10 โมดูลซ้ำสำรอน 3 โมดูลพร้อมทั้งตัวโหวต 3 โมดูล

นอกจากนี้ ระบบแบบโมดูลซ้ำสำรอน 3 โมดูลยังสามารถนำสภาวะต่าง ๆ ที่มีความเชื่อมโยงถึงกันมาพิจารณาได้ ดังรูปที่ 2.11 ถ้าตัวโหวตเกิดความล้มเหลวในระบบช่วงสภาวะที่หนึ่งแล้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

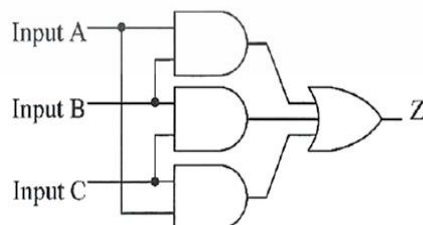
สภาวะหลังต่อมาที่รับเอาที่พูดของสภาวะแรกมาเป็นอินพุตของสภาวะหลัง ก็จะได้รับสัญญาณที่ผิดพลาดเข้ามาเช่นกัน ระบบที่มีการทำซ้ำสำรอง 3 โมดูลที่ตัวโหวตโดยทั่วไปถูกเรียกว่า การคืนสภาวะขององค์กรประกอบ (Restoring Organ) [6] เนื่องจากมีการตรวจแก้สัญญาณเอาที่พูดเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่มีหนึ่งอย่างน้อยหนึ่งอินพุตเกิดความล้มเหลว นั่นก็คือสัญญาณที่ได้จะปลอดจากความผิดพลาดนั่นเอง



รูปที่ 2.11 โมดูลซ้ำสำรองที่มีตัวโหวต 3 โมดูลที่มีความไวต่อการล้มเหลวของตัวโหวต

2.10.3 การโหวตคะแนน

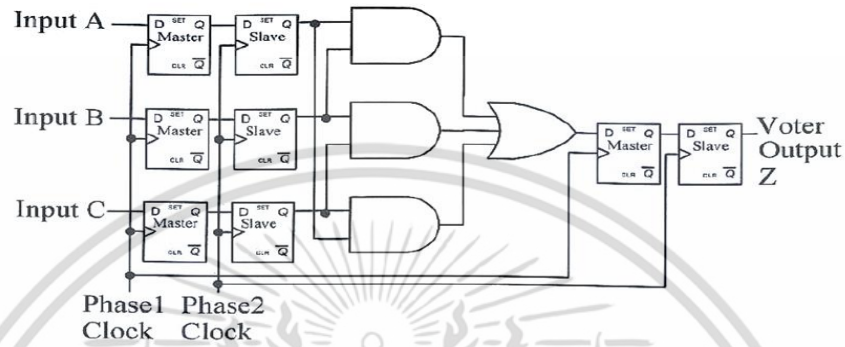
การโหวตในระบบที่มีโมดูลซ้ำสำรอง N โมดูล (NMR System) [6] ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างมากมายในงานอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการทางเคมี ซึ่งมีการรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิจำนวน 3 โมดูล การนำไปใช้งานตัวโหวตจะเลือกอินพุตจากสัญญาณของอุปกรณ์วัดทั้ง 3 ไปใช้งาน การโหวตนั้นสามารถกระทำกับสัญญาณที่เป็นแอนะล็อก และที่เป็นดิจิทัล จากตัวอย่างนอกจากจะใช้ตัวโหวตเป็นตัวถ่วงดุลสัญญาณทั้ง 3 จากอุปกรณ์วัดและสามารถใช้แก้ปัญหาในกระบวนการได้ด้วย โมดูลโหวตที่เป็นฮาร์ดแวร์ ในการออกแบบหรือก่อนนำไปใช้งานนั้น นิยมทำการออกแบบหรือตรวจสอบด้วยซอฟต์แวร์ก่อน หากเป็นข้อมูลชนิดดิจิทัล นิยมใช้โมดูลโหวตชนิดฮาร์ดแวร์ ซึ่งมีความง่ายในการออกแบบและใช้งาน เช่น รูปที่ 2.12



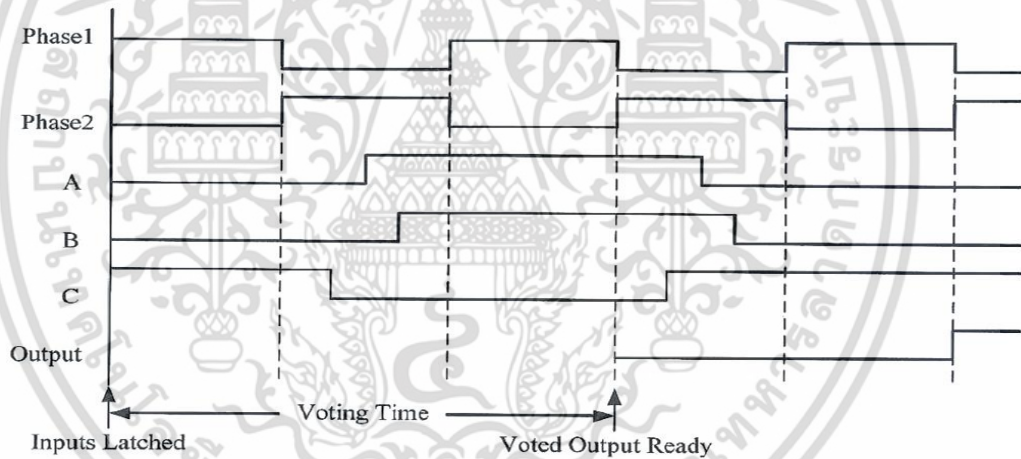
รูปที่ 2.12 รูปแบบการโหวตลงคะแนน โดยเงื่อนไขต้องมีอินพุต 2 ใน 3 ทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 เอาท์พุทของการโหวตจะมีสถานะเป็น 1 เมื่อสัญญาณอินพุตส่วนใหญ่มีสถานะเป็น 1 และเอาท์พุทของการโหวตจะเป็น 0 เมื่อสัญญาณอินพุตส่วนใหญ่เป็น 0 โครงสร้างของตัวโหวตในรูปที่ 2.12 สามารถเป็นแบบ 8 บิตและ 16 บิต ขึ้นอยู่กับการออกแบบและนำไปใช้งาน ซึ่งแต่ละวงจรจะทำงานเป็นอิสระแต่มีความสัมพันธ์กัน เวลาที่ต้องการใช้ในโมดูลโหวตชนิดฮาร์ดแวร์นี้ ในการทำงานจะขึ้นอยู่กับเวลาหน่วงในการแพร่กระจายของวงจรถิทัศน์



รูปที่ 2.13 ฮาร์ดแวร์ของตัวโหวตที่มีการประสานเวลาของอินพุตและเอาท์พุต



รูปที่ 2.14 แผนกำหนดเวลาการประสานเวลาของตัวโหวต

ในการประยุกต์ใช้งาน เวลาที่ใช้ในการโหวตเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการ หากค่าของสัญญาณที่เข้ามามีความคลาดเคลื่อนหรือเหลื่อมล้ำเพียงนิดเดียว ก็จะทำให้การประมวลผลของตัวโหวตคะแนนคลาดเคลื่อนไป วงจรฟลิปฟล็อป(Flip Flops Circuit) [6] ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยใช้อินพุตของตัวโหวตทำการประสานเวลากับการโหวตในกระบวนการดังเช่นในรูปที่ 2.13 ใช้หลักการของดีฟลิปฟล็อป (D-Flip Flops) มาใช้ในการประสานเวลาของตัวโหวต และหากพิจารณาไดอะแกรมของเวลาในรูปที่ 2.14 พบว่าการทำงานจะทำงาน 2 ช่วงสัญญาณเวลา โดยมีฟลิปฟล็อปที่ทำงานแบบหลักและรอง (Master-Slave Flip Flops) [6] โดยอินพุตที่ส่งไปยังหน่วยโหวตจะถูกเก็บในฟลิปฟล็อปตัวหลัก (Master Flip Flops) ขณะที่สัญญาณเวลาเป็นบวกขาขึ้น บนสัญญาณไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวกขาขึ้นของช่วงเวลาทำงานช่วงที่ 2 ข้อมูลที่เข้ามาก็จะถูกเก็บในฟลิปฟล็อปตัวรอง (Slave Flip Flop) แล้วข้อมูลทั้งสองจะถูกรวมกันในวงจรของการไหลต่อไป การรวมกันของข้อมูลในวงจรจะถูกเก็บเป็นเอาต์พุตของฟลิปฟล็อปตัวหลักบนสัญญาณบวกขาขึ้นในช่วงการทำงานที่ 1 และเอาต์พุตของตัวไหล (Z) ก็จะปรากฏหลังจากเกิดขอบสัญญาณขาขึ้นในช่วงที่ 2

นอกจากจะใช้โมดูลไหลที่เป็นฮาร์ดแวร์แล้ว ยังสามารถใช้โมดูลที่เป็นซอฟต์แวร์ โดยกลไกการทำงานจะใช้รีจิสเตอร์เพื่อจัดการการไหล หากพิจารณาตัวอย่างในภาพที่ 2.15 ซึ่งเป็นระบบของหน่วยประมวลผลที่ใช้ซอฟต์แวร์ในการไหล อุปกรณ์ตรวจวัดมีการสุ่มค่าและเก็บข้อมูลในหน่วยความจำสองช่องทาง (Two-port Memory) ทั้ง 3 โมดูล ในหน่วยความจำสองช่องทางจะประกอบด้วยวงจรสหสัญญาณ (Multiplexer) และทำการเข้าสหสัญญาณระหว่างสองข้อมูลที่มาจากสองผู้ใช้งาน โดยมีความเร็วเพียงพอกับการใช้งาน หน่วยประมวลผลจะอ่านค่าจากเครื่องมือวัดได้ทางหน่วยความจำทั้งสาม การไหลด้วยโปรแกรมสามารถดูค่าจากการสุ่มตัวอย่าง เพื่อทำการเปรียบเทียบ หลังจากมีการประมวลผลของแต่ละหน่วยประมวลผลแล้ว ก็ทำการเก็บค่าลงในหน่วยความจำที่อยู่ในระดับถัดมา หลักการของการทำงานเช่นนี้จะเหมือนกับการทำงานของระบบในรูปที่ 2.11 โดยแต่ละตัวไหลจะทำงานด้วยซอฟต์แวร์และกระจายไปสู่หน่วยประมวลผลอื่น ๆ ให้ทราบเมื่อมีความล้มเหลวเกิดขึ้น

2.10.4 วิธีคำนวณหาค่าอัตราการล้มเหลว

วิธีการประเมินความสามารถระบบที่ทนต่อความผิดพลาดมี 2 วิธีการหลัก [6] คือการประเมินค่าเชิงปริมาณ (Quantitative) และการประเมินค่าเชิงคุณภาพ (Qualitative) การประเมินค่าเชิงคุณภาพ เป็นค่าที่ได้มาจากการวัดโดยใช้ความรู้สึก หรือจิตวิสัย (Subjective) เพื่อเปรียบเทียบเชิงพรรณนาระหว่างสิ่งหนึ่งกับอีกสิ่งหนึ่ง หรือกับสิ่งอื่นๆ เช่น การประเมินระบบที่ทนต่อความผิดพลาดว่าเหมาะสมและสอดคล้องกับการใช้งานเพียงใดจากผู้ใช้งานระบบ ซึ่งก็จะมีความเห็นที่เป็นความรู้สึกของผู้ใช้งานแตกต่างกันไป การประเมินค่าเชิงปริมาณเป็นเทคนิควิธีการ กำหนดลักษณะประจำของแต่ละสมาชิกในระบบเพื่อสามารถเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ เช่น ความน่าเชื่อถือของระบบหนึ่งที่อยู่จะมีมากกว่าอีกระบบหนึ่ง จะต้องพิจารณาลักษณะประจำหลายอย่างด้วยกัน เช่น อัตราการล้มเหลว (Failure Rate) ค่าเฉลี่ยเวลาที่จะล้มเหลว (Mean Time to Failure:MTTF) ค่าเฉลี่ยเวลาระหว่างการล้มเหลว (Mean Time Between Failure : MTBF) เป็นต้น

ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate Calculation) เป็นค่าที่มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์และประเมินความน่าเชื่อถือของระบบ เทคนิคที่พื้นฐานที่นิยมใช้คือ วิธีประมาณค่าอัตราความล้มเหลวตามข้อมูลและวิธีการของ United State Department of Defense (USDOD) MIL-HDBK-217 Standard [6] ซึ่งก็มีอยู่หลายเวอร์ชันด้วยกัน เช่น USDOD1965 [4] USDOD1974 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการล้มเหลว ตามมาตรฐาน MIL-HDBK-217B[6]

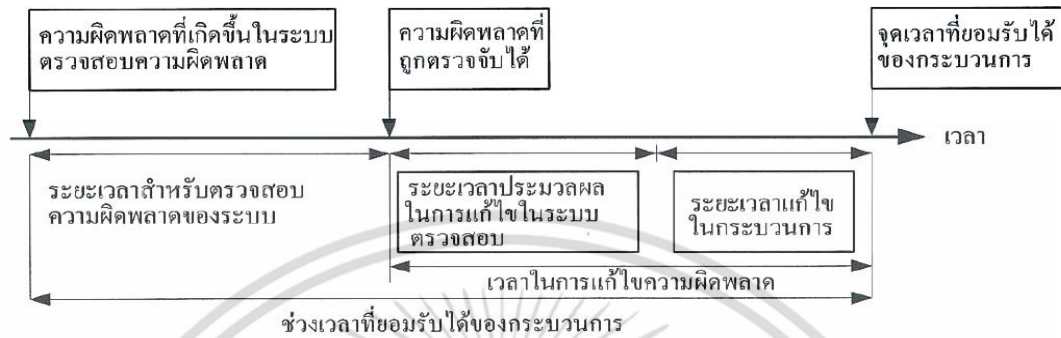
Typical failure rate calculate using MIL-HDBK-217B[6]	
$(\pi_L = 1, \pi_Q = 16, \pi_T = 0.35, \pi_E = 0.2, \pi_P = 1)$	Failure Rate (failures per million hours)
(a) Logic circuits (Number of logic gate)	
50	0.1527
100	0.2312
200	0.3655
500	1.4483
1,000	14.4880
(b) Memories (RAM) (Number of bits)	
1,024(1K)	0.8837
2,048(2K)	1.3491
8,192(8K)	3.1453
16,384(16K)	4.8033
32,768(32K)	7.3362

