

การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟสด้วยตัวควบคุมฟัซซี่

ESTIMATED FAULT LOCATION FOR THREE-PHASE SYSTEM
BY FUZZY CONTROLLER

สุธี รุกขพันธ์
SUTHEE RUKKAPHAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1135-3

การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟสด้วยตัวควบคุมฟัซซี

ESTIMATED FAULT LOCATION FOR THREE-PHASE SYSTEM
BY FUZZY CONTROLLER

สุธี รุกขพันธุ์

SUTHEE RUKKAPHAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1135-3

ESTIMATED FAULT LOCATION FOR THREE-PHASE SYSTEM
BY FUZZY CONTROLLER

SUTHEE RUKKAPHAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT THE DEGREE OF
MASTER ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1135-3

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยตัวควบคุมพีซีซี
นักศึกษา	นายสุธี รุกขพันธ์
รหัสประจำตัว	43061424
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งของกระแสลัดวงจรในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้ตัวควบคุมพีซีซีลอจิกซึ่งมีกระแสลัดวงจรเป็นอินพุตและมีระยะทางเป็นเอาต์พุต เพื่อประมาณค่าของตำแหน่งของการเกิดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสายส่ง ร่วมกับทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลังในระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟส มาประยุกต์ใช้งานบนเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ ด้วยการโปรแกรมภาษาแลดเดอร์ร่วมกับภาษาเบสิก

นอกจากนี้ระบบยังถูกออกแบบให้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานและเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูลได้ในระยะไกลด้วยการสื่อสารแบบอนุกรม RS422A ระบบนี้สามารถลดระยะเวลาในการค้นหาตำแหน่งการเกิดความผิดปกติในสายส่งไฟฟ้าและแก้ไขความผิดปกตินั้นในเวลาอันรวดเร็ว ส่งผลให้ระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าเกิดความมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น และยังช่วยลดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในภาคธุรกิจอุตสาหกรรมอีกด้วย

Thesis Title	Estimated Fault Location for Three-Phase System by Fuzzy Controller
Student	Mr. Suthee Rukkaphan
Student ID.	43061424
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Vittaya Tipsuwanporn

ABSTRACT

This thesis presents the detecting fault location in power system by using Fuzzy Logic Controller. The inputs of the controller are a short-circuit current and the distance of the transmission lines, which occur the fault position, is output. Three-phase power distribution system provides as a source. The proposed method uses Programmable Logic Controller (PLC) to operate the fuzzy controller that is formulated by Ladder programming and combining with Basic programming.

In the proposed method, the system is connected to microcomputer through the serial communication port, RS422A, in order to monitor by displaying operation status and recording the data. The system can save time to management the system. Also, the distribution lines increase stability, reliability and makes the consumers to satisfaction.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี เพราะได้รับการสนับสนุนช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแนะนำในการวิจัยจากท่าน รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับคำปรึกษาและความกรุณาที่ท่านได้มอบให้ตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ ผศ.ทวีพล ชื้อสัตย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะ ให้กำลังใจและประสบการณ์ในด้านการไปนำเสนอบทความทางวิชาการในต่างประเทศ อีกทั้งคณะเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรม การวัดคุมทุกท่านที่ให้ความสะดวกในทุกๆด้านของผู้ทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณยุทธพงศ์ ทัพผดุง กองฝึกอบรมการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งเป็นผู้มีพระคุณกับผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่งที่คอยให้คำปรึกษาในงานวิจัย อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณกลุ่มเพื่อนสนิทของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือในการวิจัยและให้ความกระจ่างกับปัญหาต่างๆในการทำวิจัยในครั้งนี้ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาและการวิจัยของผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนจบการศึกษา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบแต่ บิดา มารดา รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

สุธี รุกขพันธุ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	IX
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบจำหน่าย.....	5
2.1 เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง.....	5
2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า.....	5
2.2.1 การลัดวงจรแบ่งออกเป็น 2 ชนิด.....	6
2.2.2 การลัดวงจรแบ่งตามลักษณะได้ 2 แบบ.....	6
2.2.3 สาเหตุที่ทำให้เกิดการลัดวงจร.....	6
2.3 การลัดวงจรแบบสมมาตร.....	7
2.3.1 สาเหตุของการเกิดการลัดวงจร.....	7
2.3.2 การจำลองระบบ.....	8
2.3.3 กระแสลัดวงจร.....	10
2.3.3.1 การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรตามเวลา...10	
2.3.3.2 การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรเนื่องจาก	
การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์.....	11

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.4 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในทางปฏิบัติ.....	13
2.3.5 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่าย.....	14
2.4 การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร.....	16
2.4.1 หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการแก้ไขปัญหาแบบไม่สมมาตร...16	
2.4.2 องค์ประกอบสมมาตร.....	19
2.4.3 อิมพีแดนซ์ลำดับ.....	22
2.4.4 อิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	22
2.4.4.1 อิมพีแดนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	23
2.4.4.2 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง.....	24
2.4.4.3 อิมพีแดนซ์ของสายไฟ.....	24
2.4.4.4 อิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจร.....	24
2.4.5 การคำนวณกระแสลัดวงจร.....	25
บทที่ 3 ทฤษฎีฟuzzyลอจิก.....	31
3.1 ทฤษฎีฟuzzyลอจิก.....	31
3.1.1 ตัวแปรลิงกวิสติก.....	31
3.1.2 ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม.....	32
3.1.2.1 ค่าความจริงของประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน.....	32
3.1.2.2 ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน.....	33
3.1.2.3 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล.....	33
3.1.3 ทฤษฎีตรรกฟuzzy.....	33
3.1.3.1 ค่าความจริงของประพจน์ในทฤษฎีตรรกฟuzzy.....	33
3.1.3.2 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีตรรกฟuzzy.....	33
3.1.4 ความสัมพันธ์ฟuzzy.....	34
3.1.4.1 ผลคูณคาร์ทีเซียน.....	34
3.1.4.2 ความสัมพันธ์ฟuzzy.....	35
3.1.5 การคอมโพสิชันแบบฟuzzy.....	35
3.2 ตัวควบคุมฟuzzy.....	36
3.2.1 กฎการควบคุมฟuzzy(Fuzzy Rule Base).....	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การฟัซซีฟิเคชัน(Fuzzification).....	37
3.2.3 การอินเฟอร์เรนซ์แบบฟัซซี(Fuzzy Inference).....	37
3.2.4 การดีฟัซซีฟิเคชัน(Defuzzification).....	38
3.2.4.1 การหาค่าระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด(Max-Membership).....	38
3.2.4.2 การหาค่าจุดศูนย์กลางของฟัซซี(Centroid).....	38
3.2.4.3 การหาค่าเฉลี่ยของค่าถ่วงน้ำหนัก(Weighted average).....	39
3.2.4.4 การหาค่ากลางสูงสุด(Mean of Max Membership).....	40
บทที่ 4 เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้และการติดต่อสื่อสาร.....	41
4.1 ที่มาของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้.....	41
4.1.1 การพัฒนาของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้.....	41
4.1.2 ข้อดีของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้.....	42
4.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้.....	43
4.2.1 หน่วยประมวลผลกลาง.....	44
4.2.1.1 หน่วยประมวลผล.....	44
4.2.1.2 หน่วยความจำ.....	45
4.2.1.3 หน่วยจ่ายกำลัง.....	47
4.2.2 หน่วยอินพุต/เอาต์พุต.....	47
4.2.2.1 อินพุต/เอาต์พุตแบบสภาวะลอจิก.....	48
4.2.2.2 อินพุต/เอาต์พุตแบบค่าตัวเลข.....	48
4.2.2.3 อินพุต/เอาต์พุตสำหรับค่าสภาวะหลายบิต.....	49
4.2.2.4 อินพุต/เอาต์พุตแบบพิเศษ.....	49
4.2.3 หน่วยป้อนโปรแกรม.....	50
4.2.3.1 เครื่องป้อนโปรแกรมแบบ CRT.....	51
4.2.3.2 เครื่องป้อนโปรแกรมขนาดเล็ก.....	51
4.2.3.2 เครื่องป้อนโปรแกรมลงหน่วยความจำของ PLC.....	52
4.2.3.3 เครื่องป้อนโปรแกรมลงบนหน่วยความจำ.....	52
4.2.3.5 คอมพิวเตอร์.....	52
4.3 ลักษณะการโปรแกรมให้กับเครื่องควบคุมแบบตรรก.....	52

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.1 โปรแกรมภาษาแลตเตอร์ไดอะแกรม.....	52
4.3.2 โปรแกรมคำสั่งแบบบูตลิน.....	54
4.4 รูปแบบการสื่อสารข้อมูลของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้.....	55
4.4.1 การต่อวงจรแบบจุดต่อจุด.....	55
4.4.2 การต่อวงจรแบบหลายจุด.....	56
4.4.2.1 การต่อแบบอินพุตเอาต์พุตระยะไกล(Remote I/O System)....	56
4.4.2.2 การต่อแบบพีซีลิงค์(PC Link System).....	56
4.4.2.3 การต่อแบบเครือข่ายท้องถิ่น(Local Area Network).....	57
4.5 ข้อตกลงในการติดต่อสื่อสารของเครื่องควบคุมแบบตรรก.....	58
4.5.1 รูปแบบของบล็อก(Block Format).....	59
4.5.2 การคำนวณ FCS.....	59
4.6 มาตรฐานในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม.....	60
4.6.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232C.....	60
4.6.2 การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-422A.....	61
4.6.3 การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-485.....	61
บทที่ 5 การออกแบบการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร	
5.1 ขั้นตอนการออกแบบการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร.....	64
5.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่าย.....	65
5.3 ชุดทดลองการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร.....	69
5.4 โครงสร้างของระบบ.....	70
5.5 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของชุดทดลอง.....	71
5.6 การประยุกต์พีซีเพื่อประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร.....	81
5.6.1 การสร้างฟังก์ชันในความเป็นสมาชิกพีซีและการพีซีพีเคชั่น.....	82
5.6.1.1 ความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร.....	83
5.6.1.2 ความเป็นสมาชิกของระยะทาง.....	85
5.6.2 การสร้างฐานความรู้แบบพีซี.....	86
5.6.3 กระบวนการตัดสินใจ.....	86
5.6.4 การตีพีซีพีเคชั่น.....	87

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.6.5 การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรด้วยตัวควบคุมพีซี.....	87
5.7 โปรแกรมคำสั่งแลดเดอร์ของเครื่อง PLC (Ladder Program).....	95
5.8 โปรแกรมแสดงการประมาณการและทดสอบการติดต่อสื่อสาร.....	97
5.9 สร้างวงจรชุดแปลงสัญญาณมาตรฐาน RS-232C เป็น RS-422A.....	98
บทที่ 6 การทดสอบการทำงานและผลการทดลอง.....	100
6.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	100
6.2 การทดลอง.....	102
6.3 สรุปผลการทดลอง.....	107
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
เอกสารอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	112
ภาคผนวก ข. การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าและรูปแบบการแปลงสัญญาณ.....	113
ภาคผนวก ค. ตารางซีเควินซ์อิมพีแดนซ์ของสาย.....	115
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลย์ของอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง.....	9
2.2 การเกิดการลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	10
2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังการเกิดลัดวงจร.....	12
2.4 กระแสลัดวงจรตามเวลา.....	12
2.5 กระแสลัดวงจรในระบบที่คิดทั้งกระแสตรงและกระแสลับ.....	13
2.6 ไดอะแกรมของระบบสายส่งต่อกับระบบจำหน่าย.....	14
2.7 ระบบจำหน่ายและการคิดกระแสลัดวงจร.....	15
2.8 ระบบไฟฟ้าลัดวงจรเฟส-ดิน.....	17
2.9 หลักการองค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	18
2.10 เวกเตอร์ไดอะแกรมค้กดาไฟฟ้า.....	20
2.11 ค่าอิมพีแดนซ์(Z) ค่าที่ได้ทางเวกเตอร์ของความต้านทาน(R) กับรีแอกแตนซ์(X).....	23
2.12 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบวายกราวด์ผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n	25
2.13 Zero Sequence component ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	26
2.14 การเกิด Single line to ground fault ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	27
2.15 Sequence network ของ Single line to ground fault.....	28
2.16 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	29
2.17 การลัดวงจรชนิดต่างๆ.....	30
3.1 ความสัมพันธ์พีซี.....	34
3.2 การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์พีซี.....	35
3.3 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมพีซี.....	36
3.4 การพีซีพีเคชันแบบซิงเกิลตัน.....	37
3.5 การอินเฟอร์เรนทแบบพีซี.....	38
3.6 การดีพีซีพีเคชันโดยใช้วิธีการหาค่าระดับความเป็สมากสูงสุด.....	38
3.7 การดีพีซีพีเคชันโดยใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลางของพีซี.....	39
3.8 การดีพีซีพีเคชันด้วยการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก.....	39
3.9 การดีพีซีพีเคชันด้วยการหาค่ากลางสูงสุด.....	40
4.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้.....	43
4.2 บล็อกไดอะแกรมของหน่วยประมวลผลกลาง.....	44
4.3 ข้อมูลเป็น บิท, ไบท์ และเวิร์ด.....	45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 หน่วยความจำของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้.....	46
4.5 หน่วยความจำสำหรับผู้ใช้.....	46
4.6 บล็อกไดอะแกรมของหน่วยอินพุต/เอาต์พุต.....	47
4.7 เครื่องป้อนโปรแกรมแบบ CRT.....	51
4.8 เครื่องป้อนโปรแกรมขนาดเล็กแบบพกพา.....	51
4.9 วงจรรีเลย์ควบคุมการหมุนกลับทางของมอเตอร์แบบ JOGGING.....	53
4.10 แลตเตอร์ไดอะแกรมควบคุมการหมุนกลับทางของมอเตอร์แบบ JOGGING.....	54
4.11 การแบ่งแลตเตอร์ไดอะแกรมออกเป็นรังค์.....	54
4.12 การติดต่อแบบจุดต่อจุด.....	55
4.13 การเชื่อมโยงแบบอินพุตและเอาต์พุตระยะไกล.....	56
4.14 การต่อแบบ Serial link.....	57
4.15 การต่อแบบ Parallel link.....	57
4.16 การติดต่อสื่อสารแบบเครือข่ายท้องถิ่น.....	58
4.17 โครงข่ายแบบหลายจุดโดยใช้มาตรฐานการสื่อสารแบบ RS-485.....	58
4.18 การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องควบคุมแบบตรรก.....	58
4.19 รูปแบบของบล็อกคำสั่ง.....	59
4.20 รูปแบบของบล็อกและการคำนวณ FCS.....	59
4.21 โครงสร้างการสื่อสารแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232C.....	60
4.22 โครงสร้างการสื่อสารแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-422A.....	61
4.23 โครงสร้างการสื่อสารแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-485.....	60
5.1 ขั้นตอนการออกแบบการประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจร.....	64
5.2 แผนผังตำแหน่งสวิตช์แรงสูงของสถานีไฟฟ้านครปฐม.....	65
5.3 ชุดทดลองการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและวงจรสมมูลย์ของชุดทดลอง.....	70
5.4 โครงสร้างของระบบที่เชื่อมต่อกับ PLC.....	71
5.5 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{Lg}	72
5.6 วงจรสมมูลย์การเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{Lg}	73
5.7 Sequence Network ของการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{Lg}	73
5.8 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{LL}	76
5.9 วงจรสมมูลย์การเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{LL}	76

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 Sequence Network ของการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-L}	76
5.11 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$	78
5.12 วงจรสมมูลย์การเกิดกระแสลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$	78
5.13 Sequence Network ของการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$	79
5.14 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมฟิชซี.....	82
5.15 การฟิชซีพีเคชันแบบซิงเกิลตัน.....	82
5.16 ความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร I_{L-g}	84
5.17 ความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร I_{L-L}	84
5.18 ความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร $I_{3\phi}$	84
5.19 ความเป็นสมาชิกของระยะทางหรือความยาวของสายส่งไฟฟ้า.....	85
5.20 บล็อกไดอะแกรมส่วนกระบวนการตัดสินใจของฟิชซี.....	87
5.21 การหาค่าเอาต์พุตแบบ Mean of Max.....	87
5.22 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต L และ NL ของกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{L-g}) โดยใช้วิธีซิงเกิลตัน.....	88
5.23 Defuzzification Mean of Max ของระยะทางแบบ 1 เฟส.....	89
5.24 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต L และ NL ของกระแสลัดวงจร 2 เฟส(I_{L-L}) โดยใช้วิธีซิงเกิลตัน.....	89
5.25 Defuzzification Mean of Max ของระยะทางแบบ 2 เฟส.....	90
5.26 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต L และ NL ของกระแสลัดวงจร 3 เฟส($I_{3\phi}$) โดยใช้วิธีซิงเกิลตัน.....	91
5.27 Defuzzification Mean of Max ของระยะทางแบบ 3 เฟส.....	92
5.28 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต NH และ H ของกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{L-g}) โดยใช้วิธีซิงเกิลตัน.....	93
5.29 Defuzzification Mean of Max ของระยะทางแบบ 1 เฟส.....	94
5.30 Defuzzification Centroid ของระยะทางแบบ 1 เฟส.....	95
5.31 ตัวอย่างโปรแกรมแลตเตอร์ใน PLC	97
5.32 โปรแกรมแสดงการประมาณการเกิดกระแสลัดวงจร.....	98
5.33 วงจรแปลงมาตรฐาน RS-232C เป็น RS-422A และ RS-485.....	99

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 โปรแกรมแสดงตำแหน่งกระแสลัดวงจรบนเครื่องคอมพิวเตอร์.....	101
6.2 การเก็บข้อมูลต่างๆลงบนเครื่องคอมพิวเตอร์ในไฟล์ Notepad.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 อุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตแบบค่าสภาวะลอจิก.....	48
4.2 อุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตแบบค่าตัวเลข.....	49
4.3 อุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตสำหรับค่าสภาวะหลายบิต.....	49
4.4 ตัวอย่างของฟังก์ชันลอจิกและสัญลักษณ์พื้นฐานในการเขียนโปรแกรมแลดเดอร์ของเครื่อง ควบคุมแบบตรรก.....	53
4.5 ตัวอย่างโปรแกรมชุดคำสั่งบูลีน.....	55
4.6 ค่าเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ RS-232C, RS-422A, RS-485.....	62
5.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรในแบบต่างๆกับระยะทาง.....	81
5.2 รายละเอียดชื่อเทอมเซตอินพุต(กระแสลัดวงจร).....	84
5.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์{a,b,c} ของสามเหลี่ยมเทอมเซตอินพุต.....	85
5.4 รายละเอียดชื่อเทอมเซตเอาต์พุต(ระยะทาง).....	85
5.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์{a,b,c} ของสามเหลี่ยมเทอมเซตเอาต์พุต.....	86
6.1 ผลการทดลองกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{Lg})เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแส.....	104
6.2 ผลการทดลองกระแสลัดวงจร 2 เฟส(I_{Ll})เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแส.....	105
6.3 ผลการทดลองกระแสลัดวงจร 3 เฟส($I_{3\phi}$)เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแส.....	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) ได้มีการจัดระบบเป็นแบบเรเดียลและมีรูปแบบการเชื่อมโยงกับแหล่งจ่ายอื่นๆเป็นชนิด Open Loop ซึ่งสามารถถ่ายเทโหลดไปแหล่งจ่ายอื่นๆได้ ถ้าแหล่งจ่ายนั้นมีปัญหาไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนใหญ่ระบบจำหน่ายของ กฟภ. เป็นชนิดเดินสายเหนือหัว(Over Head Line) โดยทั่วไป กฟภ. จะใช้สายเคเบิลอลูมิเนียมเปลือยและเคเบิลชนิดฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดในย่านชนบทและพื้นที่ห่างไกล สำหรับย่านชุมชนเมือง กฟภ. จะใช้สายเคเบิลแบบเต็มพิกัด จากที่กล่าวถึงระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. มาแล้วนั้นพบว่าโอกาสที่จะมีการเกิดกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายของ กฟภ. นั้นเป็นไปได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งย่านชนบทและพื้นที่ห่างไกล ส่วนใหญ่เกิดจากต้นไม้-กิ่งไม้หักและพาดสายไฟนกหรือสัตว์เลื้อยคลานเช่นงู กิ้งก่า ตุ๊กแกขึ้นไปอาศัยบนเสาไฟฟ้าหรือตรงอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นอุบัติเหตุจากรถชนเสาไฟฟ้าหัก อุปกรณ์ชำรุดหรือเสื่อมสภาพเช่นลูกถ้วย และอื่นๆโดยไม่ทราบสาเหตุจากข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง พบว่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นส่วนใหญ่เป็นการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสและเป็นเฟสที่อยู่ใกล้กับต้นไม้ และสิ่งปลูกสร้างซึ่งเป็นมาตรฐานการติดตั้งของ กฟภ.

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการประยุกต์ทฤษฎีฟิสิกส์ลอจิก เพื่อประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งได้นำระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. มาเป็นกรณีศึกษา เพื่อช่วยลดระยะเวลาการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง และการค้นหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังส่งผลให้เสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและสร้างภาพพจน์ที่ดีต่อผู้ใช้ไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟิสิกส์ลอจิก เพื่อประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยนำค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการบันทึกของเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าที่ปฏิบัติงานจริงมาเป็นอินพุตของฟิสิกส์ลอจิก และระยะเวลาความยาวของสายส่งไฟฟ้าเป็นเอาต์พุตของฟิสิกส์ลอจิก โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการหาตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสจากการจำลองระบบบนชุดทดลองการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร โดยประมวลผลบนเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ ซึ่งมีปัจจัยกระแสลัดวงจรเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรผิดพลาดไปจากความเป็นจริงได้ การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส

ลัดวงจรนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมและระยะทางนั้นๆ โดยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้สามารถติดต่อกับผู้ใช้งานเพื่อทำการโปรแกรม และแก้ไขเปลี่ยนแปลงข้อมูลต่างๆค่อนข้างง่าย อีกทั้งยังสามารถทำการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ต่างๆได้ง่าย มีความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพในการใช้งานค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นที่ยอมรับสำหรับการใช้งานในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันมีการนำเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมได้มาประยุกต์เพื่อใช้งานในวงการอื่นๆอีกมาก เช่น การควบคุมสถานีไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์(Computer-based Substation Control System, CSCS)ของ กฟภ. บางผลิตภัณฑ์ได้ใช้เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ มาเป็นตัวประมวลผลและควบคุมสถานีไฟฟ้า โดยจะรับสถานะต่างๆของสถานีไฟฟ้า เช่น รีเลย์ป้องกัน การลัดวงจร และการปลดวงจรต่างกันในสถานีไฟฟ้า ส่งขึ้นไปแสดงผลที่ MMI (Man Machine Interface) รวมทั้งรรับคำสั่งจาก MMI และจะกระทำการตรวจสอบเงื่อนไขการสั่งงานก่อนที่จะส่งออกไปที่อุปกรณ์ต่างๆ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีแนวทางของสมมุติฐาน เป็นการเสนอวิธีการและแนวทางประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรโดยประยุกต์ทฤษฎีพีชชีลอจิก โดยประมวลผลบนเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ ซึ่งมีการจำลองการเกิดกระแสลัดวงจรแต่ละจุดบนชุดทดลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า หลังจากนั้นนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับการคำนวณตำแหน่งกระแสลัดวงจรโดยใช้ทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อน โดยจากผลที่ได้นำไปพัฒนาตามแนวทางของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรได้โดยอ้างอิงกระแสลัดวงจรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการจำลองระบบกับระบบการจ่ายไฟฟ้าจริงของสถานีไฟฟ้า ดังนั้นถ้ามีการเก็บข้อมูลดังกล่าวจากพนักงานที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องเป็นฐานความรู้ของพีชชีมากเพียงพอก็จะทำให้สามารถประมาณตำแหน่งที่จุดกระแสลัดวงจรได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อคำนวณตำแหน่งกระแสลัดวงจรในแต่ละครั้งแต่อย่างใด

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขอบเขต คือประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส โดยแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งกระแสลัดวงจรนั้นมีความสัมพันธ์กับระยะทางของตำแหน่งการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพียงใด ซึ่งการคำนวณค่ากระแสลัดวงรดังกล่าวนั้น ในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่ยุ่งยากมาก เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์เกี่ยวข้องหลายประการ โดยได้นำทฤษฎีพีชชีมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณหาตำแหน่งกระแสลัดวงจร จากนั้นทำการโปรแกรมลงเครื่องควบคุมแบบตรรกที่

โปรแกรมได้เพื่อแสดงผลการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรเป็นช่วง โดยทำการจำลองค่ากระแสลัดวงจรและการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้วบันทึกเหตุการณ์ผ่านคอมพิวเตอร์ ในส่วนของเครื่องควบคุมแบบตรรกก็เช่นเดียวกันคือยี่ห้อ OMRON รุ่น C200HS[10] โดยอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้มีข้อตกลงในการติดต่อสื่อสารข้อมูลที่ไม่เหมือนกันด้วย จึงใช้ช่องการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมของคอมพิวเตอร์ถึงสองช่องคือ พอร์ต COM1 และพอร์ต COM2

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาต่างๆ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อในการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1.5.1 ศึกษาวงจรเส้นเดียว(Single Line Diagram) ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ.
- 1.5.2 สร้างชุดทดลองการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
- 1.5.2 ศึกษาหาความสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจรกับระยะทางของจุดลัดวงจร
- 1.5.3 ศึกษาทฤษฎีฟิสิกส์ล่อจิกและหลักการที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.4 ประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟิสิกส์ล่อจิกเพื่อประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร
- 1.5.5 ศึกษาทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้
- 1.5.6 โปรแกรมการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรที่ได้จากการประยุกต์ทฤษฎีฟิสิกส์โดยใช้ภาษาแลดเดอร์ร่วมกับภาษาเบสิกลงบนเครื่อง PLC
- 1.5.7 พัฒนาโปรแกรม Visual Basic 6.0 เพื่อแสดงตำแหน่งกระแสลัดวงจรบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านการสื่อสารข้อมูลแบบมาตรฐาน RS 422A ไปยังเครื่อง PLC
- 1.5.8 สร้างวงจรชุดแปลงสัญญาณมาตรฐานจาก RS 232C เป็น RS 422A เพื่อเพิ่มศักยภาพในการส่งรับข้อมูล
- 1.5.9 บันทึกผลการทดสอบในกรณีต่างๆ
- 1.5.10 สรุปผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.6.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟิสิกส์ล่อจิกเพื่อลดความซับซ้อน ในการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.6.2 เพื่อเป็นแนวทางให้มีการนำประสบการณ์จริงของพนักงานที่มีความชำนาญในวิเคราะห์ตำแหน่งกระแสลัดวงจรมาเป็นฐานความรู้ของฟิสิกส์ล่อจิกเพื่อประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร โดยไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีไฟฟ้ากำลัง

1.6.3 เป็นการนำเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้มาประยุกต์ใช้เพื่อการตัดสินใจ ประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานของ เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้

1.6.4 การจำลองและการทดสอบผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ทำให้ทราบถึงศักยภาพการทำงานของเครื่องประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟuzzy และศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อนำไปใช้จริงต่อไป

1.6.5 การแก้ปัญหาระบบไฟฟ้ากำลังที่ซับซ้อนนั้น สามารถแก้ปัญหาได้จากประสบการณ์ของมนุษย์โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟuzzyได้

บทที่ 2

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบจำหน่าย

2.1 เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับว่าเมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้น เช่นการลัดวงจรแล้วระบบป้องกันสามารถตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบและระบบที่เหลือสามารถจ่ายไฟต่อไปได้ก็เรียกว่าระบบมีเสถียรภาพ[1,3] การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ก็คือการศึกษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้านั้นเองว่า เมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติมากระทบตั้งแต่เรื่องการลัดวงจรในระบบ การเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใด การปลดวงจรสายส่งหรือการปลดเครื่องกำเนิดออกจากระบบ ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงในระยะเริ่มแรกตั้งแต่การเปลี่ยนมุมกำลัง (Power Angle) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหลังจากเหตุการณ์ผิดปกตินั้นผ่านไป ค่ามุมกำลังที่แกว่งไป(Oscillate) สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมหรือไม่ การแกว่งของมุมกำลังของเครื่องกำเนิดก็คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ และความถี่ของระบบด้วยนั่นเอง ถ้าระบบไม่มีเสถียรภาพ เช่นเมื่อเกิดลัดวงจรและหลังจากนั้นเบรกเกอร์(Breaker) ตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบและในช่วงนั้นถ้าความถี่ของระบบ ความเร็วของโรเตอร์และมุมกำลังไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพปกติได้ คือ ความเร็วของโรเตอร์ช้าลงจนหยุด หรือความถี่แกว่งต่ำเกินไปหรือสูงเกินไปไม่คงที่ที่ค่าใหม่ ก็เรียกว่าสูญเสียซิงโครนิซึม(Synchronism) และระบบสูญเสียเสถียรภาพไม่สามารถจ่ายโหลดของระบบต่อไปได้

ประโยชน์ของการศึกษาเสถียรภาพของระบบก็เพื่อดูขีดจำกัดการทำงานของอุปกรณ์หรือใช้ในการเลือกอุปกรณ์ เช่นเบรกเกอร์ ถ้าเลือกความเร็วการตัดน้อยเกินไป ก็ทำให้ระบบ[2]สูญเสียเสถียรภาพได้ หลังจากเบรกเกอร์ตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบเป็นต้น ระบบที่ต้องการเสถียรภาพสูงก็ต้องลงทุนในเรื่องของอุปกรณ์มากซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณีไป โดยพิจารณาถึงความจำเป็นและความเสียหายที่เกิดขึ้นมาเป็นเกณฑ์

2.2 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าที่ดีไม่ได้หมายถึงระบบที่มีการผลิตและจ่ายไฟฟ้าได้อย่างเดียวเมื่อต้องการโหลดต้องมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถป้องกันหรือทนต่อเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นได้โดยไม่เสียหาย การเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นเรื่องปกติที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้และมีสาเหตุของการเกิดได้หลายประการ เช่น ฟ้าผ่าลงเสาส่ง และสายส่งเกิดแฟลชโอเวอร์(Flash Over) ที่ฉนวนลูกถ้วย เกิดคลื่นสวิชชิง(Swing Wave) และเกิดอาร์ค(Arc) ระหว่างสายกับสายหรือ

สายกับเสาส่ง กิ่งไม้พาดสายในระบบจำหน่าย ชาวบ้านยิงลูกถ้วยเล่นเป็นต้น เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกัน[3]ประเภท เซอร์คิตเบรคเกอร์ หรือฟิวส์ สามารถตัดไฟได้อย่างปลอดภัยโดยอุปกรณ์ไม่เสียหาย กรณีที่เลือกขนาดของอุปกรณ์ผิด เมื่อเกิดลัดวงจรรุนแรงขึ้น อุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวอาจเสียหายและไม่สามารถนำมาใช้งานได้ อีก ดังนั้นการศึกษาและวิเคราะห์การลัดวงจรไฟฟ้าในระบบก็เพื่อเลือกอุปกรณ์ให้สามารถตัดกระแสลัดวงจรได้อย่างปลอดภัย

2.2.1 การลัดวงจรแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- การลัดวงจรแบบสมมาตร(Symmetrical fault) เป็นการลัดวงจรแบบสมดุทธ์ได้แก่ การลัดวงจร 3 เฟส(3 phase fault)

- การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร(Unsymmetrical fault) เป็นการลัดวงจรแบบไม่สมดุทธ์เช่น เฟส-ดิน(Line to ground fault), เฟส-เฟส(Line to line fault)

โอกาสการเกิดการลัดวงจรชนิดต่างๆข้างต้นโดยอ้างอิงจากเอกสารของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถแสดงสถิติดังต่อไปนี้

เฟส-ดิน	=	70%
เฟส-เฟส	=	25 %
การลัดวงจร 3 เฟส	=	5%
รวม	=	100%

2.2.2 การลัดวงจรแบ่งตามลักษณะได้ 2 แบบ

- การลัดวงจรแบบชั่วคราว(Temporary fault) เป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นชั่วคราวแล้วหายไป เช่นกิ่งไม้หรือใบไม้ถูกลมพัดมาแตะสายไฟ แล้วหลุดออกหรืออาร์คไหม้ขาดหลุดออกไปจนไม่แตะสายไฟ การลัดวงจรแบบนี้จะเกิดขึ้นประมาณ 90 %

- การลัดวงจรแบบถาวร(Permanent fault) เป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นเป็นเวลานานกว่า 30 วินาที เช่น สายไฟขาดตกลงบนพื้นดิน สายหลุดจากลูกถ้วยลงพาดบนไม้คอน เสาล้ม ต้นไม้ล้มทับสาย เป็นต้น การลัดวงจรแบบนี้จะมีโอกาสเกิดขึ้นเพียง 10 %

2.2.3 สาเหตุที่ทำให้เกิดการลัดวงจร

- ต้นไม้แตะพาดสายไฟฟ้า
- สายวาว สายเชือก สายไฟเปลือย แตะหรือพาดกับสายไฟ
- สัตว์ต่างๆ เช่น นก งู เป็นต้น
- อุปกรณ์ไฟฟ้าชำรุด เช่นลูกถ้วยแตกร้าว หม้อแปลงเกิดลัดวงจร เป็นต้น
- มนุษย์ เช่น คนยิงนกแล้วพลาดไปถูกลูกถ้วย หรือทำให้ลูกถ้วยแตก เป็นต้น

- มลภาวะ (Pollution) เช่นระบบจำหน่ายใกล้ชายทะเล มีคราบจับเกาะบนฉนวน ลุกด้วย และไม้คอน ทำให้เกิดการวาบบนฉนวนลุกด้วย (Flash Over)
- ภัยธรรมชาติ เช่นฟ้าผ่าลงมาบนฉนวน ลมพายุพัดสายไฟแตะกัน หรือทำให้เสาล้ม เป็นต้น

การเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ามีทั้งการลัดวงจรแบบสมมาตรหรือที่เรียกว่าการลัดวงจร 3 เฟส และการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ซึ่งได้แก่การลัดวงจรแบบ สาย-สาย และ สาย-ดิน การลัดวงจรแบบสมมาตรไม่ได้รุนแรงกว่าการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรเสมอไป ในระบบสายส่งการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรอาจรุนแรงกว่าการลัดวงจรแบบสมมาตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ในระบบและการต่อขดลวดที่หม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนในระบบจำหน่ายและระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ การลัดวงจรแบบสมมาตร ให้กระแสลัดวงจรรุนแรงกว่าการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ก็ยังมีความจำเป็น อยู่เหมือนกันเพราะการพิจารณาเรื่องอาร์คซึ่งพอลต์(Arcing fault) หรือการป้องกันเพลิงไหม้อันเนื่องมาจากการลัดวงจรลงดิน ก็ยังต้องใช้การคำนวณกระแสลัดวงจรลงดินเหมือนกัน

2.3 การลัดวงจรแบบสมมาตร

การศึกษาเรื่องการลัดวงจรเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าแรงสูง การลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยส่วนใหญ่แล้วแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การลัดวงจรแบบสมมาตร และการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร การลัดวงจรแบบสมมาตรเป็นที่รู้จักกันดีคือ การลัดวงจรแบบ 3 เฟส ส่วนการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ได้แก่ การลัดวงจรระหว่าง เฟส-เฟส เฟส-ดิน ในที่นี้จะกล่าวถึงสาเหตุของการเกิดลัดวงจรซึ่งรวมทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรและจะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรทั้งในระบบแรงสูงและระบบจำหน่าย

2.3.1 สาเหตุของการเกิดการลัดวงจร

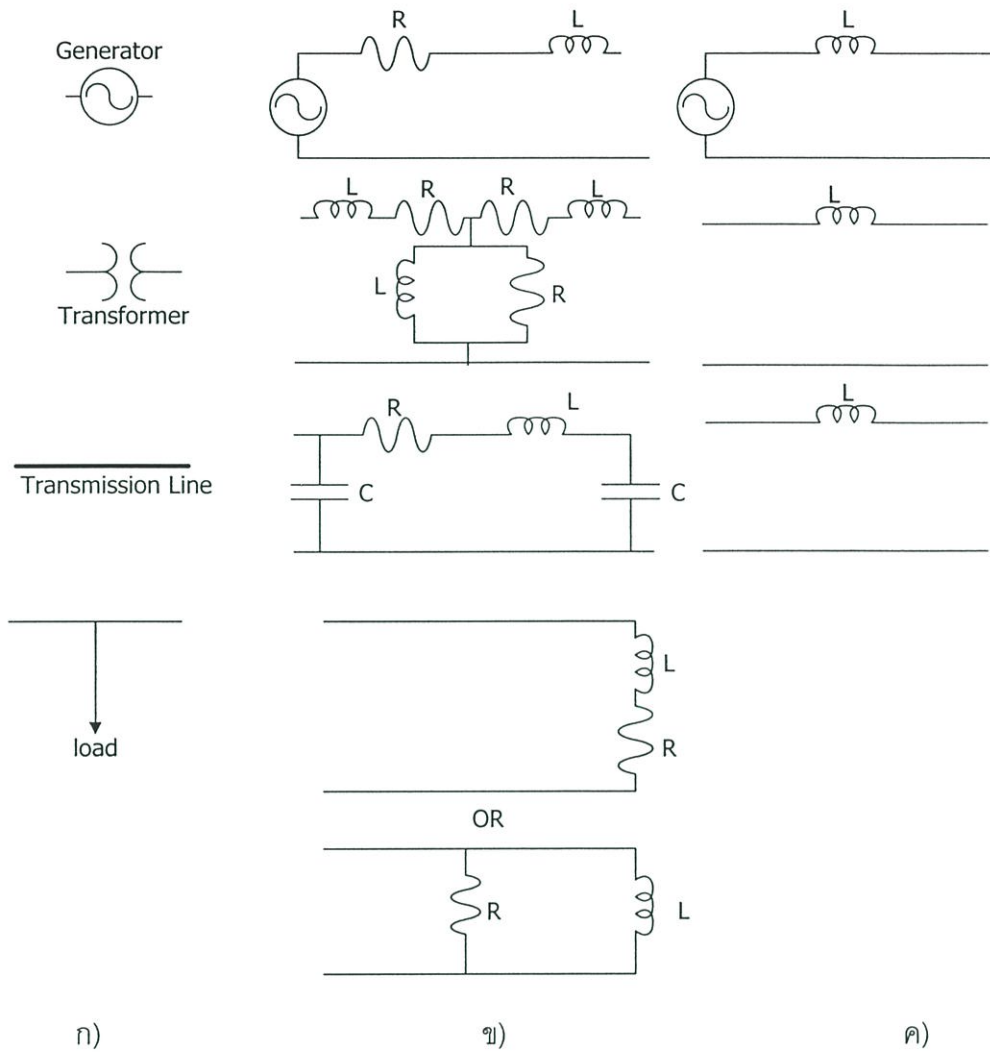
การลัดวงจรเป็นปรากฏการณ์ของสภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 2 หัวข้อใหญ่คือ การลัดวงจรอนุกรม(Series fault) และการลัดวงจรขนาน(Shunt fault) การลัดวงจรอนุกรมเป็นสภาวะผิดปกติในเฟส(phase) ของระบบ เช่นสายส่งขาดหรือไม่สามารถจ่ายไฟได้หนึ่งเฟสหรือ 2 เฟส เป็นต้น ส่วนการลัดวงจรขนานเป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสกับกราวด์(Ground) ซึ่งได้แก่การลัดวงจรแบบต่างๆ การลัดวงจรแบบขนานมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์มากกว่าการลัดวงจรแบบอนุกรม เพราะกระแสที่เกิดขึ้นในการลัดวงจรแบบขนานมีขนาดสูงมากและทำให้เกิดอุณหภูมิสูงมากในอุปกรณ์ ถ้าไม่รีบแก้ไขการลัดวงจรในระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบส่วนใหญ่จึงเน้นหนักไปทางด้านการลัดวงจรแบบขนานเมื่อ

พูดถึงเรื่องการลัดวงจร แต่ความจริงแล้วควรจะคำนึงถึงการลัดวงจรทั้งสองอย่างเพราะการลัดวงจรรุนกรมก็มีผลทำให้การส่งจ่ายไฟทำได้น้อยลงหรือต้องหยุดชะงัก การศึกษาการลัดวงจรขนาดนี้ก็เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรและขนาดของอุปกรณ์ เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ และระบบการป้องกัน เช่นระบบรีเลย์ต่างๆ ส่วนการศึกษาการลัดวงจรรุนกรมนั้นมีประโยชน์เมื่อต้องการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดฟอลท์ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจเกิดขึ้นช่วงไหนของระบบก็ได้แต่ส่วนใหญ่เกิดในสายส่งเหนือดิน (Overhead) ประมาณ 50-70 % นอกนั้นเป็นสายส่งใต้ดิน หม้อแปลง สถานีไฟฟ้าย่อย

2.3.2 การจำลองระบบ

การคำนวณกระแสลัดวงจรจำเป็นต้องทราบแบบจำลองระบบซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่ง โหลด เป็นต้นว่าจะมีรูปร่างวงจรสมมุติเป็นอย่างไรบ้าง วงจรสมมุติของระบบมีอยู่ด้วยกันหลายแบบคือ วงจรสมมุติอิมพีแดนซ์ วงจรสมมุติรีแอกแตนซ์ และวงจรสมมุติความต้านทาน

วงจรสมมุติอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แต่ละอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ข.) ถ้าหากนำวงจรสมมุตินี้ไปใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรจะยุ่งยากมากเนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีพารามิเตอร์ทั้งความต้านทาน ความเหนี่ยวนำและความจุ โดยทั่วไปอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความต้านทานต่ำเมื่อเทียบกับรีแอกแตนซ์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเหนี่ยวนำหรือความจุ ดังนั้นในการคำนวณเราอาจไม่คิดค่าความต้านทาน โดยเฉพาะความเหนี่ยวนำและความจุ เพราะกระแสลัดวงจรเหนี่ยวนำที่ต้องการคือ ขนาดเท่านั้น และการคำนวณโดยไม่คิดความต้านทานจะทำได้ง่ายมากขึ้น ผลที่ได้จากการคำนวณโดยไม่คิดความต้านทาน ทำให้กระแสลัดวงจรที่คำนวณออกมาได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย แต่เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันมีอัตรา(Rating)ของกระแสลัดวงจรที่ทนได้นั้นค่อนข้างห่างกันมากในแต่ละขั้นตอน ดังนั้นผลการคำนวณดังกล่าวที่ไม่คิดค่าความต้านทานจึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าใช้ได้ วงจรสมมุติของระบบที่ไม่คิดค่าความต้านทานของอุปกรณ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ค.) และเรียกว่าวงจรสมมุติรีแอกแตนซ์ ส่วนวงจรสมมุติความต้านทานของระบบใช้ในสมัยก่อนที่ยังไม่มีดิจิตอลคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณโดยการจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบก็ถูกย่อสเกลลงมาด้วยในแผนผังไฟฟ้าเพื่อให้สามารถวัดค่าได้ด้วยมิเตอร์ธรรมดา การจำลองด้วยระบบแบบนี้ต้องใช้แผนผังไฟขนาดใหญ่มากทำให้ไม่สะดวกและเสียเวลาในการจำลองมากและในปัจจุบันได้เลิกใช้ไปแล้ว



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลย์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ก) ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของวงจร ข) วงจรสมมูลย์อิมพีแดนซ์ ค) วงจรสมมูลย์รีแอกแตนซ์

โหลดของระบบและอุปกรณ์อื่นๆ ที่มีพารามิเตอร์ขนาน (Shunt parameter) ไม่ต้องนำมาคิด เพราะขณะคิดการลัดวงจรภายในระบบกระแสจะไหลผ่านจุดลัดวงจรเสียส่วนใหญ่โดยมีกระแสน้อยมากที่ไหลผ่านโหลดและพารามิเตอร์ขนาน ดังนั้นวงจรสมมูลย์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้คำนวณกระแสลัดวงจรจึงอยู่ในรูปง่าย ๆ ที่ประกอบด้วยรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดหม้อแปลงและสายส่งเท่านั้น

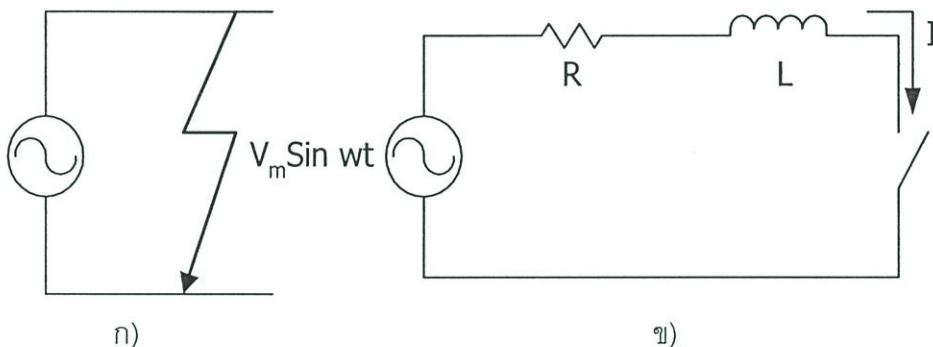
การคำนวณกระแสลัดวงจรจากวงจรสมมูลย์ของระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถทำได้ง่ายขึ้นในกรณีที่สามารถตัดความต้านทานของอุปกรณ์ต่างๆ ออก รวมทั้งพารามิเตอร์ขนานออก แต่ในการคำนวณด้วยดิจิทัลคอมพิวเตอร์นั้นใช้เวลาสั้นมากๆ ดังนั้นถ้าต้องการผลการคำนวณที่ละเอียดอ่อนก็สามารถที่จะคิดวงจรสมมูลย์อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังคือไม่ตัดค่าความต้านทานของอุปกรณ์ไม่ตัดโหลด และพารามิเตอร์ขนานของระบบออก

2.3.3 กระแสลัดวงจร

กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลานับตั้งแต่เริ่มเกิดลัดวงจร จนกระทั่งกระแสลัดวงจรเข้าสู่ค่าคงที่(steady state value) การเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจร เนื่องจากแพคเตอร์สองประการคือ เนื่องจากพารามิเตอร์ R, L, C ของระบบ และประการที่สอง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในเครื่องจักร หลังจากที่เกิดลัดวงจรเกิดขึ้น

2.3.3.1 การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรตามเวลา

นับตั้งแต่เริ่มเกิดลัดวงจร 3φ โดยพิจารณาวงจรง่าย ๆ ในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเกิดลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดและสมมติแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดมีค่าคงที่ $V_m \sin \omega t$



รูปที่ 2.2 การเกิดลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ก) โดอะแกรมเส้นเดี่ยว ข) วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสลัดวงจร I ในรูปที่ 2.2 ข) สามารถหาได้จากสมการ

$$V_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \tag{2.1}$$

เมื่อ α คือมุมของสัญญาณตัดดาไฟฟ้าขณะเกิดลัดวงจร

และสมการ (2.1) สามารถหาค่า i ได้เป็น

$$i = \frac{V_m}{|Z|} \sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-Rt/L} \sin(\alpha - \theta) \tag{2.2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

สมการที่ (2.2) ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือค่าคงที่สัญญาณไซน์ และส่วนที่สองคือค่าที่ลดลงตามเวลา หรือพูดง่าย ๆ ก็คือสัญญาณกระแสลัดวงจรประกอบด้วยกระแสลัดวงจรสลับและกระแสลัดวงจรตรง(AC & DC Components) กระแสลัดวงจรเริ่มแรกมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

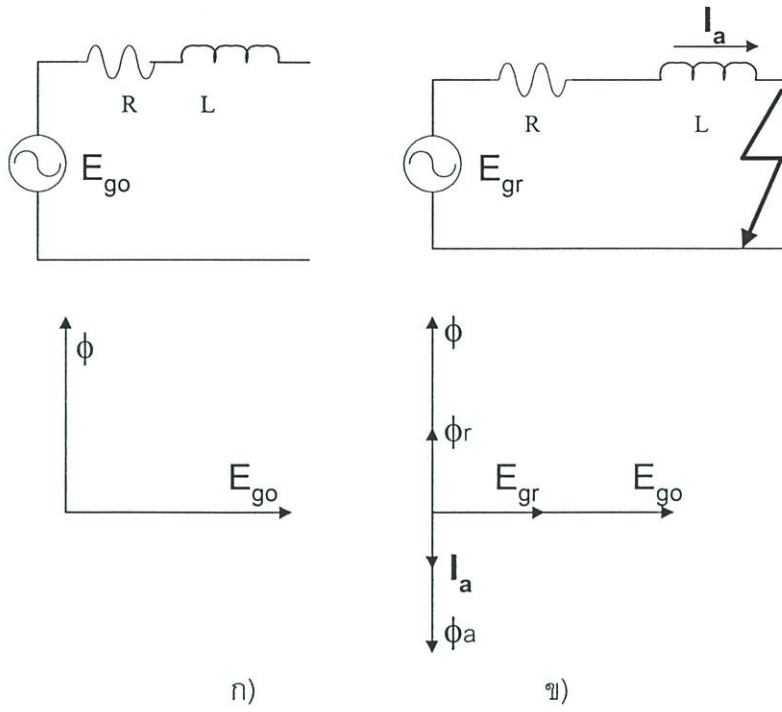
กับกระแสตรงที่เกิดขึ้น และกระแสตรงที่เกิดขึ้นมีค่ามากน้อยเท่าใด พิจารณาได้จากสมการที่ (2.2) คือ ถ้า $\alpha - \theta$ มีค่าเป็น 0 กระแสตรงก็ไม่เกิด ดังนั้นกระแสลัดวงจรก็มีเฉพาะกระแสลับอย่างเดียว แต่ถ้า $(\alpha - \theta) = \pm \pi/2$ กระแสตรงที่เกิดขึ้นก็มีค่าสูงสุด ในระบบ $1\phi(\alpha - \theta)$ มีโอกาสเป็นศูนย์แต่ในระบบ $3\phi(\alpha - \theta)$ ของทุกเฟสไม่มีโอกาสเป็นศูนย์หมดทั้งสามเฟส ดังนั้นในระบบ 3ϕ กระแสตรงเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น

กระแสลัดวงจรที่พิจารณาอยู่นี้เราได้สมมติให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ $|V_m|$ แต่ในความจริง $|V_m|$ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย

2.3.3.2 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์

ในการพิจารณากระแสลัดวงจรเนื่องจาก R, L, C ของระบบที่ผ่านมาเราได้สมมติแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่แต่ความเป็นจริงแล้วมันมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหลังจากเกิดลัดวงจร ในที่นี้จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร และกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเนื่องจากพารามิเตอร์ R, L, C ของระบบมีค่าเป็นอย่างไร พิจารณารูปที่ 2.3 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังจากเกิดลัดวงจรพร้อมเวคเตอร์ไดอะแกรม

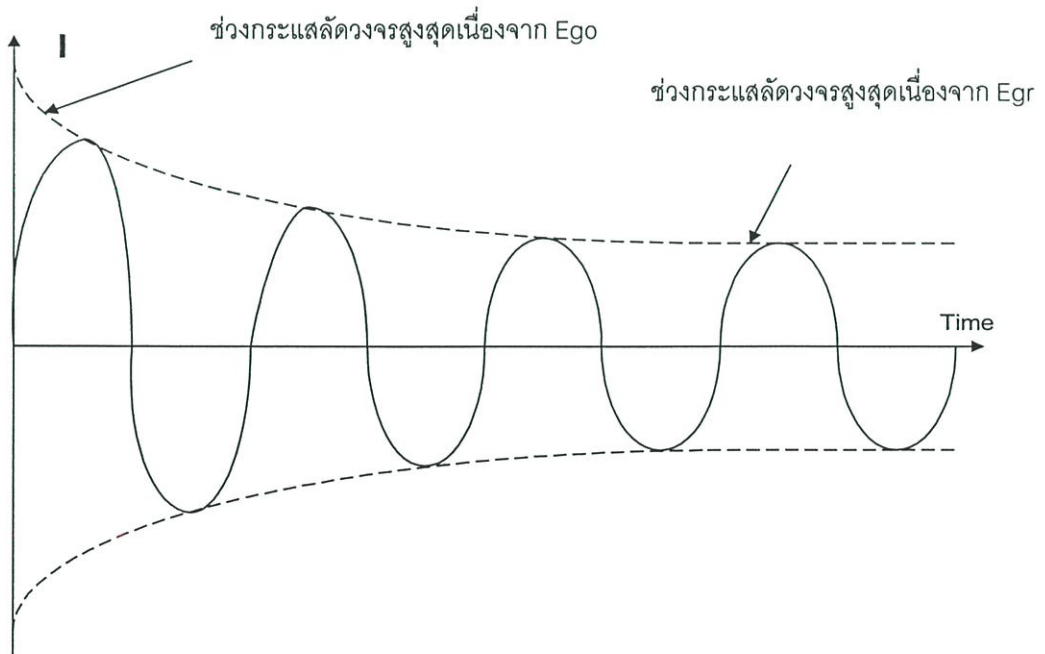
พิจารณารูปที่ 2.3 ก) ซึ่งแสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนเกิดลัดวงจร ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น E_{g0} เกิดเนื่องจากฟลักซ์จากสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่โรเตอร์และเมื่อเกิดลัดวงจรตามในรูปที่ 2.3 ข) มีกระแสลัดวงจร I_a ไหลผ่านทำให้สร้างฟลักซ์ ϕ_a สวนทางกับ ϕ (กระแส I_a ต่างเฟสจาก E_{g0} ประมาณ 90° เนื่องจากอิมพีแดนซ์ในวงจรส่วนใหญ่คือคาร์รีแอกแตนซ์เพราะค่าความต้านทานมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีแอกแตนซ์) ทำให้เกิดฟลักซ์ ϕ_r ขึ้น และฟลักซ์ ϕ_r นี้ ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_{gr} ขึ้น สรุปได้ว่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำก่อนเกิดลัดวงจรมีค่า E_{g0} และหลังจากเกิดลัดวงจรจะเปลี่ยนไปเป็น E_{gr} แต่เนื่องจากฟลักซ์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดได้ตามทฤษฎี ฟลักซ์คงที่ (ϕ ที่ t_- ใดๆ เท่ากับ ϕ ที่ t_+ เสมอ) ดังนั้นเมื่อเริ่มเกิดลัดวงจรขึ้น ฟลักซ์ยังคงมีค่าเป็น ϕ และเมื่อเวลาผ่านไป ฟลักซ์ ϕ จะค่อยๆ ลดลงและเปลี่ยนไปเป็น ϕ_r นั่นคือ ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลังจากเกิดลัดวงจรจะมีค่าเป็น E_{g0} และค่อยๆ มีค่าลดลงเปลี่ยนเป็น E_{gr} ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงเนื่องจาก E_{g0} และค่อยๆ ลดลงจนเป็นกระแสลัดวงจรที่คงที่เนื่องจาก E_{gr} ดังแสดงในรูป 2.4 จากเหตุผลข้างต้น กล่าวสรุปได้ว่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงมากและค่อยๆ ลดลงนั้นมีสาเหตุเนื่องมาจากอามเพอร์รีแอกแตนซ์ เกิดขึ้นและฟลักซ์ในแกนเหล็กไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ทำให้ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงตามเวลา



ϕ คือ ฟลักซ์ที่สร้างจากสนามไฟฟ้ากระแสตรง (DC Field excitation) และสร้าง E_{go}
 ϕ_a คือ ฟลักซ์อาร์เมเจอร์รีแอคชันเนื่องจาก I_a
 ϕ_r คือ ฟลักซ์ลัพท์ที่ไปสร้างศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_{gr} : $\phi_r = \phi - \phi_a$

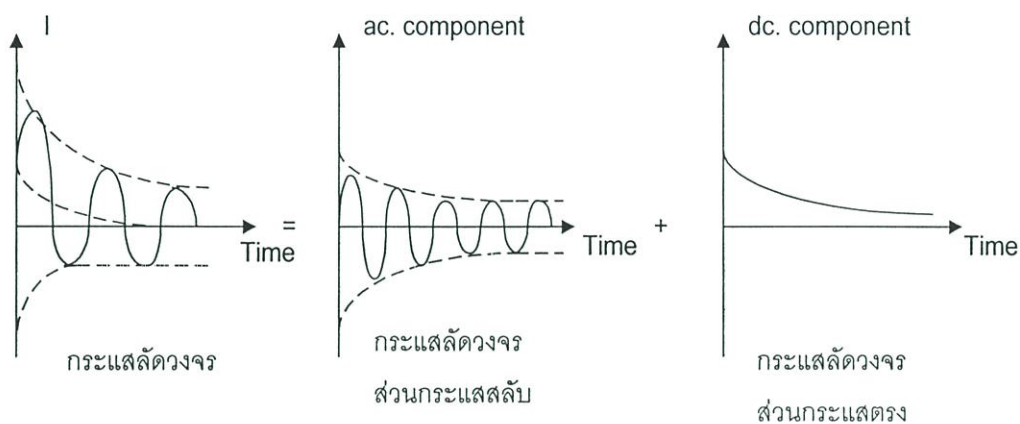
รูปที่ 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังเกิดลัดวงจร

ก) ก่อนเกิดลัดวงจร ข) หลังเกิดลัดวงจร



รูปที่ 2.4 กระแสลัดวงจรตามเวลา

รูปที่ 2.4 แสดงกระแสลัดวงจรตามเวลาซึ่งเป็นส่วนของกระแสลัดเท่านั้น แต่ถ้าพิจารณาถึงตอนลัดวงจรว่าเกิดช่วงใดของสัญญาณคิกดาไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ ก็ต้องคำนึงถึงกระแสตรง (DC component) เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจริงต้องประกอบด้วยกระแสตรงและกระแสลัดดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระแสลัดวงจรในระบบที่คิดทั้งกระแสตรงและกระแสลัด

2.3.4 การคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติเราจะคำนวณกระแสลัดวงจรจากวงจรสมมุติจะทำได้อย่างไรเพราะกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งกระแสลัดวงจรส่วนกระแสตรงและกระแสลัดวงจรส่วนกระแสลัดก็ไม่ใช่สัญญาณไซน์ และในส่วนของกระแสลัดวงจรส่วนกระแสตรงมีค่าไม่แน่นอนด้วยขึ้นอยู่กับจังหวะการเกิดลัดวงจรว่าจะเกิดในช่วงสัญญาณใดของแหล่งจ่ายไฟ และกระแสลัดวงจรส่วนกระแสตรงนี้มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อนานๆไป วิธีการพิจารณาคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติจึงทำดังนี้

ก. ในส่วนของกระแสลัดวงจรกระแสตรงให้ใช้แฟกเตอร์คงที่คูณกับกระแสลัดที่คำนวณได้แทนที่จะหาค่ากระแสตรงที่แท้จริง ซึ่งอาจจะเป็น 1.6, 1.4 หรืออื่นๆก็แล้วแต่ระบบ

ข. ในส่วนของกระแสลัดวงจรกระแสลัดนั้นค่ากระแสเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแต่ช่วงที่สำคัญและนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริงๆนั้นมีอยู่ 3 ช่วงเท่านั้นคือ

1) ช่วงเกิดลัดวงจรเริ่มแรกซึ่งอุปกรณ์ป้องกัน เช่นเบรกเกอร์ หรือฟิวส์ ยังไม่เปิดวงจรออก กระแสลัดวงจรจะมีค่าสูงมากและอุปกรณ์ป้องกันสามารถทนได้ในช่วงเริ่มแรกนี้หรือไม่

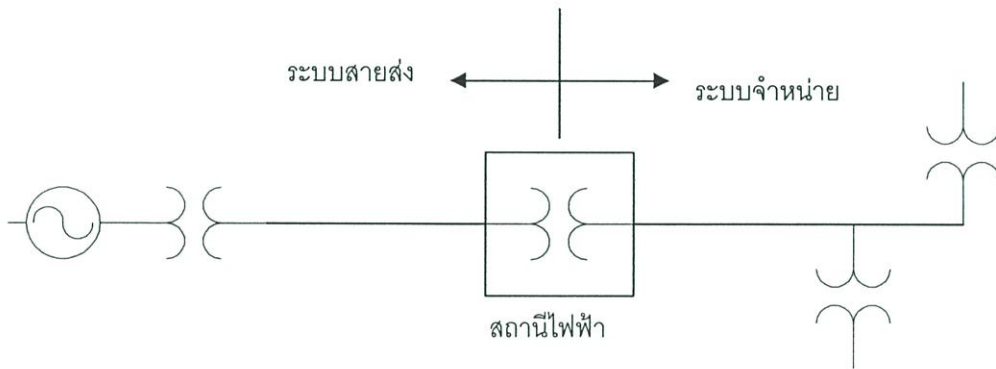
2) ช่วงอุปกรณ์ป้องกันเปิดวงจรออก ซึ่งช่วงนี้จะเกิดอาร์คที่หน้าสัมผัสของอุปกรณ์ กระแสลัดวงจรในช่วงนี้มีค่าน้อยกว่าตอนเกิดเริ่มแรกและอุปกรณ์ป้องกันสามารถตัดกระแสลัดวงจรในช่วงนี้ได้หรือไม่

3) ช่วงเกิดลัดวงจรคงที่ ถ้าอุปกรณ์ป้องกันไม่เปิดวงจร ซึ่งก็ต้องพิจารณาถึงกระแสดังกล่าวเพื่อดูว่าก่อความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบอย่างไร ถ้ามีกระแสลัดวงจรที่ขนาดดังกล่าวไหลผ่านตลอดเวลา

ดังนั้นแทนที่จะต้องหาค่ากระแสลัดวงจรของกระแสลับตามเวลาที่เป็นเรื่องยุ่งยากพอสมควรก็เหลือเพียงการหากระแสลัดวงจรใน 3 ช่วงดังกล่าวเท่านั้น ที่จะนำค่ากระแสที่คำนวณได้มาใช้ในการเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อไป

2.3.5 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่าย

การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายก็เหมือนกับคำนวณในระบบไฟฟ้ากำลังหรือสายส่งแรงสูงอาจแตกต่างกันบ้างในเรื่องของข้อกำหนดตอนเริ่มแรกเท่านั้นเพราะในระบบจำหน่ายเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำลงมาจากการแปลงไฟของหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้างวดแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมของระบบสายส่งต่อกับระบบจำหน่าย

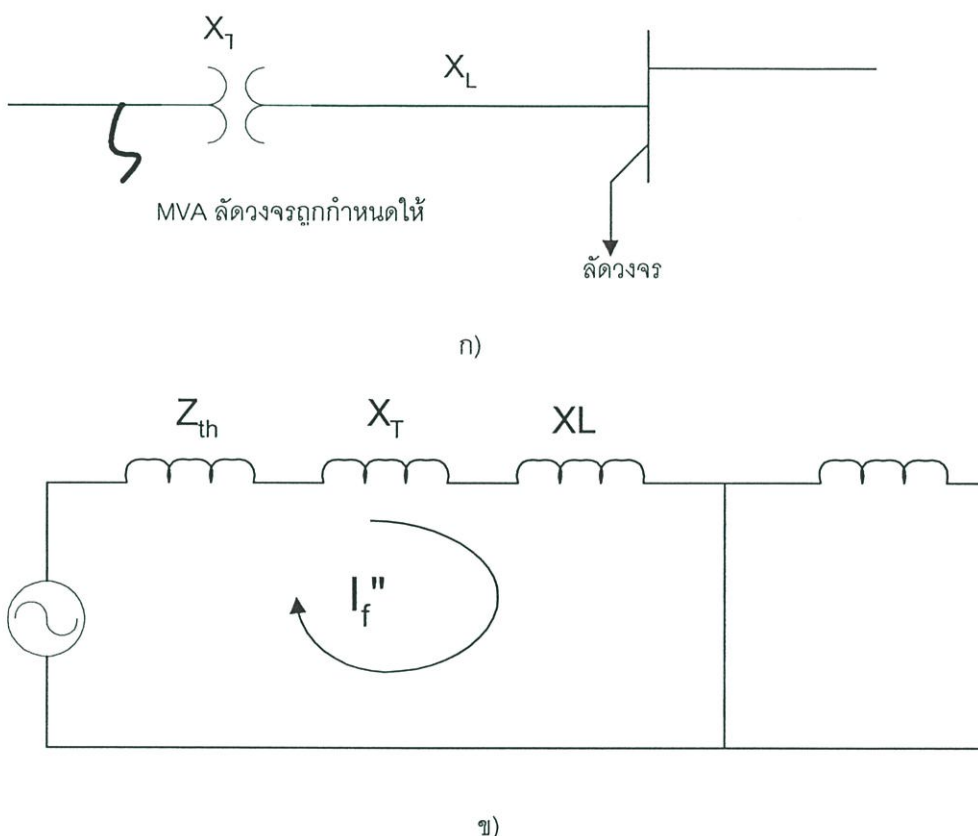
การคำนวณกระแสลัดวงจรจะเริ่มตั้งแต่หม้อแปลงที่สถานีโดยที่ต้นทางหม้อแปลงจนถึงเขื่อนหรือโรงจักรไม่จำเป็นต้องทราบว่าเป็นอย่างไร เพียงแต่ต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรหน้าหม้อแปลงที่จุด A หรือกระแสลัดวงจรที่จุด B ซึ่งเพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณหากระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายได้แล้ว

โดยทั่วไปกระแสลัดวงจรหน้าหม้อแปลงที่ A หรือ B จะกำหนดมาให้จากการไฟฟ้าที่รับผิดชอบทางด้านกรอกำเนิดและส่งไฟฟ้าและมักบอกมาเป็นค่ากระแสลัดวงจร กิโลแอมป์(KA) หรือบอกมาในรูป เมกกะโวลต์แอมป์(MVA) ถ้าหากบอกมาในรูป MVA ลัดวงจร เราสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรที่ A หรือ B ได้โดยคิดเป็นระบบ 3 เฟส ตามต้องการ

$$\text{MVA(ลัดวงจร)} = \sqrt{3} \times \text{KV(line)} \times I_{\text{SC}} \text{ (KA)} \quad (2.3)$$

เมื่อ I_{SC} คือ กระแสลัดวงจร

พิจารณาระบบจำหน่ายในรูปที่ 2.7 ก.) และวงจรสมมูลรีแอกชันไดอะแกรมเพื่อหากระแสลัดวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ข) ระบบจำหน่ายดังกล่าวสมมติว่ามีแหล่งกำเนิดจ่ายมาจากทางด้านซ้ายผ่านหม้อแปลงมาทางเดียวกัน ดังนั้นรีแอกชันทางด้านขวามือของจุดลัดวงจรเป็นต้นไปไม่ต้องนำมาคิด กรณีที่ทราบค่า MVA ลัดวงจรและรีแอกเตนซ์ของอุปกรณ์ในระบบทั้งหมดก็สามารถคำนวณกระแสลัดวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 ระบบจำหน่ายและการคิดกระแสลัดวงจร

ก) ไดอะแกรมเส้นเดียวระบบจำหน่าย ข) รีแอกเตนซ์ไดอะแกรม

$$\begin{aligned}
 Z_{th} &= \frac{V_{\text{phase}}}{I_{\text{fault}}} \times \frac{1}{Z_{\text{BASE}}} && \text{pu.} \\
 &= \frac{V_{\text{phase}}}{I_{\text{fault}}} \times \frac{\text{MVA}_{\text{BASE}}}{(\text{KV})^2} && \text{pu.} \\
 &= \frac{\text{KV}}{\sqrt{3} \times \text{KA}_{(\text{fault})}} \times \frac{\text{MVA}_{\text{BASE}}}{(\text{KV})^2} && \text{pu.} \\
 &= \frac{\text{MVA}_{\text{BASE}}}{\text{MVA}_{\text{fault}}} && \text{pu.} \tag{2.4}
 \end{aligned}$$

$$I_f'' = \frac{1.0}{Z_{th} + X_T + X_L} \quad \text{pu} \quad (2.5)$$

$$= \frac{1.0}{\frac{MVA_{BASE}}{MVA_{fault}} + X_T + X_L} \quad \text{pu} \quad (2.6)$$

สมการ I_f'' ที่ (2.6) ต้องแน่ใจว่า X_T และ X_L เป็นค่ารีแอกแตนซ์เปอร์ยูนิตที่แปลงเข้าหาฐานของระบบเรียบร้อยแล้ว ในทางปฏิบัติการคำนวณหา I_f'' ต้องพิจารณาถึงอนาคตเพราะค่า MVA_{fault} นี้มีค่าเปลี่ยนไปทุกครั้งที่มีการปลดหรือเพิ่มเครื่องกำเนิดปลดหรือเพิ่มสายส่ง ดังนั้นถ้าหากยึด MVA_{fault} ในสภาพระบบปัจจุบันเพื่อหา I_f'' พอมีการเพิ่มเครื่องกำเนิดหรือสายส่งค่า MVA_{fault} จะสูงขึ้นทำให้ I_f'' ในอนาคตมีค่าสูงขึ้นและอุปกรณ์ป้องกันที่ใส่ไว้เดิมนั้นก็ไม่ถูกต้อง

2.4 การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

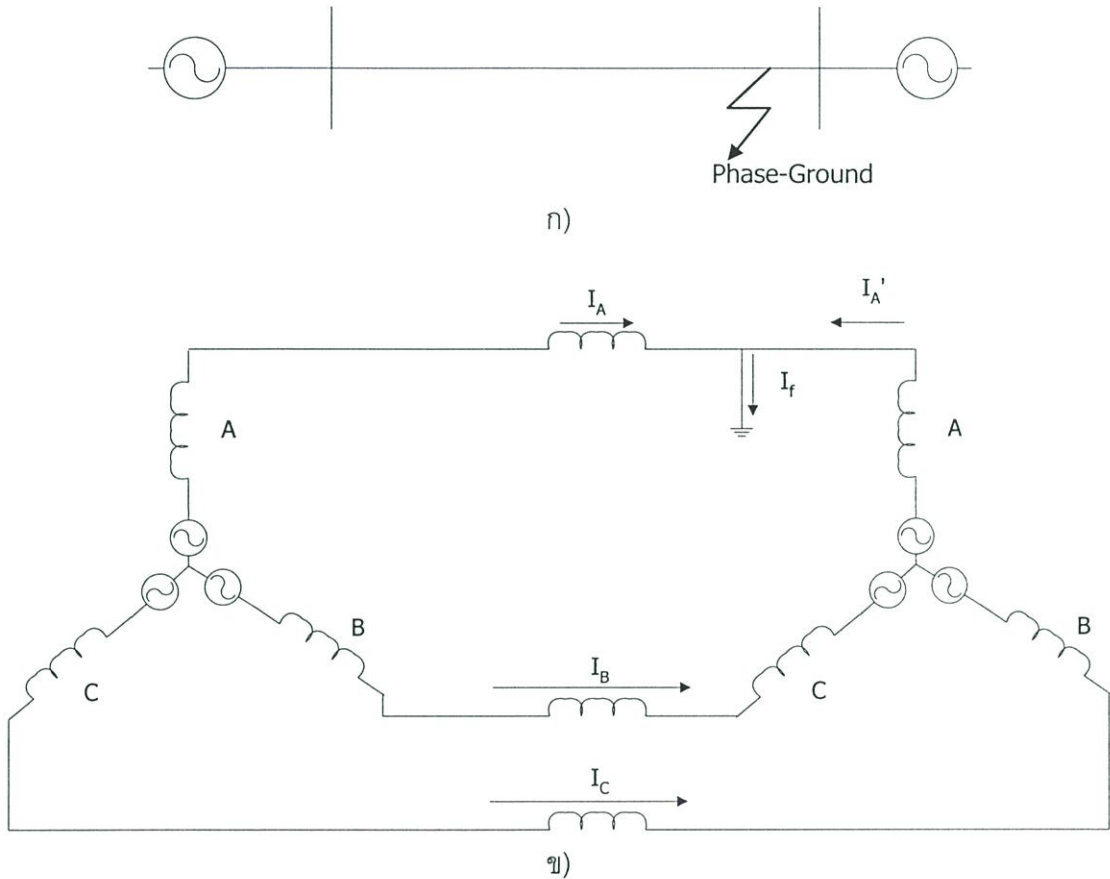
การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร หมายถึง การลัดวงจรในระบบแล้วกระแสในสามเฟสมีขนาดไม่เท่ากันหรือมุมของกระแสไม่ห่างกัน 120 องศา กล่าวง่าย ๆ คือ การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร หมายถึงการลัดวงจรที่ไม่ใช่การลัดวงจรแบบสามเฟสนั่นเอง โดยทั่วไปการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่มักเป็นแบบไม่สมมาตรเพราะโอกาสที่จะเกิดลัดวงจรแบบสามเฟสพร้อมกันมีน้อยขนาดของกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสไม่ได้รุนแรงที่สุดเสมอ บางระบบอาจให้กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรรุนแรงกว่าระบบสามเฟสได้

การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรทำให้เกิดการลัดวงจรในแต่ละเฟสมีขนาดไม่เท่ากันหรือมุมอาจไม่เท่ากัน ดังนั้นการคำนวณกระแสลัดวงจรจึงไม่สามารถคำนวณจากวงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสได้ จึงต้องใช้วิธีการขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical component) มาช่วยแปลงระบบลัดวงจรไม่สมมาตรดังกล่าวให้เป็นระบบลัดวงจรสมมาตรจึงสามารถคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสได้ง่าย ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการขององค์ประกอบสมมาตรจึงสามารถคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสได้ง่าย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการขององค์ประกอบสมมาตร ลำดับเน็ตเวิร์ค (Network sequence) ที่ได้จากการแปลงของวิธีการขององค์ประกอบสมมาตร

2.4.1 หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการแก้ปัญหาลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

ก่อนพิจารณาหลักการขององค์ประกอบสมมาตร เรามาพิจารณาถึงความยากลำบากในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรก่อนพิจารณาระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2.8 ก) กรณีที่เกิดลัดวงจรจากเฟสลงดินที่เฟส A แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ข) การหาขนาดกระแสลัดวงจร I_f และกระแสลัดวงจร I_A, I_B, I_C ดังในรูปไม่ใช่เรื่องง่าย การแก้ปัญหาที่ทำได้คือ ใช้กฎกระแสและศักดาไฟฟ้าของเคอร์ชอฟ (Kirchoff current's law & voltage's law) และถ้าระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ การแก้

ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นเรื่องที่ยากลำบากมาก สาเหตุสำคัญที่ทำให้แก้ปัญหานี้ได้ยากก็คือ ไม่สามารถแทนระบบด้วยวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ ดังนั้นวิธีองค์ประกอบสมมาตรที่มีประโยชน์มาก และทำให้การคำนวณกระแสลัดวงจรสามารถทำได้ง่ายก็คือ สามารถแปลงระบบไฟฟ้าเดิมให้เป็นระบบไฟฟ้าใหม่สามรูปแบบเรียกว่าเน็ตเวิร์คลำดับบวก เน็ตเวิร์คลำดับลบและเน็ตเวิร์คลำดับศูนย์



รูปที่ 2.8 ระบบไฟฟ้าลัดวงจรเฟส-ดิน ก) ไดอะแกรมเส้นเดี่ยว ข) วงจรสมมูล

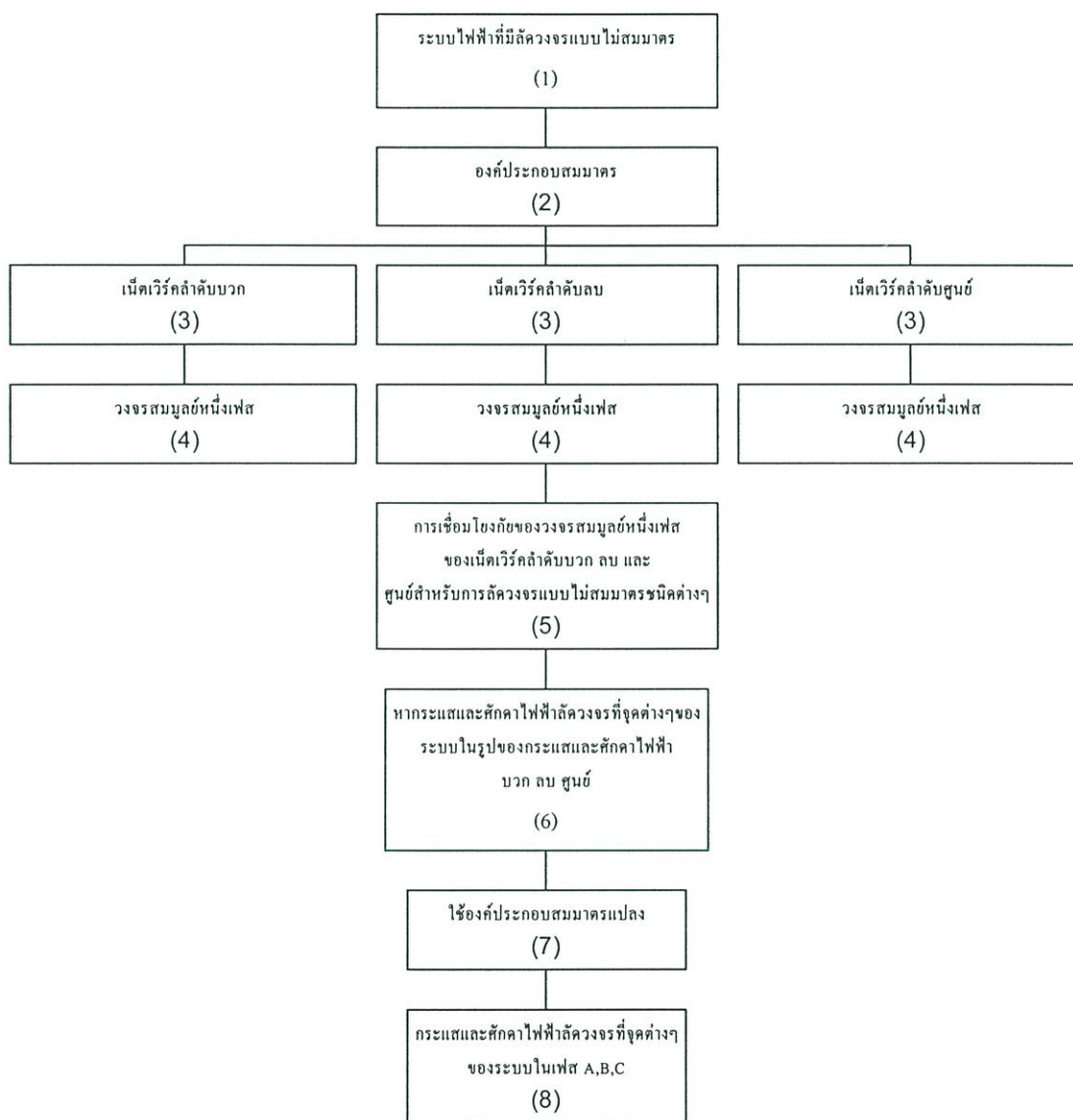
ซึ่งแต่ละแบบสามารถเขียนวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรต่างๆกัน เช่นการลัดวงจรเฟส-ดิน และ เฟส-เฟส จะมีการต่อของเน็ตเวิร์คสามแบบต่างกัน เมื่อกำหนดกระแสลัดวงจรใน เน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์ได้แล้วก็แปลงโดยวิธีการขององค์ประกอบสมมาตรกลับมาเป็นระบบไฟฟ้าเดิมเฟส A, B, C ก็จะได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ พิจารณาหลักการขององค์ประกอบสมมาตรที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบรูปที่ 2.9 ซึ่งแต่ละบล็อกในรูปอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