และ USDOD1979 [6] อย่างไรก็ตามทุกเวอร์ชันก็อยู่บนมาตรฐานเดียวกับ MIL-HDBK-217 ในทุกเวอร์ชันมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองของอัตราการล้มเหลว ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้วิธีการทดลองวิเคราะห์การล้มเหลวที่เกิดขึ้นจริงกับอุปกรณ์นั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น ตามมาตรฐาน MIL-HDBK-217B ที่ถูกพัฒนาโดย Siewiorek และ Swarz ในปี 1982 [6] และ USDOD1974[6] มีแบบจำลองในการทำนายค่าคงที่ของวงจรรวม (IC) ด้วยสมการดังนี้ คือ

$\lambda = \pi_L g_Q (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_P$ failures per million hours โดยที่ π_L คือ ค่าตัวประกอบในการเรียนรู้ (Learning Factor) π_T คือ ค่าองค์ประกอบอุณหภูมิ (Temperature Factor) π_E คือ ค่าองค์ประกอบของสิ่งแวดล้อม π_P คือค่าองค์ประกอบของพิน (Pin Factor) และ C_1 และ C_2 คือองค์ประกอบที่ซับซ้อน (Complexity Factors) โดยสามารถแสดงข้อมูลบางส่วนที่ใช้มาตรฐาน MIL-HDBK-217B คำนวณหาค่าอัตราการล้มเหลวในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

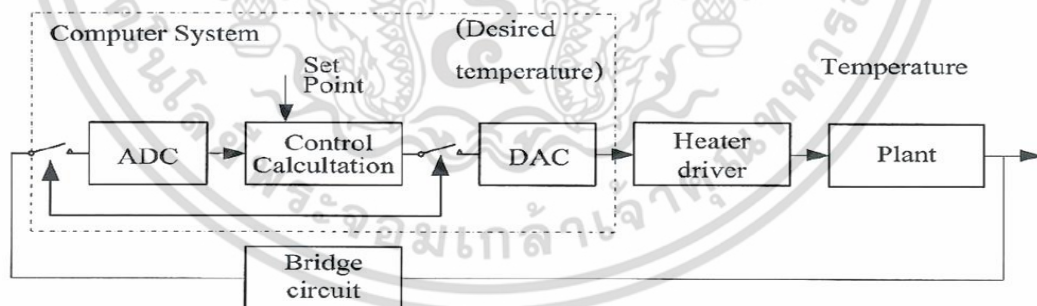
2.10.5 การควบคุมความผิดพลาด การควบคุมความผิดพลาด (Failure Control Methodology) ที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบควบคุมกระบวนการให้อยู่ในช่วงเวลาที่ยอมรับได้ของกระบวนการ (Fault Tolerance Time of the Process) มีความจำเป็นอย่างยิ่งกับระบบหรือกระบวนการที่ต้องทำงานอย่างต่อเนื่อง ถ้ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นกับระบบควบคุม โมดูลแบบซ้ำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำรองของระบบควบคุมที่ทนต่อความผิดพลาดต้องสามารถทำงานทดแทนโมดูลที่เกิดความผิดพลาดในการทำงาน หากใช้เวลาอยู่ในช่วงเวลานี้แล้วจึงจะทำให้ระบบควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการต่อไปได้ โดยช่วงเวลานี้จะประมาณ 1 วินาที [3] ดังนั้นจะต้องใช้เวลาในการกำจัดหรือแก้ไขความผิดพลาดต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นให้อยู่ภายในช่วงระยะเวลานี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ช่วงเวลาที่ยอมรับได้ของกระบวนการโดยทั่วไป

หากพิจารณาในรูปที่ 2.16 เป็นระบบเวลาจริงแบบแข็งของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของระบบเป่าลมร้อนซึ่งในเทอมของการควบคุม อุปกรณ์อุณหภูมิคือ ค่าของข้อมูลที่ทำการสุ่มเข้ามา (Sampled Data System) กลไกของการควบคุมสำหรับระบบนี้คือ ซึ่งเป็นเวลาของการสุ่ม ถ้าสมมุติว่า เวลาของการสุ่มข้อมูลคือ 10 มิลลิวินาที ดังนั้นที่ 10 มิลลิวินาทีค่าอินพุตของอุณหภูมิจะต้องถูกอ่านค่าเข้ามาที่ในส่วนการประมวลผล หลังจากนั้นค่าของระบบการควบคุมจะถูกส่งออกไปและค่าเอาต์พุตของวาล์วก็จะคำนวณค่าแล้วส่งไปที่ตัวขับของระบบอุณหภูมิ



รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคอมพิวเตอร์

ข้อบังคับในเรื่องของเวลาที่มีความสัมพันธ์กับการทำงาน เช่น ถ้าสมมุติว่าตัวเป่าลมร้อนถูกนำมาใช้เพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์แห้ง อุปกรณ์อาจจะเสียหายได้ ถ้าการเป่านั้นทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลาน้อยกว่า 10 วินาที ซึ่งถ้าเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นมา คอมพิวเตอร์จะต้องทราบค่าและจะต้องสั่งให้ตัวทำความร้อนหยุดทำงาน ในกรณีของการเป่าลมร้อนซึ่งโอกาสของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มีสูง ค่าของข้อมูลที่สุ่มมานั้นจะไม่มีมีความสำคัญต่อระบบ ถ้า $9.95 \leq T_s \leq 10.05$ มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ในค่ากลางของ T_s มิลลิวินาที อย่างไรก็ตามระบบจะไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปตามข้อกำหนดถ้าเวลาในการสุ่มอยู่ในช่วง $10 \leq T_s \leq 1000$ มิลลิวินาที กับค่ากลางของ $T_s = 10$ มิลลิวินาที ตลอดคาบเวลา 24 ชั่วโมง

2.11 ระบบทำงานทดแทนกันของพีแอลซี

ระบบทำงานทดแทนกันสำหรับตัวควบคุมที่เป็นระบบพีแอลซี[2] เป็นการนำเอาพีแอลซีมากกว่าหนึ่งเครื่องมาช่วยทำงานทดแทนกันเมื่อเครื่องพีแอลซีหลักที่ทำงานอยู่เกิดความล้มเหลวในการควบคุมจนไม่สามารถควบคุมระบบได้ เครื่องพีแอลซีสำรองจะถูกนำเข้ามาควบคุมระบบแทนซึ่งมีอยู่หลายแบบ เช่น ระบบสำรอง ระบบสำรองทำงานร่วม เป็นต้น แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปด้วยรูปแบบการทำงานและความเหมาะสมกับระดับความสำคัญของกระบวนการที่จะนำระบบทำงานทดแทนกันเข้าไปช่วยควบคุม ระบบทำงานทดแทนกันสำหรับพีแอลซีแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.11.1 ระบบสำรอง (Cold Standby)

ระบบทำงานทดแทนกันแบบสำรอง เป็นระบบแบบง่ายที่สุดสำหรับการทำงานทดแทนกัน โดยจะมีระบบสำรองอีกหนึ่งระบบที่สามารถต่อระบบเข้าทำงานทดแทนระบบหลักได้อย่างรวดเร็วเมื่อระบบหลักทำงานล้มเหลวเนื่องจากเกิดความผิดพลาดบางอย่างขึ้น วิธีการนี้ลดเวลาในการเปลี่ยนหรือซ่อมแซมระบบที่เกิดความผิดพลาดขึ้น เนื่องจากระบบสำรองสามารถทำงานทดแทนระบบหลักได้ทันที ไม่เสียเวลาในการตรวจวิเคราะห์หาสาเหตุการหยุดการทำงานของระบบ รวมทั้งไม่เสียเวลาในการติดตั้งชิ้นส่วนสำรองให้กับระบบ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ตัดต่อให้ระบบสำรองเข้าทำงานแทนระบบหลักด้วย ระบบนี้เหมาะกับกระบวนการที่มีค่าเวลาก่อนที่กระบวนการจะหยุดทำงานนานมาก ๆ

2.11.2 ระบบสำรองทำงานร่วม(Hot Standby)

ระบบทำงานทดแทนกันแบบสำรองทำงานร่วม พบมากในการใช้ควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม มีลักษณะคล้าย ๆ กันกับระบบคูสแตนบาย แต่ระบบสำรองของระบบนี้จะทำงานควบคู่ไปกับระบบหลักและคอยตรวจจับการหยุดการทำงานของระบบหลัก ถ้าหากระบบหลักหยุดทำงานลง ระบบสำรองจะเข้าไปทำงานแทนที่ระบบหลักอย่างอัตโนมัติด้วยความรวดเร็ว เพราะระบบสำรองทำงานควบคุมไปกับระบบหลักอยู่แล้ว ดังนั้นสถานะการทำงานของระบบจะทำงานต่อเนื่องกันได้ทันที แต่เอาต์พุตของตัวควบคุมก็ยังคงการช่วงเวลาหนึ่งในการสร้างสถานะ ถ้าหากค่าเวลาก่อนที่กระบวนการจะหยุดทำงานมีค่าน้อยมาก ๆ น้อยเกินกว่าช่วงเวลาที่ต้องการสร้างสถานะของเอาต์พุตแล้ว กระบวนการก็จะหยุดทำงานได้

2.11.3 ระบบซีพียูทำงานทดแทนกัน

ระบบทำงานทดแทนกันแบบซีพียูทำงานทดแทนกัน ระบบแบบนี้จะใช้วิธีการเชื่อมต่อซีพียูของตัวควบคุมหลักและตัวควบคุมสำรองเข้าถึงกันด้วยเส้นทางข้อมูลที่มีการติดต่อสื่อสารด้วยความเร็วสูง โดยระบบจะทำการคัดลอกสถานการณ์ทำงานทั้งหมดของซีพียูระบบหลักและส่งเข้าไปให้กับซีพียูระบบสำรองเก็บค่าสถานะดังกล่าวเอาไว้ เมื่อซีพียูระบบหลักเกิดความล้มเหลวในการควบคุมขึ้น ซีพียูของระบบสำรองก็จะใช้ข้อมูลที่ได้รับการเปลี่ยนค่าตามซีพียูหลักอยู่ตลอดเวลาเข้าไปทำงานแทนซีพียูของระบบหลักเพื่อให้การควบคุมกระบวนการมีความต่อเนื่อง และกระบวนการไม่หยุดทำงานลง

2.11.4 ระบบทำงานทดแทนกันแบบคู่สมบูรณ์

ระบบทำงานทดแทนกันแบบคู่สมบูรณ์ เป็นระบบที่ใช้พีแอลซีที่เหมือนกันทุกประการทั้งซีพียู หน่วยอินพุต หน่วยเอาต์พุต และ โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม ในการทำงานระบบทั้งสองจะทำงานไปพร้อมกันโดยมีการทำงานที่เหมือนกันทุกประการ แต่จะเลือกส่งเอาต์พุตจากเครื่องหลักออกไปควบคุมกระบวนการโดยการใช้อุปกรณ์ตัดต่อในการเลือก การใช้ระบบทดแทนกันแบบคู่สมบูรณ์นี้จะเสียค่าใช้จ่ายมาก เพราะต้องใช้พีแอลซีที่เหมือนกันทุกประการถึงสองเครื่อง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสำหรับพีแอลซีเป็นสองเท่า และยังต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เลือกค่าเอาต์พุตที่จะออกไปควบคุมกระบวนการอีกด้วย

2.11.5 ระบบแบบเพื่อเลือก(Fault Tolerant System)

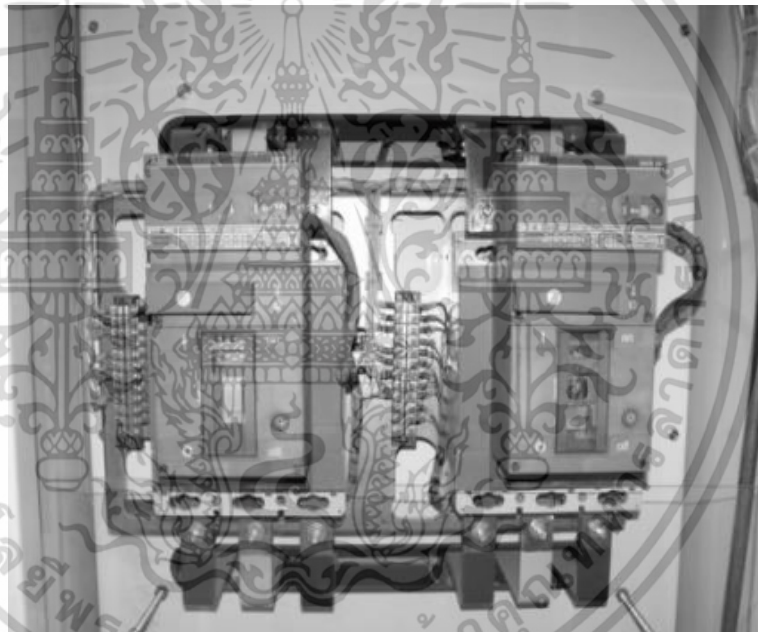
ระบบทำงานทดแทนกันแบบเพื่อเลือก เป็นระบบที่นำมาพิจารณาใช้กับกระบวนการที่ไม่ต้องการให้เกิดการขัดจังหวะในการควบคุม เพราะระบบควบคุมที่นำมาใช้ทำงานทดแทนกันจะทำงานอยู่ตลอดเวลาโดยรับค่าอินพุตเดียวกันมาป้อนให้กับตัวควบคุมที่ต่อขนานกันอยู่ ตัวควบคุมที่ต่อขนานกันอยู่นี้ จะเป็นตัวควบคุมที่อยู่ในปัจจุบันเสี่ยงเดียวกันที่อาจจะทำให้การควบคุมเกิดความล้มเหลวขึ้นมาได้ และเมื่อตัวควบคุมแต่ละตัวส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาแล้ว สัญญาณเอาต์พุตทั้งหมดจะถูกส่งตัวเข้าตัวเลือกเอาต์พุต ซึ่งตัวเลือกสัญญาณเอาต์พุตนี้จะต้องแยกเป็นอิสระจากปัจจัยเสี่ยงที่ตัวมันเองจะเกิดความล้มเหลวในการทำงานเหมือนกันตัวควบคุมที่ต่อขนานกันอยู่ ตัวเลือกสัญญาณเอาต์พุตจะเลือกสัญญาณเอาต์พุตเพียงหนึ่งค่าจากสัญญาณเอาต์พุตทั้งหมดที่ถูกส่งมาให้เพื่อส่งออกไปควบคุมกระบวนการ

บทที่ 3

การออกแบบและการติดตั้งระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ

3.1 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ (Automatic Transfer Switch, ATS)

ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ Automatic Transfer Switch หรือเรียกย่อๆว่า ระบบ ATS เป็นระบบที่ใช้ในการสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายที่ใช้งานตามปกติ เป็นระบบจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง เช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ในสภาวะฉุกเฉิน เช่น กรณีไฟจากแหล่งจ่ายหลักขัดข้อง โดยมีอุปกรณ์ที่ควบคุมการทำงานเป็นสมองที่ใช้ในการรับรู้สภาวะ และสั่งการอุปกรณ์ที่ใช้ในการสับเข้า ออกทั้งสองแหล่งจ่าย โดยส่วนมากเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breakers) สองตัวสัญญาณสั่งการจากอุปกรณ์ควบคุม



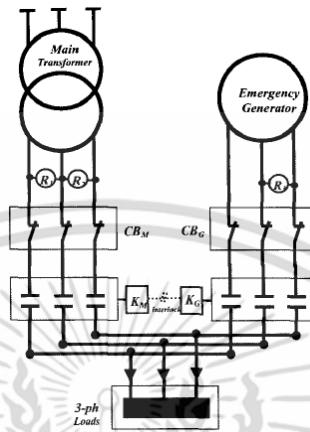
รูปที่ 3.1 ระบบ ATS ที่ประกอบด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ตัว

สถานที่ที่เหมาะสมกับการติดตั้งระบบ ATS ได้แก่ โรงพยาบาล ห้างสรรพสินค้า ขนาดใหญ่ โรงงานบางประเภทที่ต้องใช้ไฟอย่างต่อเนื่องเช่นการแช่อาหารสด จากสถานที่ต่างๆเหล่านี้บางสถานที่ เช่น โรงพยาบาลระบบ ATS มีความสำคัญมากต่อความเป็นความตายของชีวิตผู้ป่วย เนื่องจากเครื่องมือแพทย์ เกือบทุกชนิดต้องการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นความพร้อมในการทำงานของระบบ ATS จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง หน่วยงานต่างๆจึงควรมีการดูแลและเตรียมพร้อมระบบไว้อย่างดีโดยการวางแผนให้ มีการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance Automatic Transfer Switch) เป็นประจำ ระบบนี้เป็นระบบ ATS ที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำซึ่งผ่านหม้อแปลงแรงสูงมาแล้ว

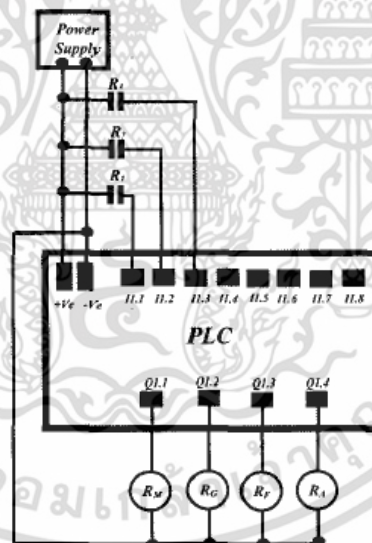
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติด้วยเครื่องควบคุมที่โปรแกรมได้

จากการสืบค้นงานวิจัย *Dr. Hamdy Ashour*, 2004 ได้พัฒนาระบบควบคุมด้วย PLC เพื่อใช้ในการควบคุมระบบ ATS สำหรับสลับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้ามายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 วงจรจ่ายกำลังของระบบ ATS



รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมของระบบ ATS

3.3 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูง

ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูง เป็นระบบที่ใช้ในการสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายจากสายส่งแรงสูงหลักไปยังสายส่งไฟฟ้าสำรอง ในสภาวะฉุกเฉิน เช่น กรณีไฟจากแหล่งสายส่งหลักขัดข้อง โดยมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของสายส่ง จากนั้นจึงสั่งการอุปกรณ์ที่ใช้ในการสับเข้า-ออกทั้งสองแหล่งจ่าย โดยอุปกรณ์ตัดตอนชนิดนี้ถูกออกแบบให้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับระบบแรงดันสูง ซึ่งทำให้ระบบนี้มีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในพระราชวังบางปะอิน



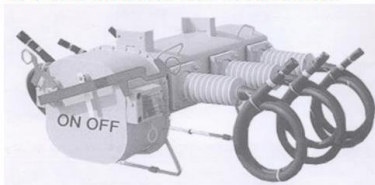
รูปที่ 3.4 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูง

3.4 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูงควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติแรงสูงที่ทำการออกแบบขึ้นมาแทนระบบเก่า เป็นระบบที่ใช้ในการสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายจากสายส่งแรงสูงหลักไปยังสายส่งไฟฟ้าสำรอง ในสถานะฉุกเฉิน เช่น กรณีไฟจากแหล่งสายส่งหลักขัดข้อง โดยมีเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอนระบบแรงสูงดังแสดงในรูปที่ 6 โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก (Main feeder) และแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง (Auxiliary feeder) จะทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงผ่าน อุปกรณ์ตัดตอนแรงดันสูงก่อนเข้าสู่หม้อแปลงเพื่อป้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าในอาคาร

โหลดเบรกสวิตช์ (Load Break Switch) เป็นสวิตช์ตัดตอนที่สามารถปิด-เปิดวงจรได้ขณะที่มีโหลด แบ่งเป็น 4 แบบ คือ ออยล์สวิตช์ (Oil Switch) แวกคัมสวิตช์ (Vacuum Switch) โหลดอินเตอร์รัพเตอร์สวิตช์ (Load Interrupter Switch) และ โหลดเบรกสวิตช์ SF6 (Load Break Switch SF6) โดยปกติการตัดตอนระบบแรงสูงในสายส่งทำได้โดยใช้อุปกรณ์ SF6 Load Break Switch ซึ่งภายในประกอบด้วยมอเตอร์และวงจรถูกควบคุมทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนหน้าสัมผัสแรงดันสูงโดยมีก๊าซ SF6 เป็นตัวดับการอาร์ค ดังรูปที่ 3.5

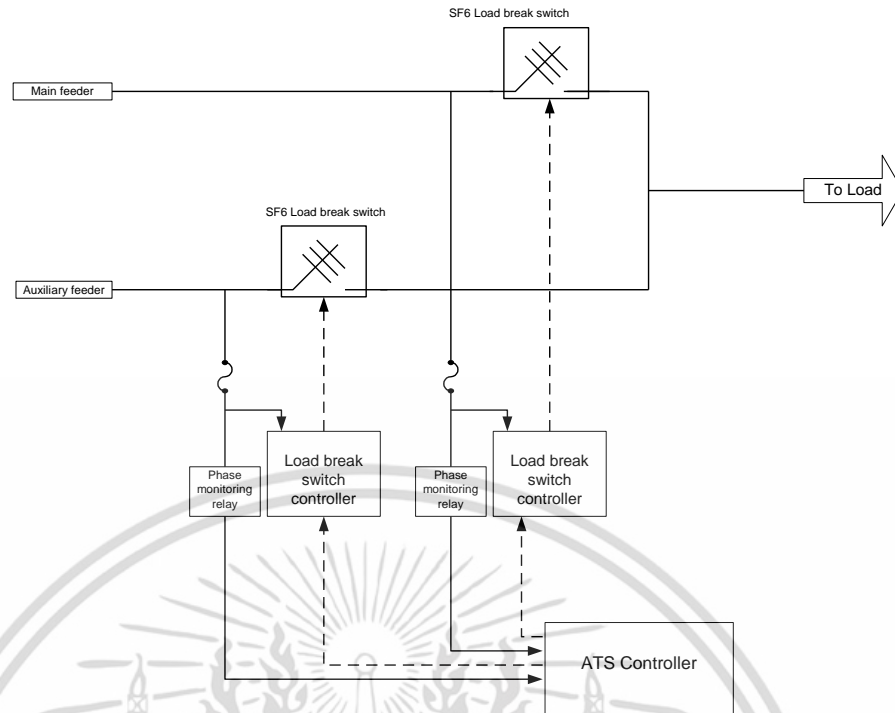
SF6 GAS Insulated load break switch



24kV, 400&600 A, SF6 Insulated load break switch

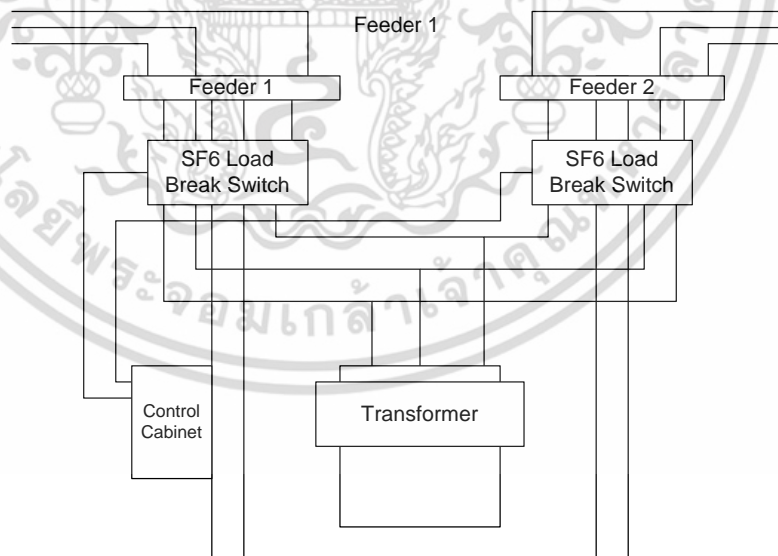
รูปที่ 3.5 SF6 Load Break Switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ ATS

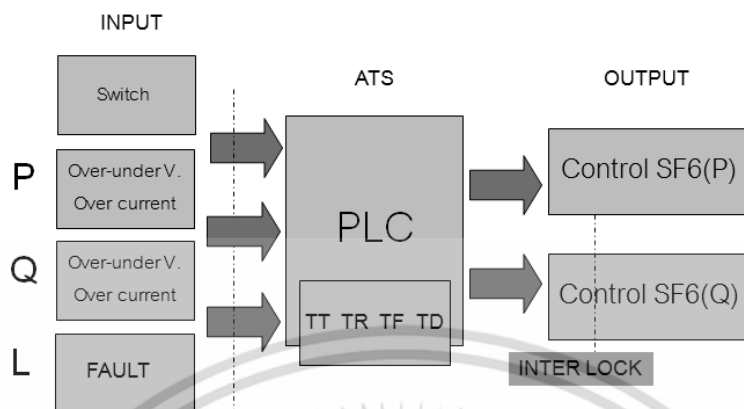
การออกแบบระบบตัดตอนแรงสูงสำหรับ 2 สายส่งทำได้โดยการเลือกแหล่งจ่ายจากสายส่งอันใดอันหนึ่งจากการส่งสัญญาณควบคุมให้กับ SF6 Load Break Switch ทั้งสองตัวดังรูปที่ 3.7 โดยต้องมีการอินเทอร์ล็อกระบบไม่ให้ทำงานพร้อมกันโดยเด็ดขาด



รูปที่ 3.7 ระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงสูงแบบอัตโนมัติควบคุมด้วย PLC

ส่วนประกอบของระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงสูงแบบอัตโนมัติควบคุมด้วยเครื่องควบคุมที่โปรแกรมได้ คือ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน กระแสไฟฟ้า และ เฟส (Phase Monitor Relay) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ทางด้านอินพุทของเครื่องควบคุม ทันทีที่เกิดความผิดปกติขึ้นเครื่องควบคุมจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลผลและส่งสัญญาณมาให้ อุปกรณ์ตัดตอนแรงสูง SF6 Load Break Switch ทำการตัดต่อการจ่ายกำลังแรงดันสูงดังแสดงในแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบ ATS

อุปกรณ์ตรวจสอบแรงดันและเฟสผิดปกติ (Under & Over Voltage Protection Relay and Phase Monitor Relay / Current Relay) แบบ 3 เฟส สำหรับป้องกันไฟตก-ไฟเกิน และตรวจสอบเฟสของระบบไฟ 3 เฟส 4 สาย

มีคุณสมบัติดังนี้

- รีเลย์สำหรับป้องกันไฟตกไฟเกินและตรวจสอบเฟส สำหรับระบบไฟ 3 เฟส
- มีปุ่มแยกปรับไฟตกระหว่าง 80 ถึง 95% โวลต์ และไฟเกินระหว่าง 105 ถึง 120% โวลต์
- เช็คลำดับเฟส (phase sequence) ของระบบไฟ 3 เฟส ป้องกันมอเตอร์หมุนผิดทิศทาง
- เช็คเฟสขาดหาย (phase breaking) ในเฟสใดเฟสหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งเฟสถึงแม้ว่าจะมีไฟย้อนกลับมาจากมอเตอร์ (back e.m.t) เนื่องจากมอเตอร์เดินตัวเปล่า
- เหมาะสำหรับใช้ป้องกันโหลดในระบบไฟ 3 เฟสเสียหาย เนื่องจากไฟตกไฟเกินลำดับเฟสไม่ถูกต้อง และเฟสขาดหาย

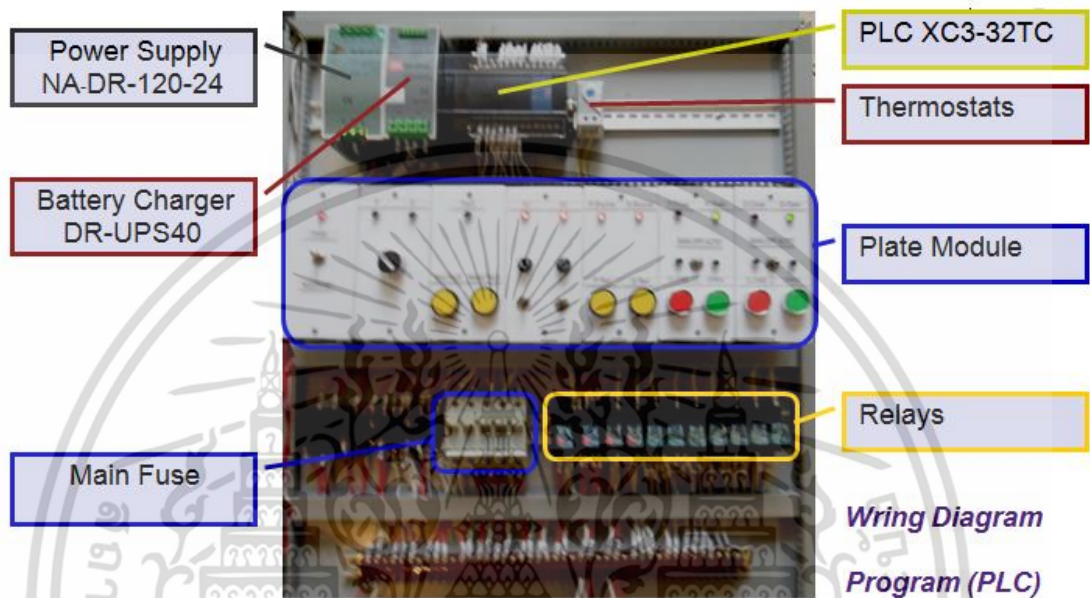
3.5 หลักการทำงาน

เมื่อขนาดแรงดันอยู่ในสภาวะปกติ (ไม่เกินกว่าค่า UL ที่ตั้งไว้ และไม่ต่ำกว่าค่า LL ที่ตั้งไว้) มีลำดับเฟส (phase sequence) ถูกต้อง RST และไฟมาครบทุกเฟส หน้าคอนแทกรีเลย์ (Contact Relay) จะทำงาน โดยมีหลอด LED ติดเพื่อแสดงว่า รีเลย์ (Relay) ทำงานแล้ว แต่ถ้าเกิดแรงดันไฟตก-ไฟเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ มีลำดับเฟส (phase sequence) ไม่ถูกต้อง และมีเฟสขาดหาย หน้าคอนแทกรีเลย์ (Contact Relay) จะหยุดทำงาน เพื่อตัดวงจรออกจากระบบ และ หลอด LED จะดับแสดงว่ารีเลย์ (Relay) หยุดการทำงาน