บล็อก 1 ระบบไฟฟ้าไดอะแกรมเส้นเดี่ยวแสดงจุดเกิดเหตุแบบไม่สมมาตร

บล็อก 2 แสดงบล็อกขององค์ประกอบสมมาตรที่จะแปลงระบบไฟฟ้าเดิมออกมาเป็น

ระบบไฟฟ้าใหม่ 3 ระบบ คือเน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์

บล็อก 3 เน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์ เหล่านี้ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบเดิมแต่อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้เน็ตเวิร์คลำดับบวกได้แก่อิมพีแดนซ์ลำดับบวก(Positive Sequence Impedance) ส่วนอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในเน็ตเวิร์คลำดับลบก็ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ลำดับลบของอุปกรณ์ต่างๆ(Negative Sequence Impedance)และเน็ตเวิร์คลำดับศูนย์ก็ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์(zero sequence impedance) มาต่อกันเป็นเน็ตเวิร์คลำดับ จะเห็นว่าอุปกรณ์แต่ละชนิดก็มีอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ลบและศูนย์ ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง



รูปที่ 2.9 หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลัดวงจร

บล็อก 4 เน็ตเวิร์คบวก, ลบ และศูนย์ ต่างก็เป็นเน็ตเวิร์คลำดับที่มีกระแสและศักดาไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีขนาดเท่ากัน และมุมห่างเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ดังในบล็อก 4

บล็อก 5 การเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมาตรแต่ละชนิดเช่น การลัดวงจรเฟส-ดิน ก็มีการเชื่อมโยงกันของเน็ตเวิร์คลำดับบวก, ลบ และศูนย์อย่างหนึ่ง การลัดวงจรเฟส-เฟส ก็มีการเชื่อมโยงกันของเน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์อีกอย่างหนึ่ง ดังนั้นเมื่อต้องการหากระแสและความศักดากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของการลัดวงจรแบบใดก็นำเน็ตเวิร์คลำดับบวก, ลบ และศูนย์ มาเชื่อมโยงกันเพื่อทดแทนการเกิดลัดวงจรแบบนั้นๆ

บล็อก 6 เมื่อได้รูปการเชื่อมโยงของเน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์ เพื่อแทนการเกิดการลัดวงจรแบบที่ต้องการพิจารณาแล้วคำนวณหากระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรในเน็ตเวิร์คลำดับทั้งสามนั้น

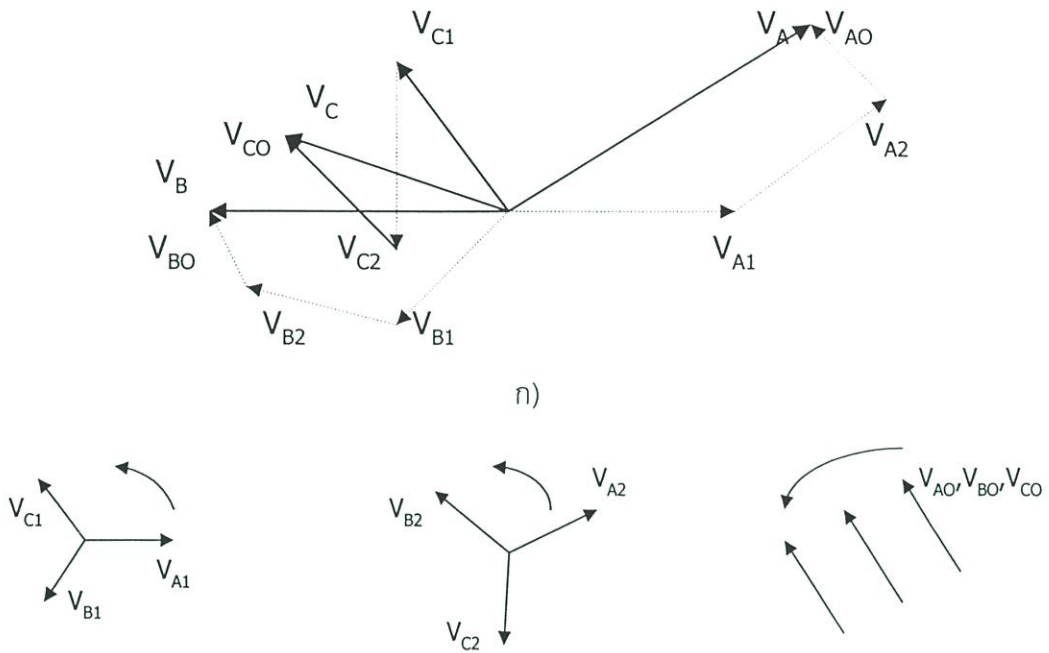
บล็อก 7 ใช้องค์ประกอบสมมาตรแปลงกระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรที่หาได้ในบล็อก 6 ของเน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์ ให้เป็นกระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรกลับไปเป็นระบบไฟฟ้าเดิม A, B, C

บล็อก 8 ผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรที่ได้ออกมาจากบล็อกที่ 7

2.4.2 องค์ประกอบสมมาตร

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เกี่ยวกับหลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการแก้ปัญหาลัดวงจรแบบไม่สมมาตรว่า วิธีการขององค์ประกอบสมมาตรมีไว้เพื่อใช้แปลงระบบเดิมที่มีกระแสหรือศักดาไฟฟ้าไม่สมดุลย์ (Unbalance) ให้เป็นระบบเน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์ที่มีกระแสหรือศักดาไฟฟ้าสมดุลย์(Balance)หรืออาจแปลงในทางกลับกันคือ เมื่อคำนวณกระแสหรือศักดาไฟฟ้าลัดวงจรได้ในเน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และศูนย์ แล้วแปลงกลับไปเป็นกระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรของระบบเดิมได้

พิจารณาเวกเตอร์ไดอะแกรมของศักดาไฟฟ้าที่ไม่สมดุลย์ V_A, V_B, V_C ซึ่งเกิดจากบวกกันโดยเวกเตอร์ขององค์ประกอบลำดับศักดาไฟฟ้าบวก ลบ และศูนย์ ในรูปที่ 2.10 โดยความสัมพันธ์



รูปที่ 2.10 เวกเตอร์ไดอะแกรมคักดาไฟฟ้าประกอบขึ้นจากองค์ประกอบลำดับคักดาไฟฟ้าบวก ลบ และศูนย์ของคักดาไฟฟ้าภายในองค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ เป็นไปตามสมการ

และศูนย์ของคักดาไฟฟ้าภายในองค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ เป็นไปตามสมการ

$$V_{A1} = aV_{B1} = a^2V_{C1} \quad (2.7)$$

$$V_{A2} = a^2V_{B2} = aV_{C2} \quad (2.8)$$

$$V_{A0} = V_{B0} = V_{C0} \quad (2.9)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ, a^2 = 1 \angle 240^\circ, a^3 = 1, a^4 = a, a^5 = a^2 \quad (2.10)$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

ความสัมพันธ์ของคักดาไฟฟ้าระบบเดิมและระบบองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ เป็นดังนี้

$$V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \quad (2.11)$$

$$V_B = V_{B0} + V_{B1} + V_{B2} \quad (2.12)$$

$$V_C = V_{C0} + V_{C1} + V_{C2} \quad (2.13)$$

ในสมการที่ 2.11-2.13 ทางขวามือมีตัวแปรทั้งหมด 9 ตัว ใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.7-2.10 เปลี่ยนตัวแปรทั้งหมด 9 ตัว ให้อยู่ในรูปของ $V_{A0}, V_{A1}, V_{A2}, \dots$ จะได้

$$V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \quad (2.14)$$

$$V_B = V_{A0} + a^2V_{A1} + aV_{A2} \quad (2.15)$$

$$V_C = V_{A0} + aV_{A1} + a^2V_{A2} \quad (2.16)$$

หรือเขียนในรูปเมตริกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} \text{ หรือ } V_{ABC} = AV_{012} \quad (2.17)$$

หรือเขียนเป็นรูปแมตริกได้เป็นอินเวอร์ทสมการที่ 2.17 ได้

$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

$$V_{012} = A^{-1}V_{ABC} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 กรณีที่ทราบค่าของ V_A, V_B, V_C สามารถหาค่า V_{A0}, V_{A1}, V_{A2} ได้ และทุกครั้งทีทราบค่า V_{A0} ก็ทราบ V_{B0} และ V_{C0} ตามความสัมพันธ์สมการที่ (2.9) เมื่อทราบค่า V_{A1} ก็สามารถทราบ V_{B1}, V_{C1} เช่นกันตามสมการที่ (2.7) ในทำนองเดียวกันเมื่อทราบ V_{A2} ก็ทราบค่า V_{B2} และ V_{C2} ตามสมการที่ (2.8)

ย้อนกลับไปพิจารณารูปที่ 2.10 ก) อีกครั้ง เมื่อกำหนด V_A, V_B, V_C ซึ่งเป็นคักตาไฟฟ้าแบบไม่สมดุลเราสามารถหาองค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ ได้ด้วยสมการที่ 2.18 สังเกตว่าองค์ประกอบลำดับบวกมีเฟสเรียงกันแบบ ABC มีขนาดเท่ากันและมุมห่างกัน 120° จึงเรียกว่าองค์ประกอบลำดับบวก (Positive sequence component) องค์ประกอบลำดับลบมีเฟสเรียงกันแบบ ACB มุมห่างกัน 120° หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีเฟสเรียงกันแบบมุม ABC ห่างกัน 120° ซึ่งเรียงเฟสกลับกันหรือตรงกันข้ามกันกับองค์ประกอบลำดับบวกจึงมีชื่อเรียกว่า องค์ประกอบลำดับลบ (Negative sequence component) ส่วนองค์ประกอบลำดับศูนย์มีชื่อเรียกเช่นนี้ก็เนื่องจากเวกเตอร์ V_{A0}, V_{B0}, V_{C0} มีมุมต่างกันเป็นศูนย์องศาเท่านั้นเอง

ความสัมพันธ์ของกระแสในระบบเดิมเฟส ABC ที่ไม่สมดุลย์กันกับกระแสในองค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ ก็เหมือนกันของคักตาไฟฟ้างแสดงในสมการที่ (2.19) และ (2.20)

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ในระบบไฟฟ้าใด กระแสและศักดาไฟฟ้าที่จุดใดซึ่งอยู่ในรูปเฟส ABC สามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นองค์ประกอบลำดับกระแสหรือศักดาไฟฟ้า บวก ลบ หรือศูนย์ได้ ถ้าหากระบบเดิมกระแสและศักดาไฟฟ้าเฟส ABC สมดุลย์(Balance) ก็สามารถหากระแสและศักดาไฟฟ้าจากวงจรมุมูล์หนึ่งเฟสของระบบเดิมที่ไม่สมดุลย์หนึ่งเฟสของระบบเดิมได้โดยไม่ต้องแตกมาเป็นองค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ แต่ถ้ากระแสและศักดาไฟฟ้าในระบบเดิมไม่สมดุลย์แทนที่จะพิจารณาหากระแสและศักดาไฟฟ้าโดยตรงเลยคือ เฟส ABC ก็สมควรหาจากกระแสและศักดาไฟฟ้าองค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ มากกว่าเพราะกระแสและศักดาไฟฟ้าไม่สมดุลย์ในระบบเดิม ABC จะมีค่าสมดุลย์ ในระบบ บวก ลบ และศูนย์

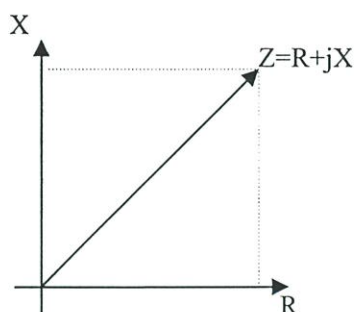
2.4.3 ลำดับอิมพีแดนซ์(Sequence impedance)

มีความสับสนในการใช้คำว่า Sequence impedance กับ Sequence components โดยทั่วไปคำว่า "Positive Sequence impedance" ไม่ได้หมายถึง Positive Sequence components ของชุดอิมพีแดนซ์ Z_a, Z_b, Z_c ที่ไม่สมดุลย์ ซึ่งจะหาค่าได้จากสมการที่ (2.21)-(2.23) คือ $(Z_a + aZ_b + a^2Z_c)/3$ แต่ตามความหมายที่แท้จริงแล้ว หมายถึง อิมพีแดนซ์ของระบบ 3 เฟสสมดุลย์ ที่วัดได้โดยการจ่ายพลังงานให้ระบบด้วย Positive sequence voltage source เช่นระบบจำหน่าย 3 เฟส สมดุลย์เกิดลัดวงจรที่ปลายข้างหนึ่ง และถูกจ่ายพลังงานให้ด้วย 3 Phase positive sequence voltage ที่ปลายอีกข้างหนึ่งจะมีเฉพาะ Positive sequence current เท่านั้นที่ไหลในระบบจำหน่ายทั้ง 3 เฟส เมื่อเอาค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส A เมื่อเทียบกับดินที่ต้นกำลังของระบบจำหน่ายหารด้วยกระแสลัดวงจรในเฟส A ค่าที่ได้คือ Positive sequence impedance ของระบบจำหน่าย ในทำนองเดียวกันคำว่า Negative sequence impedance และ Zero sequence impedance หมายถึงอิมพีแดนซ์ที่เกิดเนื่องจากค่า Negative sequence current และ Zero sequence current สัญลักษณ์ที่นิยมใช้แทน

Positive sequence impedance	คือ	Z_1
Negative Sequence current	คือ	Z_2
Zero Sequence current	คือ	Z_0

2.4.4 อิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร

ขนาดของกระแสลัดวงจรจะถูกกำหนดโดยอิมพีแดนซ์ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง, สายส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า บางครั้งก็รวมถึงรีแอกเตอร์ และตัวเก็บประจุ(Capacitor) ดังนั้นในการคำนวณหากระแสลัดวงจร จึงต้องทราบค่าของอิมพีแดนซ์ทั้งหมดตั้งแต่แหล่งผลิตจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร



รูปที่ 2.11 ค่าอิมพีแดนซ์(Z) ค่าที่ได้ทางเวกเตอร์ของความต้านทาน(R) กับรีแอกแตนซ์(X)

ในอุปกรณ์บางชนิดเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, หม้อแปลง, รีแอกเตอร์ เป็นต้น ค่า R มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า X เราจึงตัดค่า R ที่ไม่นำมาคิดในกระตาศคำนวณ จึงทำให้ $Z = jX$ แต่สำหรับสายที่ต้องนำค่า R มาคิดในการคำนวณด้วยเพราะจะมีค่ามากตามความยาวของสายไฟ

ค่า R และ Z จะเขียนออกมาในหน่วยของโอห์ม หรือ เปอร์เซนต์ก็ได้แต่โดยทั่วไปสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, หม้อแปลง, รีแอกเตอร์ ผู้ผลิตจะระบุเป็นเปอร์เซนต์คิดเทียบจากพิกัดแรงดันไฟฟ้าและขนาด KVA ของอุปกรณ์นั้น สำหรับสายไฟจะระบุเป็นโอห์มต่อกิโลเมตรและคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังนี้

2.4.4.1 อิมพีแดนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เนื่องจากความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่าน้อยมากจึงคิดแต่ค่ารีแอกแตนซ์ซึ่งประกอบด้วย

X_d (direct axis synchronous reactance) ใช้ค่านี้สำหรับคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในช่วงหลังจากเกิดการลัดวงจรแล้ว 40-50 ไซเคิล หรืออยู่ในสภาวะคงที่(Steady state)

$X'd$ (direct axis transient reactance) ใช้ค่านี้สำหรับคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในช่วงหลังจากเกิดการลัดวงจรแล้ว 3-40 ไซเคิล

$X''d$ (direct axis subtransient reactance) ใช้ค่านี้สำหรับคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในช่วงเวลาเริ่มเกิดการลัดวงจรถึง 3 ไซเคิล ค่ากระแสลัดวงจรที่ได้นี้ใช้ในการเลือกพิกัดตัดกระแสลัดวงจร (interrupting capacity) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

สำหรับ Positive sequence impedance จะใช้ค่า $X''d$, $X'd$ หรือ X_d ก็ได้ขึ้นอยู่กับว่า การหาค่าการลัดวงจรในช่วงเวลาไหน ส่วน Negative Sequence impedance สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหัน(Turbine generator) และแบบ Salient – pole machine จะมีค่าเท่ากับ $X''d$ ส่วน Zero Sequence impedance จะแปรค่าตาม Armature winding pitch ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะมีค่าประมาณ 10-70 เปอร์เซนต์ของ $X''d$ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหัน(Turbine generator) จะมีค่า Zero Sequence impedance จาก 0.01-0.14 pu แต่เนื่อง

จากระบบทั่วไปก็จะมีหม้อแปลงมาคั่นระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับสายส่งหรือสายจำหน่าย ถ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงต่อขดลวดแบบเดลต้า(Delta) หรือเป็นแบบ Ungrounded ค่า Zero Sequence impedance ของอุปกรณ์ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ก็จะไม่นำค่ามาคิดในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร

2.4.4.2 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

Positive และ Negative sequence impedance ของหม้อแปลงจะมีค่าเท่ากับ เปอร์เซนต์ Impedance voltage ที่ระบุค่าไว้บนป้ายชื่อ(Nameplate) ของหม้อแปลงเครื่องนั้นๆ ส่วน Zero Sequence impedance ขึ้นอยู่กับการต่อขดลวดของหม้อแปลงและระบบการต่อลงดิน เช่นถ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบวายกราวด์ $Z_0 = Z_1 = Z_2$

2.4.4.3 อิมพีแดนซ์ของสายไฟ

ค่า Sequence impedance ของสายไฟจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

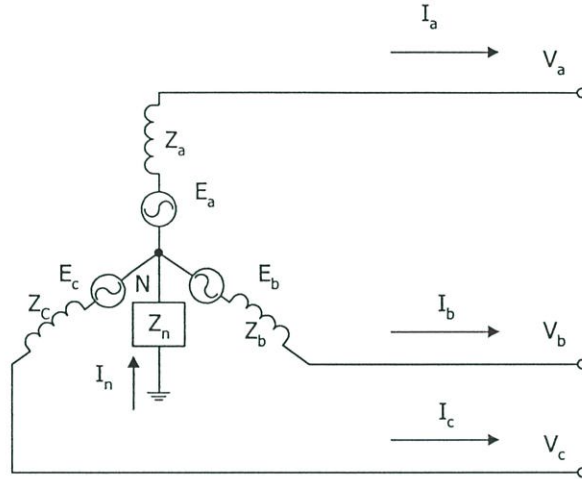
- 1) ชนิดของสายไฟ เช่น สายอลูมิเนียม, อลูมิเนียมอัลลอย, อลูมิเนียมแกนเหล็ก เป็นต้น ซึ่งจะมีค่าความต้านทาน(Resistance) แตกต่างกัน
- 2) ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายไฟ จำนวนและขนาดของเส้นลวดตีเกลียว
- 3) ระยะห่างระหว่างสายเฟส, สาย Overhead ground wire
- 4) อุณหภูมิ และ Skin effect ที่มีผลต่อความต้านทานของสายไฟ
- 5) ลักษณะการพาดสายแบบวงจรเดี่ยว (Single circuit) หรือวงจรคู่ (Double circuit)

2.4.4.4 อิมพีแดนซ์ที่เกิดลัดวงจร(Fault Impedance)

การลัดวงจรในระบบที่วิเคราะห์มาตั้งแต่ต้นเราสมมติว่าการลัดวงจรไม่ว่าจะเป็นเฟสลงดิน หรือ เฟส-เฟส อิมพีแดนซ์ที่เกิดลัดวงจรเป็นศูนย์ในแต่ละทางปฏิบัติหรือสิ่งที่เกิดขึ้นจริงนั้นถ้าหากเป็นการลัดวงจรเกิดเนื่องจากวัตถุไปพาดสายเช่นความต้านทานดิน, ความต้านทานของกิ่งไม้ เป็นต้น ก็ต้องคิดอิมพีแดนซ์ของวัตถุนั้นๆด้วยหรือถ้าเกิดลัดวงจรธรรมดา ก็จะมีอาร์คเกิดขึ้นซึ่งอาร์คดังกล่าวก็มีความต้านทานด้วย ดังนั้นทุกครั้งที่เกิดลัดวงจรจึงมีอิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเกิดขึ้นเสมอ เมื่อเอาอิมพีแดนซ์ดังกล่าวมาคิดรวมไปด้วย ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นจากความต้านทานในระบบขณะเกิดการลัดวงจรรวมเรียกว่า ฟอลต์อิมพีแดนซ์(Z_f) โดย กฟภ. ได้กำหนดเป็นค่าเฉลี่ยทั้งประเทศซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลการเกิดกระแสลัดวงจรจริงโดยทราบระยะทางที่เกิดขึ้นและขนาดกระแสลัดวงจร จากนั้นทำการคำนวณย้อนหลังเพื่อหาค่า Z_f จากการเก็บข้อมูลดังกล่าวพบว่าค่า 40 โอห์ม เป็นค่าที่มีความเหมาะสม จึงใช้ค่านี้ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรเฟสดิน ซึ่งค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจริงๆในแต่ละครั้งที่เกิดการลัดวงจรอาจจะมีค่าน้อยหรือมากกว่าค่าเฉลี่ยนี้ได้ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ สภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ

2.4.5 การคำนวณกระแสลัดวงจร

การหาค่ากระแสลัดวงจรจะต้องอาศัยหลักการขององค์ประกอบสมมาตร ในที่นี้จะแสดงการหาค่ากระแสลัดวงจรแบบ เฟส-ดิน ส่วนค่ากระแสลัดวงจรแบบอื่นก็สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 2.12 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบวายกราวด์ผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n

จากรูปที่ 2.12 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นดังนี้

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1}Z_1 \quad (2.21)$$

$$V_{a2} = E_{a2} - I_{a2}Z_2 \quad (2.22)$$

$$V_{a0} = E_{a0} - I_{a0}Z_0 \quad (2.23)$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงดันสมดุลย์ $V_{a2} = E_{a0} = 0$ และ $E_{a1} = E_a$ โดยค่า Z_1 และ Z_2 จะเป็น Positive และ Negative Sequence impedance ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนค่า Z_0 ในสมการที่(2.23) ไม่ใช่ Z_0 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จะต้องรวมค่า Z_n ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด N และกราวด์

จากกฎของ Kirchoff จะได้ว่า

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

แทนค่า I_a, I_b, I_c ในรูปของ Symmetrical component จะได้

$$I_n = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} + I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} + I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

แต่ระบบที่สมดุลย์ใน Symmetrical component

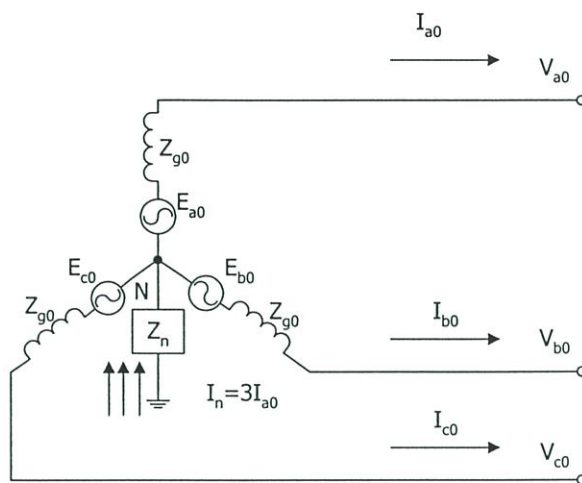
$$I_{a1} + I_{b1} + I_{c1} = I_{a2} + I_{b2} + I_{c2} = 0$$

$$\text{และ } I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$$

$$\text{ดังนั้น } I_n = 3I_{a0}$$

$$(2.24)$$

ดังนั้นถ้าจะพิจารณาเฉพาะ Zero Sequence component จะได้ดังวงจรในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 Zero Sequence component ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.13 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฟส A กับกราวด์ เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{a0} &= -I_n Z_n + E_{a0} - I_{a0} Z_{g0} \\ &= -3I_{a0} Z_n + E_{a0} - I_{a0} Z_{g0} \\ &= E_{a0} - I_{a0} (3Z_n + Z_{g0}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

เปรียบเทียบกับสมการที่ (2.23) กับ (2.25) จะเห็นว่า

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \quad (2.26)$$

ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าสมมูลย์

$E_{a2} = E_{a0} = 0$ และ $E_{a1} = E_a$ ดังนั้นสมการที่(2.21)-(2.23) จะเป็นดังนี้

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1 \quad (2.27)$$

$$V_{a2} = -I_{a2} Z_2 \quad (2.28)$$

$$V_{a0} = -I_{a0} (3Z_n + Z_{g0}) \quad (2.29)$$

สมการข้างบนนี้เป็นสมการทั่วไปสำหรับ Symmetrical component ของ Line to ground Voltage ของเฟส A ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบวายกราวด์ ที่มีแรงดันสมมูลย์ ซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ Symmetrical component ของระบบที่ไม่สมมูลย์ Symmetrical component ต่อไปจะพิจารณาหาสูตรการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบ Single line to ground fault

$$I_b = I_c = 0 \quad V_a = I_a Z_f$$

จากสมการที่ (2.21)-(2.23) Symmetrical component ของกระแส

$$\begin{aligned} I_{a1} &= (I_a + aI_b + a^2I_c)/3 = I_a/3 \\ I_{a2} &= (I_a + a^2I_b + aI_c)/3 = I_a/3 \\ I_{a0} &= (I_a + I_b + I_c)/3 = I_a/3 \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\text{ดังนั้น } I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = I_a/3 \quad (2.31)$$

และจาก $V_a = I_a Z_f$

$$\text{แต่ } V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

นำค่า V_{a1} , V_{a2} และ V_{a0} จากสมการที่(2.27), (2.28), (2.29) มาแทนค่า

$$\text{จะได้ } I_a Z_f = E_a - I_{a1} Z_1 - I_{a2} Z_2 - I_{a0} (3Z_n + Z_{g0})$$

$$\text{แต่ } I_a = 3I_{a1} \quad \text{และ} \quad I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } 3I_a Z_f = E_a - I_{a1} Z_1 - I_{a1} Z_2 - I_{a1} (3Z_n + Z_{g0})$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_{g0} + 3Z_n + 3Z_f} \quad (2.32)$$

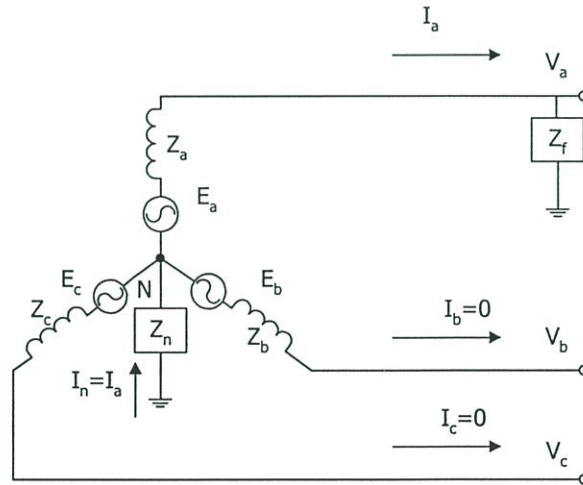
จากรูปที่ 2.13 เมื่อ $I_s = 3I_{a1}$ $I_n = 3I_{a0} = 3I_{a1}$

$$\text{ค่ากระแสลัดวงจร } I_f = I_a = I_n = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_{g0} + 3Z_n + 3Z_f} \quad (2.33)$$

$$\text{และถ้าให้ } Z_{g0} + 3Z_n = Z_0 \quad (2.34)$$

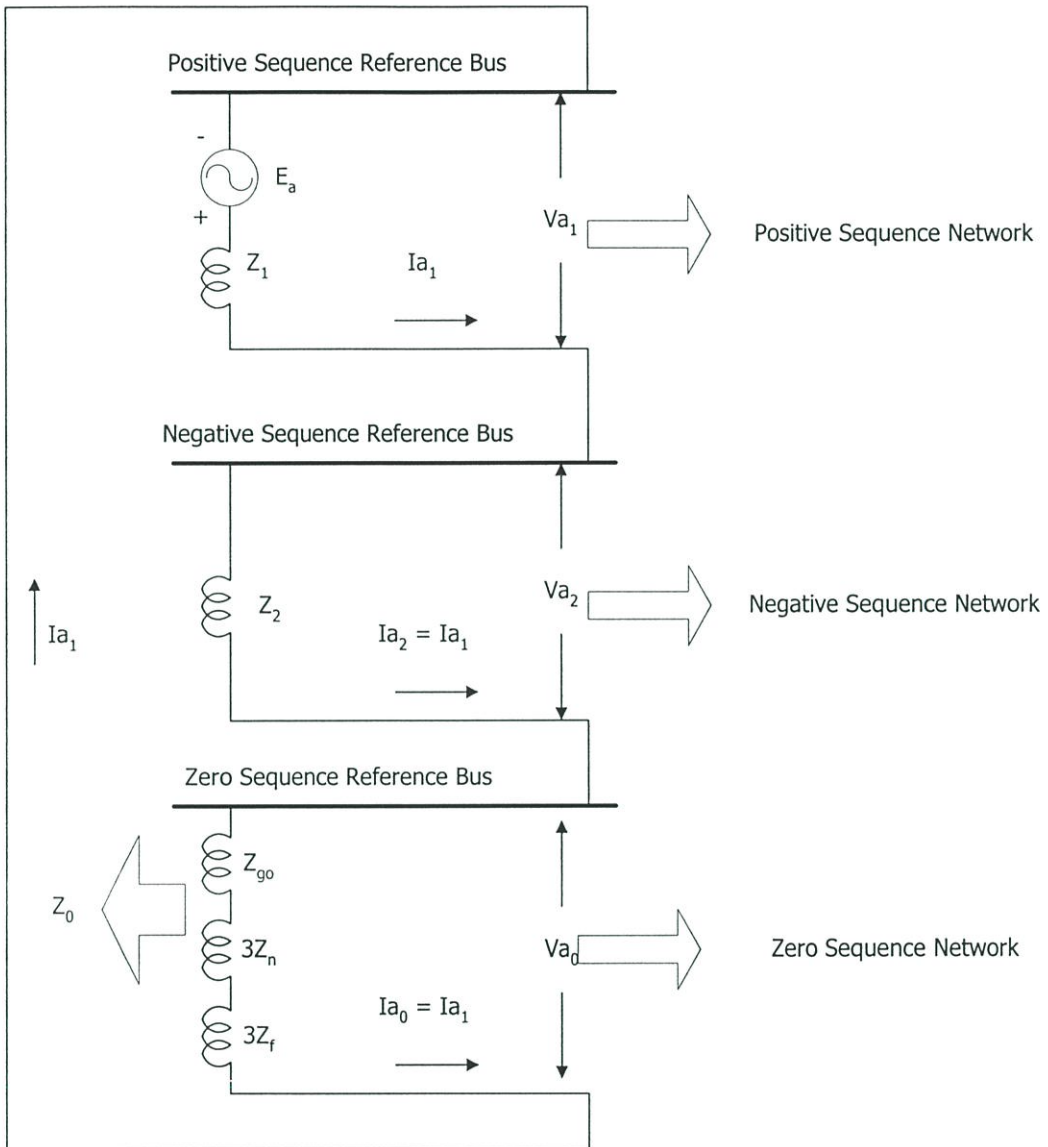
$$\text{จะให้ } I_{a1} = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.35)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็น วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรที่เฟส a ทำให้ขนาดกระแสของเฟส a มีค่ามากกว่ากระแสในเฟส b และกระแสในเฟส c จึงกำหนดให้กระแสที่ไหลในเฟส b และ c เท่ากับ 0 ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเกิด Single line to ground fault ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในสภาวะที่ไม่มีโหลด จะได้



รูปที่ 2.15 Sequence network ของ Line to ground fault

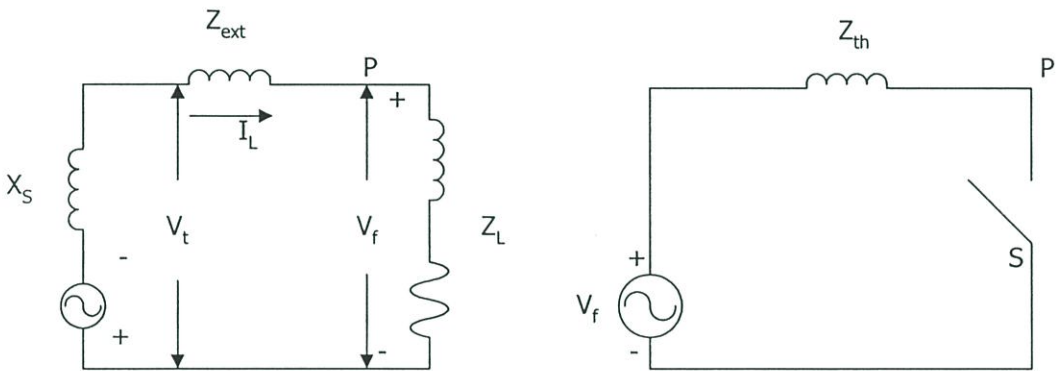
จากสมการที่ (2.35) เป็นสูตรการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบ Line to ground fault ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด อย่างไรก็ตามสูตรข้างต้นสามารถนำมาใช้กับระบบทั่วไปที่สลับซับซ้อนโดยใช้ทฤษฎีของ Thevenin

ทฤษฎีของ Thevenin กล่าวไว้ว่า ระบบหนึ่งซึ่งสิ้นสุดที่ 2 จุด คือ a และ b และประกอบด้วย Voltage source หลายชุด จะสามารถแทนได้ด้วย Voltage source ชุดเดียว และอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมระหว่างจุด a กับ b อิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมนี้ คืออิมพีแดนซ์ของระบบที่วัดระหว่างจุด a กับ b ด้วย Internal voltage short-circuit โดย voltage source ชุดเดียวจะมีค่าเท่ากับ Open circuit voltage ที่วัดระหว่างจุด a กับ b

ดังนั้นสมมติว่า ระบบไฟฟ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายชุด จะมีวงจรเป็นแบบ Close loop เราก็อาศัยทฤษฎีของ Thevenin เปลี่ยนเป็นระบบง่าย ๆ เหมือนรูปที่ 2.14

ดังนั้น สัญลักษณ์ ในสมการที่ (2.33) จะมีความหมายใหม่เป็นดังนี้
 E_a คือ Thevenin Equivalent open circuit voltage ที่จุดเกิดการลัดวงจรหรือมีค่าเท่ากับ Line to ground voltage ก่อนเกิดการลัดวงจร (V_f)

Sequence impedance จะไม่ได้หมายความถึงเฉพาะอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ Neutral impedance แต่จะหมายถึง Equivalent impedance ของระบบทั้งหมดที่มองจากจุดเกิดการลัดวงจรกลับเข้าไปในระบบที่ Voltage source ทุกชุด Short circuit (Z_{th})



รูปที่ 2.16 (ก) วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะ

จ่ายโหลดก่อนเกิดการลัดวงจรที่จุด P

(ข) วงจรสมมูลย์ของรูปที่ 2.16

ตามทฤษฎีของ Thevenin

ดังนั้นจากทฤษฎีของ Thevenin สามารถเขียนการคำนวณกระแสลัดวงจรของฟอลท์[1] ชนิดต่างๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Symmetrical component ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นดังนี้

Three phase fault

$$I = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (2.36)$$

Line to line fault

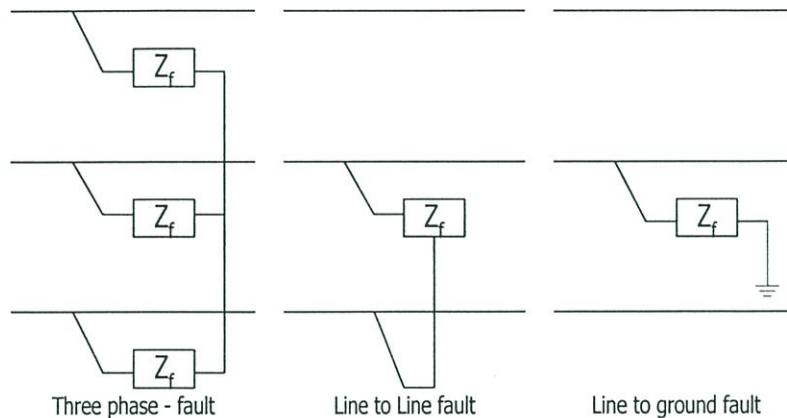
$$I = \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.37)$$

Line to ground fault

$$I = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.38)$$

โดยที่ I = กระแสลัดวงจรที่ไหลในเฟสที่เกิดการลัดวงจร

- V_f = Line to ground Voltage ที่จุดเกิดการลัดวงจรขณะก่อนเกิดการลัดวงจร
 Z_1 = Positive sequence impedance
 Z_2 = Negative Sequence impedance
 Z_0 = Zero Sequence impedance
 Z_f = Fault impedance ขณะเกิดการลัดวงจรชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การลัดวงจรชนิดต่างๆ ที่มีค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์รวมอยู่ด้วย

ในการศึกษาค่ากระแสลัดวงจรขณะเกิดการลัดวงจร ปกติจะพิจารณาเฉพาะค่ากระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรชนิด 3 เฟส และ การลัดวงจรแบบ เฟส-ดิน เนื่องจากการลัดวงจรแบบ 3 เฟสโดยปกติจะให้ค่าลัดกระแสวงจสูงสุด และ การลัดวงจรแบบ เฟส-ดิน เป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด และเมื่อรวมค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ ซึ่งรวมค่าความต้านทานดินด้วยแล้ว ส่วนใหญ่จะให้ค่าต่ำสุด โดยปกติถ้าต้องการคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุด จะสมมุติให้ค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ Z_f มีค่าเป็น ศูนย์ ซึ่งเป็นจริงตามสมการที่ (2.36)-(2.38)

บทที่ 3

ทฤษฎีพีชชีลอจิก

พีชชีลอจิกได้ถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในหลายสาขา ทั้งนี้เนื่องจากพีชชีลอจิกสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแปรเปลี่ยนตามเวลา และยากที่จะกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อีกทั้งยังสามารถใช้กับระบบหลายอินพุตเอาต์พุตได้อีกด้วย ซึ่งปัญหาที่เคยเกิดขึ้นกับระบบควบคุมเดิมเหล่านี้สามารถขจัดไปได้ด้วยการควบคุมแบบพีชชีลอจิก เนื่องจากการควบคุมแบบพีชชีลอจิกนั้นเป็นการประมาณความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ด้วยประสบการณ์หรือการใช้เหตุผลของมนุษย์โดยไม่ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นเครื่องมือในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกนั้นจะต้องอาศัยทฤษฎีและความรู้ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับระบบพีชชีลอจิกซึ่งจะอธิบายในลำดับต่อไป

3.1 ทฤษฎีพีชชีลอจิก

3.1.1 ตัวแปรลิงกวิสติก (Linguistic Variable)