การทำงานทั่วไป ในสภาวะปกติแหล่งจ่ายหลักจะกำหนดให้จ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อพบความผิดปกติจากการตรวจสอบแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส โดยมีการหน่วงเวลาในการตรวจจับ จนกระทั่งพบว่ามีปัญหาผิดปกติแบบถาวร เครื่องควบคุมจะสั่งการให้ตัดสายส่งหลักออก จากนั้นจะส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สายส่งสำรองเชื่อมต่อเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแทน และเมื่อสายส่งหลักเข้าสู่สภาวะปกติระบบควบคุมก็จะสั่งให้อุปกรณ์ตัดตอนตัดกลับมาเป็นแหล่งจ่ายหลัก ระบบการทำงานที่ซับซ้อนมากกว่านี้ การตั้งเวลาและเงื่อนไขต่างๆ สามารถทำได้อย่างสะดวกโดยการแก้ไขโปรแกรมแลตเตอร์ในเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

3.6 การออกแบบ



รูปที่ 3.9 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุม



รูปที่ 3.10 แผงหน้าปัดควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่และความหมายของอุปกรณ์ในตัวควบคุม

1. SW.เลือกแหล่งจ่ายไฟหลัก (Source Select) เป็นสวิตช์หมุนเพื่อเลือกทำให้สวิตช์ “P” หรือ สวิตช์ “Q” เป็นแหล่งจ่ายไฟหลัก (Main Source)
2. SW. Prefer Timer เป็นสวิตช์เลือกจะทำให้ Refer Timer ทำงานหรือไม่ ซึ่งสามารถโยกเลือกเป็น Prefer, NON-Refer มีฟังก์ชันการทำงานดังนี้ :
 - ถ้าโยกสวิตช์ตัวนี้ไปไว้ที่ตำแหน่ง Prefer ชุด Restore Timer “TR” จะทำงานเมื่อ Main Source มีไฟกลับมาตามปกติ
 - แต่ถ้าโยกสวิตช์นี้ไปไว้ที่ตำแหน่ง NON-Refer ชุด Restore Timer “TR” จะไม่ทำงานเมื่อ Main Source มีไฟกลับมาตามปกติ
3. สวิตช์ Reset Fault เป็นสวิตช์กดเพื่อยกเลิกการหน่วงเวลาของ Timer Fault “TF”
4. Module “P” เป็นชุดควบคุมสั่งการทำงานของ สวิตช์ “P”
5. Module “Q” เป็นชุดควบคุมสั่งการทำงานของ สวิตช์ “Q”
บน Plate Module ทั้ง 2 ชุด ประกอบด้วย
สวิตช์เลือกการทำงาน Auto/manual
สวิตช์กดสั่ง Close, สวิตช์กดสั่ง Open
6. Monitor “P” และ Monitor “Q” มีหน้าที่ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่จ่ายผ่านจาก VT เข้ามาในตัวควบคุม
7. Main Fuse ขนาด 6 A. ซึ่งรับไฟผ่านมาจาก VT ของ “P” และ VT ของ “Q”
8. Fault Protection มีหน้าที่ตรวจสอบ Fault ด้านโหลด
9. Power Supply และ Battery Charger มีหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 V.DC ให้แก่วงจรในตัวควบคุม และ Battery Charger
10. SW.Test “P” และ SW. Test “Q” มีไว้ทดสอบว่า Source ไฟดับ
11. DC.SW.เป็นสวิตช์เปิด-ปิด การจ่ายแรงดันไฟฟ้า DC. จาก Power Supply และ Battery ผ่าน Fuse ขนาด 3 A.
12. AC.SW.เป็นสวิตช์เปิด-ปิด การจ่ายแรงดันไฟฟ้า AC. 110V. ให้ตัวควบคุม
13. หม้อแปลง รับไฟ 110 V.ac จาก VT ของ SF6 แปลงลดลงมาเหลือ 24 Vac.(เป็น Power Supply) และ 30 V.ac (จ่ายให้ชุด Charger)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การกำหนดขั้นตอนการทำงาน

3.7.1 การทำงานแบบ Manual

3.7.2 การทำงานแบบ Auto

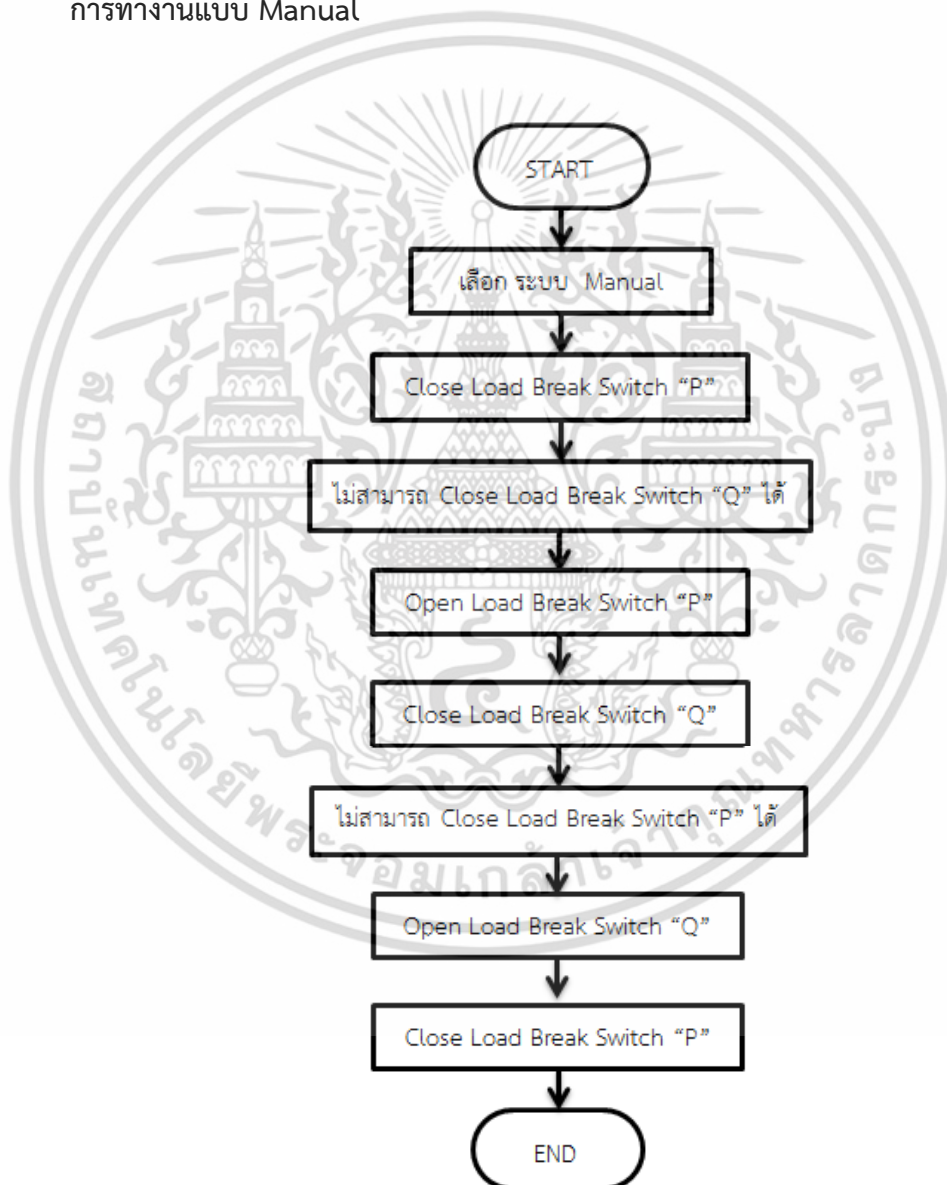
- Prefer

- Non Prefer

3.7.3 การทำงานเมื่อไฟดับ ทั้ง 2 Feeder

3.7.4 การทำงานเมื่อเกิด Fault ด้าน Load

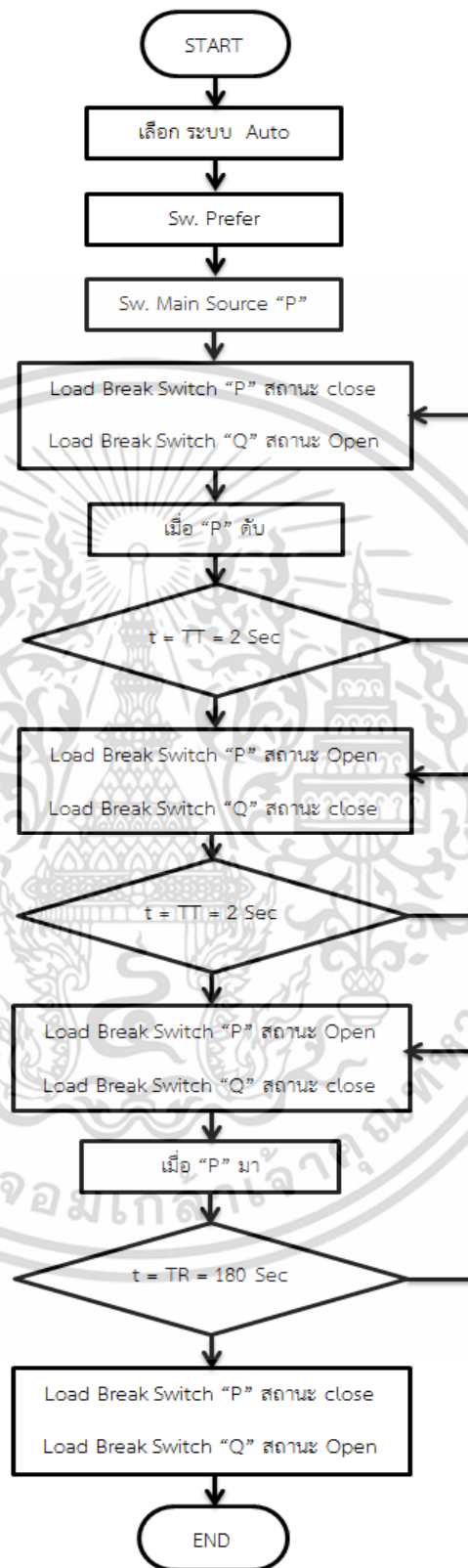
การทำงานแบบ Manual



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทำงานแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

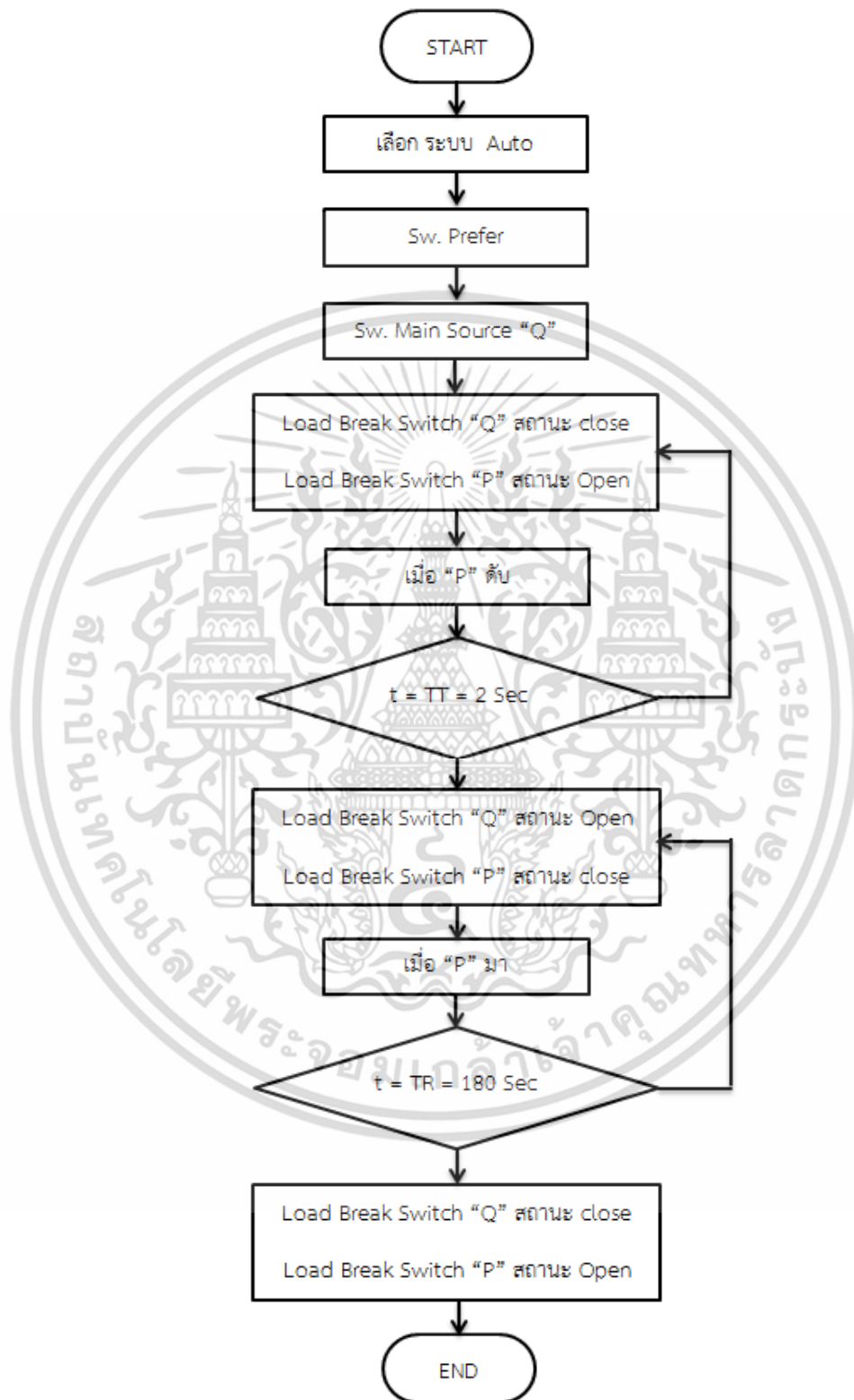
การทำงานแบบ Auto - Prefer



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทำงานแบบ Auto - Prefer เมื่อ Sw. Main Source "P"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

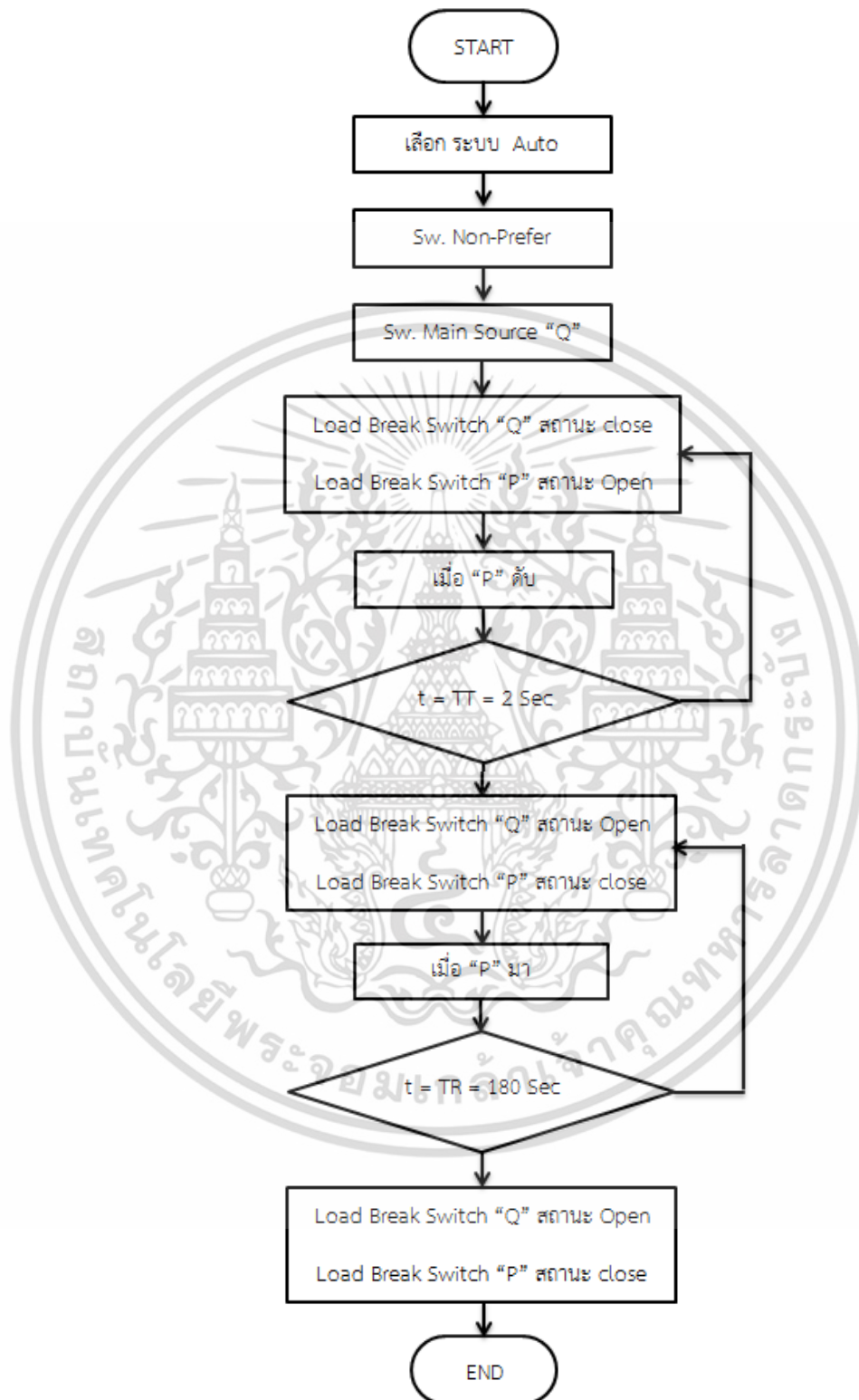
การทำงานแบบ Auto - Prefer



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการทำงานแบบ Auto – Prefer เมื่อ Sw. Main Source “Q”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

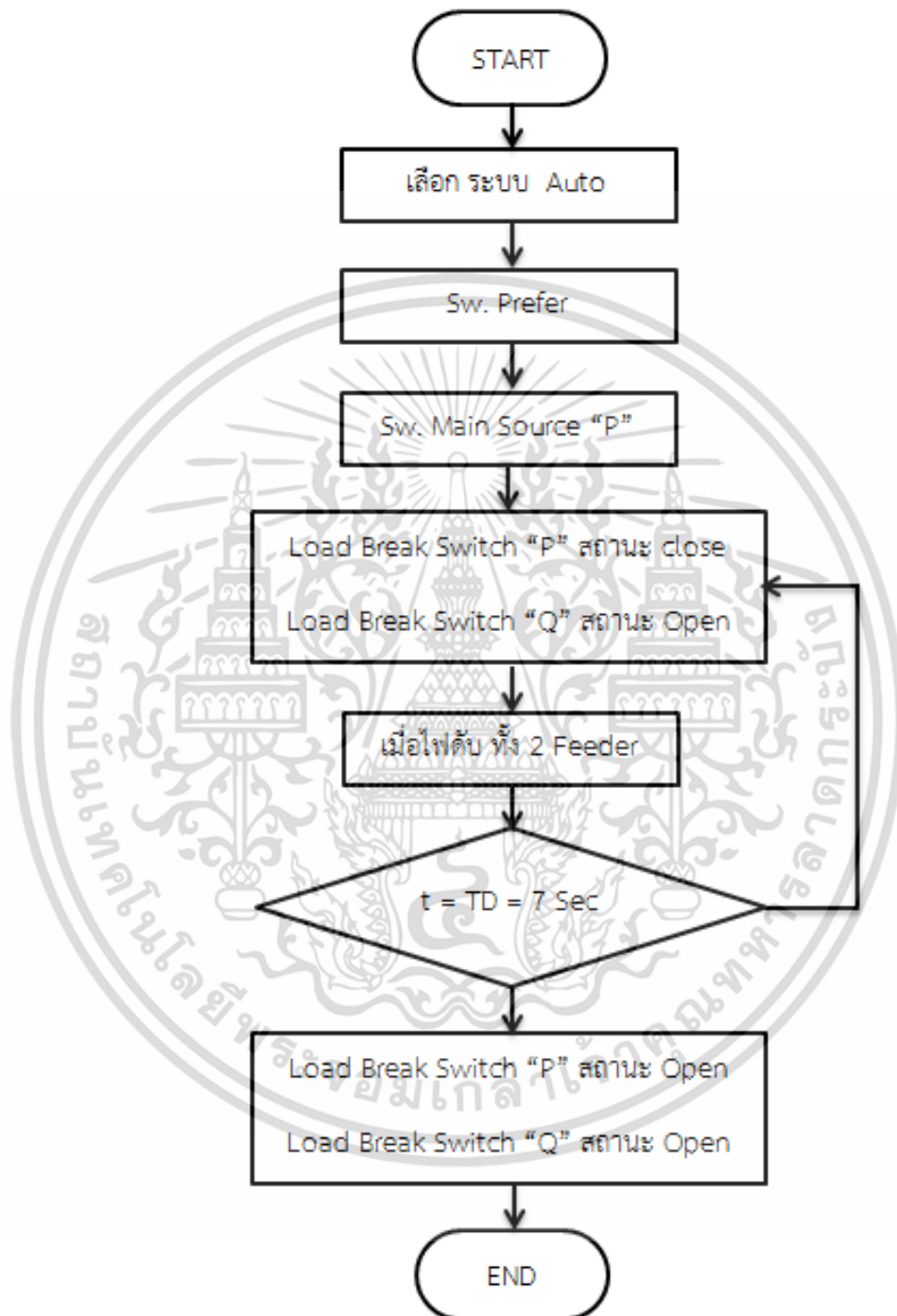
การทำงานแบบ Auto – Non-Prefer



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทำงานแบบ Auto – Non- Prefer เมื่อ Sw. Main Source “Q”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

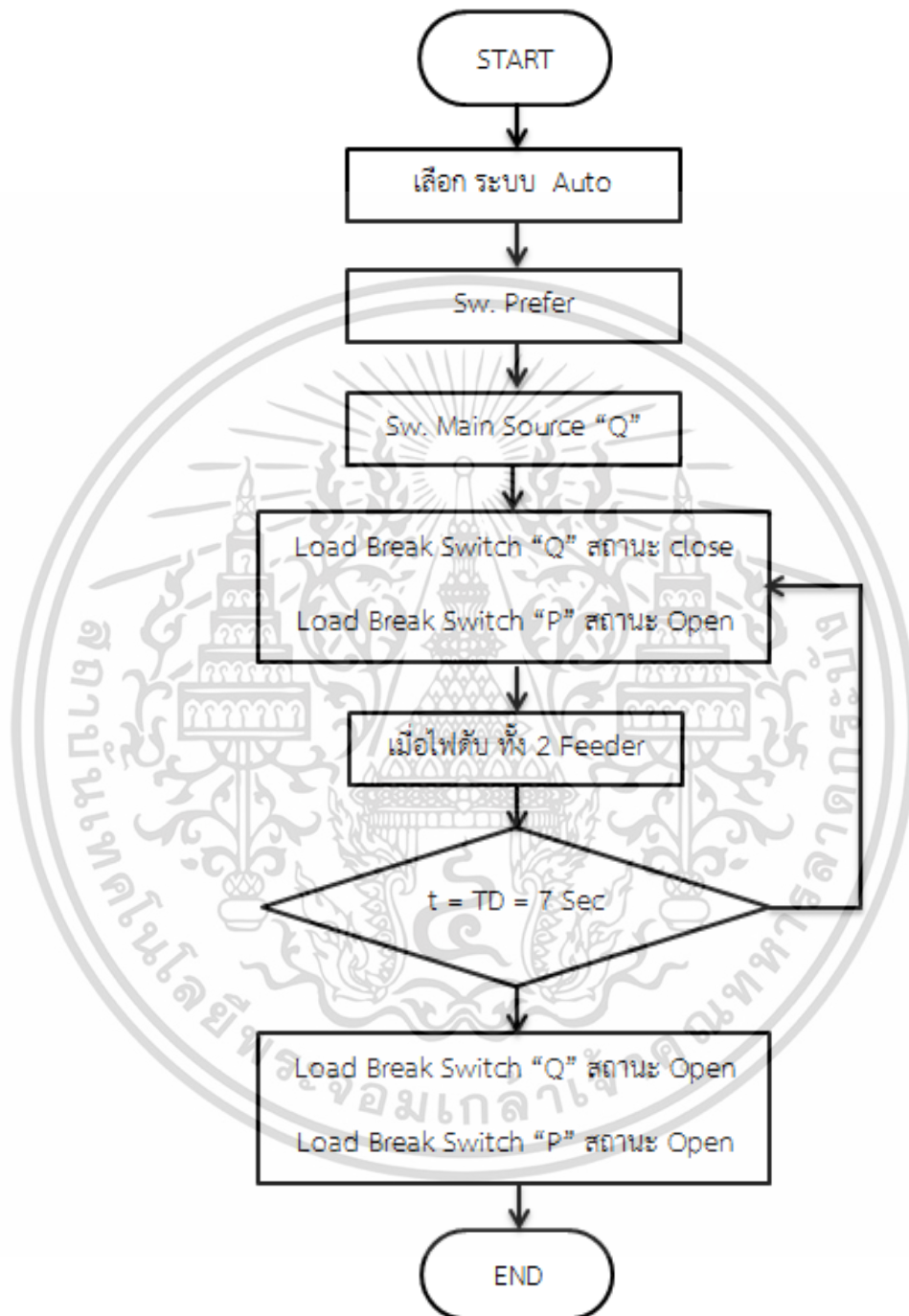
การทำงานเมื่อไฟดับ ทั้ง 2 Feeder



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนเมื่อไฟดับ ทั้ง 2 Feeder เมื่อ Sw. Main Source "P"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

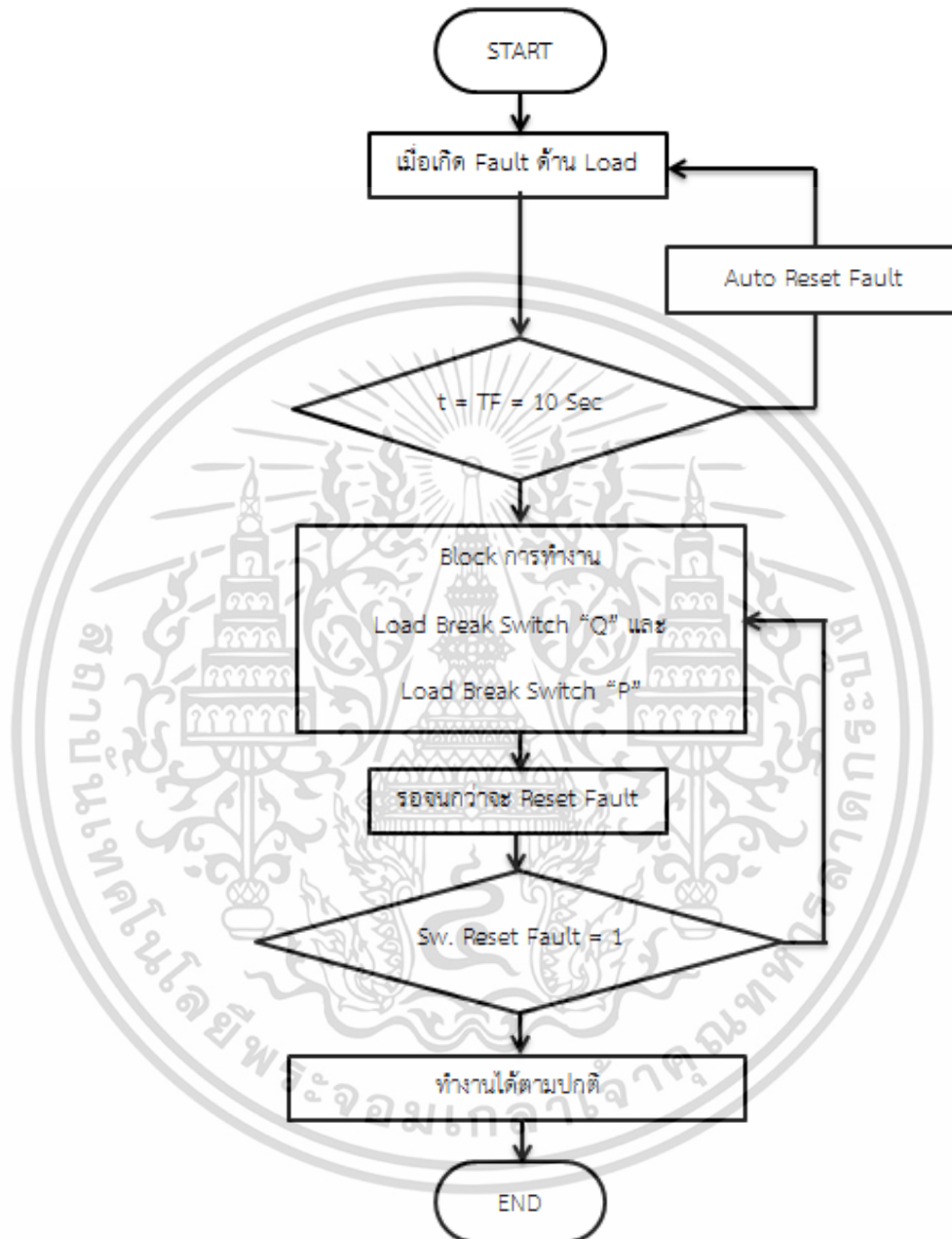
การทำงานเมื่อไฟดับ ทั้ง 2 Feeder



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนเมื่อไฟดับ ทั้ง 2 Feeder เมื่อ Sw. Main Source "Q"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานเมื่อเกิด Fault ด้าน Load