ตัวแปรลิงกวิสติกคือตัวแปรทางภาษา เหตุที่เรียกว่าตัวแปรทางภาษาก็เนื่องมาจากมีการใช้ตัวแปรนี้มาทดแทนความรู้สึกของมนุษย์ ซึ่งเป็นสิ่งที่บอกขอบเขตที่แน่นอนไม่ได้ โดยสามารถนิยามตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ดังสมการต่อไปนี้

$$T(\text{Truth}) = \{\text{not true, very true, not very true, \dots, not false, very false, not very false, \dots}\}$$

- นิยาม เทอมปฐม (primary term) ของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” คือ “true” และ “false”
- นิยาม ส่วนขยาย (modifier or hedge) ของตัวแปรลิงกวิสติก คือ not, very, not very, ...
- นิยาม T คือตัวแปรลิงกวิสติก

ซึ่งจากนิยามทั้งหมดข้างต้น สามารถที่จะยกตัวอย่างตัวแปรลิงกวิสติก หรือความรู้สึกของมนุษย์ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันเป็นสมการได้ดังนี้

ถ้ามองที่ผิวของคนๆหนึ่ง สมมติว่าชื่อสมชาย จะพบว่าแต่ละความรู้สึกของคนอื่นๆ ที่มองดูผิวของสมชายแล้วบอกถึงสีที่ไม่ตรงกัน แต่สามารถที่จะแบ่งได้กว้างๆ ว่าเป็นสีขาว และสีดำ ฉะนั้นจึงสามารถที่จะกำหนดให้

- เทอมปฐม(primary term) ของตัวแปรลิงกวิสติก “ผิว” คือ “ขาว” และ “ดำ” และเมื่อมองความรู้สึกของคนเหล่านั้น สามารถที่จะแยกความรู้สึกย่อยออกไปได้ว่า ขาวมากๆ, ขาวมาก, ขาว, ดำ, ดำมาก, ดำมากๆ ซึ่งจากข้อความตรงนี้เองที่สามารถกำหนดส่วนขยายของตัวแปรลิงกวิสติกได้คือ

- ส่วนขยาย (modifier or hedge) ของตัวแปรลิงกวิสติก คือ มากๆ, มาก, ไม่รู้สึกมากหรือน้อยซึ่งสามารถที่จะนำมาเขียนเป็นตัวแปรลิงกวิสติกได้ดังนี้
- T(ผิว) = { ขาวมากๆ, ขาวมาก, ขาว, ดำ, ดำมาก, ดำมากๆ }

จากนิยามและตัวอย่างทั้งหมดจะสามารถนำไปใช้กำหนดพีชซีเซตได้ โดยจะกำหนดได้เป็นเซตของ ขาวมากๆ, ขาวมาก, ขาว, ดำ, ดำมาก, ดำมากๆ ซึ่งรูปร่างของเซตจะต้องใช้ความชำนาญหรือข้อมูลด้านสถิติมาใช้เป็นตัวกำหนดว่าช่วงของแต่ละเซตว่าควรมีค่าระดับการเป็นสมาชิกเท่าใดซึ่งจะทำให้เกิดรูปร่างของสถิตินั้นขึ้นมา

3.1.2 ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม

ทฤษฎีตรรกศาสตร์ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของการหาข้อสรุปโดยใช้เหตุผล ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ค่าความจริง (Truth value) การปฏิบัติการ (Operation) และวิธีการหาข้อสรุปตามหลักเหตุผล (Reasoning procedure) ในตรรกศาสตร์บูลีนได้นิยามส่วนประกอบแต่ละส่วนประกอบดังนี้

3.1.2.1 ค่าความจริงของประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน

นิยามของประพจน์ คือ ข้อความที่บ่งบอกได้ว่าสิ่งที่สนใจอยู่นั้นเป็นความจริงหรือเท็จโดยที่ประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน จะมีค่าความจริงเท่ากับ 0 เมื่อประพจน์เป็นเท็จ และ จะมีค่าความจริงเท่ากับ 1 เมื่อประพจน์เป็นจริง

3.1.2.2 ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน คือ การกระทำทางลอจิกของประพจน์ซึ่งผลของการกระทำจะแสดงออกมาในรูปของค่าความจริงของประพจน์โดยตัวกระทำพื้นฐานมีดังนี้

ตัวกระทำ	“และ”	ใช้สัญลักษณ์	\wedge
ตัวกระทำ	“หรือ	ใช้สัญลักษณ์	\vee
ตัวกระทำ	“ถ้า...แล้ว”	ใช้สัญลักษณ์	\rightarrow
ตัวกระทำ	“...ก็ต่อเมื่อ...”	ใช้สัญลักษณ์	\leftrightarrow
ตัวกระทำ	“ตรงข้าม”	ใช้สัญลักษณ์	\neg

3.1.2.3 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม จะใช้สัจนิรันดร์ (tautology) สำหรับเป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุป

โดยนิยามของสัจนิรันดร์ คือ ประพจน์ที่มีค่าความจริงเป็นจริงเสมอ ตัวอย่างสัจนิรันดร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุปตามหลักการและเหตุผล (forward data-driven) แสดงดังนี้

$$\text{Modus ponens} : A \wedge (A \rightarrow B) \rightarrow B$$

ซึ่งเงื่อนไขของ Modus ponens สามารถอธิบายได้ดังนี้

Modus ponens เป็นพื้นฐานของการหาข้อสรุป โดยการแจกแจงจากเหตุสู่ผลของตรรกศาสตร์แบบเดิม โดยการแจกแจงจากเหตุสู่ผล กำหนดให้

A แทน หลักฐาน (Premise) ที่หาได้

B แทน ข้อสรุป (conclusion) ที่ได้

สามารถเขียนการแจกแจงจากเหตุสู่ผลได้คือ

IF A THEN B หรือ $A \rightarrow B$ หรือ A หลักฐาน (Premise)

$A \rightarrow B$ การแจกแจงเหตุสู่ผล (Implication)

B ข้อสรุป (Conclusion)

หมายความว่า ถ้ามีเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งเกิดขึ้นเป็นเหตุการณ์ A ที่เหมือนกับเหตุการณ์ A ที่อยู่ใน $(A \rightarrow B)$ แล้ว ผลของการเกิดเหตุการณ์นี้จะได้ผลเท่ากับ B แต่ถ้าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่เหมือนกับเหตุการณ์ A ที่อยู่ใน $(A \rightarrow B)$ แล้วผลลัพธ์ที่จะได้ไม่เท่ากับ B ซึ่งเป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงการหาข้อสรุปจากเหตุที่เกิดไปสู่ผลที่จะได้

3.1.3 ทฤษฎีตรรกพีชซี

ตรรกพีชซีเป็นทฤษฎีทางตรรกศาสตร์[5] ที่ขยายมาจากทฤษฎีตรรกศาสตร์หลายค่า (Multivalued logic) โดยนิยามค่าความจริงของประพจน์เป็นตัวแปรลิงกวิสติก ได้มีการนิยามการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์สำหรับตรรกพีชซีไว้ต่างๆ กันโดยในวิทยานิพนธ์นี้ จะอ้างอิงนิยามดั้งเดิมของ Zadeh

3.1.3.1 ค่าความจริงของประพจน์ในทฤษฎีตรรกพีชซี

กำหนดให้ $v(A)$ เป็นพีชซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ V

โดย v_i จะแทนค่าความจริงในประพจน์ A

ซึ่ง V จะแทนเอกภพสัมพัทธ์ $V = [0, 1]$

ในที่นี้หมายความว่าประพจน์ A จะมีค่าความจริงอยู่ในช่วงของเอกภพสัมพัทธ์คือ 0 ถึง 1 ซึ่งต่างจากประพจน์ของเซตเดิมที่มีค่า 2 ค่า คือ 0 และ 1

จะได้ว่า $v(A) = \{(v_i, \mu_i) \mid i = 1, 2, \dots, n; v_i \in [0, 1]\}$

$v(\text{not } A) = 1 - v(A) = \{(1 - v_i, \mu_i) \mid i = 1, 2, \dots, n; v_i \in [0, 1]\}$

3.1.3.2 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีตรรกพีชซี

การหาข้อสรุปตามเหตุผล โดยใช้ทฤษฎีตรรกพีชซี จะเป็นการขยายนิยามของสัจจนิรันดร์ที่ใช้ในตรรกศาสตร์แบบเดิม เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลของประพจน์ที่เป็นพีชซีเซต โดย

นำการขยายนิยามของ Modus Ponens สำหรับฟัซซีลอจิกเรียกว่า “Generalized Modus Ponens: GMP” โดย GMP คือ การหาข้อสรุปจากเหตุไปหาผล (forward data- driven) ซึ่งการหาข้อสรุปของฟัซซีโดยนำหลักการของตรรกศาสตร์แบบเดิมมาใช้ นั่น จะมีหลักการคล้ายกันคือ กำหนดให้

A_1 แทนหลักฐานแบบฟัซซี (Fuzzy Premise)

$A_2 \rightarrow B$ แทนการแจกแจงเหตุสู่ผลแบบฟัซซี (Fuzzy Implication)

$A_1 \circ (A_2 \rightarrow B)$ แทนข้อสรุปแบบฟัซซี (Fuzzy Conclusion)

ซึ่งจากข้อกำหนดข้างต้นมีความหมายว่าเหตุการณ์ A_1 ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นหลักฐานแบบฟัซซี ไม่จำเป็นต้องเหมือนกับเหตุการณ์ A_2 ใน $(A_2 \rightarrow B)$ ทุกประการ ฉะนั้นข้อสรุปแบบฟัซซีจึงต้องทำการคอมโพสิชัน (composition (\circ)) ระหว่าง A_1 และ $(A_2 \rightarrow B)$ จึงจะได้ข้อสรุปแบบฟัซซีออกมา

3.1.4 ความสัมพันธ์ฟัซซี

3.1.4.1 ผลคูณคาร์ทีเซียน (Cartesian product)

กำหนดให้ A_1, \dots, A_n เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U_1, \dots, U_n โดยที่ $u_1, \dots, u_n \in U_1, \dots, U_n$

ผลคูณคาร์ทีเซียนของ A_1, \dots, A_n คือ ฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ $U_1 \times \dots \times U_n$ ที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, \dots, u_n) = \text{MIN} \{ \mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n) \}$$

ตัวอย่างถ้า $A_1 = \{(1, 0.2), (2, 0.5), (3, 1.0), (4, 0.6)\}$

$A_2 = \{(4, 0.1), (5, 0.4), (6, 1.9), (7, 0.3)\}$

ผลคูณคาร์ทีเซียน ของ $A_1 \times A_2$ หาได้จาก

$$\text{โดย } \mu_{A_1 \times A_2} = \text{MIN} \{ \mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_2}(u_2) \}$$

โดย u_1, u_2 แทนสมาชิกของเซต A_1 และ A_2 ตามลำดับ

ซึ่งจากรูปที่ 3.1 แสดงการหาความสัมพันธ์ของ $A_1 \times A_2$ ซึ่งในการหาความสัมพันธ์ดังในรูปจะใช้วิธีคำนวณโดยใช้ผลคูณคาร์ทีเซียน ซึ่งจะจับคู่ของระดับการเป็นสมาชิกทุกคู่ ซึ่งในแต่ละคู่จะเลือกใช้เฉพาะค่าที่มีค่าน้อยเป็นคำตอบ

		4	5	6	7
$A_1 \times A_2 = A_1$	1	0.1	0.2	0.2	0.2
	2	0.1	0.4	0.5	0.3
	3	0.1	0.4	0.9	0.3
	4	0.1	0.4	0.6	0.3

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ฟัซซี

3.1.4.2 ความสัมพันธ์ฟัซซี

กำหนดให้ R เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีจากเซต A ไปยังฟัซซีเซต B

โดยที่ A เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U

และ B เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ V

จะได้ว่า $R(u \times v) = A \times B = \{(u, v), \mu_R(u, v) \mid (u, v) \in U \times V\}$

$$\mu_R(u \times v) = \mu_A \times B(u, v) = \text{MIN}\{\mu_A(u), \mu_B(v)\} \text{ MIN - intersection}$$

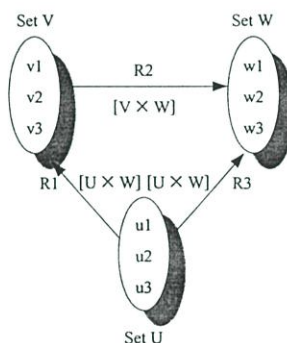
โดยที่ MIN - intersection คือการปฏิบัติอินเตอร์เซกชันของฟัซซี โดยจะมีหลักการปฏิบัติการ คือ จะทำการเลือกค่าระดับการเป็นสมาชิกที่มีค่าต่ำสุด ที่อยู่ในขอบเขตที่พิจารณา

3.1.5 การคอมโพสิชันแบบฟัซซี(Fuzzy Composition)

กำหนดให้ $R_1(u, v)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีจากเอกภพสัมพัทธ์ U ไป V โดยที่ $(u, v) \in U \times V$

และ $R_2(u, v)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีจากเอกภพสัมพัทธ์ V ไป W โดยที่ $(v, w) \in V \times W$

การคอมโพสิชัน คือ ปฏิบัติการในการหาความสัมพันธ์ $R_3(u, w)$ จากความสัมพันธ์ที่ถ่ายทอดต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ $R_1(u, v)$ และ $R_2(u, v)$



รูปที่ 3.2 การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี

กำหนดให้ $R_1(u, v)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีบนระนาบ $U \times V$ โดยที่ $(u, v) \in U \times V$

$R_2(u, v)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีบนระนาบ $V \times W$ โดยที่ $(v, w) \in V \times W$

การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้และเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด โดยจะใช้วิธีการของ MAX - MIN Composition ซึ่ง Composition แต่ละแบบถูกนิยามดังนี้

MAX - MIN Composition

$$R_3 = R_1 \circ R_2 = \{(u, w), \text{MAX}\{\text{MIN}[\mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w)]\} \mid u \in U, v \in V, w \in W, v \in V\}$$

Max-Product Composition

$$R_3 = R_1 * R_2 = \{(u, w), \text{MAX}\{\mu_{R_1}(u, v) \cdot \mu_{R_2}(v, w)\} \mid u \in U, v \in V, w \in W\}$$

Max-Average Composition

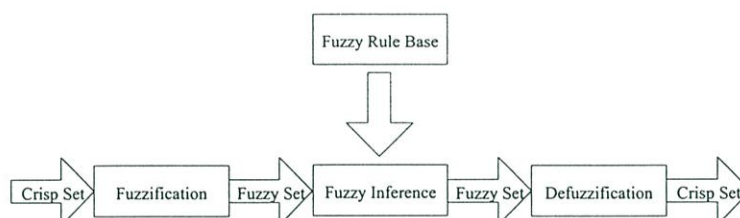
$$R_3 = R_1 \text{ av } R_2 = \{((u, w), \text{MAX} \{ \mu_{R_1}(u, v) + \mu_{R_2}(v, w) / 2 \}) \mid u \in U, v \in V, w \in W\}$$

Min-Max Composition

$$R_3 = R_1 \bullet R_2 = \{((u, w), \text{MIN} \{ \text{MAX}[\mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w)] \}) \mid u \in U, v \in V, w \in W\}$$

3.2 ตัวควบคุมฟัซซี

โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนกฎการควบคุม (Fuzzy rule base) ส่วนฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification unit) ส่วนอินเฟอเรนซ์ (Inference unit) และ ส่วนดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification unit) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยแต่ละส่วนจะมีหลักการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.3 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี

3.2.1 กฎการควบคุมฟัซซี(Fuzzy Rule Base)

กฎการควบคุมฟัซซี เป็นหน่วยที่รวบรวมกฎการควบคุมแบบฟัซซีซึ่งอยู่ในรูปแบบ IF...THEN กำหนดให้กฎการควบคุมอยู่ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\text{IF } x_1 \text{ is } X_1^k \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } X_m^k \text{ THEN } y \text{ is } Y^k$$

$$\text{หรือ IF } x \text{ is } X^k \text{ THEN } y \text{ is } Y^k ; k = 1, 2, 3, \dots, m$$

โดยที่ x คือ ตัวแปรสถานะของกระบวนการ ซึ่งใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี

$$x = [x_1, \dots, x_m]$$

X^k คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุต ในส่วนเหตุของกฎการควบคุม

$$X^k = X_1^k \times \dots \times X_m^k$$

m คือ จำนวนตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม

y คือ ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี

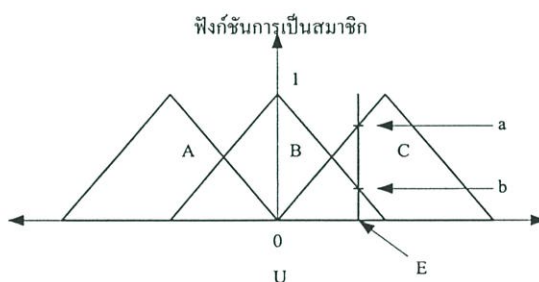
Y^k คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎการควบคุมที่ k

M คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

ซึ่งจากคำจำกัดความในรูปสมการข้างต้น สามารถอธิบายได้ว่ากฎการควบคุมจะถูกกำหนดตามเงื่อนไข ถ้า...แล้ว

3.2.2 การฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

การฟัซซีฟิเคชัน คือ กระบวนการหาค่าฟัซซีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ U ของอินพุต เพื่อเป็นตัวแทนของอินพุต ซึ่งมีค่าเป็นตัวเลขสำหรับใช้เป็นอินพุตของระบบฟัซซี หรืออีกนัยหนึ่งคือ การแปลงค่าตัวแปรของกระบวนการให้เป็นตัวแปรของฟัซซี โดยค่าของฟัซซีจะเป็นค่าตัวเลขที่ได้จากฟัซซีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ U ซึ่งการฟัซซีฟิเคชันจะสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การฟัซซีฟิเคชันโดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน, การฟัซซีฟิเคชันโดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์, การฟัซซีฟิเคชันโดยใช้ไฮบริดนัมเบอร์ ซึ่งสามารถแสดงการกระทำได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 การฟัซซีฟิเคชันแบบซิงเกิลตัน

โดยที่ E เป็นฟัซซีซิงเกิลตัน ซึ่งมี $S(E) = \{u_0\}$

$$\mu_E(u) = 1 ; u = u_0$$

$$\mu_E(u) = 0 ; u \neq u_0$$

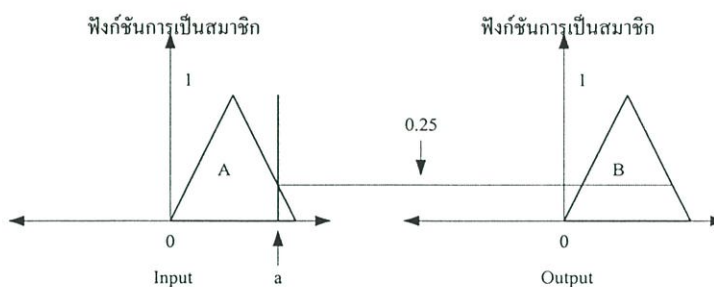
จากรูปที่ 3.4 สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าการหาฟัซซีฟิเคชันด้วยการฟัซซีซิงเกิลตันนั้น จะใช้หลักการอินเตอร์เซกชันระหว่างกลุ่มเซตทางอินพุตที่ถูกกำหนดขึ้นกับเซตแบบซิงเกิลตันซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการกำหนดให้กลุ่มเซตทางอินพุตประกอบด้วยเซต A , B และ C ซึ่งเป็นฟัซซีเซตแบบฟัซซีนัมเบอร์ และเซตที่จะถูกนำมาอินเตอร์เซกชันคือเซต E ที่เป็นเซตแบบซิงเกิลตัน ซึ่งจะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่มีอินพุตเข้ามา ซึ่งเมื่อทำการอินเตอร์เซกชันหรือการซ้อนทับกันจะทำให้เกิดจุดซ้อนทับกัน 2 จุด คือ จุด a ซึ่งเป็นจุดที่เซต E ซ้อนทับกับเซต C และจุด b ซึ่งเป็นจุดที่เซต E ซ้อนทับกับเซต B ซึ่งทั้งจุด a และ จุด b จะเป็นค่าระดับการเป็นสมาชิกที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนทางอินพุต

3.2.3 การอินเฟอเรนซ์แบบฟัซซี (Fuzzy Inference)

การอินเฟอเรนซ์ คือกระบวนการในการหาข้อสรุป (conclusion) จากหลักฐาน (premise) ซึ่งในกระบวนการอินเฟอเรนซ์หลักฐานที่จะนำมาใช้จะได้มาจากส่วนของกฎการควบคุมที่ถูกกำหนดขึ้นมาจากความชำนาญ

จากรูปที่ 3.5 ถ้าส่วนกำหนดกฎการควบคุมกำหนดไว้ว่า ถ้ามีข้อมูลอินพุตเข้ามาที่เซต A ค่าเอาต์พุตที่ได้จะต้องเป็นเซต B ซึ่งจากหลักฐานนี้เองทำให้หน่วยอินเฟอเรนซ์สามารถที่จะหาข้อ

สรุปออกมาได้โดยให้อินพุต a อยู่ในช่วงสมาชิกของเซต A จึงสามารถที่จะระบุได้เลยว่า ข้อมูลที่ได้จะต้องเป็นสมาชิกของเซต B ซึ่งในรูปจะเห็นได้ว่าการที่สมาชิกแต่ละตัวมีระดับการเป็นสมาชิกไม่เท่ากันจึงทำให้ข้อสรุปจะต้องขึ้นอยู่กับระดับการเป็นสมาชิกของเซตด้วย



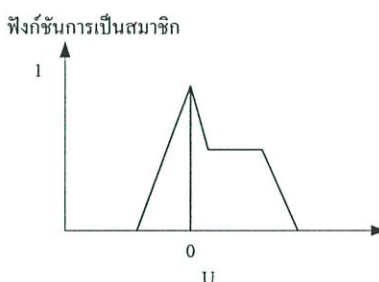
รูปที่ 3.5 การอินเฟอเรนซ์แบบฟัซซี

3.2.4 การดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification)

การดีฟัซซิฟิเคชัน คือกระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียว (ซึ่งเกิลตัน) ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต โดยที่ค่าที่ได้จะกระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ของเอาต์พุตนั้น หรือจะกล่าวอีกลักษณะหนึ่งคือการแปลงค่าตัวแปรทางฟัซซีให้เป็นตัวแปรของกระบวนการที่จะนำไปควบคุมกระบวนการต่อไป โดยการดีฟัซซิฟิเคชันจะสามารถกระทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

3.2.4.1 การหาค่าระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด (Max - Membership)

ซึ่งรู้จักในชื่อของ Height method ซึ่งวิธีนี้จะใช้วิธีการหาค่าโดยเลือกค่าเอาต์พุตที่มีค่าระดับการเป็นสมาชิกสูงสุดเพียงค่าเดียว



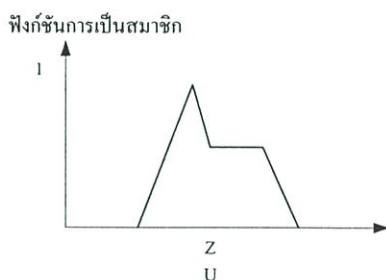
รูปที่ 3.6 การดีฟัซซิฟิเคชันโดยใช้วิธีการหาค่าระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด

จากรูปที่ 3.6 จะแสดงถึงเซตเอาต์พุตที่ได้มาจากหน่วยอินเฟอเรนซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเอาต์พุตมีระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด คือค่า U ซึ่งก็คือค่าที่เป็นตัวแทนของเอาต์พุตนั่นเอง

3.2.4.2 การหาค่าจุดศูนย์กลางของฟัซซี (Centroid)

รูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าการหาค่าเอาต์พุตของการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางของฟัซซีจะเป็นการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ซึ่งได้มาจากการอินเฟอเรนซ์ โดยคำตอบของการ

ดีฟัซซีฟิเคชันที่ได้คือ Z ซึ่งถ้ากำหนดให้ C เป็นเซตเอาต์พุต จะสามารถหาค่า Z ได้จาก สมการต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 การดีฟัซซีฟิเคชันโดยใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลางของฟัซซี

$$Z = \frac{\int \mu_c(u) \cdot u \, du}{\int \mu_c(u) \, du} \quad (3.1)$$

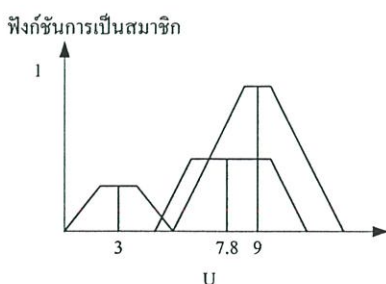
- กำหนดให้
- C คือ เซตเอาต์พุต
 - μ คือ สมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ทางเอาต์พุต
 - Z คือ ค่าที่ได้จากการดีฟัซซีฟิเคชัน

3.2.4.3 การหาค่าเฉลี่ยของค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted average)

จะเป็นวิธีหาค่าเอาต์พุตที่เหมาะสม ซึ่งหาค่าได้จากสมการ

$$v_o = \frac{\sum \mu_B(v)v}{\sum \mu_B(v)} \quad (3.2)$$

- กำหนดให้
- B คือ เซตเอาต์พุต
 - v คือ สมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์เอาต์พุต
 - v_o คือ ค่าจากการดีฟัซซีฟิเคชัน

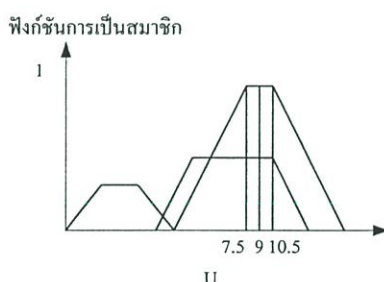


รูปที่ 3.8 แสดงการดีฟัซซีฟิเคชันด้วยการหาค่าเฉลี่ยของค่าถ่วงน้ำหนัก

ในการใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าถ่วงน้ำหนักมาทำการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยจากรูปที่ 3.8 จะพบได้วก่อนที่จะทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าถ่วงน้ำหนักจะต้องแยกกลุ่มเซตเอาต์พุตที่จะนำมา ดีฟัซซิฟิเคชันว่าประกอบด้วยเซตใดบ้างซึ่งในรูป 3.8 สมมติว่าประกอบด้วยเซต A, B, C ขึ้นตอนต่อไปของหาค่าดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีนี้ โดยการหาค่ากลางของสมาชิกแต่ละเซตซึ่งจากรูปคือตำแหน่งที่ลากเส้นประลงมาในแต่ละเซตแล้วนำค่ากลางในแต่ละเซตที่ได้คูณกับค่าระดับการเป็นสมาชิกของค่ากลาง หรือค่าสมาชิกที่เกิดค่ากลางนั้นๆ แล้วจึงนำค่าที่ได้ของแต่ละเซตมาบวกเข้าด้วยกันแล้วจึงนำผลบวกที่ได้มาหารด้วยผลรวมของระดับการเป็นสมาชิกที่ตำแหน่งค่ากลางของทุกเซตซึ่งค่าที่ได้จึงเป็นคำตอบของการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีนี้ ซึ่งจากในรูปค่ากลางของแต่ละเซตคือ 3, 7.8 และ 9

3.2.4.4 การหาค่ากลางสูงสุด (Mean of Max Membership)

เป็นการหาค่ากลางของค่าสูงสุดของระดับการเป็นสมาชิกที่ตำแหน่งสูงสุด การหาดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีนี้จะเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดจากการที่เซตที่จะนำมาทำการดีฟัซซิฟิเคชันมีค่าระดับการเป็นสมาชิกสูงสุดอยู่หลายค่าซึ่งการหาค่าดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีการของการหาค่าสูงสุดไม่สามารถทำได้ซึ่งจากรูปที่ 3.9 จะพบว่าเซตมีค่าระดับการเป็นสมาชิกสูงสุดอยู่หลายค่าจึงต้องใช้วิธีการหาค่ากลางอยู่หลายค่าจึงต้องใช้วิธีการหาค่ากลางของค่าสูงสุดมาทำการดีฟัซซิฟิเคชัน ซึ่งในการหาค่ากลางจะหาค่าเฉพาะช่วงที่มีค่าสูงสุดตามเส้นประที่ลากลงมาดังในรูปซึ่งจะทำให้ได้ค่าการดีฟัซซิฟิเคชันออกมา



รูปที่ 3.9 การดีฟัซซิฟิเคชันโดยการหาค่ากลางสูงสุด

บทที่ 4

เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้และการติดต่อสื่อสาร

4.1 ที่มาของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

การควบคุมแบบลำดับขั้น(Sequence Control)[8] เป็นการควบคุมแบบหนึ่งที่ต้องการให้เครื่องจักรหรือระบบการทำงานตามช่วงเวลา ตามลำดับขั้นตอน ตลอดจนตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้โดยมีลักษณะของการควบคุมเป็นแบบ “ON” หรือ “OFF” การควบคุมแบบลำดับขั้นหรือแบบ ซีควอนซ์นี้จะพบเห็นอยู่เสมอในงานอุตสาหกรรมแทบทุกชนิด ตัวอย่างของการควบคุมแบบนี้ได้แก่ ระบบควบคุมเครื่องจักร ระบบลำวางรถอัตโนมัติ ระบบป้องกันวัสดุ ระบบควบคุมลิฟต์ เป็นต้น

ในอดีตที่ผ่านมา ระบบควบคุมแบบลำดับขั้นจะใช้ อุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกล (Electromechanical Device) เช่น รีเลย์แม่เหล็กไฟฟ้า(Relay) ตัวตั้งเวลา(Timer) ตัวนับ (Counter) มาประกอบกันเป็นวงจรควบคุมเพื่อให้เครื่องจักรหรือระบบกระบวนการทำงานตามช่วงเวลา ตามลำดับขั้นตอน และตามเงื่อนไขที่วิศวกรหรือผู้ออกแบบระบบกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระบบควบคุมที่ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกลที่กล่าวมานี้มีข้อเสียมากคือขนาดของวงจรควบคุมจะมีขนาดใหญ่ สิ้นเปลืองทั้งเนื้อที่และพลังงานสูง ราคาแพง ไม่สามารถจะใช้กับระบบควบคุมที่มีขั้นตอนการทำงานยุ่งยากซับซ้อน เมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นในวงจรควบคุมก็ตรวจสอบแก้ไขยาก การขยายระบบทำได้ยาก และที่สำคัญคือ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงลำดับขั้นตอนหรือเงื่อนไขของการทำงาน วงจรควบคุมแบบรีเลย์ที่มีอยู่เดิม จะเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้กับงานใหม่ได้ยาก ต่อมาเมื่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ(Solid State Device) ได้แพร่หลาย และก้าวหน้าขึ้น จึงได้มีการนำเอาเกต(Gate) ต่างๆ มาประกอบกันเป็นวงจรควบคุมแทนรีเลย์ และสามารถลดข้อเสียของระบบเดิมลงไปได้มาก เช่น วงจรควบคุมแบบรีเลย์ และสามารถลดข้อเสียการขยายระบบทำได้ง่ายขึ้น และยังสามารถต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลและอื่นๆ ได้เป็นต้น แต่ก็ยังไม่สามารถจะลดข้อเสียบางอย่างที่สำคัญลงได้ นั่นคือการตรวจสอบแก้ไข เมื่อมีปัญหาก็ยังทำได้ยาก และไม่สามารถจะเปลี่ยนแปลงลำดับขั้นตอน หรือเงื่อนไขของการทำงาน จึงได้มีการสร้างเครื่องควบคุมที่สามารถกำหนดโปรแกรมการทำงาน(Programmable Controller) ขึ้นมาเพื่อให้นำมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมแบบซีควอนซ์ได้ทุกระบบโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงแก้ไขวงจรควบคุมแต่อย่างใด

4.1.1 การพัฒนาของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ หรือ Programmable Logic Controllers(PLC) เป็นเครื่องควบคุมที่สามารถกำหนดโปรแกรมการทำงานได้ เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์นอกจากจะใช้ในการควบคุมเครื่องจักรโดยทั่วไปแล้ว ยังมีการพัฒนาให้มีความสามารถ

และขอบเขตของงานได้กว้างขวางขึ้น เช่น มีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพิ่มขึ้น ทำให้การควบคุมเป็นได้ทั้งแบบ ON-OFF หรือแบบอนาล็อก เช่น PID (Proportional+Integral+Derivative) สามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดและควบคุม (Instrumentation) อื่นๆ จำนวนของอินพุต/เอาต์พุต (input/output) ขยายให้มากขึ้นได้ หรือการใช้อินพุต/เอาต์พุตแบบรีโมท เพื่อลดการเดินสาย การติดต่อสื่อสารข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ ตลอดจนอุปกรณ์พิเศษอื่นๆ เช่น เครื่องอ่านรหัสแถบเพื่อจำแนกหรือจัดทำฐานข้อมูลการเชื่อมโยงข้อมูลลักษณะโครงข่ายท้องถิ่น(LAN) เป็นต้น หน่วยความจำก็ขยายได้มาก ทำให้ใช้กับระบบกระบวนการใหญ่ๆได้ และมีการจัดการเกี่ยวกับข้อมูลได้ตามต้องการ

4.1.2 ข้อดีของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

ข้อดีของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้สามารถจำแนกออกได้เป็นข้อๆดังนี้

1. สิ้นเปลืองเนื้อที่น้อยเพราะมีขนาดเล็ก
2. สามารถจะใช้ควบคุมเครื่องจักรหรือระบบกระบวนการใดๆก็ได้ถ้าเลือกขนาดของ PLC/PC ที่เหมาะสม
3. การเปลี่ยนลำดับขั้นตอนหรือเงื่อนไขของการทำงานก็ทำได้ตามต้องการเพราะใช้หลักของการโปรแกรม
4. ตัวตั้งเวลาและตัวนับจะเป็นซอฟต์แวร์ ทำให้การกำหนดค่าต่างๆ่ายเปลี่ยนแปลงค่าได้ตลอดเวลาไม่ต้องมีฮาร์ดแวร์ร่วม และทำให้ราคาถูกลง
5. รีเลย์ภายใน(Internal relay) ก็เป็นซอฟต์แวร์เช่นเดียวกัน จึงลดค่าใช้จ่ายในการเดินสาย ลดฮาร์ดแวร์ และทำให้ขนาดเล็กลงด้วย
6. การติดตั้งทำได้ง่ายและสะดวก
7. การขยายระบบให้ใหญ่ขึ้นทำได้โดยง่าย
8. ราคาถูกกว่าระบบรีเลย์
9. ความน่าเชื่อถือ(Reliability) ดีเพราะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ไม่มีการเดินสายมาก ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับหน้าสัมผัส(Contact) แบบรีเลย์
10. มีระบบตรวจสอบหาที่ผิดพลาดด้วยตัวเอง การตรวจสอบแก้ไขเมื่อมีปัญหาจึงทำได้เร็ว
11. ลดการเดินสายยาวๆและลดค่าใช้จ่ายในการเดินสายได้ เพราะมีอินพุต/เอาต์พุตแบบรีโมท
12. การบำรุงรักษาทำได้ง่าย
13. เวลาในการทำงานเร็วกว่าระบบที่ใช้รีเลย์

14. มีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้แก่ บวก ลบ คูณหาร และอื่นๆ ทำให้สามารถใช้สำหรับการควบคุมแบบ ON-OFF หรือแบบอนาล็อก เช่น PID ได้

15. สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การวัด เช่น เทอร์โมคัปเปิล(Thermocouple) และอื่นๆได้นอกจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่เป็นสวิตช์

16. ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ เช่น การเก็บข้อมูลการกระจายการควบคุม(Distributed Control) เป็นต้น

17. การโปรแกรมทำได้หลายแบบ เช่น คำสั่งในรูปของแลดเดอร์ไดอะแกรม คำสั่งบูลีนคำสั่งในรูปบล็อก หรือคำสั่งภาษาเบสิก

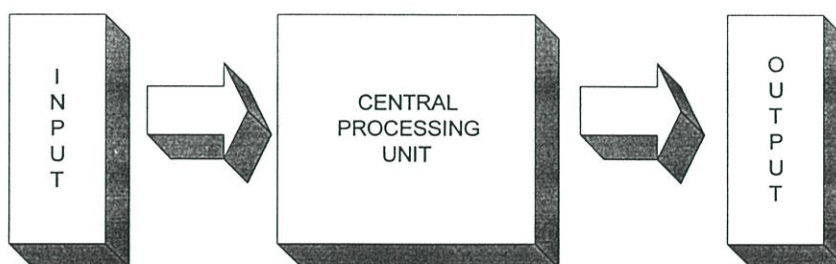
18. ใช้ได้ในทุกสภาพแวดล้อมของงานอุตสาหกรรม

19. การโปรแกรมทำได้โดยใช้เครื่องป้อนโปรแกรม(Program Loader) หรือโปรแกรมลงบน CRT

4.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้

เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักร หรือระบบกระบวนการให้ทำงานตามโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้(User Program) และข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับจากอินพุต/เอาต์พุตของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ จะเป็นได้ทั้งการทำงานตามช่วงเวลาตามลำดับขั้นตอนฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ และอื่นๆ เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ

- หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit)
- หน่วยอินพุต/เอาต์พุต



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้

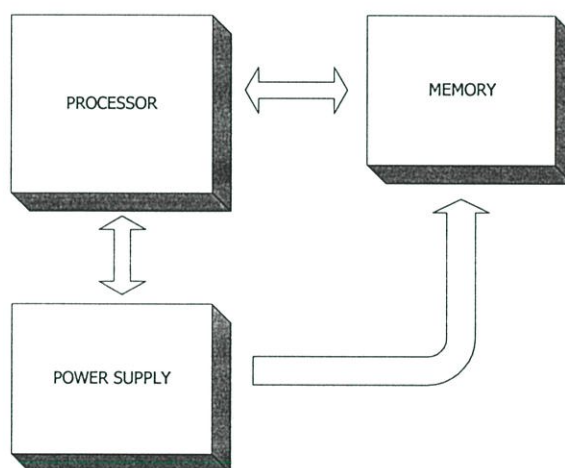
นอกจากส่วนประกอบทั้งสองแล้วเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ยังประกอบด้วยหน่วยป้อนโปรแกรม ผู้ใช้สามารถติดต่อกับเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ หรือเปลี่ยนแปลงแก้ไขโปรแกรมคำสั่งตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักรหรือระบบกระบวนการ ตลอด

จนตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ ได้ทางหน่วยป้อนโปรแกรม เพื่อป้อนหรือเปลี่ยนแปลงแก้ไขโปรแกรม คำสั่งตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักร หรือระบบกระบวนการ ตลอดจนตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

4.2.1 หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลกลางจะแสดงส่วนประกอบดังรูปที่ 4.2 โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลกลางจะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งเป็นวงจรรวม(IC : Integrated Circuit) ที่มีความสามารถทั้งในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ การจัดการข้อมูล และการตรวจสอบตัวเอง ในขณะที่วงจรรวมที่ใช้รีเลย์หรือไอซีพวกต่างๆ ไม่สามารถทำได้เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ จึงมีข้อดีและประโยชน์มากกว่าระบบแบบเก่าอย่างเห็นได้ชัด หน่วยประมวลผลกลางประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

- หน่วยประมวลผล (Processor)
- หน่วยความจำ (Memory)
- หน่วยจ่ายกำลัง (Power Supply)