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนเมื่อการทำงานเมื่อเกิด Fault ด้าน Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การติดตั้งระบบ ATS

การติดตั้งสวิตช์ตัดตอนแรงดันสูง



รูปที่ 3.19 การติดตั้งทดสอบและใช้งานจริงที่พระตำหนักสิริยาลัย จ.พระนครศรีอยุธยา



รูปที่ 3.20 การติดตั้งระบบตัดตอนแรงดันต้นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การติดตั้งระบบตัดตอนแรงดันดันสูง



รูปที่ 3.22 การติดตั้งทดสอบเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 การปรับแก้โปรแกรมในเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้



รูปที่ 3.24 การติดตั้งและทดสอบการทำงานของระบบ ATS ชั้นตอนสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

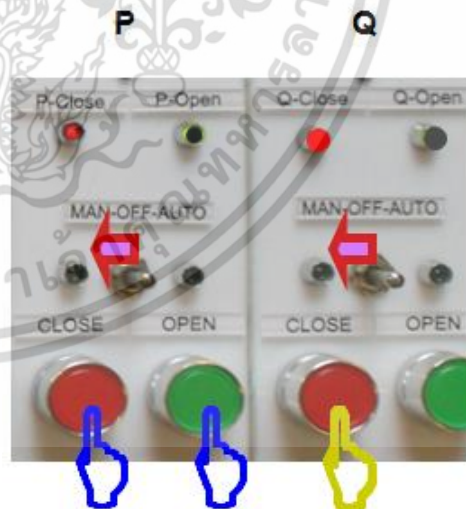
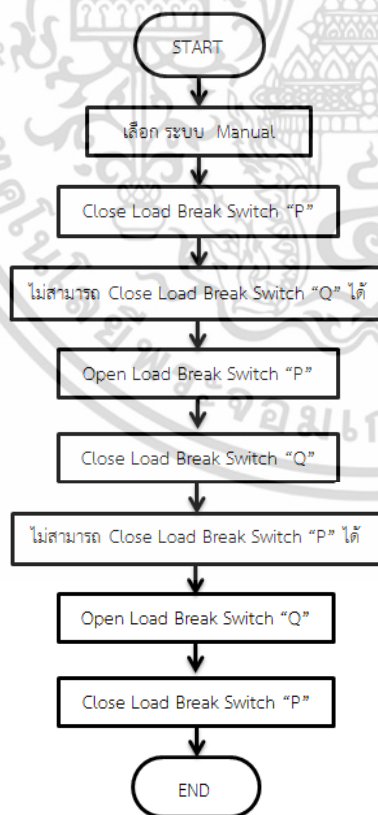
การทดสอบการทำงานของระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ

4.1 การทดสอบการทำงานของระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายอัตโนมัติ

ผู้ควบคุม ATS AC.SW. และ DC.SW. อยู่ที่ตำแหน่ง ON สวิตช์บน Module “P” และ Module “Q” อยู่ที่ตำแหน่ง OFF ขณะนี้ SF6 Load Break Switch อยู่ที่สถานะ Open ทั้งหมด (หลอด Open สีเขียว บน Module ทั้ง 2 ติดสว่าง)

4.1.1 การสั่ง ATS ทำงานแบบ Manual

- ผู้ควบคุม ATS SW.AC และ SW,DC อยู่ที่ตำแหน่ง ON
- และสวิตช์บน Module “P” และ Module “Q” อยู่ที่ตำแหน่ง OFF
- ขณะนี้ SF6 Load Break Switch อยู่ที่สถานะ Open ทั้งหมด (หลอด Open สีเขียว บน Module ทั้ง 2 ติดสว่าง)
- ที่ Module “P” และ Module “Q” โยกสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง Manual



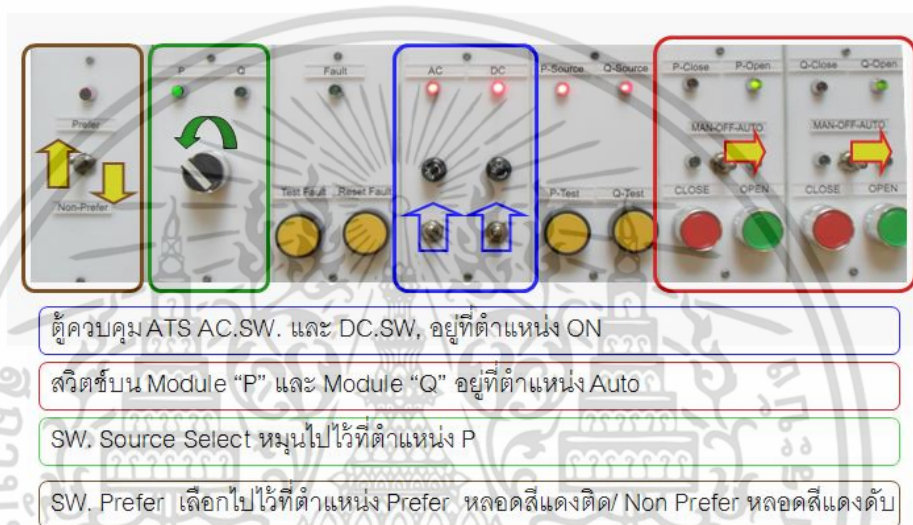
รูปที่ 4.1 การสั่ง ATS ทำงานแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการสั่ง ATS ทำงานแบบ Manual

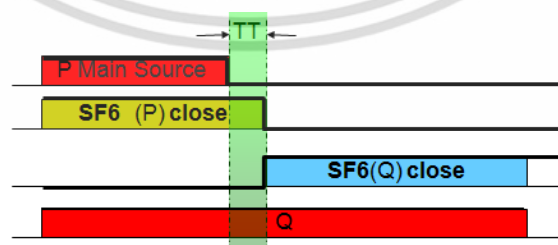
1. สามารถควบคุมการตัดตอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง โดยการสั่งการแบบ **Manual** ได้
2. ระหว่างที่ SF6 Load Break Switch “P” หรือ SF6 Load Break Switch “Q” Close อยู่ จะไม่สามารถ Close อีกตัวได้ เพราะ Inter Lock กันอยู่

4.2.2 การสั่ง ATS ทำงานแบบ Auto



รูปที่ 4.2 การสั่ง ATS ทำงานแบบ Auto

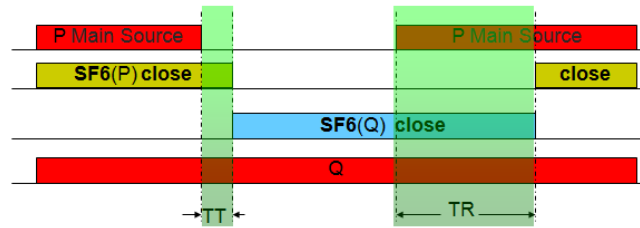
Transfer Timer “TT” เป็น Timer หน่วงเวลาในการสั่ง OPEN SF6 Load Break Switch (Main Source) เมื่อไฟดับ และไปสั่ง Close SF6 Load Break Switch (Stand By) ที่รับไฟจากแหล่งจ่ายไฟสำรอง เข้าไปแทนเพื่อจ่ายไฟให้โหลด



รูปที่ 4.3 Transfer Timer “TT”

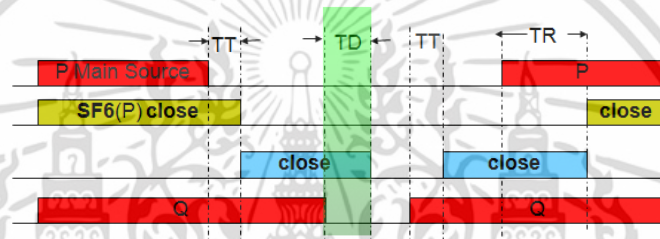
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Restore Timer “TR” เป็น Timer หน่วงเวลาในการ Restore กลับ เมื่อ Main Source มีไฟจ่ายกลับมาปกติ



รูปที่ 4.4 Restore Timer “TR”

Timer Delay “TD” เป็น Timer หน่วงเวลา Open SF6 Load Break Switch เมื่อไม่มีไฟจ่ายมาตามปกติ



รูปที่ 4.5 Timer Delay “TD”

กำหนดค่า Timer ต่างๆ ดังนี้

Transfer Timer	“TT”	2 วินาที
Restore Timer	“TR”	180 วินาที
Delay Timer	“TD”	7 วินาที
Auto Fault Reset Timer	“TF”	10 วินาที

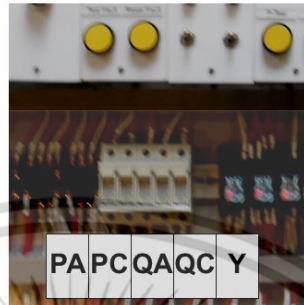
- การทดสอบให้ ATS ทำงานแบบ Auto นอกจากการกดที่สวิตช์ Test แล้ว ยังสามารถทดสอบโดยการปลด Drop Fuse แรงสูงของแต่ละฟีดเดอร์ก็ได้ โดยใช้ไม้ชักฟิวส์



รูปที่ 4.6 การทดสอบโดยการปลด Drop Fuse แรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หรือทดสอบโดยการดึง Main Fuse ในตู้ควบคุม ATS ก็ได้ ถ้าต้องการ Test ว่าไฟ ฟิวส์เตอร์ “P” ดับ ก็ให้ดึง Fuse “PA” หรือ Fuse “PC” หรือทั้ง 2 ตัวก็ได้ ในทำนองเดียวกัน ต้องการ Test ว่าไฟ ฟิวส์เตอร์ “Q” ดับ ก็ให้ดึง Fuse “QA” หรือ Fuse “QC” หรือทั้ง 2 ตัวก็ได้ และถ้าต้องการทดสอบว่าไฟดับทั้ง 2 ฟิวส์เตอร์ ก็ให้ดึง เฉพาะ Fuse Common Y ตัวเดียว หรือจะดึงออกทั้ง 5 ตัวก็ได้



รูปที่ 4.7 การทดสอบการดึง Main Fuse ในตู้ควบคุม ATS

ผลการทดลองการสั่ง ATS ทำงานแบบ Auto

1. เมื่อไฟแหล่งจ่ายหลักดับ ATS สามารถ สั่ง **OPEN** SF6 Load Break Switch (Main Source) และไปสั่ง **Close** SF6 Load Break Switch (Stand By) รับไฟจากแหล่งจ่ายไฟสำรองเข้าไปแทนเพื่อจ่ายไฟให้โหลด โดยใช้เวลา = Transfer Timer “TT” = 2 วินาที
2. กรณี เลือก เป็น Prefer เมื่อไฟแหล่งจ่ายหลักมีไฟกลับมาตามปกติ ATS สามารถ สั่ง **OPEN** SF6 Load Break Switch (Stand By) และไปสั่ง **Close** SF6 Load Break Switch (Main Source) รับไฟจากแหล่งจ่ายไฟหลักเพื่อจ่ายไฟให้โหลด เมื่อแหล่งจ่ายหลักมีไฟมาเท่ากับ Restore Timer “TR” = 180 วินาที
3. กรณี เลือก เป็น Non-Prefer เมื่อไฟแหล่งจ่ายหลักมีไฟกลับมาตามปกติ ATS สามารถ สั่ง **Close** SF6 Load Break Switch (Stand By) และ **OPEN** SF6 Load Break Switch (Main Source) รับไฟแหล่งจ่ายไฟสำรองเหมือนเดิม ซึ่งวิธีนี้จะลดการกระพริบไฟได้ 1 ครั้ง
4. กรณี ไฟดับทั้ง 2 ฟิวส์เตอร์ ATS สามารถ สั่ง **OPEN** SF6 Load Break Switch (ตัวที่ **Close** อยู่) เมื่อไฟดับทั้ง 2 ฟิวส์เตอร์ เมื่อเวลาเท่ากับ Delay Timer “TD” = 7 วินาที (สถานะ **OPEN** SF6 Load Break Switch ทั้ง 2 ตัว)
5. การทดสอบ Fault (ชั่วคราว) ATS สามารถ เคลียร์ Fault ชั่วคราวอัตโนมัติตามเวลา Auto Fault Reset Timer “TF” < 10 วินาที
6. การทดสอบ Fault (ถาวร) ATS สามารถ Block การทำงาน ของ SF6 Load Break Switch ทั้ง 2 ตัว ให้หยุดการทำงาน เมื่อเกิด Fault (ถาวร) Timer “TF” > 10 วินาที รอจนมีการเคลียร์ Reset Fault ATS จะทำงานตามปกติ
7. ระบบสามารถปรับเปลี่ยนค่าเวลาต่างๆได้โดยเปลี่ยนที่โปรแกรมเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะภายในหน่วยงานเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของระบบ

รูปแบบการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง ในงานวิจัยนี้ เป็นรูปแบบโมดูลที่ซ้ำสำรองรอทำงาน (Stand-by Redundancy) หรือบางครั้งเรียกว่า Cold Stand-by Redundancy โดยจะมีแหล่งจ่ายไฟสำรองที่สามารถต่อเข้าทำงานทดแทนแหล่งจ่ายหลักได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแหล่งจ่ายหลักเกิดความล้มเหลวเนื่องจากเกิดความผิดพลาดบางอย่างขึ้น วิธีการนี้จะช่วยลดเวลาในการเปลี่ยน หรือซ่อมแซมแหล่งจ่ายที่เกิดความล้มเหลวขึ้น เนื่องจากแหล่งจ่ายสำรองสามารถทำงานทดแทนแหล่งจ่ายหลักได้ทันที ไม่เสียเวลาในการตรวจวิเคราะห์หาสาเหตุการหยุดการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถหาได้ในภายหลัง แต่วิธีนี้จะเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ในการสร้างระบบแหล่งจ่ายสำรองขึ้นมาอีกระบบหนึ่งเพื่อรอไว้ รวมด้วยค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ตัดต่อให้ระบบสำรองเข้ามาทำงานแทนระบบหลักด้วย

ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) สามารถอธิบายความน่าเชื่อถือของระบบได้ตามสมการ

$$R(t) + Q(t) = 1$$

$$R(t) = 1 - Q(t)$$

กำหนดให้

$R(t)$ คือ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าเชื่อถือ, ความน่าเชื่อถือ ณ เวลา t

$Q(t)$ คือ ฟังก์ชันแจกแจงความไม่น่าเชื่อถือ

ในกรณีของการสับเปลี่ยนของระบบแบบไม่สมบูรณ์แบบนี้ จะนำความน่าจะเป็นที่จะสับเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายหลัก ไปสู่แหล่งจ่ายสำรอง แล้วสามารถเกิดความล้มเหลวขึ้นมาพิจารณาด้วย

หากกำหนดให้ P_s คือ ความน่าจะเป็นที่มีการสับเปลี่ยนจากสับเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายหลัก ไปสู่แหล่งจ่ายสำรอง ได้สำเร็จ

สามารถหาความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดความล้มเหลวได้คือ

$$Q = Q_A - Q_A P_s (1 - Q_B)$$

ดังนั้น ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) $R(p)$ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$R(p) = 1 - [Q_A - Q_A P_s (1 - Q_B)]$$

หากกำหนดให้

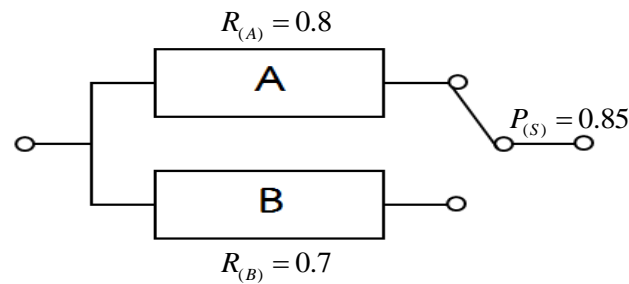
Q_A คือ ความน่าจะเป็นที่แหล่งจ่ายหลักจะเกิดความล้มเหลว = 0.2

Q_B คือ ความน่าจะเป็นที่แหล่งจ่ายสำรองจะเกิดความล้มเหลว = 0.3

P_s คือ ความน่าจะเป็นที่มีการสับเปลี่ยนจากสับเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายหลักไปสู่

แหล่งจ่ายสำรอง ได้สำเร็จ = 0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ของระบบ $R(p)$ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} R(p) &= 1 - [Q_A - Q_A P_s (1 - Q_B)] \\ &= 1 - [0.2 - 0.2(0.85)(1 - 0.3)] \\ &= 1 - 0.081 \\ &= 0.919 \end{aligned}$$

จึงสรุปได้ว่า ความน่าเชื่อถือของจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่าย จึงมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

4.3 คำนวณค่าความคุ้มค่า

จากข้อมูลงานวิจัยโครงการศึกษาอัตราความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ (Outage Cost) เพื่อประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้า ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ของสำนักนโยบายและแผนพลังงาน ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ.2555 พบว่า มูลค่าความเสียหายเฉลี่ยทั่วประเทศ/ 1 ครั้ง = 85,609 บาท

สำหรับสำนักพระราชวัง/พระตำหนัก ซึ่งไม่สามารถประเมินความเสียหาย เมื่อเกิดไฟฟ้าดับเป็นจำนวนเงินได้ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้ดำเนินการติดตั้ง ATS ระบบเดิม ในวงเงินงบประมาณประมาณ 12,000,000 บาท

จึงสามารถสรุปได้ว่าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเมินความเสียหาย เมื่อไฟฟ้าดับที่สำนักพระราชวัง/พระตำหนัก ที่ 1,000,000 บาท/ครั้ง/ปี (กรณีเกิดไฟดับระยะเวลา ครั้งละ 2 วินาทีขึ้นไป จำนวน 12 ครั้ง/ปี)

สำหรับงบประมาณของ ATS ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ชุด Controller 150,000 บาท Load Break SW. SF6 2 ตัว 600,000 บาท ค่าติดตั้ง 200,000 บาท รวม 950,000 บาท

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ระบบ ATS ในงานวิจัยที่ติดตั้งที่พระตำหนักสิริยาลัย จะคุ้มค่าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ เพียงครั้งเดียว

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การควบคุมกระบวนการให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องนั้น มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะกระบวนการที่มีความสำคัญสูง ซึ่งหากเกิดความผิดปกติขึ้นในกระบวนการดังกล่าว จะทำให้เกิดปัญหาตามมาอีกมากมาย จึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะทำให้ระบบมีความต่อเนื่องในการทำการควบคุม เพื่อที่จะลดความเสียหายอันเกิดจากการที่ระบบควบคุมหยุดการทำงาน

งานวิจัยนี้จึงศึกษาแนวทางในการออกแบบระบบพัฒนาระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูงอัตโนมัติควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ (Programmable Logic Controller, PLC) ที่ถูกออกแบบให้มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย เช่น ฟังก์ชันทางตรรก ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ฟังก์ชันตัวตั้งเวลา ตัวนับ การติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก และถูกออกแบบให้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ร้อนและชื้น ได้รับความนิยอย่างกว้างขวางในการควบคุมทำงานเครื่องจักรอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกระบบควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้มาพัฒนาใช้กับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง

จากการทดลองการทำงานระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง เป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ โดยใช้เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ (PLC) ที่สามารถควบคุมการทำงานของระบบให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดทั้งหมดได้ การใช้ PLC ควบคุมการทำงานของระบบทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย มีประสิทธิภาพการใช้งานสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงานได้โดยการเปลี่ยนแปลงที่โปรแกรมเท่านั้น

ทั้งนี้ ได้มีการติดตั้ง ทดสอบและใช้งานจริงที่พระตำหนักสิริยาลัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จนถึงปัจจุบัน

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

ในการพัฒนาระบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น คือ ควรเพิ่มการบันทึกจัดเก็บข้อมูลสถานะต่าง ๆ เช่น จำนวนครั้งของการเกิดฟอลท์ จำนวนครั้งของการถ่ายโอนแหล่งจ่ายเป็นต้น พัฒนาวิธีการส่งสัญญาณเตือนของระบบ ผ่านการสื่อสารระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้ผู้ดูแลรับทราบและแก้ไขความผิดพลาดได้ทันเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Hamdy Ashour, “Automatic transfer switch (ATS) using programmable logic controller (PLC)” Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, .2004ICM ' .04Publication Year: 2004 , Page(s): 531–535
- [2] Taweeapol Suesut, Viriya Kongratana, Vittaya Tipsuwanporn and Suphan Kulphanich, “A Technique to Expand the I/O of the PLC Using Remote I/O module”, The 14th Korea Automatic Control Conference, pp E-61 –64, Korea OCT 1999
- [3] T.Suesut , P.Rerngruen, V.Tipsuwanporn, S.Kulphanich and S.Chuenarom, “Design of the PLC network Using Remote I/O module Application for A multi group of machine”, The 3rd Asian Control Conference pp2821-2818, Shanghai, China, July 2000
- [4] ทวีช ชูเมือง, ระบบวัดคุม nirky ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต, ซีไอเอ็มเคชั่น, 2544.
- [5] Shu-Ho Dai, Ming-O Wang, Reliability Analysis in Engineering Applications, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [6] Barry W. Johnson, “Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital System”, Addison Wesley Publishing Company Inc., New York. 1957.
- [7] MARTIN L. SHOOMAN, “Reliability of Computer Systems And Networks”, JOHN WILEY & SONS, INC., New York. 2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตขิงผง Automatic Control System for Ginger Powder Production Process

นาวัทธา หนูนาค¹ ชาวฤทธิ์ สุขรักร² ทวีพล ชื้อสตัย²
Navaphattra Nunak¹, Chaowarite Sukrak², Taweepol Suesut²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนากระบวนการควบคุมอัตโนมัติสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตขิงผง จากกระบวนการเดิมที่อาศัยผู้ปฏิบัติงานคอยปรับอัตราทดของเกียร์เพื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของใบกวนให้สอดคล้องกับช่วงเปลี่ยนเฟสของของเหลวผสม (น้ำขิงผสมน้ำตาลทราย) ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของเหลวผสมในระหว่างกระบวนการระเหยน้ำจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรอินพุตควบคุมความเร็วรอบใบกวน โดยแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหลวผสมได้เป็น 2 ช่วงดังนี้ ช่วงให้ความร้อนแก่ของเหลวผสมเพื่อให้น้ำตาลในของเหลวผสมละลายและเพื่อระเหยน้ำออก ความเร็วของมอเตอร์ในช่วงนี้จะคงที่ซึ่งอุณหภูมิของเหลวผสมจะค่อย ๆ สูงขึ้นจากนั้นคงที่ และเพิ่มขึ้นสูงอีกครั้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึงจุดเดือดของน้ำเชื่อมจะหยุดให้ความร้อน ซึ่งต้องเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ให้สูงขึ้นเพื่อช่วยระบายความร้อนออกจากขิงผงให้เร็วที่สุด ณ สภาวะนี้ของเหลวผสมจะคายพลังงานเพื่อสร้างพันธะจับตัวกันเป็นของแข็งและเป็นขิงผงโดยสมบูรณ์ซึ่งอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงจนเข้าใกล้อุณหภูมิห้อง ระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ประกอบด้วยเครื่องควบคุมที่โปรแกรมได้ที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยมีเทอร์โมคัปเปิลตรวจวัดอุณหภูมิจากกระทะต้มน้ำขิงโดยที่โปรแกรมควบคุมจะตั้งปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ตามช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส ระบบนี้สามารถประยุกต์ใช้งานแทนระบบเดิมได้ดี ซึ่งลดพลังงานและเกิดความผิดพลาดจากคน

คำสำคัญ: ขิงผง ระบบควบคุมอัตโนมัติ เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้

ABSTRACT

This paper presents the development of automatic control systems for ginger powder process. According to the conventional operation, the worker has to change the gear box for adjusting the motor speed related to the phase change of solid-liquid mixture (ginger ale and sugar). Therefore, the temperature of the mixture in the evaporation process is used as the input variable for control agitation speed. The phase change temperature of the solid-liquid mixture was divided into two periods. In the beginning process, the solid-liquid mixture is heated to dissolve sugar and evaporated the water out. Motor speed is still maintained. The liquid mixture temperature will gradually increase. When the temperature of mixture is reached to the boiling point of sugar solution, the motor speed is increased. Finally, the temperature will gradually decrease to the room temperature. The motor control system consists of Programmable Logic Controller (PLC) with the temperature control module connected to thermocouple for sensing the temperature of mixed liquid cooker. The speed of motor was controlled by inverter and PLC depending on the condition of the temperature and phase changing. This system can be applied instead of the traditional system that uses an operator to adjust the speed of motor gear causing the human error and waste of energy.

Keywords: Ginger powder, Automatic control system, Programmable Logic Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการประชุมวิชาการซึ่งจะคืนให้เจ้าของลิขสิทธิ์ ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Email: kbnavaph@kmitl.ac.th
1. อีเมลทั้งห้าฉบับให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2. สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Email: kstaweep@kmitl.ac.th

บทนำ

การผลิตซิงผงเป็นการแปรรูปอาหารโดยทำให้แห้งและอาศัยความร้อนเพื่อทำให้น้ำในอาหารระเหยออกจากผิวอาหาร ส่งผลให้ความชื้นของอาหารลดลงจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งมีค่า water activity (a_w) ต่ำกว่า 0.70 การผลิตซิงผงในอุตสาหกรรมขนาดย่อมโดยทั่วไปใช้วัสดุอุปกรณ์พื้นฐานและอาศัยบุคคลในการควบคุมความเร็วรอบใบกวนและให้พลังงานความร้อนจากเตาแก๊ส จึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซิงผง การควบคุมที่ไม่เหมาะสมจะก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน เพิ่มต้นทุน ในการผลิต และเสี่ยงต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับคนงาน

สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตอาหารผง ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิ เวลาและความเร็วรอบใบกวน โดยการผลิตซิงผงในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ให้ความร้อนจากลมร้อน ซึ่งความเข้มข้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิ อากาศเข้าและอัตราการพ่นของ spray dry ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาดอนุภาคสุดท้ายที่รวมตัวกันมีขนาดเล็ก (กรวลีย์ พันธุ์-แพและคณะ, 2550) และทางเคมีของผลิตภัณฑ์ซิงผง เช่น การเกิดปฏิกิริยาน้ำตาล (อนงค์ เสริฐวาสนาและคณะ, 2551) เป็นต้น ในขณะที่อุตสาหกรรมขนาดย่อมให้ความร้อนจากเตาแก๊ส โดยควบคุมความเข้มข้นวัตถุดิบส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของซิงผงเปลี่ยนแปลง (ศิริฉวี เลื่อนแป้น, 2549)

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยข้างต้น ยังไม่พบการผลิตซิงผงที่มีการควบคุมอุณหภูมิของเหลวผสมและความเร็วรอบใบกวน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบใบกวนที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ซิงผง เพื่อหาแนวทางในการออกแบบระบบควบคุมการผลิตซิงผงแบบอัตโนมัติในระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

คัดเลือกซิงแก๊สพันธุ์ซิงเล็กหรือซิงเผ็ดจากจังหวัดเพชรบูรณ์ล้างทำความสะอาด บั่นและกรองจะได้น้ำซิงสดและกากที่เหลือ จากนั้นเตรียมน้ำซิงสดและน้ำตาลทรายขาว (ยี่ห้อเซฟแพ็คจากห้างสรรพสินค้าตลาดหรือซูเปอร์มาร์เก็ต) ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:1

เครื่องกวน

มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกคล้ายกระทะทรงสูงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 นิ้วใช้มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า (1.5 กิโลวัตต์) มีเกียร์ 4 เกียร์ ใช้ในการปรับลดความเร็วรอบ ใช้แรงงานคนในการควบคุมปรับเกียร์ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะชุดกวนพร้อมมอเตอร์และชุดเกียร์ ใช้สำหรับการระเหยน้ำ

การทดลอง

นำน้ำซิงสดและน้ำตาลทรายผสมในเครื่องกวนและให้ความร้อนจากเตาแก๊ส ที่ควบคุมการให้ความร้อน (หยุดให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 และ 128°C) และความเร็วรอบใบกวน (16 และ 24 rpm) บันทึกอุณหภูมิของเหลวผสม สังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น สี การเกิดฟอง การเปลี่ยนแปลง เป็นต้น เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิงผงไปวิเคราะห์ความชื้นและสีต่อไป

การวิเคราะห์คุณภาพ

ความชื้นฐานเปียก

จากการสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิงผง 3-5 กรัม ไปอบที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้นที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง

คุณสมบัติ	ซิงสด	น้ำซิงสด	ซิงผง	น้ำซิงผง
ความชื้นฐานเปียก (%w.b.)	89.99	98.11	0.82	96.23
a_w	0.9995	-	0.2475	-
pH	-	5.3	-	5.61
Brix	-	3	-	9.75
L*	-	0.95	-	0.61
a*	-	0.63	-	-0.23

สี

สุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิงผง 5-10 กรัม อ่านค่าจาก Munsell Book และเครื่อง Colorimeter รุ่น JC-801 โดยบันทึกค่า L* a* b* (ค่า L* คือค่าความสว่าง a* คือค่าความเป็นสีแดง b* คือค่าความเป็นสีเหลือง)

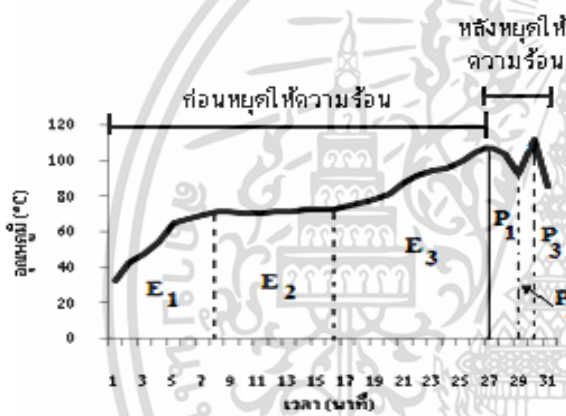
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางบริษัทฯ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ

ตารางที่ 2 แสดงค่าที่อ่านได้จากมันเซลล์บิวค (Muncell Book)

ค่าที่อ่านได้	
น้ำขิงสด	น้ำขิงผง
5Y/8/6	10YR/7/7
5Y/8/6	10YR/6.5/8
7.5Y/8/4	10YR/7/8
7.5Y/7.5/6	10YR/7/10

ผลการทดลองและวิจารณ์

อุณหภูมิของเหลวผสมช่วงหยุดให้ความร้อนสูง ส่งผลให้สีของขิงผงเข้มขึ้นและที่ความเร็วในการกวนช่วงเปลี่ยนเฟสสูงส่งผลทำให้ขนาดขิงผงลดลง สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหลวผสมเป็น 2 ช่วง (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา



ภาพที่ 3 ภาพแสดงการลักษณะการเปลี่ยนแปลงของน้ำขิงในช่วงก่อนหยุดให้ความร้อน ช่วงที่2(E₂) และช่วงที่3(E₃)

ช่วงหลังหยุดให้ความร้อน

ช่วงที่1(P₁) อุณหภูมิของเหลวผสมจะลดลงเนื่องจากไม่ได้รับความร้อนเพิ่ม จึงเย็นตัวลงและเริ่มใสที่อุณหภูมิประมาณ 88-95°C

ช่วงที่2(P₂) แนวโน้มอุณหภูมิของเหลวผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากของเหลวผสมคายพลังงานเพื่อสร้างพันธะจับตัวกันเป็นของแข็งและเริ่มมีสีขาวขุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 92-103°C จนเป็นขิงผงสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 71-90°C

ช่วงที่3(P₃) อุณหภูมิขิงผงลดลงจนถึงสภาวะอุณหภูมิห้อง

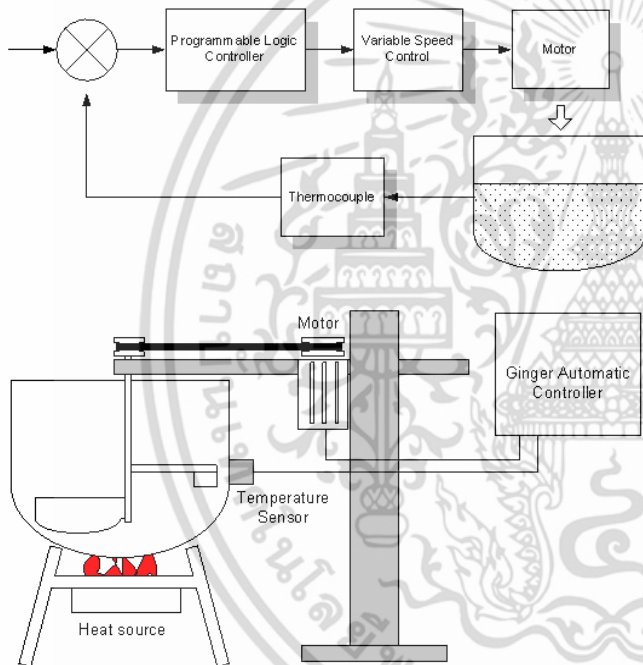


ภาพที่ 4 ภาพแสดงการลักษณะการเปลี่ยนแปลงของน้ำขิงในช่วงหลังหยุดให้ความร้อน ช่วงที่1(P₁) และช่วงที่2(P₂)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติการผลิตซิงผง

จากการศึกษากระบวนการผลิตซิงผง พบว่าความเร็วรอบของใบกวนในช่วงเปลี่ยนเฟสและอุณหภูมิของเหลวผสม (น้ำซิงผสมน้ำตาลทราย) ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพซิงผงที่ได้ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของเหลวผสมในระหว่างกระบวนการระเหยน้ำจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรอินพุตควบคุมความเร็วรอบใบกวน โดยแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหลวผสมได้เป็น 2 ช่วงดังกล่าว ระบบควบคุมประกอบด้วยเครื่องควบคุมที่โปรแกรมได้ที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยมีเทอร์โมคัปเปิลตรวจวัดอุณหภูมิจากหม้อต้มน้ำซิงโดยที่โปรแกรมควบคุมจะส่งปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ตามช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส (ภาพที่ 5)



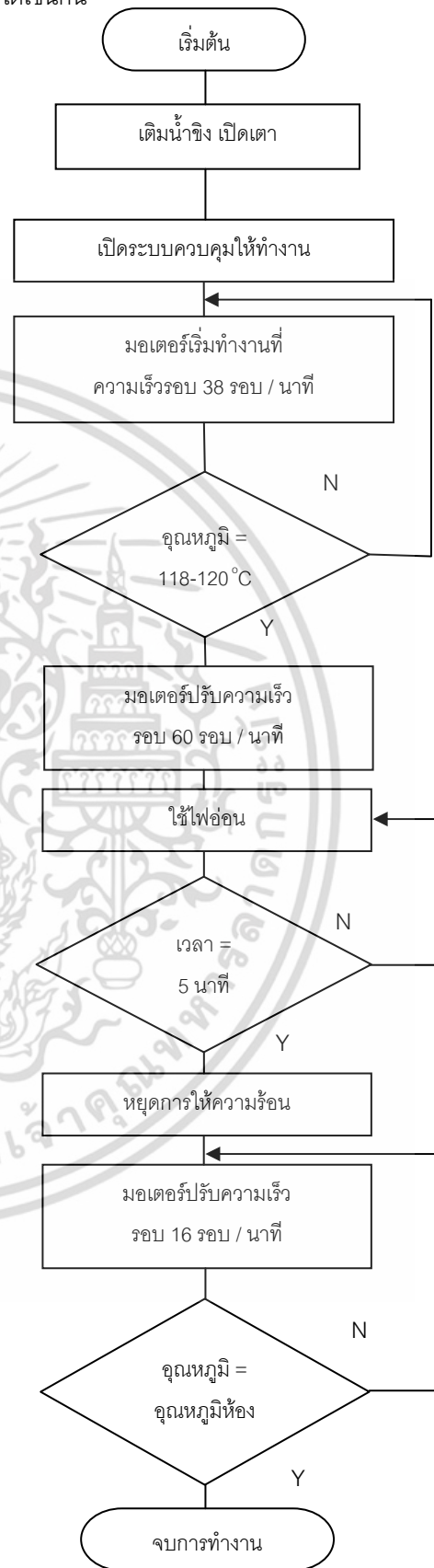
ภาพที่ 5 ระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

การทำงานของระบบควบคุม

การเปิดปิดเตายังคงใช้คนเป็นผู้ควบคุมโดยการเปิดปิดแก๊ส เครื่องควบคุมที่โปรแกรมได้จะรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลที่แนบอยู่กับกระทะ อุณหภูมิที่อ่านได้จะใช้ในการโปรแกรมระดับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยส่งสัญญาณควบคุมไปยังชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ในการกำหนดระดับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละช่วงเวลานั้นจะขึ้นอยู่กับระดับค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำซิงในหม้อต้ม การทดลองเพื่อกำหนดเงื่อนไขของเวลาในการกำหนดโปรแกรมจึงมีความจำเป็นในการทำงาน ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะเดียวกันอุณหภูมิที่วัดได้จากน้ำซิงก็จะบอกสถานะของน้ำซิงได้เช่นกัน



ภาพที่ 6 ระบบควบคุมอัตโนมัติการผลิตซิงผง

การทำงานของระบบควบคุมถูกออกแบบให้ทำงานในแบบควบคุมไปข้างหน้า(Feed forward Control) และการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feed back Control) ควบคุมกันไปเมื่อน้ำขิงเปลี่ยนสภาพใกล้เป็นขิงผง อุณหภูมิจะสูงมากขึ้น ไบโกลานต้องหมุนให้เร็วขึ้นเพื่อป้องกันขิงผงไหม้ในขณะที่การให้ความร้อนต้องถูกลดลง จนเสร็จสิ้นกระบวนการ

สรุป

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพขิงผงได้แก่ อุณหภูมิของเหลวผสมช่วงลดความร้อนและความเร็วรอบไบโกลานช่วงเปลี่ยนเฟส จึงนำอุณหภูมิของเหลวผสมมาเป็นตัวแปรอินพุตในการควบคุมความเร็วรอบไบโกลาน ในระบบควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณโครงการ IRPUS สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2552 ผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณคุณชุตติมณฑน์ วรเชษฐบัญชา คุณชุตติมา พิพัฒน์คุณแมนรัตน์ บุญประถัมภ์และคุณวลัยพร สายวัฒน์สำหรับข้อมูลทางงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรวาลัย พันธุ์แพ, ศุภลักษณ์ อ่างแก้ว, จิรวดี ศรีธำราและจินดา เงินสุทธิชัยพร. การสังเคราะห์นาโนไททานเนียมไดออกไซด์โดยปราศจากอัลคอกไซด์ด้วยวิธีไฮลเจล. [ปริญาวิทยาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2550.

พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์, มณฑิรา นพรัตน์และดวงพร ตั้งบำรุงพงษ์. กระบวนการผลิตน้ำผักผลไม้รวมโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจาย. [ปริญาวิทยาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2545.

ศิริณมา เลื่อนแป้น. การศึกษาน้ำตาลมะพร้าวผง. [ปริญาวิทยาสตรบัณฑิต]. เพชรบุรี : สถาบันราชภัฏเพชรบุรี, 2549.

ศิริลักษณ์ สิ้นธวาลัย. ทฤษฎีอาหาร เล่ม 2 หลักการถนอมอาหารและการควบคุมคุณภาพอาหาร : การใช้น้ำตาล. ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ; 2525. P.109-139.

สุมาลี อุณหวนิชย์. ระบบควบคุม (CONTROL SYSTEM). กรุงเทพฯ : บริษัท ว.เพ็ชรสกุล จำกัด ; 2545.

อนงค์ เสรีวาสนา และ สิงหนาท พวงจันทร์แดง. การพัฒนากระบวนการแปรสภาพน้ำขิงผงและขิงผง. [ปริญาวิทยาสตรบัณฑิต]. ขอนแก่น : ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวมหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2551.

Arora, C. P. 1998. "Thermodynamics." New Delhi: Tata McGraw Hill. 31. Balladin, D. A. & Headley, O. (1997). "Extraction and Evaluation of the Main Pungent Principles of Solar Dried West Indian Ginger (Zingiber officinale Roscoe) Rhizome." Renewable Energy. 12. 125-130.

Lawrence, B. M. and Reynolds, R. J. 1984. "Progress in Essential Oil." Perfumer & Flavorist. 16 .49-56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสำรวจความพึงพอใจในการใช้งาน ระบบควบคุมอัตโนมัติ สำหรับถ่ายโอนแหล่งจ่ายแรงดันสูง (ATS)

1. รอบระยะเวลาการประเมิน
1 มกราคม 2557 – 31 ธันวาคม 2557
2. อัตราการเกิดไฟฟ้าดับ/ปี
 1 – 2 ครั้ง/ปี 3 - 4 ครั้ง/ปี 5 - 6 ครั้ง/ปี 7 ครั้ง/ปี
 ปี ขึ้นไป
3. การทำงานของ ATS เมื่อเกิดไฟฟ้าดับ
 ปกติ
 ไม่ปกติ โปรดระบุ

4. สรุปความพึงพอใจในภาพรวม
 ต่ำมาก ดี ปานกลาง พอใช้
 ปรับปรุง

ผู้ตอบแบบประเมินความพึงพอใจ

ชื่อ – สกุล นายสุทธิเกียรติ เหมะ

ตำแหน่ง พนักงานช่างระดับ 4

หน่วยงาน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล เชาวฤทธิ์ สุขรักษ์
 วัน เดือน ปี เกิด 09 ธันวาคม 2518
 ประวัติการศึกษา ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
 ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ในปีการศึกษา 2539-2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้