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของหน่วยประมวลผลกลาง

4.2.1.1 หน่วยประมวลผล

หน่วยประมวลผลของ CPU ทำหน้าที่ควบคุมและดูแลการทำงานของระบบทั้งหมด โดยรับข้อมูลจากหน่วยอินพุตมาทำการประมวลผลตามโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้ที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ และส่งผลที่ได้ออกไปยังหน่วยเอาต์พุต ในปัจจุบันหน่วยประมวลผลของ CPU จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ขนาดตั้งแต่ 4 บิต 8 บิต หรือ 16 บิต จำนวน 1 ตัว หรือหลายๆ ตัวมาทำงานร่วมกัน ในกรณีที่ไมโครโปรเซสเซอร์หลายๆตัวจะมีข้อดีคือ การทำงานของระบบจะเร็วขึ้น ทำให้เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้มีขีดความสามารถสูงขึ้น เช่น การใช้ชุดเชื่อมต่อพิเศษที่มีไมโครโปรเซสเซอร์และหน่วยความจำภายใน จะทำให้การทำงานควบคุมดียิ่งขึ้นและเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ หน่วย

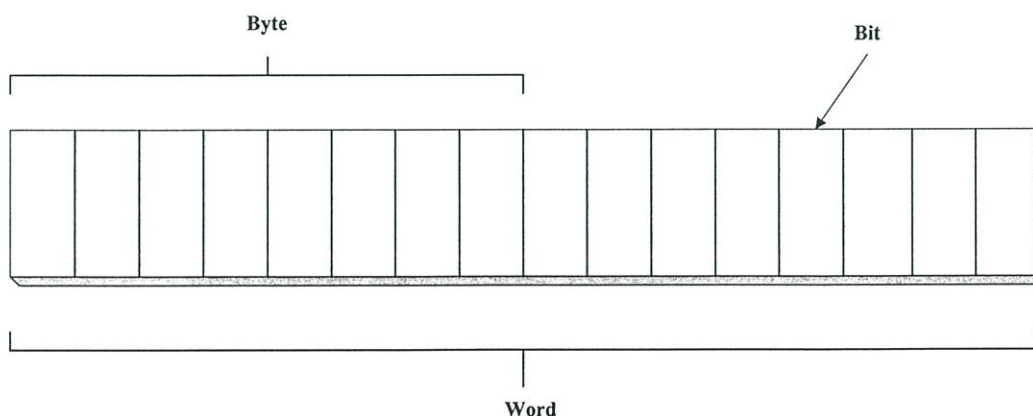
ประมวลผล ตัวอย่างก็คือชุดควบคุม PID ที่ใช้สำหรับควบคุมระบบแบบลูปปิด(Closed-Loop Control) ซึ่งทำงานอิสระจากหน่วยประมวลผล

การทำงานของหน่วยประมวลผล 1 รอบ เริ่มจากการรับข้อมูลจากการรับข้อมูลจากหน่วยอินพุตเข้ามา ประมวลผลตามโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้ ส่งผลที่ได้ไปยังหน่วยเอาต์พุต ตรวจสอบการทำงานของระบบทั้งหมดและติดต่อกับผู้ใช้ เรียกว่าการ SCAN โดยทั่วไปเวลา SCAN ของหน่วยประมวลผลจะใช้เวลาประมาณ 0.001 ถึง 0.1 วินาที เวลา SCAN จะอ้างอิงถึงขนาดของหน่วยความจำที่เก็บโปรแกรมของผู้ใช้เสมอ เช่น เวลา SCAN เท่ากับ 0.01 วินาทีต่อโปรแกรมคำสั่งขนาด 1 กิโลไบต์ (K-byte) อย่างไรก็ตามเวลา SCAN จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆด้วย เช่น การใช้ชุดอินพุต/เอาต์พุตแบบรีโมทจะทำให้เวลา SCAN ของหน่วยประมวลผลเพิ่มขึ้น

4.2.1.2 หน่วยความจำ

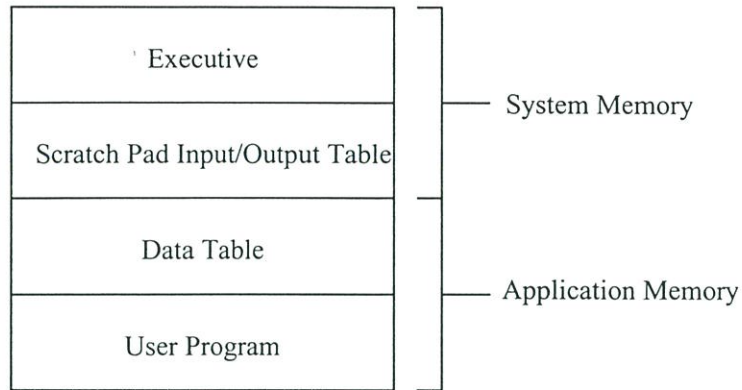
หน่วยความจำเป็นที่เก็บโปรแกรมและข้อมูลที่หน่วยประมวลผลใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้และการทำงานตามโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้ ขนาดของหน่วยความจำจะแบ่งออกเป็นบิตข้อมูลภายในหน่วยความจำ 1 บิต จะมีค่าสถานะทางลอจิก "1" หรือ "0" ข้อมูลขนาด 8 บิต และ 16 บิต รวมกันเรียกว่าไบต์(Byte) และ เวิร์ด(Word) ตามลำดับ

หน่วยความจำแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือหน่วยความจำที่ข้อมูลสูญหายเมื่อไม่มีแหล่งจ่ายกำลัง(Volatile) และหน่วยความจำที่ข้อมูลคงอยู่แม้ไม่มีแหล่งจ่ายกำลัง(Non-Volatile) หรืออาจจะแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ตามคุณลักษณะคือ RAM(Random Access Memory) หรือ NOVRAM(Non-Volatile RAM) และ ROM(Read Only Memory) นอกจากนี้ ROM ยังจำแนกออกได้เป็น PROM(Programmable ROM) EPROM(Erasable Programmable ROM) EAROM (Electrically Alterable ROM) และ EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM)



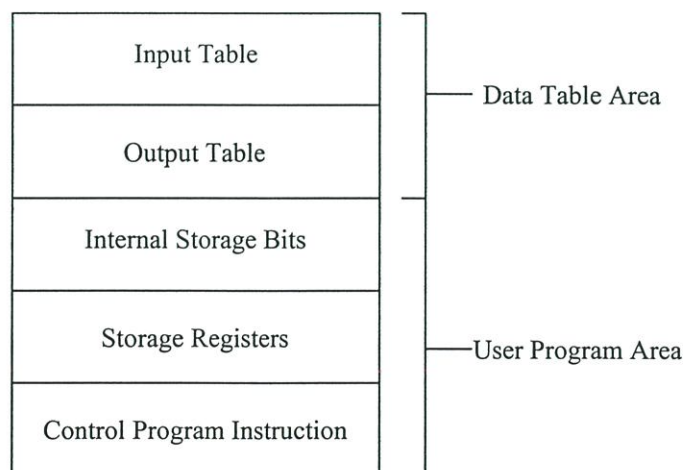
รูปที่ 4.3 ข้อมูลเป็น บิต, ไบต์ และเวิร์ด

หน่วยความจำของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามรูปที่ 4.4 เพื่อใช้เก็บข้อมูลและโปรแกรมต่างๆ คือ



รูปที่ 4.4 หน่วยความจำของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

1. โปรแกรมจัดการ(Execute program) เป็นโปรแกรมที่ทำหน้าควบคุม ดูแล และตรวจสอบการทำงานของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ทั้งหมด
2. ข้อมูลชั่วคราว(Processor Work Area หรือ Scratch pad) หน่วยความจำส่วนที่สองทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ ทำงานตามโปรแกรมจัดการและโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้
3. ตารางข้อมูล (Data Table) หน่วยความจำส่วนที่สามทำหน้าที่เก็บ ค่าของอินพุต/เอาต์พุต และตัวแปรต่างๆ จากการทำงานตามโปรแกรมคำสั่ง ของผู้ใช้ ทั้งที่เป็นค่า สภาวะทางลอจิกและตัวเลข
4. หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้ (User Program Memory)



รูปที่ 4.5 หน่วยความจำสำหรับผู้ใช้

หน่วยความจำของผู้ใช้จะแตกต่างกันตามขนาดของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ หน่วยความจำดังกล่าวจะสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดได้ตามต้องการ การเลือกใช้เครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้จึงต้องคำนึงถึงขีดความสามารถและขีดจำกัดต่างๆประกอบด้วย เช่น ขนาดโปรแกรม คำสั่งของผู้ใช้ จำนวนอินพุต/เอาต์พุตที่จะขยายได้สูงสุด ขนาดของหน่วยความจำภายในที่ใช้เก็บข้อมูล และฟังก์ชันพิเศษต่างๆ เช่น รีเลย์ภายใน ตัวตั้งเวลา และตัวนับ

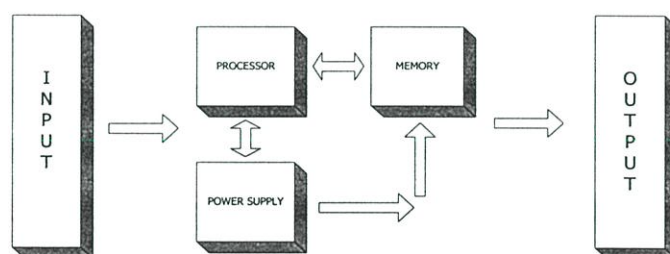
4.2.1.3 หน่วยจ่ายกำลัง

หน่วยจ่ายกำลังจะทำหน้าที่จ่ายและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(D.C Voltage) ให้กับหน่วยประมวลผล หน่วยความจำ และหน่วยอินพุต/เอาต์พุต ตามความต้องการ และทำหน้าที่เตือนให้หน่วยประมวลผลทราบเมื่อเกิดปัญหา

4.2.2 หน่วยอินพุต/เอาต์พุต

หน่วยอินพุตทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างหน่วยประมวลผลกับอุปกรณ์ภายนอก โดยรับค่าสถานะหรือปริมาณทางกายภาพต่างๆจากอุปกรณ์ตรวจวัด(Sensor) ของเครื่องจักรหรือกระบวนการ เช่น ลิมิตสวิตช์(Limit Switch) พร็อกซิมีตีส์วิตช์(Proximity Switch) ตำแหน่งอุณหภูมิ ระดับแรงดัน กระแสไฟ และอื่นๆ ส่งไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อประมวลผลตามโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้

หน่วยเอาต์พุตทำหน้าที่รับค่าสถานะหรือคำสั่งควบคุมที่ได้จากหน่วยประมวลผลเพื่อส่งไปควบคุมอุปกรณ์ภายในเครื่องจักรหรือกระบวนการเช่น วาล์ว(Valve) มอเตอร์(Motor) ปั๊ม(Pump) และอื่นๆให้ทำงานตามค่าสถานะหรือคำสั่งที่หน่วยประมวลผลต้องการ



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมของหน่วยอินพุต/เอาต์พุต

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในช่วงแรกเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ ได้ถูกใช้แทนรีเลย์ สำหรับการควบคุมแบบ ON-OFF หน่วยอินพุต/เอาต์พุตในขณะนั้นจึงเป็นแบบที่ใช้สำหรับค่าสถานะลอจิกเท่านั้น แต่ต่อมาเมื่อเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ ได้ถูกพัฒนาจนมีการควบคุมแบบอนาล็อกรวมอยู่ด้วย โดยใช้หน่วยอินพุต/เอาต์พุตที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อ รับ-ส่ง สัญญาณแบบ อนาล็อกโดยเฉพาะ ปัจจุบันหน่วยอินพุต/เอาต์พุตของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้อาจแบ่งได้ดังนี้คือ

4.2.2.1 อินพุต/เอาต์พุตแบบค่าสภาวะลอจิก

อินพุต/เอาต์พุตแบบนี้จะใช้กันมากที่สุด ข้อมูลจะมีค่าสภาวะอยู่ 2 สภาวะคือ “1” หรือ “ON” หมายถึง สวิตช์ หรือหน้าสัมผัสของรีเลย์แตะกัน และสภาวะ “0” หรือ “OFF” หมายถึง สวิตช์หรือหน้าสัมผัสของรีเลย์เปิดออก เนื่องจากระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีหลายแบบ การเลือกใช้หน่วยอินพุต/เอาต์พุต แบบค่าสภาวะลอจิกจึงต้องเลือกใช้ให้ถูกต้อง ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็น ตัวอย่างของอุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตแบบลอจิก

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ อินพุต/เอาต์พุตแบบค่าสภาวะลอจิก

อุปกรณ์ทางด้านอินพุต	อุปกรณ์ทางด้านเอาต์พุต
Selector Switches	Alarms
Push Buttons	Control Relays
Photoelectric Eyes	Fans
Limit Switches	Lights
Circuit Breakers	Horns
Proximity Switches	Valves
Level Switches	Motor Starters
Motor Starter Contacts	Solenoid
Relay Contacts	

4.2.2.2 อินพุต/เอาต์พุตแบบค่าตัวเลข

หน่วยอินพุต/เอาต์พุตแบบค่าตัวเลขนี้จะมีอยู่ในเครื่องควบคุมแบบตรรกได้ตั้งแต่ขนาดกลางที่มีฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์รวมอยู่ด้วย โดยทั่วไปแล้วหน่วยอินพุต/เอาต์พุตแบบค่าตัวเลขนี้จะแบ่งเป็น 2 ชนิดคือหน่วยอินพุต/เอาต์พุตสำหรับสัญญาณอนาล็อก และหน่วยอินพุต/เอาต์พุตสำหรับค่าสภาวะแบบหลายบิต

หน่วยอินพุตสำหรับสัญญาณอนาล็อกจะรับสัญญาณอินพุตจากอุปกรณ์ต่างๆ และหน่วยเอาต์พุตจะส่งสัญญาณอนาล็อกไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ตารางที่ 4.2 แสดงถึงอุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตแบบค่าตัวเลข

ตารางที่ 4.2 อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตแบบค่าตัวเลข

อุปกรณ์อินพุตแบบอนาล็อก	อุปกรณ์เอาต์พุตแบบอนาล็อก
Temperature Transducers	Analog Valves and Actuators
Pressure Transducers	Chart Recorders
Load Cell Transducers	Electric Motor Drives
Humidity Transducers	Analog Meters
Flow Transducers	

4.2.2.3 อินพุต/เอาต์พุตสำหรับค่าสถานะแบบหลายบิต

หน่วยอินพุต/เอาต์พุตสำหรับค่าสถานะแบบหลายบิตนี้จะทำงานเหมือนกับหน่วยอินพุต/เอาต์พุตแบบค่าสถานะลอจิกทุกอย่าง ต่างกันก็แต่เพียงการรับ-ส่งข้อมูล ซึ่งสามารถทำได้ครั้งละหลายบิตในเวลาเดียวกัน เช่น อินพุต/เอาต์พุตแบบ BCD เป็นต้น ตารางที่ 4.3 แสดงถึงอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับหน่วยอินพุต/เอาต์พุตสำหรับค่าสถานะแบบหลายบิต

ตารางที่ 4.3 อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตสำหรับค่าสถานะแบบหลายบิต

อุปกรณ์อินพุตแบบหลายบิต	อุปกรณ์เอาต์พุตแบบหลายบิต
Thumbwheel Switches	Seven – Segment Displays
Bar Codes Readers	Intelligent Display

4.2.2.4 อินพุต/เอาต์พุตแบบพิเศษ

สำหรับเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ตั้งแต่ขนาดกลางขึ้นไปจะสามารถนำเอาหน่วยอินพุต/เอาต์พุต แบบพิเศษมาต่อเพื่อใช้งานเฉพาะด้านได้ อินพุต/เอาต์พุตสำหรับงานเฉพาะด้านนั้นมีหลายอย่างดังต่อไปนี้

1. อินพุตที่เป็นเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Input) หน่วยอินพุตสำหรับเทอร์โมคัปเปิลนี้จะทำหน้าที่ปรับระดับสัญญาณ (Signal Conditioning) ที่รับมาโดยตรงจากเทอร์โมคัปเปิลให้มีระดับที่เหมาะสม การทำงานของหน่วยอินพุตชนิดนี้จะเหมือนกับหน่วยอินพุตสัญญาณอนาล็อกจาก เทอร์โมคัปเปิลนี้จะถูกกรอง ขยาย และทำให้เป็นสัญญาณดิจิตอล จากนั้นถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อการทำงานตามโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้
2. อินพุตที่เป็นพัลส์หน่วยอินพุตสำหรับรับอินพุตที่เป็นพัลส์นี้จะทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่า 1 ช่วงเวลาของการ SCAN ของหน่วยประมวลผล
3. อินพุต/เอาต์พุตที่เป็นรหัส ASCII หน่วยอินพุต/เอาต์พุตแบบนี้ใช้สำหรับรับ-ส่งข้อมูลที่เป็นตัวอักษรในรหัส ASCII

4. อินพุตที่เป็นสเตรนเกจ(Strain Gage Input) หน่วยอินพุตสำหรับสัญญาณอนาล็อกจากสเตรนเกจเหมือนกับหน่วยอินพุตสำหรับเทอร์โมคัปเปิล แตกต่างกันที่วงจรปรับระดับสัญญาณ ซึ่งถูกออกแบบไว้รับสัญญาณจากสเตรนเกจเท่านั้น

5. เอาต์พุตที่เป็นพัลส์(Pulse Output) หน่วยเอาต์พุตนี้ทำหน้าที่ส่งพัลส์ไปควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์โดยเฉพาะตำแหน่งของมอเตอร์จะถูกกำหนดจากจำนวนของพัลส์เอาต์พุตที่ถูกรับไว้ก่อน และคำสั่งให้หมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา

6. หน่วยเชื่อมต่อเซอร์โว(Servo Interface) หน่วยเชื่อมต่อเซอร์โวเป็นหน่วยอินพุต/เอาต์พุตที่ถูกออกแบบขึ้นเพื่อตรวจสอบ และควบคุมตำแหน่งของเครื่องจักรโดยเฉพาะ เช่นการควบคุมในระบบ NC(Numerical Control)

7. หน่วย APM(Axis Positioning Module) หน่วย APM เป็นหน่วยเชื่อมต่อของ PC ที่ได้รับการออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบ และควบคุมตำแหน่งของเครื่องจักร เช่นเดียวกับหน่วยเชื่อมต่อเซอร์โวแต่สามารถจะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบซีควเอนซ์ได้โดยที่การทำงานที่แยกเป็นอิสระจากหน่วยประมวลผล

8. หน่วย PID เป็นหน่วยอินพุต/เอาต์พุตที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ควบคุมในระบบลูปปิดที่ต้องการฟังก์ชัน การควบคุมแบบ PID(Proportional, Integral, Derivative)

9. หน่วยเชื่อมต่อโครงข่าย(Network Interface Module) หน่วยเชื่อมต่อนี้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานของ PC ให้สูงขึ้นโดยช่วยให้ PC หลายๆ ระบบเชื่อมต่อกันและติดต่อกันได้หรือติดต่อกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นหน่วยควบคุมหลัก

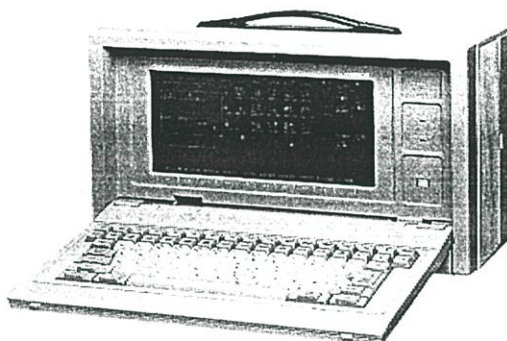
10. หน่วยอินพุต/เอาต์พุตแบบรีโมท หน่วยอินพุต/เอาต์พุตแบบรีโมทจะใช้กับเครื่องควบคุมแบบตรรกขนาดใหญ่ที่มีอินพุต/เอาต์พุตจำนวนมากๆ และมีระบบย่อยๆหลายระบบเพื่อทำหน้าที่ตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์จากจุดต่างๆหลายจุดในเวลาเดียวกันภายใต้การควบคุมของหน่วยประมวลผลกลาง

4.2.3 หน่วยป้อนโปรแกรม

หน่วยป้อนโปรแกรมของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ทำหน้าที่ติดต่อระหว่างผู้ใช้และเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ทั้งระบบคือ การป้อนโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้เข้าสู่หน่วยความจำของหน่วยประมวลผลตรวจสอบสถานะการทำงาน รับ-ส่ง ข้อมูลระหว่างหน่วยประมวลผล กับหน่วยป้อนโปรแกรม รับ-ส่ง ข้อมูลระหว่าง หน่วยประมวลผลกับเทป หรืออื่นๆ ตามฟังก์ชันการใช้งานที่มีอยู่ หน่วยป้อนโปรแกรมของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้แบ่งออกได้หลายชนิดคือ

4.2.3.1 เครื่องป้อนโปรแกรมแบบ CRT

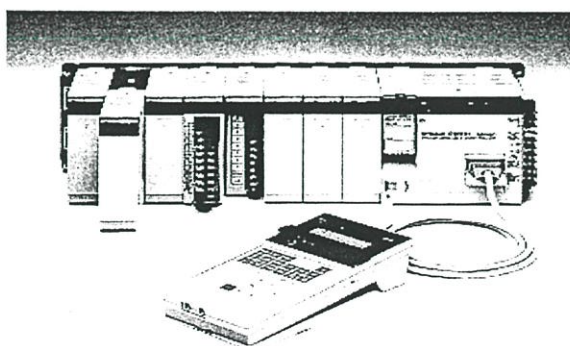
หน่วยป้อนโปรแกรม CRT ประกอบด้วยจอภาพและแป้นพิมพ์ เป็นเครื่องป้อนโปรแกรมแบบที่สะดวกที่สุดเครื่องป้อนโปรแกรมแบบนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือแบบดัมพ์ CRT(Dumb CRT) ซึ่งเป็นแบบที่ไม่มีหน่วยประมวลผลภายในตัว การทำงานทุกอย่างจะถูกควบคุมจากหน่วยประมวลผลของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้และแบบอินเทลลิเจนต์ CRT(Intelligent CRT) ซึ่งจะมีหน่วยประมวลผลภายในตัวซึ่งการทำงานเป็นอิสระจากหน่วยประมวลผลของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้จึงมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบดัมพ์



รูปที่ 4.7 เครื่องป้อนโปรแกรมแบบ CRT

4.2.3.2 เครื่องป้อนโปรแกรมขนาดเล็ก (Mini Programmer)

เป็นเครื่องป้อนโปรแกรมขนาดเล็กที่สามารถพกติดตัวและเคลื่อนย้ายไปมาได้สะดวก แต่ประสิทธิภาพจะดีกว่าเครื่องป้อนโปรแกรมแบบ CRT ปกติแล้วจะใช้จอ LCD ในการแสดงผล เครื่องป้อนโปรแกรมแบบนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบอินเทลลิเจนต์ และ แบบดัมพ์



รูปที่ 4.8 เครื่องป้อนโปรแกรมขนาดเล็กแบบพกพา

4.2.3.3 เครื่องป้อนโปรแกรมลงในหน่วยความจำของ PLC

เครื่องป้อนโปรแกรมแบบนี้สามารถใช้ป้อนหรือแก้ไขโปรแกรมคำสั่งของผู้ใช้เข้าไปในหน่วยความจำของเครื่องควบคุมแบบตรรกะได้โดยตรงหรือใช้ในการรับ-ส่งโปรแกรมและส่งข้อมูลต่างๆ ระหว่างเครื่องควบคุมแบบตรรกะและเทป

4.2.3.4 เครื่องป้อนโปรแกรมลงในหน่วยความจำ(Memory Burner)

เครื่องป้อนโปรแกรมแบบนี้ทำหน้าที่ถ่ายโปรแกรมที่มีอยู่ลงเก็บไว้ในหน่วยความจำแบบ ROM เพื่อให้โปรแกรมต่างๆคงอยู่ตลอดเวลาเมื่อโปรแกรมต่างๆได้ถูกตรวจสอบและแก้ไขจนเรียบร้อยสมบูรณ์แล้ว

4.2.3.5 คอมพิวเตอร์

เครื่องควบคุมแบบตรรกะบางรุ่นได้ออกแบบให้สามารถติดต่อกับคอมพิวเตอร์ได้เพื่อให้การโปรแกรมทุกอย่างสามารถทำบนคอมพิวเตอร์ได้

4.3 ลักษณะการโปรแกรมให้กับเครื่องควบคุมแบบตรรกะ

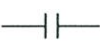

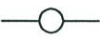
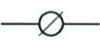
ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคำสั่งสำหรับเครื่องควบคุมแบบตรรกะนั้นมีหลายภาษาด้วยกันสามารถจะจำแนกได้ในหัวข้อต่อไป

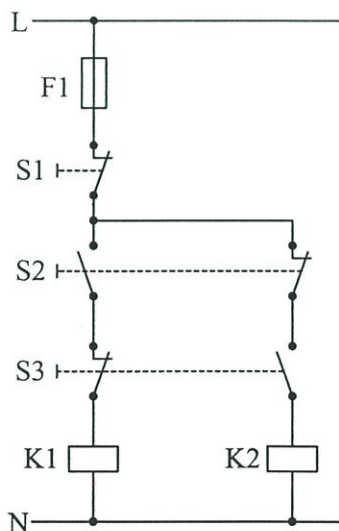
4.3.1 โปรแกรมภาษาแลดเดอร์ไดอะแกรม

สัญลักษณ์พื้นฐานของภาษาแลดเดอร์ไดอะแกรม ดังที่ทราบกันแล้วว่าเครื่องควบคุมแบบตรรกะเป็นเครื่องควบคุมที่ใช้วิธีการโปรแกรมและใช้ซอฟต์แวร์แทนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น รีเลย์ ตัวตั้งเวลา ตัวนับ ดังนั้นการเขียนโปรแกรมคำสั่งจึงใช้สัญลักษณ์พื้นฐานต่อไปนี้แทนอุปกรณ์ต่างๆ

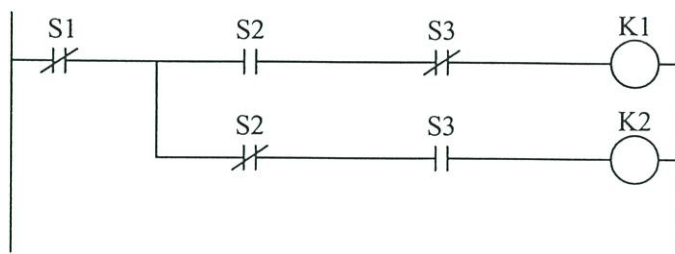
ภาษาแลดเดอร์ไดอะแกรมเป็นการโปรแกรมที่เข้าใจได้ง่ายเนื่องจากมีลักษณะคล้ายกับรีเลย์ไดอะแกรมจึงทำได้ง่าย ดังตัวอย่างแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างรีเลย์ไดอะแกรมซึ่งเป็นวงจรควบคุมการกลับทางหมุนของมอเตอร์[9]แบบ JOGGING ในรูปที่ 4.9 และเปลี่ยนมาใช้เครื่องควบคุมแบบตรรกะควบคุมโดยเขียนเป็นโปรแกรมแลดเดอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.10 แลดเดอร์ไดอะแกรม แบ่งออกเป็นส่วนๆแต่ละส่วนคือ เอาต์พุต 1 จุดหรือเอาต์พุตมากกว่า 1 จุด แต่เอาต์พุตเหล่านี้มีลอจิกเหมือนกันแต่ละส่วนเหล่านี้เรียกว่า “รันค (Rung)” ดังในรูปที่ 4.11 เป็นโปรแกรมที่ให้ผลการควบคุมเหมือนเดิม แต่แยกออกเป็น 2 รันค

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างของการใช้ฟังก์ชันลอจิก และสัญลักษณ์พื้นฐานในการเขียนโปรแกรมแลตเตอร์ของเครื่องควบคุมแบบตรรก

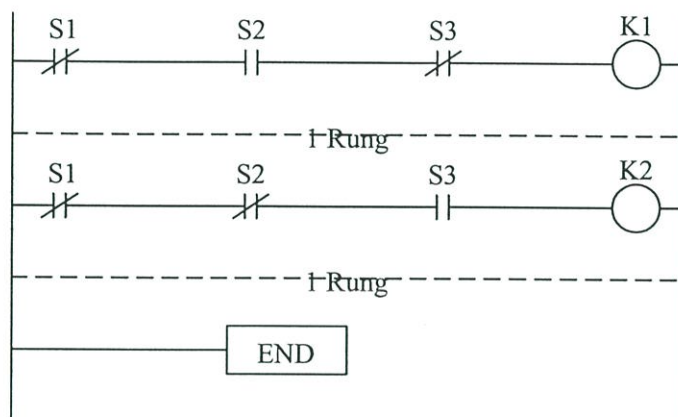
สัญลักษณ์	ความหมาย
	จะใช้แทนอุปกรณ์ทางด้านอินพุตต่างๆ ได้แก่ สวิตช์ ไฟฟ้าหรือหน้าสัมผัสของรีเลย์ ตัวตั้งเวลา ตัวนับ หรือรีเลย์ภายในเป็นต้น โดยที่อุปกรณ์นั้นปกติจะมีค่า สภาวะเป็นลอจิก "0" หน้าสัมผัสปกติเปิดหรือ N.O.
	จะใช้แทนอุปกรณ์ทางด้านอินพุตต่างๆ ได้แก่ สวิตช์ไฟฟ้าหรือหน้าสัมผัสของรีเลย์ ตัวตั้งเวลา ตัวนับ หรือรีเลย์ภายในเป็นต้น โดยที่อุปกรณ์นั้นปกติจะมีค่าสภาวะเป็นลอจิก "1"
	เอาต์พุตปกติไม่ทำงานจะใช้แทนอุปกรณ์ทางด้านเอาต์พุตต่างๆ ได้แก่ หลอดไฟฟ้ามอเตอร์ไฟฟ้า ขดลวดของรีเลย์ ขดลวดโซลินอยด์ (Solenoid) ตัวตั้งเวลา ตัวนับ รีเลย์ภายใน เป็นต้น โดยที่ปกติแล้วอุปกรณ์ทางด้านเอาต์พุตจะมีค่าสภาวะเป็นลอจิก "0"
	เอาต์พุตปกติทำงาน จะใช้แทนอุปกรณ์ทางด้านเอาต์พุตต่างๆ ได้แก่ หลอดไฟฟ้ามอเตอร์ไฟฟ้า ขดลวดของรีเลย์ ขดลวดโซลินอยด์ (Solenoid) ตัวตั้งเวลา ตัวนับ รีเลย์ภายใน เป็นต้น โดยที่ปกติแล้วอุปกรณ์ทางด้านเอาต์พุตจะมีค่า สภาวะเป็น ลอจิก "1"



รูปที่ 4.9 วงจรรีเลย์ควบคุมการหมุนกลับทางของมอเตอร์แบบ JOGGING



รูปที่ 4.10 แลตเตอร์ไดอะแกรมควบคุมการหมุนกลับทางของมอเตอร์แบบ JOGGING



รูปที่ 4.11 การแบ่งแลตเตอร์ไดอะแกรมออกเป็นรังค์

การโปรแกรมด้วยแลตเตอร์ไดอะแกรมจะสะดวกและมีประสิทธิภาพมาก แต่ข้อเสียของการโปรแกรมแบบนี้ คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมจะต้องมีหน่วยแสดงผลที่สามารถแสดงอักษรหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการโปรแกรมแบบนี้มักจะใช้จอ CRT แต่ปัจจุบันจะมีซอฟต์แวร์สนับสนุนการเขียนแลตเตอร์บนคอมพิวเตอร์และเชื่อมโยงข้อมูลกับเครื่องควบคุมแบบตรรกะทางพอร์ตอนุกรม โดยคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ในการสร้างและแก้ไขแลตเตอร์ไดอะแกรม แล้วทำการแปลงเป็นชุดคำสั่งของเครื่องควบคุมนอกจากนั้นแล้วขณะที่เครื่องควบคุมทำงานอยู่ก็สามารถตรวจสอบการทำงานได้โดยการแสดงผลซึ่งจะแสดงเป็นแลตเตอร์ไดอะแกรมและเมื่ออินพุต/เอาต์พุตตัวใดมีการเปลี่ยนแปลงสถานะก็จะมีเปลี่ยนแปลงตามสถานะของอินพุต/เอาต์พุตตัวนั้นๆ ด้วย

4.3.2 โปรแกรมภาษาคำสั่งแบบบูลีน

การโปรแกรมชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับสัญลักษณ์ของพีชคณิตบูลีนนอกจากจะเป็นสัญลักษณ์ของพีชคณิตบูลีนแล้วยังมีการใช้ฟังก์ชันพิเศษต่างๆอีกมากเช่น ตัวนับ ตัวตัวเวลา เป็นต้น ภาษาคำสั่งบูลีนจะมีความสัมพันธ์กับภาษาแลตเตอร์ไดอะแกรมที่สามารถที่จะแปลความหมายถึงกันได้ดังตัวอย่างในตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นชุดคำสั่งบูลีนที่เขียนจากแลตเตอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.11 การเขียนโปรแกรมเป็นแลตเตอร์ไดอะแกรมสามารถแสดงกระบวนการของ

โปรแกรมได้ง่ายต่อการเข้าใจ แต่ไม่สะดวกในการป้อนลงบนเครื่องควบคุม จึงมีการแปลงจากแลตเตอร์ไดอะแกรมเป็นภาษาคำสั่งบูลีน เพื่อป้อนลงชุดรับข้อมูลแบบพกพาของเครื่องควบคุมแบบตรรกซึ่งจะกระทำได้สะดวกมากขึ้น

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างโปรแกรมชุดคำสั่งบูลีน

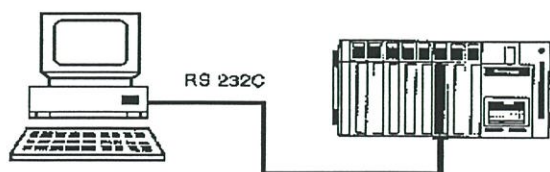
แอดเดรส	คำสั่ง	อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุต
0000	LD NOT	S1
0001	AND	S2
0002	AND NOT	S3
0003	OUT	K1
0004	LD NOT	S1
0005	AND NOT	S2
0006	AND	S3
0007	OUT	K2
0008	END	-

4.4 รูปแบบการสื่อสารข้อมูลของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้

การต่อวงจรในการติดต่อสื่อสารข้อมูลของเครื่องควบคุมแบบตรรก[10] อาจแบ่งออกได้ 3 แบบด้วยกันคือ

4.4.1 การต่อวงจรแบบจุดต่อจุด(Point to Point)

ในการติดต่อสื่อสารข้อมูลแบบจุดต่อจุด จะใช้มาตรฐานการสื่อสารแบบ RS 232C ซึ่งเป็นการติดต่อในระยะทางที่ไม่ไกลมากเช่น การติดต่อระหว่างเครื่องควบคุมแบบตรรกกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการตรวจสอบสถานะการทำงานหรือ การควบคุมจากคอมพิวเตอร์ หรือ สนับสนุนการทำงานอื่นๆ การติดต่อระหว่างเครื่องควบคุมแบบตรรกกับอุปกรณ์อื่น เช่น โมเด็ม (Modem) อุปกรณ์ควบคุมสัมผัสหน้าจอ(Touch Screen) คีย์บอร์ด(Key board) เครื่องอ่านรหัสแถบ (Bar Code Reader) เครื่องพิมพ์ เครื่องบันทึก(Recorder) เครื่องรายงานผล(Reporter) เป็นต้น

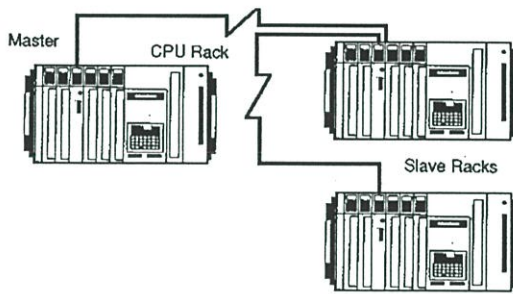


รูปที่ 4.12 ระบบการติดต่อแบบจุดต่อจุด

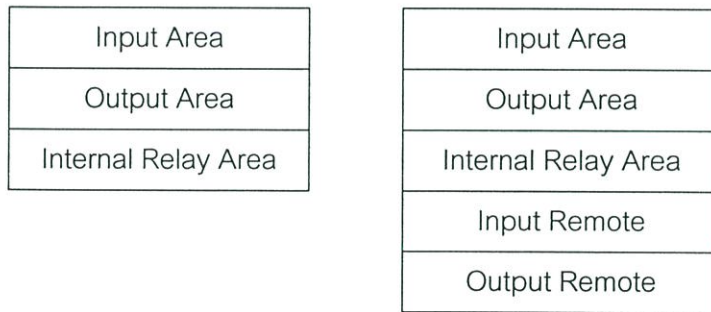
4.4.2 การต่อวงจรแบบหลายจุด(Multi point)

4.4.2.1 การติดต่อแบบอินพุตและเอาต์พุตระยะไกล(Remote I/O System)

เป็นการเชื่อมโยงสื่อสารข้อมูลในลักษณะ ที่ตัวประมวลผลของเครื่องควบคุมหลักกับ ปลายทางอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมอยู่ไกลกัน และอาจมีมากกว่า 1 จุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะมี การเชื่อมโยงในระยะไกล ในการติดต่อลักษณะนี้จะใช้มาตรฐานการสื่อสารแบบ RS 485 บนตัว นำสองเส้น โดยที่ตัวควบคุมหลัก(Master) จะทำการรับอินพุตทั้งจากพื้นที่ของตัวควบคุม และ หน่วยระยะไกล(Slave) จากนั้นจะทำการประมวลผล แล้วส่งเอาต์พุตไปยังส่วนต่างๆ โดยที่อินพุต และเอาต์พุตของหน่วยระยะไกลจะจองพื้นที่ของรีเลย์ภายใน(Internal Relay) ของตัวควบคุมหลัก โดยการเซตระบบนั้นจะแตกต่างกันไปตามบริษัทผู้ผลิต



รูปที่ 4.13 การเชื่อมโยงแบบอินพุตและเอาต์พุตระยะไกล(Remote I/O System)



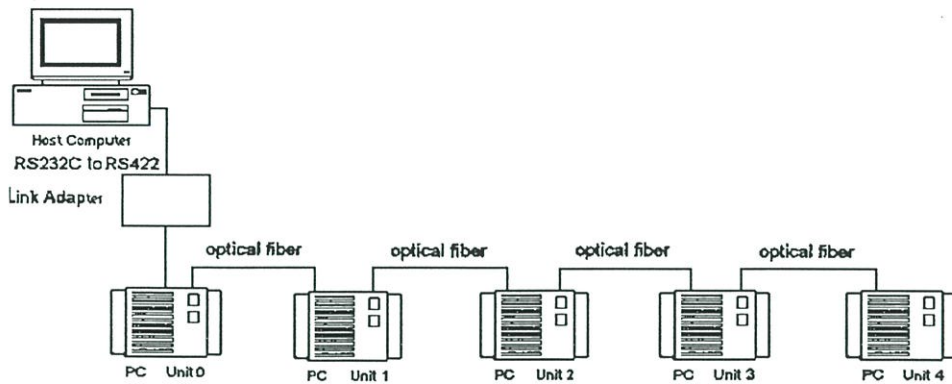
รูปที่ 4.14 ก) การจำลองพื้นที่ของตัวควบคุมหลักขณะทำงานปกติ

ข) การจำลองพื้นที่ของตัวควบคุมหลักขณะเมื่อมีการทำงานร่วมกับหน่วยอินพุต/เอาต์พุตระยะไกล

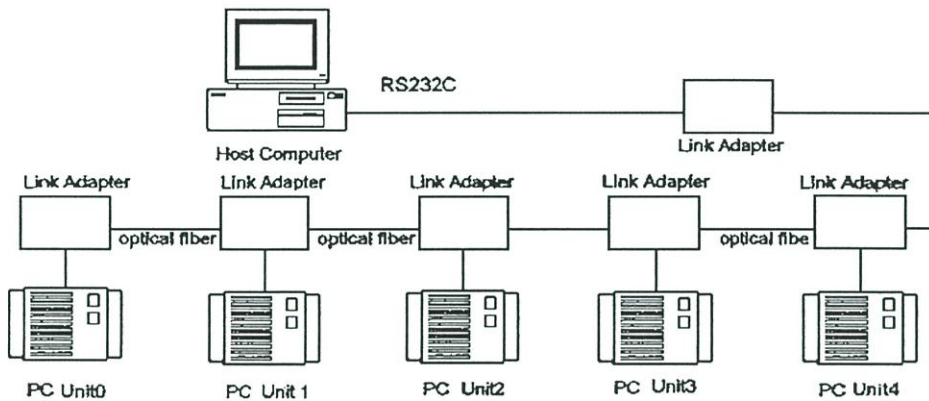
4.4.2.2 การติดต่อแบบพีซีลิงค์(PC Link System)

เป็นการเชื่อมโยงสื่อสารข้อมูลในลักษณะของการแบ่งพื้นที่ในการอ่านเขียนของเครื่อง ควบคุมแบบตรรกแต่ละตัวสามารถรับรู้ข่าวสารซึ่งกันและกันได้ มาตรฐานในการสื่อสารข้อมูลชนิด นี้มักจะเป็นแบบ RS 422A หรือเป็นรูปแบบการสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสง(Fiber optic) หรือ ผ่านสายโคแอกเซียล โดยจะมีตัว Link Adapter เป็นตัวแปลงรูปแบบข้อมูลให้เป็นมาตรฐานตรง กัน อาจจะมีการเชื่อมโยงกับเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาในระบบการลิงค์ เพื่อสนับสนุนการทำงาน

ของเครื่องควบคุมแบบตรรก ซึ่งจะเรียกว่าโฮสคอมพิวเตอร์(Host Computer) มีลักษณะการต่อวงจรดังนี้



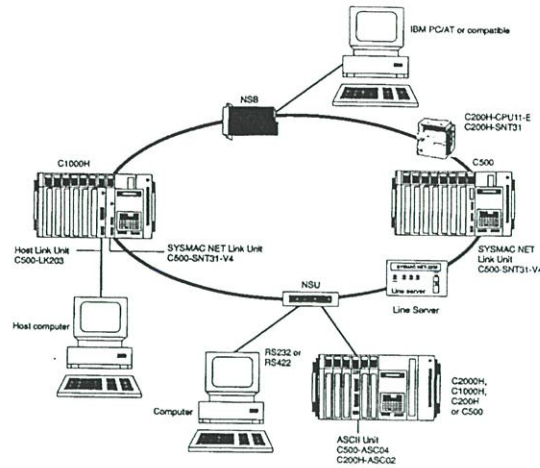
รูปที่ 4.15 การต่อแบบ Serial link



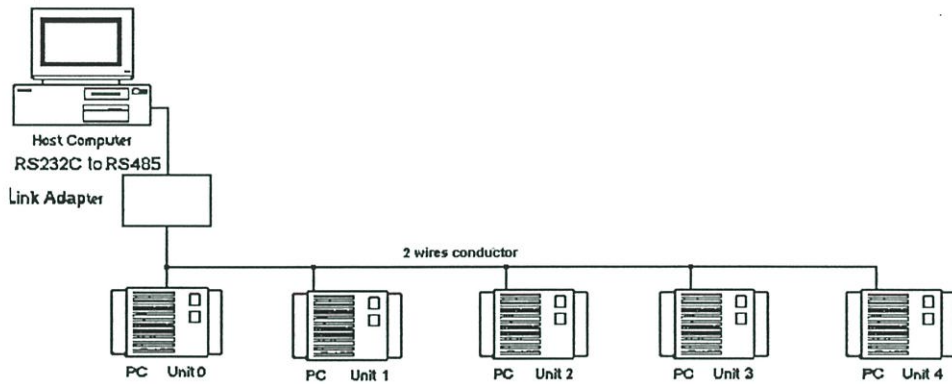
รูปที่ 4.16 การต่อแบบ Parallel link

4.4.3 การต่อแบบเครือข่ายท้องถิ่น(Local Area Network)

การเชื่อมโยงในลักษณะของเครือข่ายท้องถิ่นนี้เป็นระบบขนาดใหญ่ประกอบด้วย อุปกรณ์หลายชนิดและหลายวงรอบด้วยกัน ซึ่งจะเป็นลักษณะเครือข่ายแบบวงแหวน(Ring Network) ในแต่ละวงรอบสามารถที่จะเชื่อมโยงไปยังวงรอบอื่นๆได้ ซึ่งจะมีความซับซ้อนในระบบการติดต่อสื่อสารมากขึ้น รูปแบบสายนำสัญญาณจะมีทั้งสายใยแก้วนำแสง(Fiber Optic) และสายตัวนำในแบบต่างๆ ในระบบโครงข่ายก็จะมีเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่เป็นตัวจัดการข้อมูลเช่นเดียวกับกับเครื่องเซิร์ฟเวอร์(Computer Server) บนโครงข่ายของคอมพิวเตอร์



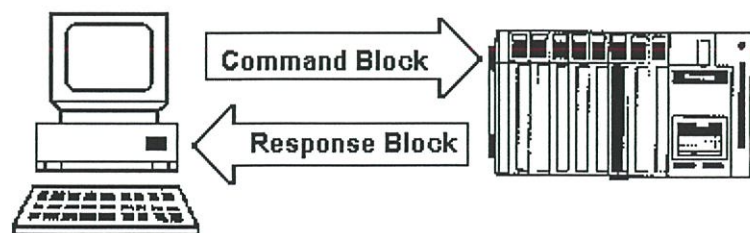
รูปที่ 4.16 ระบบการติดต่อสื่อสารแบบเครือข่ายท้องถิ่น



รูปที่ 4.17 ระบบโครงข่ายแบบหลายจุดโดยใช้มาตรฐานการสื่อสารแบบ RS-485

4.5 ข้อตกลงในการสื่อสารของเครื่องควบคุมแบบตรรก

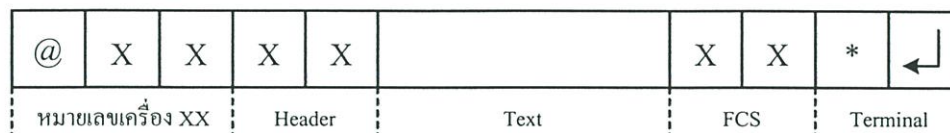
รูปแบบของข้อตกลงในการสื่อสารของเครื่องควบคุมแบบตรรก โดยทั่วไปจะเป็นลักษณะการถามตอบกันระหว่างเครื่องควบคุมกับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งอุปกรณ์ภายนอกมักจะเป็นฝ่ายถามก่อนโดยการส่งบล็อกคำสั่ง (Command Block) ออกไป จากนั้นเครื่องควบคุมจะทำการตรวจสอบแล้วส่งบล็อกตอบสนองกลับมา (Response Block) ตัวอย่างการสื่อสารข้อมูลกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องควบคุมแบบตรรก



รูปที่ 4.18 การติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องควบคุมแบบตรรก

4.5.1 รูปแบบของบล็อก(Block Format)

ลักษณะของบล็อกของเครื่องควบคุมแบบตรรกแต่ละผู้ผลิตจะแตกต่างกันไปแต่จะมีพื้นฐานเดียวกันดังตัวอย่างของบล็อกคำสั่งต่อไปนี้

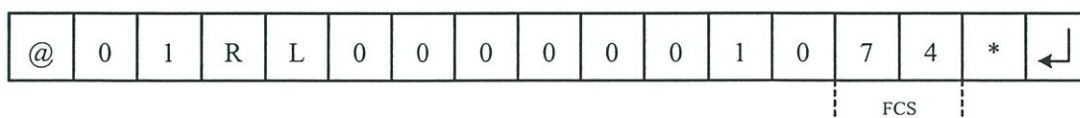


รูปที่ 4.19 รูปแบบของบล็อกคำสั่ง

1. หมายเลขเครื่อง ในการเชื่อมต่อที่เป็นโครงข่ายแบบหลายจุดนั้นเครื่องควบที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบจะมีมากกว่า 1 เครื่อง การกำหนดว่าต้องการส่งข้อมูลให้กับเครื่องควบตัวใด เช่น @05 คือ เครื่องหมายเลขที่ 05
2. ส่วน Header เป็นส่วนของคำสั่งหลักที่จะกำหนดว่าต้องการกระทำกับข้อมูลส่วนใด เช่น ต้องการอ่านข้อมูลของอินพุต ต้องการเขียนข้อมูลให้กับตัวนับ เป็นต้น
3. ส่วน Text เป็นส่วนของข้อมูล เช่น ค่าที่อ่านได้จากอินพุต หรือ ค่าที่จะต้องเขียนลงในพื้นที่ต่างๆ
4. ส่วนของ FCS เป็นส่วนของการควบคุมความผิดพลาดของข้อมูลซึ่งได้จากการคำนวณ
5. ส่วนของ Terminal เป็นส่วนที่ปิดท้ายบอกให้ทราบว่าจะจบบล็อก และมักจะติดตามด้วยรหัสของ Carrier Return (CR)

4.5.2 การคำนวณ FCS

FCS หรือ Frame Check Sequence เป็นสิ่งที่ใช้ในการตรวจสอบความผิดพลาดของการสื่อสารเป็นการเปลี่ยนข้อมูล 8 บิต เป็น 2 ตัวอักษรข้อมูลASCII แล้วนำมาทำการ EXCLUSIVE-OR (XOR) โดยเริ่มจาก @ จนถึงตัวอักษรตัวสุดท้ายของ Text



รูปที่ 4.20 รูปแบบของบล็อกและการคำนวณ FCS

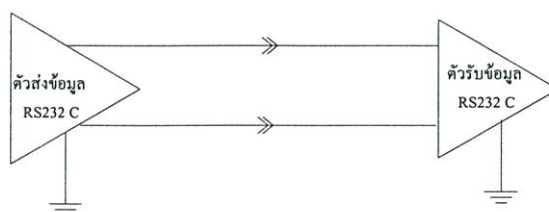
จากรูปแบบบล็อคจะคำนวณได้ดังนี้

อักขระ	รหัส(ASCII BINARY)	(HEX)	XOR (HEX)
@	0100 0000	[40]	
0	0011 0000	[30]	112 [70]
1	0011 0001	[31]	65 [41]
R	0101 0010	[52]	19 [13]
L	0100 1100	[4C]	95 [5F]
o	0011 0000	[30]	111 [6F]
o	0011 0000	[30]	95[5F]
o	0011 0000	[30]	111[6F]
o	0011 0000	[30]	95 [5F]
o	0011 0000	[30]	111 [6F]
o	0011 0000	[30]	95 [5F]
1	0011 0001	[31]	110 [6E]
o	0011 0000	[30]	94 [5E]
*	0010 1010	[2A]	116 [74]

4.6 มาตรฐานในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม

4.6.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232C

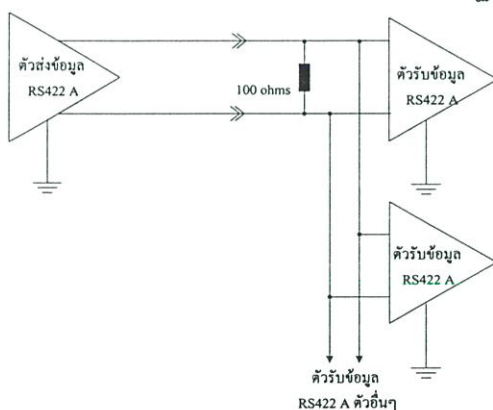
การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม[11-13]ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันนั้น ได้มีการกำหนดมาตรฐานการรับส่งข้อมูลไว้หลายแบบ แต่ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างมาก คือการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232C และที่มาตรฐานนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นระบบการสื่อสารข้อมูลที่ใช้ในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ IBM PC ซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์ที่มีใช้อย่างแพร่หลายมากจากอดีตจนถึงปัจจุบันมาตรฐานการสื่อสารนี้ในการออกแบบเบื้องต้นได้ออกแบบ สำหรับการเชื่อมต่อกับเครื่องโมเด็ม(Modem) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้การสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ผ่านทางสายโทรศัพท์ ซึ่งทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลถูกจำกัดให้มีค่าที่ค่อนข้างต่ำ มาตรฐาน RS-232C นี้ได้ออกแบบให้มีโครงสร้างการสื่อสารเป็นแบบจุดต่อจุดเท่านั้น โดยมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 โครงสร้างของการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232C

4.6.2 การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมมาตรฐาน RS-422A

ในการออกแบบระบบสื่อสารข้อมูลจากที่ผ่านมามาจนถึงปัจจุบัน ได้มีการพยายามที่จะออกแบบให้การสื่อสารข้อมูลได้รวดเร็วขึ้นและมีระยะในการสื่อสารที่มากขึ้นด้วย ซึ่งที่ผ่านมามาการสื่อสารข้อมูลตามมาตรฐาน RS-232C ได้ออกแบบเพื่อใช้เชื่อมต่อกับโมเด็มเท่านั้น จึงไม่ได้คำนึงถึงความเร็วและระยะทางในการสื่อสารต่อมาได้มีมาตรฐานในการสื่อสารข้อมูลใหม่ที่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งานที่ต้องการให้การรับส่งข้อมูลได้ระยะทางไกลและรวดเร็ว มาตรฐานนี้คือ RS-422A ซึ่งการที่มาตรฐานสื่อสารนี้สามารถรับส่งข้อมูลได้ไกลและรวดเร็วขึ้นเนื่องมาจากหลักการที่ใช้สัญญาณเป็นแบบดิฟเฟอเรนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งหลักการก็คือสัญญาณที่รับส่งจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ 2 เส้นเทียบกับมาตรฐาน RS-232C ที่สัญญาณทุกสัญญาณจะเทียบกับกราวด์ ซึ่งในการสื่อสารในระยะทางไกลๆ แล้วสัญญาณจะถูกลดทอนไปและเมื่อสัญญาณถูกลดทอนถึงจุดๆ หนึ่งสัญญาณนั้นก็จะมีผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ทำให้การรับส่งข้อมูลเกิดผิดพลาดขึ้น แต่สำหรับสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล การลดทอนของสัญญาณก็จะไปลดทอนทั้งสองสายด้วยค่าที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันและความแตกต่างของสัญญาณทั้ง 2 เส้น จากตัวส่งไปยังตัวรับก็ยังมีค่าเท่าเดิมหรือเปลี่ยนแปลงน้อย จึงทำให้ผลของการลดทอนต่อสัญญาณที่ระยะการสื่อสารที่ไกลไม่มีผลต่อการสื่อสารข้อมูล พร้อมทั้งสามารถติดต่อกับตัวรับได้ถึง 10 ตัว ดังแสดงตารางในตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบมาตรฐานการสื่อสารข้อมูล



รูปที่ 4.22 โครงสร้างของการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-422A

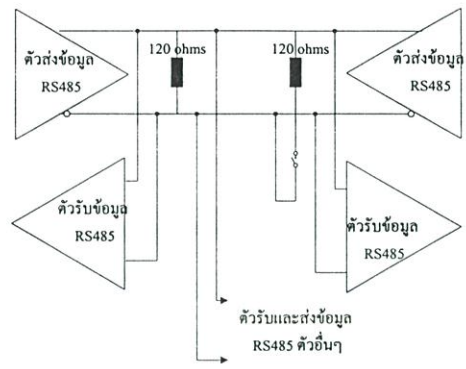
4.6.3 การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-485

การสื่อสารข้อมูลตามมาตรฐานที่กล่าวมาข้างต้นคือ RS-232C นั้นเป็นมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลในแบบที่ใช้สื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่ออุปกรณ์หรือจุดต่อจุด (Point-to-Point) ส่วน RS-422A นั้นเป็นมาตรฐานที่พัฒนามาจาก RS-232C ให้ได้ระยะทางไกลขึ้นและอัตราการสื่อสารเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังเป็น การสื่อสารข้อมูลจากอุปกรณ์หนึ่งตัวไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ได้สูงสุด 10 ตัวเท่านั้นไม่สามารถส่งย้อนกลับจากอุปกรณ์ตัวรับมาตัวส่งได้ หรือกล่าวได้ว่าการสื่อสารข้อมูลตามมาตรฐาน

RS-422A นั้นเป็นการสื่อสารข้อมูลแบบ Simplex คือทิศทางของข้อมูลเป็นแบบทางเดียวตลอดเวลา ดังนั้นถ้าต้องการออกแบบระบบให้เป็นลักษณะโครงข่ายข้อมูลก็ไม่สามารถทำได้ จึงมีการพัฒนามาตรฐานการสื่อสารข้อมูลขึ้นใหม่เพื่อรองรับความต้องการนี้ คือ มาตรฐาน RS-485 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่อาศัยหลักการของสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียลเช่นเดียวกับมาตรฐาน RS-422A แต่สามารถสื่อสารข้อมูลได้ทั้ง 2 ทิศทางในสายสัญญาณเพียงคู่เดียว ซึ่งก็คือการสื่อสารข้อมูลแบบ Half-Duplex จากผลของการใช้สัญญาณในลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลนี้ ทำให้ระยะทางและความเร็วในการสื่อสารข้อมูลมีค่าสูง เช่นเดียวกับมาตรฐานการสื่อสารข้อมูล RS-422A แต่มาตรฐาน RS-485 สามารถที่จะสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ทั้งการส่งของอุปกรณ์ได้สูงสุด 32 ตัว หรืออาจกล่าวได้ว่าการสื่อสารตามมาตรฐาน RS-485 เป็นการสื่อสารแบบหลายจุด (Multipoint-Communication) แสดงโครงสร้างในรูปที่ 4.23 และดังแสดงค่าเปรียบเทียบในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ RS-232C, RS-422A, RS-485

	RS-232C	RS-422A	RS-485
Cabling	single ended	single ended multi-drop	multi-drop
Number of Devices	1 transmit 1 receive	5 transmitters 10 receivers	32 transmitters 32 receivers
Communication Mode	full duplex	full duplex half duplex	half duplex
Max. Distance	50 feet at 19.2 Kbps	4000 feet at 100 Kbps	4000 feet at 100 Kbps
Max. Data Rate	19.2 Kbps for 50 feet	10 Mbps for 50 feet	10 Mbps for 50 feet
Signaling	Unbalanced	Balanced	Balanced
Mark (data 1)	-5 V min. -15 V max.	2 V min. (B>A) 6 V max. (B>A)	1.5 V min. (B>A) 5 V max. (B>A)
Space (data 0)	5 V min. 15 V max.	2 V min. (A>B) 6 V max. (A>B)	1.5 V min. (A>B) 5 V max. (A>B)
Input Level Min.	+/- 3 V	0.2 V difference	0.2 V difference
Output Current	500 mA	150 mA	250 mA



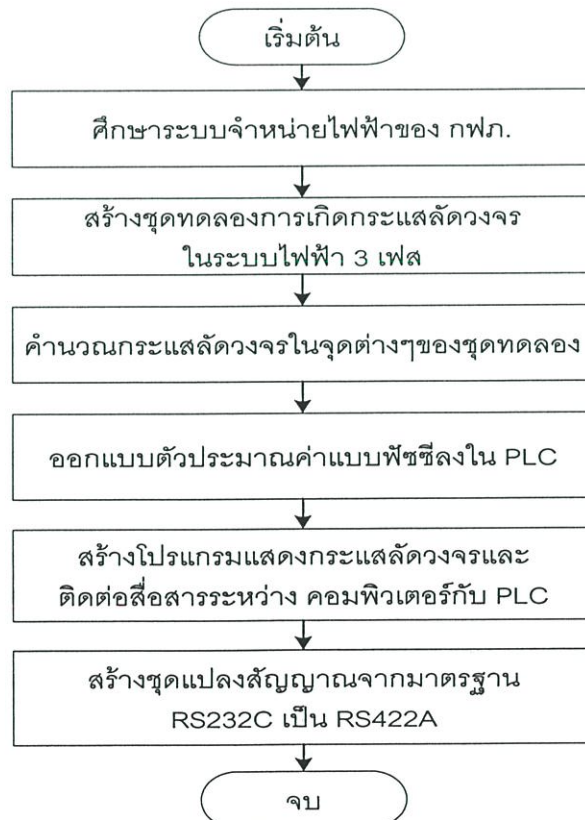
รูปที่ 4.23 โครงสร้างของการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-485

บทที่ 5

การออกแบบการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร

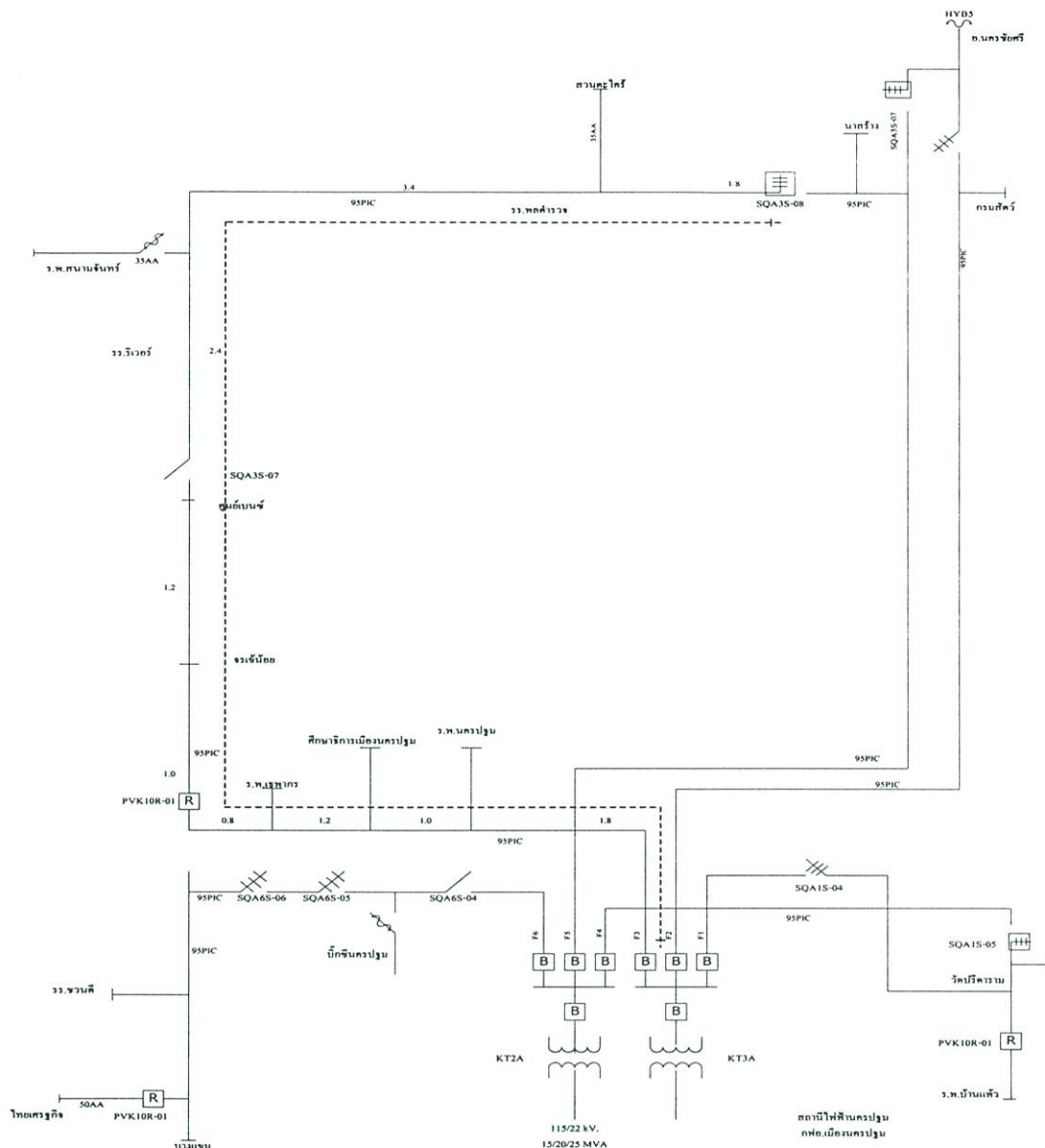
5.1 ขั้นตอนการออกแบบการประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจร

ในส่วนของขั้นตอนการออกแบบนี้จะประกอบไปด้วยการศึกษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.)ว่ามีลักษณะการจ่ายไฟฟ้าแบบใดเพื่อที่จะนำมาสร้างชุดทดลองการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรสามเฟสเนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่สะดวกในการให้ทดสอบกับระบบจริงของ กฟภ. ซึ่งอาจเกิดอันตรายหรือเกิดการผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. อันส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จากนั้นทำการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแบบต่างๆของชุดทดลองเพื่อนำมาออกแบบสร้างตัวควบคุมพีซี โดยนำช่วงกระแสลัดวงจรดังกล่าวมาทำการออกแบบตัวประมาณการแบบพีซีลงในเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้(PLC) จากนั้นทำการสร้างโปรแกรมการสำหรับติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับ PLC โดยใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 เพื่อแสดงผลและจัดเก็บข้อมูลการเกิดกระแสลัดวงจรต่างๆลงในคอมพิวเตอร์เป็นฐานข้อมูลและสุดท้ายสร้างชุดแปลงสัญญาณมาตรฐาน RS232C เป็น RS422A เพื่อให้สามารถเชื่อมโยงข้อมูลระหว่าง PLC และคอมพิวเตอร์เป็นลักษณะเครือข่ายแบบหลายจุดอีกด้วยยังสามารถติดต่อสื่อสารได้ในระยะทางที่ไกลมากขึ้น



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการออกแบบการประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจร

5.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 5.2 แผนผังตำแหน่งสวิตช์แรงสูงของสถานีไฟฟ้านครปฐม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำระบบจำหน่ายไฟฟ้า[3]ของ กฟภ. มาเป็นกรณีศึกษาโดยใช้แผนผังตำแหน่งสวิตช์แรงสูงของสถานีไฟฟ้านครปฐม อ.เมือง จ.นครปฐม ซึ่งสถานีไฟฟ้างกล่าวจะเป็นระบบแรงดัน 22 กิโลโวลต์ โดยรับพลังงานไฟฟ้าจาก กฟผ. ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงแผนผังตำแหน่งสวิตช์แรงสูงในเขตระบบจำหน่ายของสถานีไฟฟ้านครปฐม โดยทำให้ทราบรายละเอียดต่างๆของระบบจำหน่าย เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการคำนวณกระแสลัดวงจร เช่นขนาดและชนิดสายเคเบิล ระยะทางหรือความยาวโดยประมาณของสายเคเบิลชนิดของวงจรของระบบจำหน่ายไฟฟ้า อุปกรณ์ตัดตอน และป้องกันในระบบจำหน่ายถึงแม้ว่าแผนผังตำแหน่งสวิตช์แรงสูงในเขต

ระบบจำหน่ายของสถานีไฟฟ้าแรงดันสูง จะให้รายละเอียดทางเทคนิคเป็นอย่างมากก็ตาม แต่เราก็จำเป็นต้องทราบรายละเอียดบางส่วนเพิ่มคือ ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาดของค่ากระแสลัดวงจรที่บัสบาร์ทั้งค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดและค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุด ดังนั้นขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจรดังแสดงต่อไปนี้

ในการคำนวณในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ กระแส และกำลังไฟฟ้านั้นค่าปริมาณต่าง ๆ เหล่านี้จะมีหน่วยแตกต่างกันออกไปเป็นโอห์ม, แอมป์ เมกกะวาร์ หรือเมกกะวัตต์ ดังนั้นเพื่อให้สามารถทำการคำนวณในระบบที่ยู่ยากให้สะดวกและง่ายขึ้นจึงได้ทำการตั้งระบบการคำนวณที่มีค่าปริมาณเป็นหน่วยเดียวกัน(unity) ซึ่งเรียกว่าระบบเปอร์ยูนิท(Per Unit System) โดยนำเอาค่าปริมาณต่าง ๆ ที่มีหน่วยแตกต่างกันออกไปเหล่านั้นมาคิดเทียบกับค่าปริมาณอ้างอิงค่าหนึ่งของระบบ(base reference)ซึ่งในที่นี้ต่อไปจะเรียกว่าปริมาณอ้างอิง(base) เป็นผลให้ค่าปริมาณต่างๆจะเทียบเข้ามาอยู่ในหน่วยเดียวกันจะเป็นหน่วยเปอร์ยูนิท(per-unit : pu) ด้วยเหตุนี้จะสามารถแปลงค่าปริมาณในหน่วยต่างๆมาอยู่ในค่าเปอร์ยูนิทได้โดย

$$\text{ปริมาณที่คิดเป็นเปอร์ยูนิท} = \frac{\text{ปริมาณจริง}}{\text{ปริมาณอ้างอิง}} \text{ pu.}$$

ปริมาณจริงเป็นค่าปริมาณในหน่วยของแอมป์, โอห์ม, โวลต์ หรือวัตต์ และค่าที่เลือกเป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบหรือปริมาณอ้างอิงของปริมาณนั้นๆจะต้องอยู่ในหน่วยเดียวกันซึ่งกำหนดให้ค่าปริมาณใดๆในระบบนั้นมีค่าเท่ากับ 1 หรือเรียกว่าค่ายูนิทดังนั้นผลของการนำเอาค่าจริงมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงในหน่วยเดียวกันจะได้เป็นค่าเปอร์ยูนิทและหน่วยเดิมจะหายไปและเขียนบอกค่าปริมาณที่ได้จากการเปรียบเทียบด้วยตัวน้อย pu

เพื่อให้ได้ค่าฐานเดียวกันทั้งระบบ โดยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตกำหนดปริมาณอ้างอิง แรงดันไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้า เป็น 22 กิโลโวลต์ 25 เมกกะวาร์ จะทำให้หาค่าปริมาณอ้างอิงของกระแสและอิมพีแดนซ์ในการคำนวณได้ดังนี้

$$I_{\text{base}} = \frac{P_{\text{base}1\phi}}{V_{\text{base}1\phi}} \quad \text{แอมป์}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} \quad \text{โอห์ม}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{(V_{\text{base}})^2}{P_{\text{base}}} \quad \text{โอห์ม}$$

โดย $P_{\text{base}1\phi}$ คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงหนึ่งเฟส
 $V_{\text{base}1\phi}$ คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงหนึ่งเฟส
 I_{base} คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิง

Z_{base} คือ อิมพีแดนซ์อ้างอิง

จากการไฟฟ้าให้ค่าปริมาณแรงดันอ้างอิงหนึ่งเฟสเท่ากับ 22 กิโลโวลต์ และกำลังไฟฟ้าอ้างอิงสามเฟสเท่ากับ 25 เมกกะวาร์จะได้

$$I_{base} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{P_{base}}{V_{base}} \quad (5.1)$$

$$= \frac{25,000,000}{\sqrt{3} \times 22,000} = 656 \text{ แอมป์}$$

$$Z_{base} = \frac{(V_{base})^2}{P_{base}} \quad (5.2)$$

$$= \frac{(22,000)^2}{25,000,000} = 19.36 \text{ โอห์ม}$$

เราทราบค่ากระแสลัดวงจรที่บัสบาร์ 22 กิโลโวลต์จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่กำหนดให้มาในแต่ละสถานีคือ 3,154 แอมป์ทำให้เราสามารถคำนวณค่าลำดับอิมพีแดนซ์ ($Z_1 = \text{Positive}$, $Z_2 = \text{Negative}$, $Z_0 = \text{Zero}$) รวมของระบบจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามาถึงสถานีไฟฟ้าย่อย 22 กิโลโวลต์ จากสมการที่ (2.38) ได้ดังนี้

จากค่ากระแสลัดวงจรคือ 3,154 แอมป์ ที่บัสบาร์ 22 กิโลโวลต์

$$I = \frac{3 V_{pu} \times I_{base}}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)_{pu}} \quad (5.3)$$

$$(Z_1 + Z_2 + Z_0)_{pu} = \frac{3 \times V_{pu} \times I_{base}}{I} \quad (5.4)$$

$$\text{แทนค่า} \quad = \frac{3 \times 1 \times 656}{3,154}$$

อิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายถึงสถานีไฟฟ้าย่อย = $j 0.62397 \text{ pu}$

สำหรับสถานีไฟฟ้านครปฐมใช้สายเคเบิลหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร ชนิดวงจรเดี่ยว[15] คือเดินสายเพียงเส้นเดียวในแต่ละเฟสดังแสดงในตารางที่เควินซ์อิมพีแดนซ์ของสายในภาคผนวก ค. ซึ่งมีระยะทาง 17 กิโลเมตร จากบัส 22 กิโลโวลต์ จนถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างฟีดเดอร์ มาเป็นกรณีศึกษา

จากตารางลำดับอิมพีแดนซ์ของสาย[15] ซึ่งอยู่ในภาคผนวก ค.

$$Z_1 = Z_2 = 0.214350 + j0.339760 \text{ โอห์ม/กิโลเมตร}$$

$$Z_0 = 0.391860 + j1.553800 \text{ โอห์ม/กิโลเมตร}$$

เมื่อทราบค่า Z_1 , Z_2 และ Z_0 (Z แหล่งจ่าย) จากด้านต้นกำลังถึงบัส 22 KV แล้วเราจะหาค่ากระแสลัดวงจรที่จุดใดๆก็เพียงนำความต้านทานของสายคูณกับระยะทางบวกเข้าไปก็จะหาค่ากระแสลัดวงจรแบบต่างๆตามตำแหน่งที่ต้องการได้การหาค่ากระแสลัดวงจรค่าต่ำสุด สามารถ

คำนวณจากสมการที่ (5.6) แต่ในความเป็นจริงค่ากระแสลัดวงจรค่าต่ำสุด จะมีปัจจัยที่สำคัญเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อให้การคำนวณได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้นคือค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจร (Z_f) ซึ่งค่าดังกล่าว กฟภ.จะใช้ค่า 40 โอห์ม[15] ดังตัวอย่างแสดงการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่ปลายสายระหว่างเฟสกับกราวด์ (I_{L-g}) ที่ระยะ 17 กิโลเมตร บางส่วน โดยใช้ค่า $Z_f = 40$ โอห์มจากสมการที่ (2.36)-(2.38) ในบทที่ 2 ร่วมกับการคำนวณแบบระบบต่อหน่วยของ กฟภ.จะได้ดังนี้

$$I_{L-g} = \frac{3 \times V_{pu} \times I_{base}}{Z_{(แหล่งจ่าย)_{pu}} + Z_{(สายส่ง)_{pu}} + 3Z_{f_{pu}}} \quad \text{แอมป์} \quad (5.5)$$

$$I_{L-g} = \frac{3 \times V_{pu} \times I_{base}}{Z_{(แหล่งจ่าย)_{pu}} + Z_{0_{pu}} + Z_{1_{pu}} + Z_{2_{pu}} + 3Z_{f_{pu}}} \quad \text{แอมป์} \quad (5.6)$$

โดยที่

$$Z_1(pu) = \frac{Z_1}{Z_{base}} \times \text{ระยะทาง} \quad \text{โอห์ม}$$

$$= \frac{0.214350 + j0.339760}{19.36} \times 17$$

$$= 0.1882 + j0.2983 \quad \text{โอห์ม}$$

และ

$$Z_0(pu) = \frac{Z_0}{Z_{base}} \times \text{ระยะทาง} \quad \text{โอห์ม}$$

$$= \frac{0.39186 + j1.55380}{19.36} \times 17$$

$$= 0.3441 + j1.3644 \quad \text{โอห์ม}$$

และ

$$Z_f(pu) = \frac{Z_f}{Z_{base}} = \frac{40}{19.36} \quad \text{โอห์ม}$$

$$= 2.07 \quad \text{โอห์ม}$$

จากสมการที่ (5.6) จะได้

$$I_{L-g} = \frac{3 \times 1 \times 656}{j0.62397 + 2(0.1882 + j0.2983) + (0.3461 + j1.3644) + (3 \times 2.07)} \quad \text{แอมป์}$$

$$= 249.23 - j92.31 \quad \text{แอมป์}$$

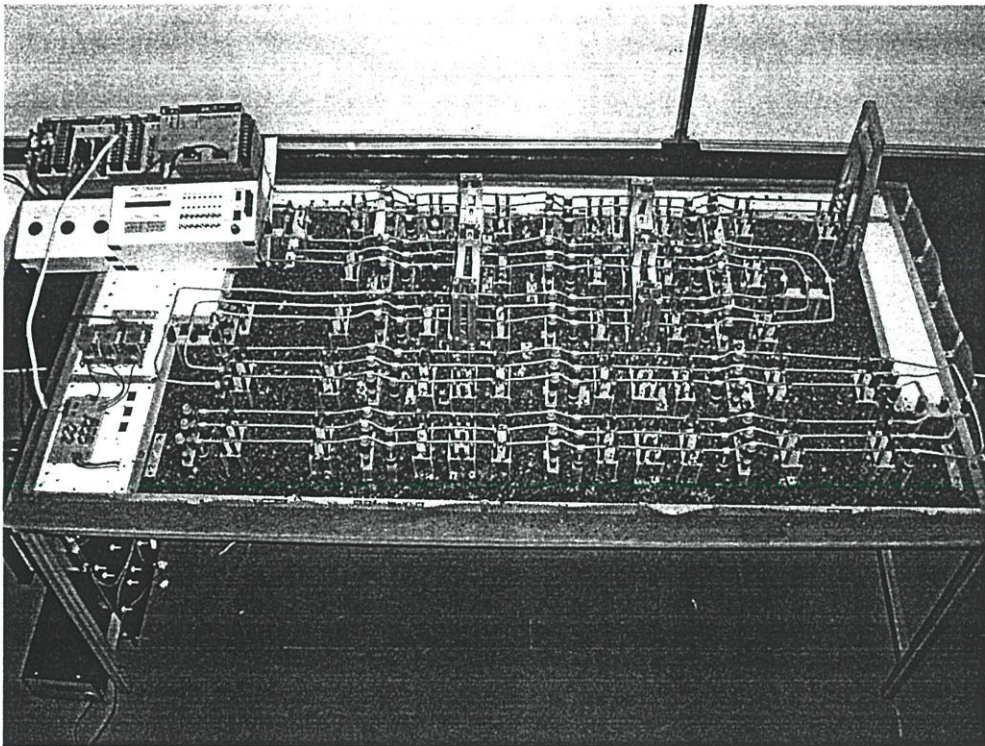
$$= 266 \angle -20.45^\circ \quad \text{แอมป์}$$

จากตัวอย่างการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรสามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในจุดต่างๆ ได้จึงนำไปออกแบบสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของพีชซีขึ้นมาและมีระยะทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งหมด 17 กิโลเมตรเป็นเอาต์พุต เนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) ไม่สะดวก

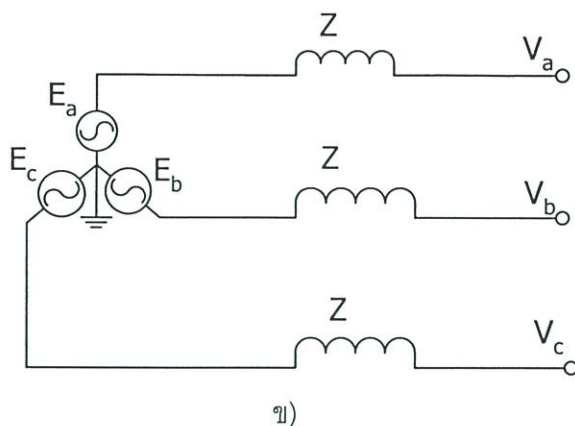
ในการให้ทดสอบกับระบบจริงของ กฟภ. ซึ่งอาจเกิดอันตรายหรือเกิดการผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. อันส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จึงได้ดำเนินการสร้างชุดทดลองการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร จากนั้นจึงทำการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบต่างๆของชุดทดลองแทนระบบจริง เพื่อนำมาออกแบบสร้างตัวควบคุมฟิวส์ซีในหัวข้อถัดไป

5.3 ชุดทดลองการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

ในการทดลองได้ทำการสร้างชุดทดลองการเกิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยให้มีค่าระดับแรงดันในชุดทดลองระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็น 22 โวลต์และมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าเท่ากับ 7 โอห์มต่อเมตรซึ่งชุดทดลองการเกิดกระแสลัดวงจรนี้จะมีความยาวของสายส่งไฟฟ้าทั้งหมดโดยรวม 6 เมตร เนื่องจากความยาวของชุดทดลองการเกิดกระแสลัดวงจรนี้มีระยะสั้นจึงทำให้เกิดค่า Inductance(L) ในสายส่งน้อยกว่าค่า Resistance(R) มากซึ่งในการคำนวณจะคิดเพียงค่า Resistance(R) เพียงอย่างเดียวดังแสดงวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 5.3



ก)

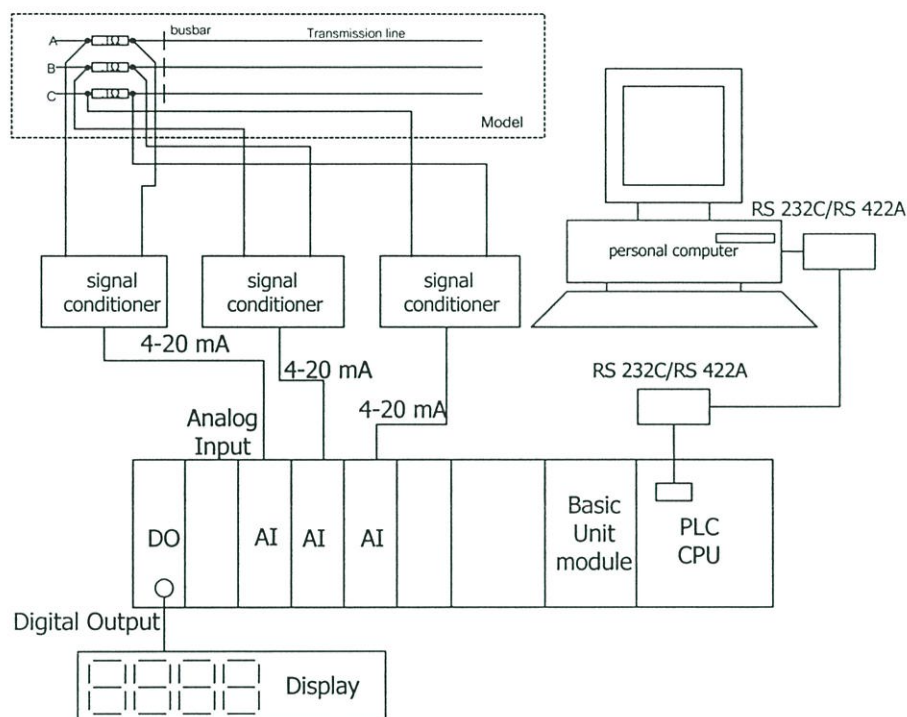


รูปที่ 5.3 ก) ชุดทดลองการเกิดกระแสลัด วงจร ข) วงจรสมมูลย์ของชุดทดลอง

5.4 โครงสร้างของระบบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงออกแบบสร้างระบบดังแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงให้เห็นโครงสร้างของระบบโดยรวมเริ่มจากรับค่ากระแสจากเฟส a, b และ c มาผ่านตัวแปลงสัญญาณ(Signal Conditioner) ซึ่งจะแปลงสัญญาณกระแสที่รับมาได้เป็นค่าระดับสัญญาณกระแสมาตรฐาน 4-20 มิลลิแอมป์ จากกระแสปกติซึ่งเป็นอัตราส่วนกันโดยนำไปคูณกับแฟคเตอร์ตัวหนึ่งทำให้ได้ค่ากระแสมาตรฐานนั้นออกมา จากนั้นส่งต่อไปยังหน่วยอนาลอกอินพุต(Analog Input) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้(PLC) ซึ่งหน่วยดังกล่าวจะทำหน้าที่แปลงค่ากระแสที่รับมาจาก Signal Conditioner ที่เป็นค่าอนาลอก มาเป็นค่าดิจิทัลเพื่อเก็บลงบนหน่วยความจำของ PLC เพื่อที่จะนำไปใช้งานต่อไป โดยที่หน่วยประมวลผลของ PLC(PLC CPU) จะทำหน้าที่วิเคราะห์และคำนวณข้อมูลต่างๆในหน่วยความจำที่กำหนดไว้ร่วมกับหน่วยเบสิก(Basic Unit) ซึ่งมีหน้าที่ช่วยการคำนวณในการใช้ฟังก์ชันพิเศษ เมื่อมีการวิเคราะห์และคำนวณข้อมูลต่างๆแล้ว หน่วยประมวลผลของ PLC ก็จะเก็บข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์แล้วนั้นลงในหน่วยความจำของตัวเองและส่วนหนึ่งก็ส่งไปยังหน่วยเอาต์พุต(Digital Output) เป็นลักษณะตัวเลขชุดแสดงผล 7 ส่วน (Display) โดยหน่วยประมวลผลของ PLC ยังสามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโดยผ่านพอร์ตมาตรฐาน RS-232C ของ PLC ไปยังพอร์ตมาตรฐาน RS-232C ของคอมพิวเตอร์ได้ โดยสร้างชุดแปลงสัญญาณมาตรฐาน RS-232C มาเป็น RS-422A เพื่อให้สามารถเชื่อมโยงข้อมูลระหว่าง PLC และคอมพิวเตอร์เป็นลักษณะเครือข่ายแบบหลายจุดอีกทั้งยังสามารถติดต่อสื่อสารได้ในระยะทางที่ไกลมากขึ้นได้ซึ่งแตกต่างกับการสื่อสารบนมาตรฐาน RS-232C ซึ่งติดต่อได้เพียงคอมพิวเตอร์กับ PLC เพียงตัวเดียวเท่านั้นและยังมีระยะทางที่ใกล้กว่าอีกด้วย และในส่วนของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลนี้ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับเครื่อง PLC เพื่อที่จะเก็บข้อมูลที่เครื่อง PLC วิเคราะห์ได้ลงบนเครื่องคอมพิวเตอร์อีกทั้งยังสามารถแสดงสถานะการทำงานของเครื่อง PLC

แบบเวลาจริง(Real Time) และยังสามารแก้ไขตัวโปรแกรมการวิเคราะห์บนเครื่องคอมพิวเตอร์นี้ได้อีกด้วยโดยผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป Syswin Ver. 3.4 ซึ่งรองรับผลิตภัณฑ์ของ Omron รุ่น C200HS



รูปที่ 5.4 โครงสร้างของระบบที่เชื่อมต่อกับ PLC

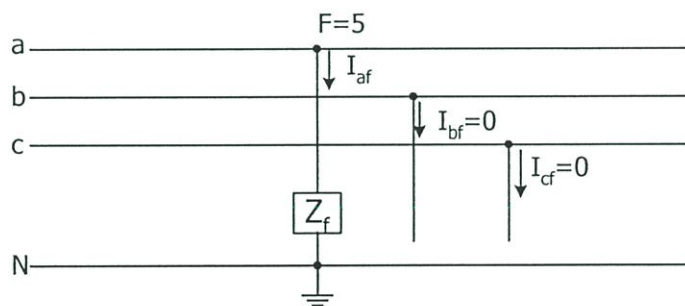
5.5 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของชุดทดลอง

จากแบบจำลองในรูปที่ 5.3 ซึ่งจะเชื่อมต่อกับระบบการประมาณการหาระยะทางแบบพีชที่เราจะสามารถคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรในชุดทดลองโดยมีรายละเอียดของแบบจำลองคือระยะทางของสายไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าซึ่งใช้ตัวนำประเภทอลูมิเนียม ซึ่งมีความต้านทานต่อระยะทางสูงเหมาะสำหรับการสร้างเป็นแบบจำลองและและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้คือ 0.5 มิลลิเมตรมีความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยระยะทางเท่ากับ 7 โอห์ม และในการคำนวณหาตำแหน่งกระแสลัดวงจรนี้กำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์เท่ากับ 40 โอห์มโดยใช้ตัวต้านทานแบบเซรามิกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อที่จะหาค่ากระแสลัดวงจรที่บัสบาร์ได้ โดยแสดงตัวอย่างขั้นตอนในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่ปลายสายได้ดังนี้

- I คือ ระยะทางของสายส่ง (เมตร)
- F คือ ตำแหน่งของสายส่งที่เกิดการลัดวงจร (เมตร)
- Z คือ อิมพีแดนซ์รวมของสายส่ง (โอห์ม)
- Z_l คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งต่อหน่วยความยาว (โอห์มต่อเมตร)

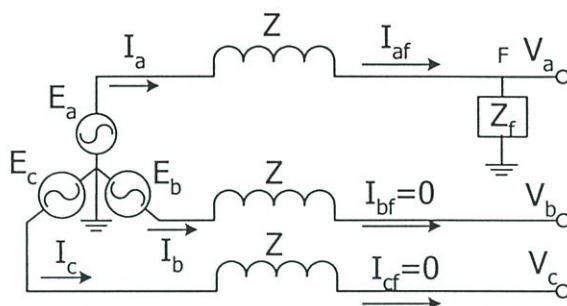
E_a	คือ ระดับแรงดันในสายส่งที่เฟส a (โวลต์)
E_b	คือ ระดับแรงดันในสายส่งที่เฟส b (โวลต์)
E_c	คือ ระดับแรงดันในสายส่งที่เฟส c (โวลต์)
Z_f	คือ อิมพีแดนซ์ฟอลต์ (โอห์ม)
Z_0	คือ ลำดับอิมพีแดนซ์ศูนย์ของสายส่ง (โอห์ม)
Z_1	คือ ลำดับอิมพีแดนซ์บวกของสายส่ง (โอห์ม)
Z_2	คือ ลำดับอิมพีแดนซ์ลบของสายส่ง (โอห์ม)
I_{af}	คือ กระแสลัดวงจรที่เฟส a (แอมป์)
I_{bf}	คือ กระแสลัดวงจรที่เฟส b (แอมป์)
I_{cf}	คือ กระแสลัดวงจรที่เฟส c (แอมป์)
I_{a0}	คือ ลำดับกระแสลัดวงจรศูนย์ที่เฟส a (แอมป์)
I_{a1}	คือ ลำดับกระแสลัดวงจรบวกที่เฟส a (แอมป์)
I_{a2}	คือ ลำดับกระแสลัดวงจรลบที่เฟส a (แอมป์)

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 1 เฟส (I_{L-g}) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด F โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์เท่ากับ 40 โอห์ม ซึ่งจุด F คือระยะสายส่งที่เกิดการลัดวงจร = 5 เมตร ดังแสดงลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรในรูปที่ 5.5



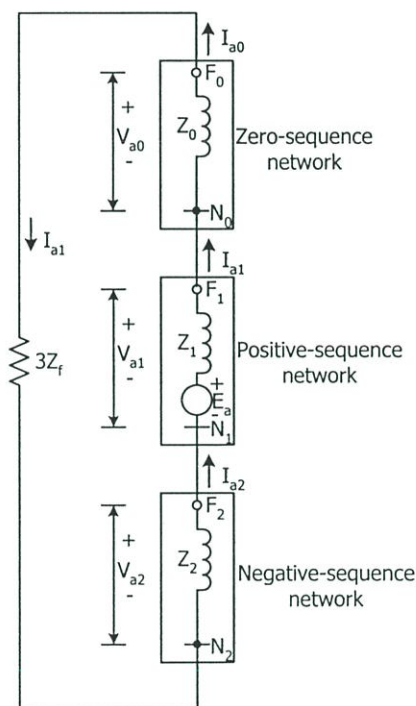
รูปที่ 5.5 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-g}

จากรูปที่ 5.5 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-g} ในกรณีนี้จะเท่ากับ I_{af} ซึ่งมีขนาดกระแสสูงกว่าขนาดกระแสอีกสองเฟสที่เหลือซึ่งก็คือ I_{bf} และ I_{cf} โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ I_{L-g} ซึ่งมีปริมาณมากกว่า I_{bf} และ I_{cf} มากๆ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงกำหนดให้ I_{bf} และ I_{cf} มีค่าเท่ากับ ศูนย์ ในกรณีนี้สามารถเขียนวงจรสมมูลของการเกิดกระแสลัดวงจรได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 วงจรสมมุติการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-g}

จากรูปที่ 5.6 วงจรสมมุติของการเกิดกระแสลัดวงจรร่วมกับทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลังในบทที่ 2 สามารถเขียน Sequence Network[16] ของวงจรสมมุติได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 Sequence Network ของการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-g}

จากรูปที่ 5.5-5.7 สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ที่จุด F ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{bf} &= I_{cf} = 0 \\
 I_{af} &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\
 I_{af} &= 3I_{a0} = 3I_{a1} = 3I_{a2} \\
 I_{L-g} &= |I_{af}|
 \end{aligned}$$

จากวงจรสมมุติในรูปที่ 5.6 และ Sequence Network ของการเกิดกระแสลัดวงจรในรูปที่ 5.7 ร่วมกับสมการที่ (2.38) สามารถแสดงการคำนวณลักษณะการเกิดการลัดวงจรเฟสกับกราวด์ในแต่ละเฟสได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.19)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

พิจารณาระแสลัดวงจรเฟสใดเฟสหนึ่งกับกราวด์ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส

ในเฟส a, b, c เมื่อให้ $G = \frac{1}{Z + 3Z_f}$ จะได้

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}_a + G \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}_b + G \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}_c \quad (5.8)$$

จากสมการที่ (5.7) และ (5.8) จะได้

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}_a + G \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}_b + G \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}_c \quad (5.9)$$

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} 3E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_a + G \begin{bmatrix} 0 \\ 3E_b \\ 0 \end{bmatrix}_b + G \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3E_c \end{bmatrix}_c$$

$$= G \begin{bmatrix} 3E_a & 0 & 0 \\ 0 & 3E_b & 0 \\ 0 & 0 & 3E_c \end{bmatrix}_{abc}$$

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \frac{3}{Z + 3Z_f} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

ในลักษณะการเกิดกระแสแบบหนึ่งเฟส (I_{L-g}) ซึ่งก็คือมีค่า Z_f ต่อรวมกันที่จุดลัดวงจรของสายเส้นนั้นเนื่องจากการเกิดกระแสลัดวงจรที่เฟส a แสดงให้เห็นตัวอย่างดังรูปที่ 5.6 และเมื่อพิจารณาระแสที่ไหลแบบ sequence network ในเฟส a ตามสมการที่ (5.10) จะได้

$$I_{af} = \frac{3E_a}{Z + 3Z_f} \quad (5.11)$$

ในลักษณะเดียวกันพิจารณากระแสลัดวงจรที่เฟส b จะได้

$$I_{bf} = \frac{3E_b}{Z + 3Z_f} \quad (5.12)$$

ในลักษณะเดียวกันพิจารณากระแสลัดวงจรที่เฟส c จะได้

$$I_{cf} = \frac{3E_c}{Z + 3Z_f} \quad (5.13)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \frac{3}{Z + 3Z_f} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

จากค่าแรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์ ที่กำหนดให้และการพิจารณาการเกิดกระแสลัดวงจรหนึ่งเฟสที่เฟส a กับกราวด์แทนค่าในสมการที่ (5.14) จะได้

เมื่อ $Z_l = 7$ โอห์มต่อเมตร

$F = 5$ เมตร

$E_a = 22 \angle 0^\circ$ โวลต์

$E_b = 0$ โวลต์

$E_c = 0$ โวลต์

$Z_f = 40$ โอห์ม

$Z = Z_l \times F$

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \frac{3}{(7 \times 5) + (3 \times 40)} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 22 \angle 0^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

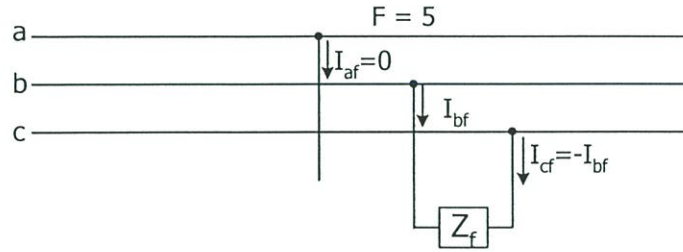
$$I_{af} = \frac{22 \angle 0^\circ}{(7 \times 5) + (3 \times 40)} = 425.8 \text{ mA}$$

$$I_{bf} = \frac{0}{(7 \times 5) + (3 \times 40)} = 0 \text{ mA}$$

$$I_{cf} = \frac{0}{(7 \times 5) + (3 \times 40)} = 0 \text{ mA}$$

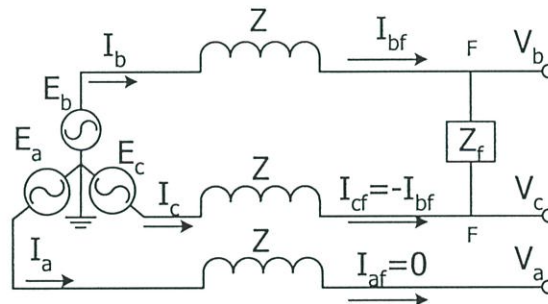
$$I_{L-g} = I_{af} = 425.8 \text{ mA}$$

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 2 เฟส (I_{L-L}) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด F โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์เท่ากับ 40 โอห์ม ซึ่งจุด F คือ ระยะสายส่งที่เกิดการลัดวงจร = 5 เมตร ดังแสดงลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรในรูปที่ 5.8



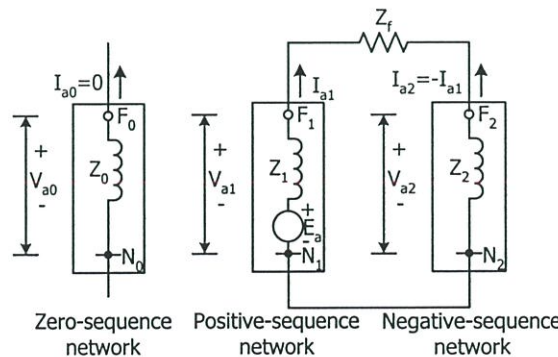
รูปที่ 5.8 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-L}

จากรูปที่ 5.8 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-L} ในกรณีนี้จะเท่ากับ I_{bf} ซึ่งมีขนาดกระแสสูงกว่าขนาดกระแสในเฟส a ซึ่งก็คือ I_{af} โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ I_{L-L} ซึ่งมีปริมาณมากกว่า I_{af} มากๆ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงกำหนดให้ I_{af} มีค่าเท่ากับ ศูนย์ ในกรณีนี้สามารถเขียนวงจรสมมูลย์ของการเกิดกระแสลัดวงจรได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลย์การเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-L}

จากรูปที่ 5.9 วงจรสมมูลย์ของการเกิดกระแสลัดวงจรร่วมกับทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลังในบทที่ 2 สามารถเขียน Sequence Network[16] ของวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 Sequence Network ของการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ I_{L-L}

จากรูปที่ 5.8-5.10 สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ที่จุด F ได้ดังนี้

$$I_{af} = 0$$

$$I_{bf} = -I_{cf}$$

$$I_{bf} = I_{a1} = -I_{a2}$$

$$I_{L-L} = |I_{bf}|$$

จากการคำนวณในลักษณะเดียวกันกับตัวอย่างที่ 1 ในลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบสองเฟส (I_{L-L}) ซึ่งก็คือมีค่า Z_f ต่อรวมกันที่จุดลัดวงจรระหว่างสายสองเส้นนั้นเนื่องจากการเกิดกระแสลัดวงจรที่เฟส b กับเฟส c แสดงให้เห็นตัวอย่างดังรูปที่ 5.9 และเมื่อพิจารณากระแสที่ไหลแบบ sequence network ในเฟส a จะได้

$$I_{af} = \frac{\sqrt{3}E_a}{2Z + Z_f} \quad (5.15)$$

ในลักษณะเดียวกันพิจารณากระแสลัดวงจรที่เฟส b จะได้

$$I_{bf} = \frac{\sqrt{3}E_b}{2Z + Z_f} \quad (5.16)$$

ในลักษณะเดียวกันพิจารณากระแสลัดวงจรที่เฟส c จะได้

$$I_{cf} = \frac{\sqrt{3}E_c}{2Z + Z_f} \quad (5.17)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2Z + Z_f} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

จากค่าแรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์ ที่กำหนดให้และการพิจารณาการเกิดกระแสลัดวงจรสองเฟสที่เฟส b กับเฟส c แทนค่าในสมการที่ (5.18) จะได้

$$\text{เมื่อ } Z_1 = 7 \text{ โอห์มต่อเมตร}$$

$$F = 5 \text{ เมตร}$$

$$E_a = 22 \angle 0^\circ \text{ โวลต์}$$

$$E_b = 0 \text{ โวลต์}$$

$$E_c = 0 \text{ โวลต์}$$

$$Z_f = 40 \text{ โอห์ม}$$

$$Z = Z_1 \times F$$

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{(2 \times 7 \times 5) + 40} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 22 \angle 240^\circ \\ 22 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

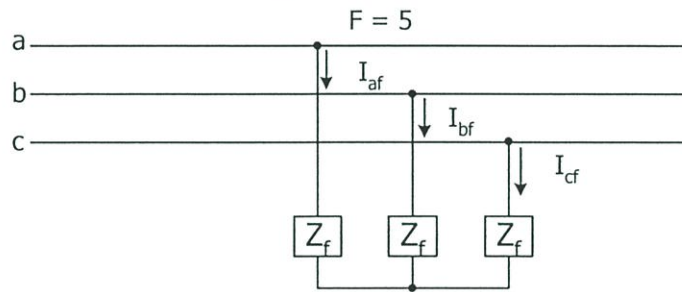
$$I_{af} = \frac{\sqrt{3} \times 0}{(2 \times 7 \times 5) + 40} = 0 \text{ mA}$$

$$I_{bf} = \frac{\sqrt{3} \times 22 \angle 240^\circ}{(2 \times 7 \times 5) + 40} = 346.4 \angle 240^\circ \text{ mA}$$

$$I_{cf} = \frac{\sqrt{3} \times 22 \angle 120^\circ}{(2 \times 7 \times 5) + 40} = 346.4 \angle 240^\circ \text{ mA}$$

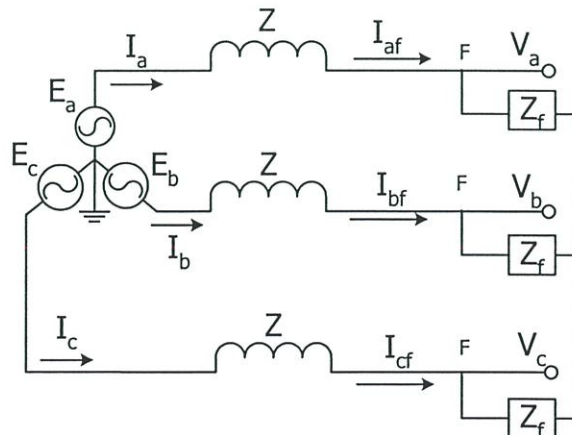
$$I_{L-L} = |I_{bf}| = 346.4 \text{ mA}$$

ตัวอย่างที่ 3 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 3 เฟส ($I_{3\phi}$) เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด F โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์เท่ากับ 40 โอห์ม ซึ่งจุด F คือระยะสายส่งที่เกิดการลัดวงจร = 5 เมตร ดังแสดงลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรในรูปที่ 5.11



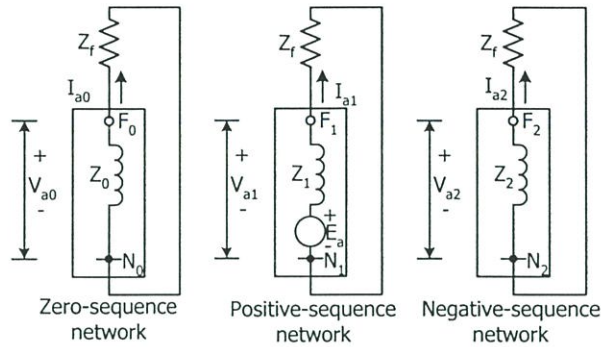
รูปที่ 5.11 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$

จากรูปที่ 5.11 ลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$ สามารถเขียนวงจรสมมูลของการเกิดกระแสลัดวงจรได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 วงจรสมมูลการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$

จากรูปที่ 5.12 วงจรสมมูลของการเกิดกระแสลัดวงจรร่วมกับทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลังในบทที่ 2 สามารถเขียน Sequence Network[16] ของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 Sequence Network ของการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$

จากรูปที่ 5.11-5.13 สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ที่จุด F ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } I_{af} &= I_{bf} = I_{cf} \\ I_{af} &= I_{a1} \\ I_{bf} &= a^2 I_{a1} = I_{a1} \angle 240^\circ \\ I_{cf} &= a I_{a1} = I_{a1} \angle 120^\circ \\ I_{3\phi} &= |I_{af}| \end{aligned}$$

จากการคำนวณในลักษณะเดียวกันกับตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ในลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส ($I_{3\phi}$) ซึ่งก็คือมีค่า Z_f ต่อรวมกันที่จุดลัดวงจรระหว่างสายทั้งสามเส้นนั้นเนื่องจากการเกิดกระแสลัดวงจรสามเฟสแสดงให้เห็นตัวอย่างดังรูปที่ 5.12 และเมื่อพิจารณากระแสที่ไหลแบบ sequence network ในเฟส a จะได้

$$I_{af} = \frac{E_a}{Z + Z_f} \quad (5.19)$$

ในลักษณะเดียวกันพิจารณากระแสลัดวงจรที่เฟส b จะได้

$$I_{bf} = \frac{E_b}{Z + Z_f} \quad (5.20)$$

ในลักษณะเดียวกันพิจารณากระแสลัดวงจรที่เฟส c จะได้

$$I_{cf} = \frac{E_c}{Z + Z_f} \quad (5.21)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z + Z_f} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

จากค่าแรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์ ที่กำหนดให้และการพิจารณาการเกิดกระแสลัดวงจรสามเฟสแทนค่าในสมการที่ (5.22) จะได้

เมื่อ $Z_f = 7$ โอห์มต่อเมตร

$F = 5$ เมตร

$E_a = 22 \angle 0^\circ$ โวลต์

$E_b = 0$ โวลต์

$E_c = 0$ โวลต์

$Z_f = 40$ โอห์ม

$Z = Z_f \times F$

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \frac{1}{(7 \times 5) + 40} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 22 \angle 0^\circ \\ 22 \angle 240^\circ \\ 22 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$I_{af} = \frac{22}{(7 \times 5) + 40} = 293.3 \text{ mA}$$

$$I_{bf} = \frac{22 \angle 240^\circ}{(7 \times 5) + 40} = 293.3 \angle 240^\circ \text{ mA}$$

$$I_{cf} = \frac{22 \angle 120^\circ}{(7 \times 5) + 40} = 293.3 \angle 120^\circ \text{ mA}$$

$$I_{3\phi} = I_{af} = 293.3 \text{ mA}$$

จากการคำนวณกระแสลัดวงจรในแบบต่างๆโดยมีค่าอิมพีแดนซ์ฟอลต์ 40 โอห์ม จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสลัดวงจรจะเปรียบเทียบกับระยะทางดังแสดงในตารางที่ 5.1

จากตัวอย่างการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรดังที่ผ่านมาแสดงให้เห็นค่ากระแสลัดวงจรที่มีความสัมพันธ์กับระยะทางต่างๆดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยสามารถนำไปออกแบบสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyขึ้นมาในหัวข้อถัดไป โดยการคำนวณจะใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งในชุดทดลองเพียงค่า Resistance(R) เพียงค่าเดียวเนื่องจากสายส่งมีระยะสั้นและระดับแรงดันในสายส่งมีค่าน้อยจึงทำให้เกิดค่า Reactance ($X_L + X_C$) น้อยมากเมื่อเทียบกับค่า Resistance(R) ของสายส่งในชุดทดลอง ซึ่งแตกต่างกับสายส่งไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

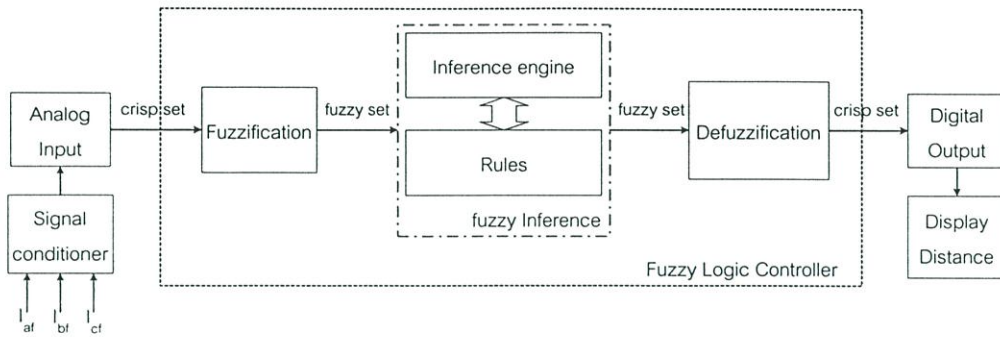
ภาค (กฟภ.) โดยจะมีทั้งค่า Resistance(R) และค่า Reactance ($X_L + X_C$) อันเนื่องมาจากสายส่งมีความยาวมากทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าในสายทั้งสามเส้นจึงทำให้เกิดค่า Reactance ขึ้นและเมื่อจะทำการคำนวณก็สามารถนำค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจริงแทนค่าในการคำนวณในค่า Z โดยค่า $R + jX$ แล้วทำการคำนวณในลักษณะต่างๆดังแสดงในตัวอย่างข้างต้น

ตารางที่ 5.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรในแบบต่างๆกับระยะทาง

ระยะทาง(เมตร)	I_{L-g} (mA)	I_{L-L} (mA)	$I_{3\phi}$ (mA)
0	550.0	952.6	550.0
0.5	534.4	810.7	505.7
1.0	519.7	705.6	468.1
1.5	505.7	624.6	435.6
2.0	492.5	560.3	407.4
2.5	480.0	508.0	382.6
3.0	468.1	464.7	360.6
3.5	456.7	428.1	341.1
4.0	445.9	396.9	323.5
4.5	435.6	369.9	307.7
5.0	425.8	346.4	293.3
5.5	416.4	325.7	280.2
6.0	407.4	307.3	268.3

5.6 การประยุกต์ฟัซซีเพื่อการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร

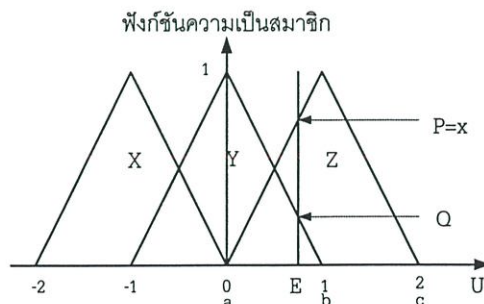
การประยุกต์ใช้ฟัซซีเพื่อการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรจะแสดงเป็นเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.14 โดยมีอินพุตเป็นค่ากระแสลัดวงจรในเฟสต่างๆเป็น I_{af} , I_{bf} , I_{cf} และมีเอาต์พุตเป็นระยะทางโดยตัวควบคุมฟัซซีจะทำหน้าที่แปลงข้อมูลกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากค่า Crisp set ในหน่วยความจำของ PLC ให้อยู่ในรูปของ Fuzzy set โดยหน่วย Fuzzification เพื่อที่จะคำนวณและวิเคราะห์แบบฟัซซี(Inference Engine) โดยหน่วย Fuzzy Inference ซึ่งอาศัยฐานข้อมูล(Fuzzy Rules Base) เป็นกฎการตัดสินใจเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตออกมาและค่าที่ได้ยังคงเป็นค่า Fuzzy set อยู่จำเป็นต้องมีหน่วยแปลงข้อมูล(Defuzzification) จากค่า Fuzzy set ให้เป็นค่าเอาต์พุต Crisp set ซึ่งจะส่งไปยังชุดแสดงผลต่อไป โดยแบ่งออกเป็นโซน โซนละประมาณ 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมฟัซซี

5.6.1 การสร้างฟังก์ชันในความเป็นสมาชิกฟัซซี(Membership function)และการฟัซซีฟิเคชัน(Fuzzification)

การฟัซซีฟิเคชันคือการแปลงค่าอินพุตจากเซตของค่าจริง(crisp set) ให้มาเป็นเซตทางฟัซซี (fuzzy set) ด้วยการใช้วิธีซึ่งเกิดขึ้นซึ่งจะใช้หลักการอินเตอร์เซกชันระหว่างกลุ่มเซตทางอินพุตที่ถูกกำหนดขึ้นแบบซิงเกิลตันซึ่งจากรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าการกำหนดให้กลุ่มเซตประกอบด้วยเซต X, Y, Z ซึ่งเป็นแบบฟัซซีนิ่มเบอร์และเซตทางอินพุตที่ถูกนำมาอินเตอร์เซกชันคือเซต E ที่เป็นเซตแบบซิงเกิลตัน ซึ่งจะเกิดขึ้นในตำแหน่งอินพุตที่เข้ามาซึ่งเมื่อทำการอินเตอร์เซกชันหรือซ้อนทับกันจะทำให้เกิดจุดซ้อนทับกัน 2 จุดคือจุด P ซึ่งเป็นจุดที่เซต E ซ้อนทับกับเซต Z และจุด Q เป็นจุดที่เซต E ซ้อนทับกับเซต Y ซึ่งทั้งจุด P และจุด Q จะมีค่าระดับความเป็นสมาชิกที่จะใช้เป็นตัวแทนทางอินพุต ส่วนของการสร้างฟังก์ชันในความเป็นสมาชิกของฟัซซีนั้นได้อาศัยการคำนวณด้วยระบบไฟฟ้ากำลังในหัวข้อที่แล้วเพื่อเป็นข้อมูลในการแบ่งความเป็นสมาชิก(Membership Function) โดยกำหนดให้ค่ากระแสลัดวงจรเป็นความเป็นสมาชิกของอินพุตและความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเป็นระยะทางโดยใช้รูปแบบการสร้างความเป็นสมาชิกเป็นสามเหลี่ยมเนื่องจากระบบค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นและมีความต่อเนื่องกันของปริมาณกระแสและระยะทางจึงเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมซึ่งซึ่งถูกกำหนดโดย 3 พารามิเตอร์ {a,b,c} แสดงดังสมการ (5.23) และแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสามเหลี่ยมดังรูปที่ 5.15



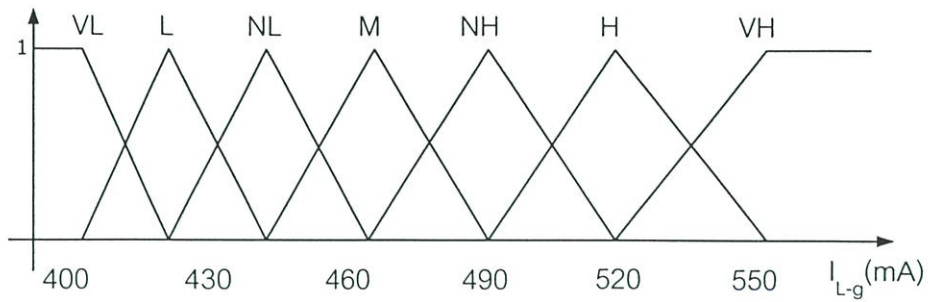
รูปที่ 5.15 การฟัซซีฟิเคชันแบบซิงเกิลตัน

$$\text{triangle}(x;a,b,c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0, & \text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (5.23)$$

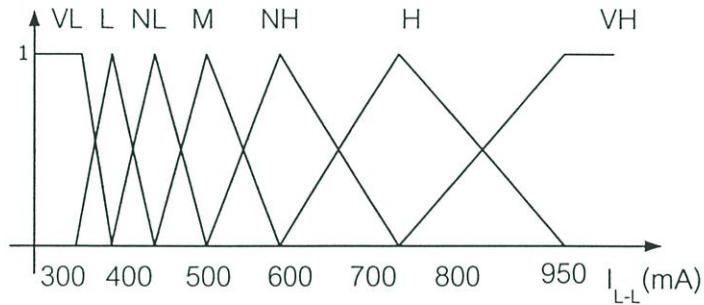
เมื่อ $x =$ จุดใดๆที่จะพิจารณา
 $a =$ จุดเริ่มต้นของสามเหลี่ยม
 $b =$ จุดยอดของสามเหลี่ยม
 $c =$ จุดสิ้นสุดของสามเหลี่ยม

5.6.1.1 ความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร

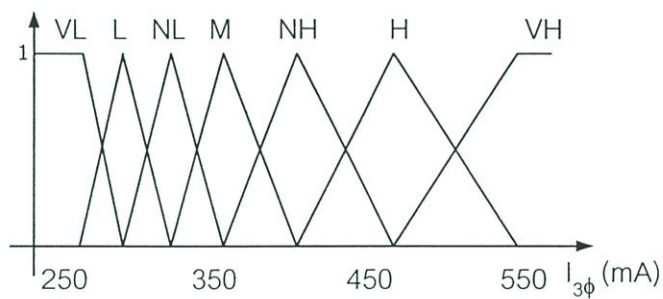
การกำหนดความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจรจะใช้รูปแบบสามเหลี่ยมเพื่อให้มีความต่อเนื่องกันของปริมาณโดยจะแบ่งออกเป็น 7 เทอมเซต(term set)ด้วยกันเพื่อให้มีความละเอียดในการครอบคลุมถึงกระแสลัดวงจรในแบบต่างๆกันจำนวน 3 แบบคือความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจรแบบ 1 เฟส(I_{L-g}) ความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจรแบบ 2 เฟส(I_{L-L}) และความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟส($I_{3\phi}$) ดังแสดงในรูปที่ 5.16-5.18 ซึ่งในการเลือกใช้ชุดความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจรในแบบใดจะขึ้นอยู่กับตัดสินใจของโปรแกรมใน PLC โดยการตรวจสอบค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะใดโดยโปรแกรมควบคุมใน PLC จะทำหน้าที่ตัดสินใจและเลือกใช้ชุดของค่าความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจรในแบบนั้นๆโดยดูจากขนาดกระแสที่ผิดปกติจากค่าที่กำหนดไว้มีจำนวนเฟสเท่าใดและอยู่ที่เฟสใดแล้วจะแสดงถึงว่าเฟสนั้นมีการลัดวงจรเกิดขึ้น ตัวอย่างเช่นถ้าเกิดกระแสผิดปกติจากค่าที่กำหนดเพียงเฟสเดียวจะแสดงว่าเกิดการลัดวงจรแบบ I_{L-g} ที่เฟสนั้น และถ้าเกิดการผิดปกติของกระแสไฟฟ้าคู่หนึ่งจากค่าที่กำหนด จะแสดงว่าเกิดการลัดวงจรแบบ I_{L-L} ที่สองเฟสนั้น และถ้าเกิดการผิดปกติของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสจากค่าที่กำหนด จะแสดงว่าเกิดการลัดวงจรแบบ $I_{3\phi}$ ทั้งสามเฟส โดยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งสามรูปแบบตามรูปที่ 5.16-5.18 และตารางที่ 5.2 เป็นการแสดงรายละเอียดชื่อของเทอมเซตอินพุตค่ากระแสลัดวงจร และในส่วนของ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับเซตของอินพุต ในลักษณะของการเกิดกระแสลัดวงจรทั้งสามลักษณะจะแสดงในตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.16 ความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจร I_{L-g}



รูปที่ 5.17 ความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจร I_{L-L}



รูปที่ 5.18 ความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจร $I_{3\phi}$

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดชื่อเทอมเซตอินพุต(กระแสลัดวงจร)

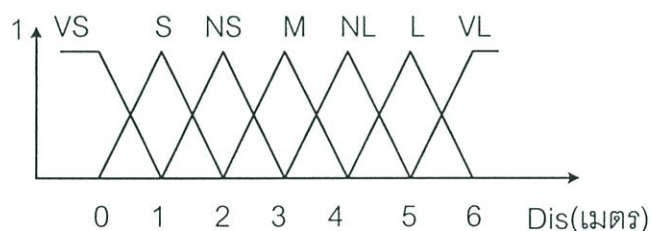
ลำดับ	สัญลักษณ์	ความหมาย
1	VL	ค่ากระแสลัดวงจรต่ำมาก
2	L	ค่ากระแสลัดวงจรต่ำ
3	NL	ค่ากระแสลัดวงจรค่อนข้างต่ำ
4	M	ค่ากระแสลัดวงจรปานกลาง
5	NH	ค่ากระแสลัดวงจรค่อนข้างสูง
6	H	ค่ากระแสลัดวงจรสูง
7	VH	ค่ากระแสลัดวงจรสูงมาก

ตารางที่ 5.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์{a,b,c} ของสามเหลี่ยมเทอมเซตอินพุต

เทอมเซต	I_{L-g} (mA)	I_{L-L} (mA)	$I_{3\phi}$ (mA)
VL	407,407,423	307,307,346	268,268,293
L	407,423,445	307,346,396	268,293,323
NL	423,445,465	346,396,464	293,323,360
M	445,465,490	396,464,560	323,360,407
NH	465,490,518	464,560,705	360,407,468
H	490,518,550	560,705,952	407,468,550
VH	518,550,550	705,952,952	468,550,550

5.6.1.2 ความเป็นสมาชิกของระยะทาง

การกำหนดความเป็นสมาชิกของระยะทางหรือความยาวของสายส่งไฟฟ้าจะใช้รูปแบบสามเหลี่ยมเช่นกันเพื่อให้มีความต่อเนื่องกันของระยะทางหรือความยาวของสายส่งไฟฟ้าโดยจะแบ่งออกเป็น 7 เทอมเซตด้วยกันซึ่งครอบคลุมถึงระยะทางหรือความยาวของสายส่งไฟฟ้าทั้งหมด ดังแสดงรูปที่ 5.19 และตารางที่ 5.4 เป็นการแสดงรายละเอียดชื่อเทอมเซตเอาต์พุตต่างๆของระยะทางหรือความยาวของสายส่งไฟฟ้า และในส่วนของ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับเซตของเอาต์พุต แสดงในตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.19 ความเป็นสมาชิกของระยะทางหรือความยาวของสายส่งไฟฟ้า

ตารางที่ 5.4 รายละเอียดชื่อเทอมเซตเอาต์พุต(ระยะทาง)

ลำดับ	สัญลักษณ์	ความหมาย
1	VS	ตำแหน่งการเกิดกระแสลัดวงจรใกล้มาก
2	S	ตำแหน่งการเกิดกระแสลัดวงจรใกล้
3	NS	ตำแหน่งการเกิดกระแสลัดวงจรค่อนข้างใกล้
4	M	ตำแหน่งการเกิดกระแสลัดวงจรปานกลาง
5	NL	ตำแหน่งการเกิดกระแสลัดวงจรค่อนข้างไกล
6	L	ตำแหน่งการเกิดกระแสลัดวงจรไกล
7	VL	ตำแหน่งการเกิดกระแสลัดวงจรไกลมาก

ตารางที่ 5.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์{a,b,c} ของสามเหลี่ยมเทอมเซตเอาต์พุต

เทอมเซต	I_{L-g} (mA)
VS	0,0,1
S	0,1,2
NS	1,2,3
M	2,3,4
NL	3,4,5
L	4,5,6
VL	5,6,6

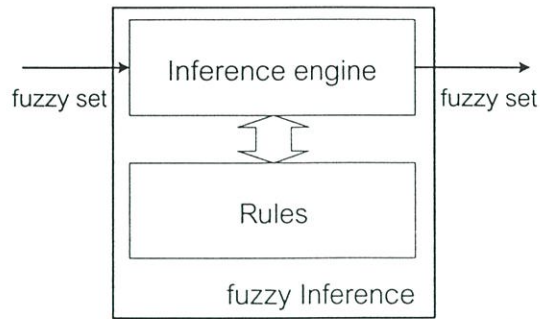
5.6.2 การสร้างฐานความรู้แบบพีชชี (Rules base)

ในส่วนของฐานความรู้จะประกอบไปด้วยกฎที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ IF...THEN... ซึ่งกฎต่างๆนั้นขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอินพุตโดยการนำเอาอินพุตคือค่ากระแสลัดวงจรมาทำการสร้างกฎซึ่งใช้ความชำนาญของผู้เชี่ยวชาญโดยหาค่าเอาต์พุตทั้งหมดที่เป็นไปได้แล้วนำมาสร้างกฎการควบคุมให้อยู่ในขอบเขตเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุดซึ่งมีทั้งหมด 7 กฎ

IF กระแสลัดวงจร = VL	THEN ระยะทางของสายส่ง = VL
IF กระแสลัดวงจร = L	THEN ระยะทางของสายส่ง = L
IF กระแสลัดวงจร = NL	THEN ระยะทางของสายส่ง = NL
IF กระแสลัดวงจร = M	THEN ระยะทางของสายส่ง = M
IF กระแสลัดวงจร = NH	THEN ระยะทางของสายส่ง = NS
IF กระแสลัดวงจร = H	THEN ระยะทางของสายส่ง = S
IF กระแสลัดวงจร = VH	THEN ระยะทางของสายส่ง = VS

5.6.3 กระบวนการตัดสินใจ(Inference)

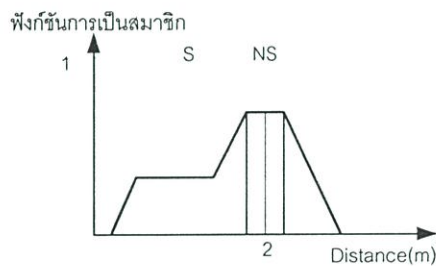
กระบวนการตัดสินใจทำหน้าที่หาค่าเอาต์พุตของระบบพีชชีจากค่าตัวแปรอินพุตแบบพีชชี โดยอาศัยฐานความรู้และกฎการตัดสินใจโดยใช้วิธีการหาเหตุผลคือ IF I_i คือ... THEN Dis คือ... โดยส่วนนี้จะหาดำแหน่งของ Membership function เอาต์พุตโดยใช้วิธี Max-Min ที่สัมพันธ์กับกฎการควบคุมดังแสดงตามบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 บล็อกไดอะแกรมส่วนกระบวนการตัดสินใจของฟัซซี

5.6.4 การดีฟัซซิฟิเคชัน(Defuzzification)

การดีฟัซซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการแปลงตัวแปรฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นค่า Crisp Set ซึ่งการการดีฟัซซิฟิเคชัน มีด้วยกันหลายวิธี สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสูงสุด Mean of Max เป็นการหาค่าของตัวแปรเอาต์พุตโดยการหาค่าเฉลี่ยจุดสูงสุดของพื้นที่ของกฎที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าศูนย์ โดยเป็นวิธีที่สามารถหาค่าเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงของการประมาณการเป็นโซนซึ่งมีความใกล้เคียงและสามารถยอมรับได้ และยังลดความซับซ้อนในการสร้างโปรแกรมการคำนวณหาค่าเอาต์พุตอีกทั้งใช้เวลาในการคำนวณที่ต่ำอีกด้วย

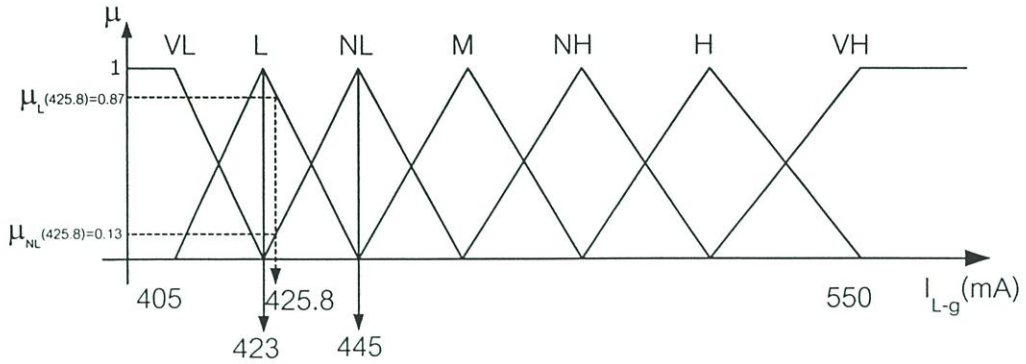


รูปที่ 5.21 การหาค่าเอาต์พุตแบบ Mean of Max

5.6.5 การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรด้วยตัวควบคุมฟัซซี

จากการออกแบบตัวประมาณการกระแสลัดวงจรด้วยตัวควบคุมฟัซซีสามารถแสดงการคำนวณหาค่าเอาต์พุตจากค่ากระแสลัดวงจรที่ได้ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรนั่นเองบ่งบอกถึงระยะทางของสายส่งไฟฟ้าได้ในรูปแบบฟัซซีได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 4 จากตัวอย่างที่ 1 เกิดการลัดวงจรแบบ 1 เฟส(I_{Lg}) เท่ากับ 425.8 mA สามารถนำมาดำเนินการฟัซซิฟิเคชันโดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.22 โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{Lg}) ในเซตของ L และ NL จะถูกนำมาพิจารณาตั้งนั้นสามารถหาค่าความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{Lg})ซึ่งเป็นอินพุต ตามสมการที่ (5.26) ได้ 2 ค่าดังรูป 5.22



รูปที่ 5.22 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต L และ NL ของกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{L-g}) โดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน

$$\begin{aligned}\mu_L(x = 425.8, a = 405, b = 423, c = 445) &= \frac{1}{c-b}(c-x) \\ &= \frac{1}{445-423}(445-425.8) \\ &= 0.87\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{NL}(x = 425.8, a = 423, b = 445, c = 465) &= \frac{1}{b-a}(x-a) \\ &= \frac{1}{445-423}(425.8-423) \\ &= 0.13\end{aligned}$$

ที่กระแสลัดวงจรเท่ากับ 425.8 mA ไม่ได้เป็นสมาชิกในเซตของ VL, M, NH, H และ VH ดังนั้นที่กระแสลัดวงจรแบบ 1 เฟส(I_{L-g}) เท่ากับ 425.8 mA จะส่งผลให้เซตของ L และ NL จะถูกนำมาพิจารณาจากกฎของฟัซซีเป็นจริงอยู่ 2 กฎด้วยกันคือ

IF กระแสลัดวงจร = L THEN ระยะเวลาของสายส่ง = L

IF กระแสลัดวงจร = NL THEN ระยะเวลาของสายส่ง = NL

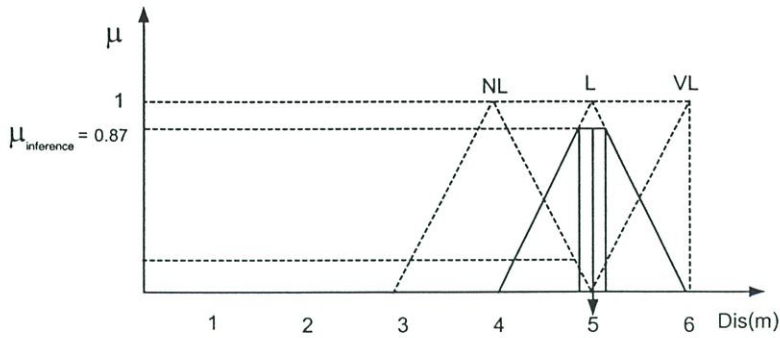
จากกฎการควบคุมทั้งสองสามารถประมาณตัวแปรเอาต์พุตด้วยค่า Max ตามหัวข้อที่ 5.5.3 จะได้

$$\mu_{\text{inference}} = \text{Max}(0.87, 0.13)$$

กฎที่ใช้ในการประมาณค่า ระยะเวลาของสายส่ง ในกรณีการ Defuzzification โดยวิธี Mean of Max คือ

IF กระแสลัดวงจร = L THEN ระยะเวลาของสายส่ง = L

เนื่องจากกฎข้อนี้ใช้หาค่าความจริงที่มีค่ากลางสูงสุด $\mu_{\text{output}} = \text{MOM}(0.87)$ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประมาณการของระยะเวลาของสายส่งได้ดังรูปที่ 5.23



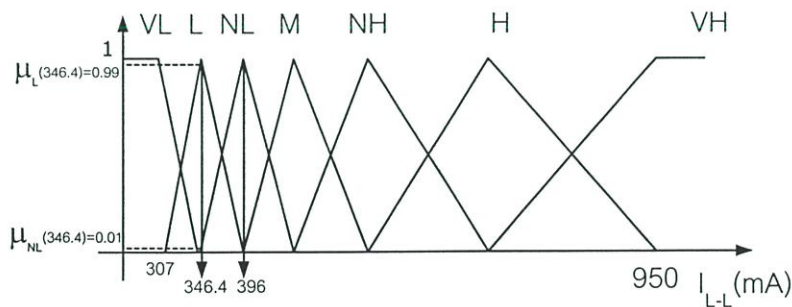
รูปที่ 5.23 Defuzzification แบบ Mean of Max ของระยะทางแบบ 1 เฟส

จากขั้นตอนการประมาณค่าเอาต์พุตในรูปที่ 5.23 โดยใช้วิธี Mean of Max จะได้ค่าเอาต์พุตเป็นระยะทางได้ดังนี้

$$\text{ระยะทาง} = \frac{4.87 + 5.13}{2} = 5 \text{ เมตร}$$

จากตัวอย่างการคำนวณแบบฟัซซีดังแสดงตามขั้นตอนสามารถนำไปใช้ได้กับการคำนวณหาเอาต์พุตของฟัซซีคอนโทรลเลอร์โดยมีค่าอินพุตเป็นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลักษณะ 1 เฟสโดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของลักษณะ 1 เฟสนั้นมาคำนวณ

ตัวอย่างที่ 5 จากตัวอย่างที่ 2 เกิดการลัดวงจรแบบ 2 เฟส (I_{L-L}) เท่ากับ 346.4 mA สามารถนำมาดำเนินการฟัซซีฟิเคชันโดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.24 โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 2 เฟส (I_{L-L}) ในเซตของ L และ NL จะถูกนำมาพิจารณาดังนั้นสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 2 เฟส (I_{L-L}) จากสมการที่ (5.26) ได้ 2 ค่าดังรูป 5.24



รูปที่ 5.24 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต L และ NL ของกระแสลัดวงจร 2 เฟส (I_{L-L}) โดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน

$$\begin{aligned} \mu_L(x = 346.4, a = 307, b = 346, c = 396) &= \frac{1}{c - b}(c - x) \\ &= \frac{1}{396 - 346}(396 - 346.4) \end{aligned}$$

$$= 0.99$$

$$\begin{aligned}\mu_{NL}(x = 346.4, a = 346, b = 396, c = 464) &= \frac{1}{b-a}(x-a) \\ &= \frac{1}{396-346}(346.4-346) \\ &= 0.01\end{aligned}$$

ที่กระแสลัดวงจรเท่ากับ 346.4 mA ไม่ได้เป็นสมาชิกในเซตของ VL, M, NH, H และ VH ดังนั้นที่กระแสลัดวงจรแบบ 2 เฟส(I_{L-L}) เท่ากับ 346.4 mA จะส่งผลให้เซตของ L และ NL จะถูกนำมาพิจารณาจากกฎของฟัชซีเป็นจริงอยู่ 2 กฎด้วยกันคือ

IF กระแสลัดวงจร = L THEN ระยะทางของสายส่ง = L

IF กระแสลัดวงจร = NL THEN ระยะทางของสายส่ง = NL

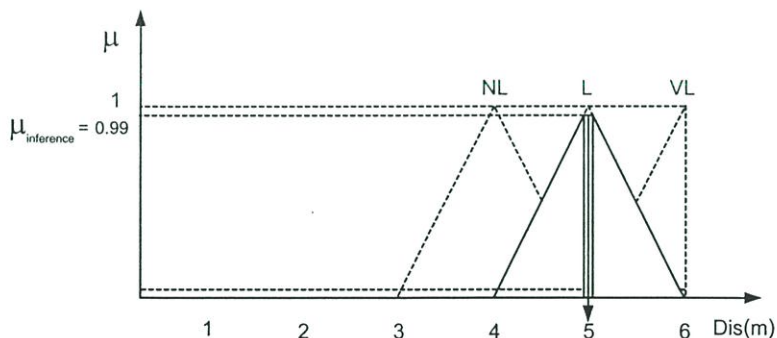
จากกฎการควบคุมทั้งสองสามารถประมาณตัวแปรเอาต์พุตด้วยค่า Max ตามหัวข้อที่ 5.5.3 จะได้

$$\mu_{inference} = \text{Max}(0.99, 0.01)$$

กฎที่ใช้ในการประมาณค่า ระยะทางของสายส่ง ในกรณีการ Defuzzification โดยวิธี Mean of Max คือ

IF กระแสลัดวงจร = L THEN ระยะทางของสายส่ง = L

เนื่องจากกฎข้อนี้ใช้หาค่าความจริงที่มีค่ากลางสูงสุด $\mu_{output} = \text{MOM}(0.99)$ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประมาณการของระยะทางของสายส่งได้ดังรูปที่ 5.25



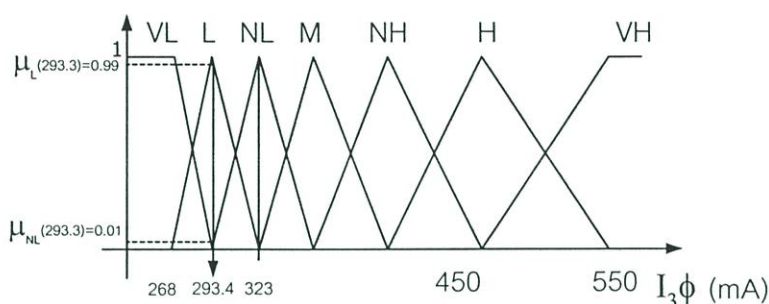
รูปที่ 5.25 Defuzzification แบบ Mean of Max ของระยะทางแบบ 2 เฟส

จากขั้นตอนการประมาณค่าเอาต์พุตในรูปที่ 5.25 โดยใช้วิธี Mean of Max จะได้ค่าเอาต์พุตเป็นระยะทางได้ดังนี้

$$\text{ระยะทาง} = \frac{4.99 + 5.01}{2} = 5 \text{ เมตร}$$

จากตัวอย่างการคำนวณแบบฟัซซีดังแสดงตามขั้นตอนสามารถนำไปใช้ได้กับการคำนวณหาเอาต์พุตของฟัซซีคอนโทรลเลอร์โดยมีค่าอินพุตเป็นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลักษณะ 2 เฟสโดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของลักษณะ 2 เฟสนั้นมาคำนวณ

ตัวอย่างที่ 6 จากตัวอย่างที่ 3 เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ($I_{3\phi}$) เท่ากับ 293.3 mA สามารถนำมาดำเนินการฟัซซีฟิเคชันโดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.26 โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 3 เฟส ($I_{3\phi}$) ในเซตของ L และ NL จะถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นสามารถประมาณค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 3 เฟส ($I_{3\phi}$) จากสมการที่ (5.26) ได้ 2 ค่าดังรูป 5.26



รูปที่ 5.26 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต L และ NL ของกระแสลัดวงจร 3 เฟส ($I_{3\phi}$) โดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน

$$\begin{aligned}\mu_L(x = 293.3, a = 268, b = 293, c = 323) &= \frac{1}{c-b}(c-x) \\ &= \frac{1}{323-293}(323-293.3) \\ &= 0.99\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{NL}(x = 293.3, a = 293, b = 323, c = 360) &= \frac{1}{b-a}(x-a) \\ &= \frac{1}{323-293}(293.3-293) \\ &= 0.01\end{aligned}$$

ที่กระแสลัดวงจรเท่ากับ 293.3 mA ไม่ได้เป็นสมาชิกในเซตของ VL, M, NH, H และ VH ดังนั้นที่กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟส ($I_{3\phi}$) เท่ากับ 293.3 mA จะส่งผลให้เซตของ L และ NL จะถูกนำมาพิจารณาจากกฎของฟัซซีเป็นจริงอยู่ 2 กฎด้วยกันคือ

IF กระแสลัดวงจร = L THEN ระยะทางของสายส่ง = L

IF กระแสลัดวงจร = NL THEN ระยะทางของสายส่ง = NL

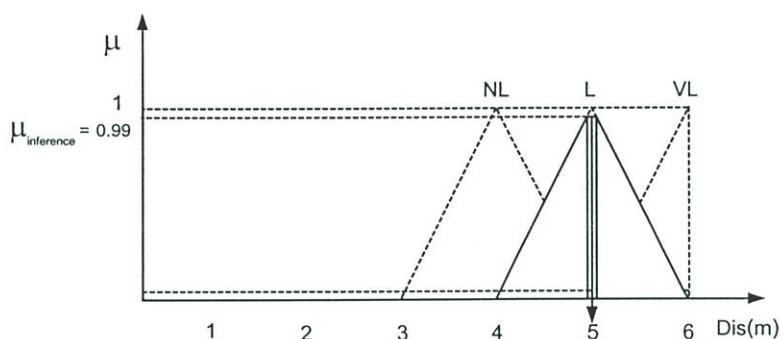
จากกฎการควบคุมทั้งสองสามารถประมาณตัวแปรเอาต์พุตด้วยค่า Max ตามหัวข้อที่ 5.5.3 จะได้ว่า

$$\mu_{\text{inference}} = \text{Max}(0.99, 0.01)$$

กฎที่ใช้ในการประมาณค่า ระยะทางของสายส่ง ในกรณีการ Defuzzification โดยวิธี Mean of Max คือ

IF กระแสลัดวงจร = L THEN ระยะทางของสายส่ง = L

เนื่องจากกฎทั้งสองข้อนี้ใช้หาค่าความจริงที่มีค่ากลางสูงสุด $\mu_{\text{output}} = \text{MOM}(0.99)$ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประมาณการของระยะทางของสายส่งได้ดังรูปที่ 5.27



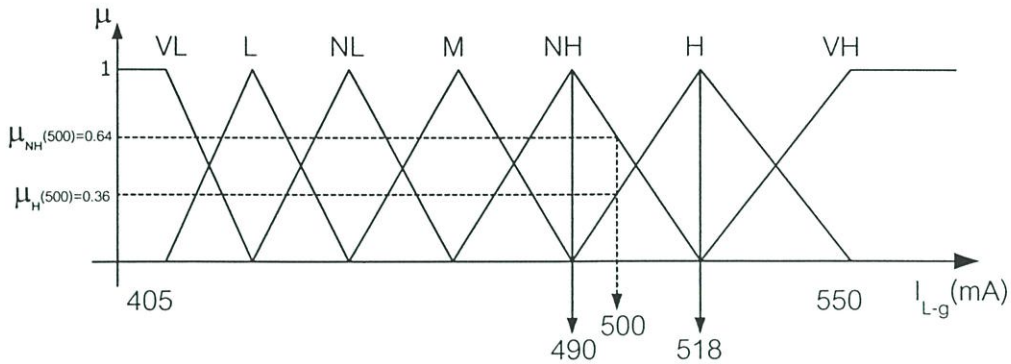
รูปที่ 5.27 Defuzzification แบบ Mean of Max ของระยะทางแบบ 3 เฟส

จากขั้นตอนการประมาณค่าเอาต์พุตในรูปที่ 5.27 โดยใช้วิธี Mean of Max จะได้ว่าค่าเอาต์พุตเป็นระยะทางได้ดังนี้

$$\text{ระยะทาง} = \frac{4.99 + 5.01}{2} = 5 \text{ เมตร}$$

จากตัวอย่างการคำนวณแบบฟัซซีดังแสดงตามขั้นตอนสามารถนำไปใช้ได้กับการคำนวณหาเอาต์พุตของฟัซซีคอนโทรลเลอร์โดยมีค่าอินพุตเป็นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลักษณะ 3 เฟสโดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของลักษณะ 3 เฟสนั้นมาคำนวณ

ตัวอย่างที่ 7 สมมุติให้เกิดการลัดวงจรแบบ 1 เฟส (I_{Lg}) เท่ากับ 500 mA ซึ่งจากการคำนวณกลับไปหาค่ากระแสลัดวงจรจะอยู่ในตำแหน่งที่ 1.71 เมตร สามารถนำมาดำเนินการฟัซซีฟิเคชันโดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.28 โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 1 เฟส (I_{Lg}) ในเซตของ NH และ H จะถูกนำมาพิจารณาดังนั้นสามารถหาค่าความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร 1 เฟส (I_{Lg}) ซึ่งเป็นอินพุต ตามสมการที่ (5.26) ได้ 2 ค่าดังรูป 5.28



รูปที่ 5.28 การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต NH และ H ของกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{L-g}) โดยใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน

$$\begin{aligned}\mu_{NH}(x = 500, a = 465, b = 490, c = 518) &= \frac{1}{c - b}(c - x) \\ &= \frac{1}{518 - 490}(518 - 500) \\ &= 0.64\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_H(x = 500, a = 490, b = 518, c = 550) &= \frac{1}{b - a}(x - a) \\ &= \frac{1}{518 - 490}(500 - 490) \\ &= 0.36\end{aligned}$$

ที่กระแสลัดวงจรเท่ากับ 500 mA ไม่ได้เป็นสมาชิกในเซตของ VL, L, NL, M, และ VH ดังนั้นที่กระแสลัดวงจรแบบ 1 เฟส(I_{L-g}) เท่ากับ 500 mA จะส่งผลให้เซตของ NH และ H จะถูกนำมาพิจารณาจากกฎของฟัซซีเป็นจริงอยู่ 2 กฎด้วยกันคือ

IF กระแสลัดวงจร = NH THEN ระยะเวลาของสายส่ง = NS

IF กระแสลัดวงจร = H THEN ระยะเวลาของสายส่ง = S

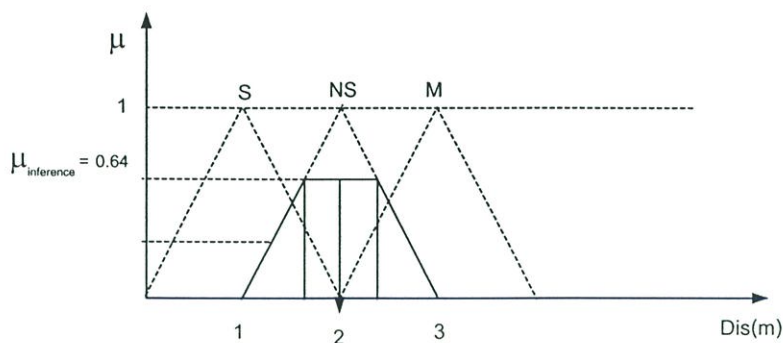
จากกฎการควบคุมทั้งสองสามารถประมาณตัวแปรเอาต์พุตด้วยค่า Max ตามหัวข้อที่ 5.5.3 จะได้

$$\mu_{inference} = \text{Max}(0.64, 0.36)$$

กฎที่ใช้ในการประมาณค่า ระยะเวลาของสายส่ง ในกรณีการ Defuzzification โดยวิธี Mean of Max คือ

IF กระแสลัดวงจร = NH THEN ระยะเวลาของสายส่ง = NS

เนื่องจากกฎข้อนี้ใช้หาค่าความจริงที่มีค่ากลางสูงสุด $\mu_{output} = \text{MOM}(0.64)$ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประมาณการของระยะเวลาของสายส่งได้ดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 Defuzzification แบบ Mean of Max ของระยะทางแบบ 1 เฟส

จากขั้นตอนการประมาณค่าเอาต์พุตในรูปที่ 5.29 โดยใช้วิธี Mean of Max จะได้ค่าเอาต์พุตเป็นระยะทางได้ดังนี้

$$\text{ระยะทาง} = \frac{1.64 + 2.36}{2} = 2 \text{ เมตร}$$

จากตัวอย่างการคำนวณแบบฟัซซีดังแสดงตามขั้นตอนสมมุติค่ากระแสลัดวงจรขนาด 500 มิลลิแอมป์แสดงให้เห็นได้ว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนจากระยะจริงเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ความคลาดเคลื่อน} &= 2 - 1.71 \\ &= 0.29 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

จากการคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.29 เมตรและเพื่อที่จะหาค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจจะน้อยกว่านี้ หรืออีกนัยหนึ่งแสดงถึงความแม่นยำอาจเพิ่มสูงขึ้นได้ จะใช้วิธีอินเฟอร์เรนซ์และการดีฟัซซิฟิเคชันแบบใหม่เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยในกรณีเดียวกันนี้ใช้การอินเฟอร์เรนซ์(inference)แบบ Max-Min และการดีฟัซซิฟิเคชัน(Defuzzification)แบบการหาค่าจุดศูนย์กลาง(Centroid) ที่กระแสลัดวงจรเท่ากับ 500 mA ไม่ได้เป็นสมาชิกในเซตของ VL, L, NL, M, และ VH ดังนั้นที่กระแสลัดวงจรแบบ 1 เฟส(I_{Lg}) จะส่งผลให้เซตของ NH และ H จะถูกนำมาพิจารณาจากกฎของฟัซซีเป็นจริงอยู่ 2 กฎด้วยกันคือ

IF กระแสลัดวงจร = NH THEN ระยะทางของสายส่ง = NS

IF กระแสลัดวงจร = H THEN ระยะทางของสายส่ง = S

จากกฎการควบคุมทั้งสองสามารถประมาณตัวแปรเอาต์พุตด้วยค่า Max-Min จะได้

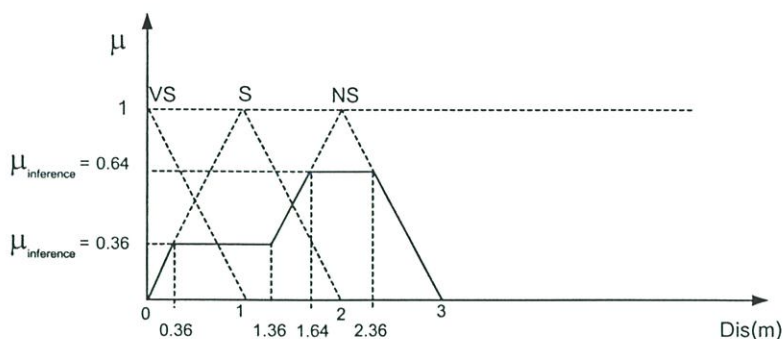
$$\mu_{\text{inference}} = \text{Max-Min}(0.64, 0.36)$$

กฎที่ใช้ในการประมาณค่า ระยะทางของสายส่ง ในกรณีการ Defuzzification โดยวิธี Centroid มีด้วยกันสองกฎ คือ

IF กระแสลัดวงจร = NH THEN ระยะทางของสายส่ง = NS

IF กระแสลัดวงจร = H THEN ระยะทางของสายส่ง = S

เนื่องจากกฎทั้งสองข้อนี้ใช้หาค่าความจริงของเอาต์พุตคือ $\mu_{\text{output}} = \text{Centroid}(0.64, 0.36)$ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประมาณการของระยะทางของสายส่งได้ดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 Defuzzification แบบ Centroid ของระยะทางแบบ 1 เฟส

จากขั้นตอนการประมาณค่าเอาต์พุตในรูปที่ 5.30 โดยใช้วิธี Centroid จะได้ค่าเอาต์พุตเป็นระยะทางได้ดังนี้

$$\text{ระยะทาง} = \frac{(0.36 \times 0.36) + (1.36 \times 0.36) + (1.64 \times 0.64) + (2.36 \times 0.64)}{0.36 + 0.36 + 0.64 + 0.64} = 1.58 \text{ เมตร}$$

จากตัวอย่างการคำนวณแบบพีซีดังแสดงตามขั้นตอนสมมุติค่ากระแสลัดวงจรขนาด 500 มิลลิแอมป์และใช้วิธีการหาค่าเอาต์พุตแบบหาค่าจุดศูนย์กลางแสดงให้เห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนจากระยะจริงเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ความคลาดเคลื่อน} &= 1.71 - 1.58 \\ &= 0.13 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

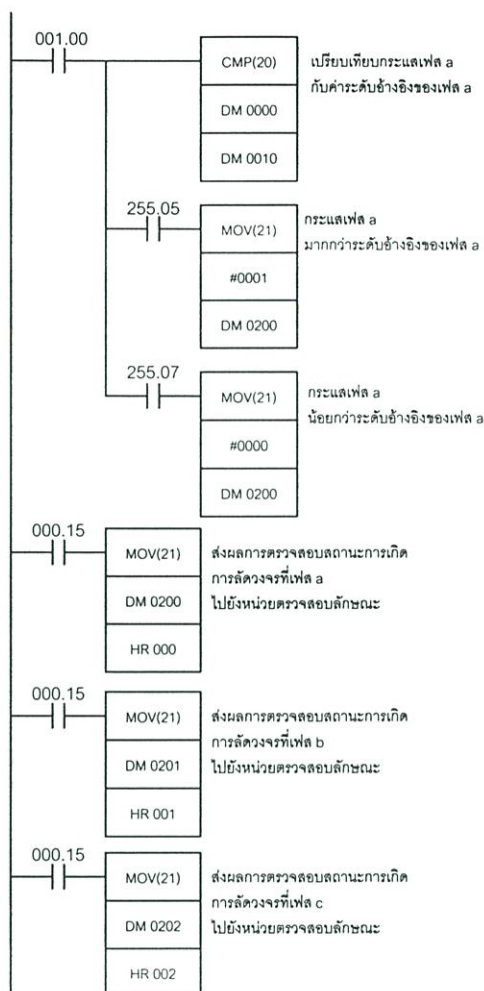
การคำนวณแบบพีซีดังแสดงตามขั้นตอนสมมุติค่ากระแสลัดวงจรขนาด 500 มิลลิแอมป์โดยใช้วิธีการคำนวณที่ต่างกันไปจะทำให้ได้ค่าเอาต์พุตที่ต่างกันไปโดยในการคำนวณจะเห็นได้ว่าการใช้วิธีการหาค่าเอาต์พุตโดยวิธีหาค่าจุดศูนย์กลางจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกว่าการใช้วิธีการหาค่าเอาต์พุตแบบการหาค่าเฉลี่ยสูงสุดซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนจากระยะจริงน้อยกว่า ซึ่งการหาค่าเอาต์พุตด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยสูงสุดสามารถให้ค่าในการบอกตำแหน่งเป็นโซนได้ โดยค่าที่ได้ยังอยู่ในขอบเขตที่กำหนดซึ่งสามารถยอมรับได้และยังประหยัดเวลาในการคำนวณของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (PLC) ที่มีความเร็วในการคำนวณต่ำอีกด้วย

5.7 โปรแกรมคำสั่งแลดเดอร์ของเครื่อง PLC (Ladder Program)

เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ถูกพัฒนาขึ้นมาบนพื้นฐานเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า "ไมโครโพรเซสเซอร์" (Microprocessor) มีพอร์ตอินพุตเอาต์พุตที่สามารถควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกได้และมีภาษาในการโปรแกรมที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวเรียกว่าแลดเดอร์ (Ladder diagram) ซึ่งดัดแปลงมาจาก Relay diagram จุดประสงค์ก็เพื่อจะให้ผู้ที่เคยใช้ระบบ

วิธีที่สามารถเขียนโปรแกรม Ladder diagram ได้ไม่ยากโดยอาศัยหลักการความเข้าใจเดิม นอกจากนี้แล้วเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ ยังรวมเอาฟังก์ชันการทำงานต่างๆ เช่นตัวตั้งเวลา ตัวนับ การหมุนวนข้อมูล การเคลื่อนย้ายข้อมูล การเปรียบเทียบข้อมูล และอื่นๆ จำนวนมากเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเขียนโปรแกรมที่มีความสลับซับซ้อน และข้อดีอีกประการคือ สามารถแก้ไขปรับเปลี่ยนโปรแกรมการทำงานได้ง่ายจึงเป็นเหตุให้เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ได้รับความนิยมในเวลาอันรวดเร็ว ส่วนการติดต่อสื่อสารกับเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ จะมีซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่สนับสนุนเพื่อพัฒนาโปรแกรมช่วยการติดต่อสื่อสารตัวอย่างเช่นโปรแกรมที่ชื่อ Syswin Ver. 3.4 ที่ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ Omron รุ่น C200HS ซึ่งโปรแกรมนี้เองสามารถเขียนและแก้ไขโปรแกรมแลตเตอร์ได้อย่างครอบคลุมอีกทั้งยังมีฟังก์ชันพิเศษที่ช่วยในการดูสถานะแบบเวลาจริง(Real Time)ขณะที่ PLC อยู่ในโหมดรัน(Run Mode)

สำหรับตัวอย่างการเขียนโปรแกรมภาษาแลตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.31 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่ากระแสที่เฟส a มีค่าปกติหรือไม่โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสเฟส a ที่รับมาได้(DM 0000) กับค่าระดับกระแสอ้างอิง(DM 0010) โดยฟังก์ชันพิเศษ CMP(20) ซึ่งจะถูกลังการโดยหน่วยสั่งการให้เปรียบเทียบกระแสที่เฟส a (แอดเดรส 00.100) กล่าวคือเมื่อหน่วยสั่งการให้เปรียบเทียบกระแสในเฟส a ส่งคำสั่งมาให้หน่วยเปรียบเทียบกระแสในเฟส a ฟังก์ชัน CMP(20) จะทำการเปรียบเทียบกระแสในเฟส a ที่อ่านมาได้กับระดับอ้างอิงแล้วตัดสินใจว่าเกิดการลัดวงจรในเฟส a หรือไม่ ซึ่งนำเงื่อนไขมากกว่าหรือน้อยกว่า(แอดเดรส 255.05 และ 255.07) ระดับอ้างอิงโดยตัดสินใจว่าเกิดการลัดวงจรจะนำค่าข้อมูลว่าเกิดการลัดวงจร(#0001) ที่เฟส a ไปยังหน่วยส่งผลการตรวจสอบและในกรณีเดียวกันตัดสินใจว่าไม่เกิดการลัดวงจรที่เฟส a จะนำค่าข้อมูลว่าไม่เกิดการลัดวงจร(#0000) ที่เฟส a ไปยังหน่วยส่งผลการตรวจสอบการเกิดการลัดวงจรโดยฟังก์ชัน MOV(21) ซึ่งในหน่วยส่งผลการตรวจสอบจะนำผลที่ได้จากการตรวจสอบของหน่วยตรวจสอบ(DM 0200) ไปยังหน่วยสั่งการให้วิเคราะห์กระแสลัดวงจร(HR 000) โดยจะถูกสั่งการโดยหน่วยอ่านข้อมูล(แอดเดรส 000.15) หน่วยส่งผลการตรวจสอบก็จะนำผลการตรวจสอบที่ได้ไปยังหน่วยวิเคราะห์ต่อไป โดยฟังก์ชัน MOV(21) และในลักษณะเดียวกันนี้จะมีหน่วยดังกล่าวกระทำกับเฟส b และเฟส c ด้วย โดยจะเรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นตอนการส่งผลการตรวจสอบสถานะ ดังแสดงตัวอย่างเป็นแลตเตอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 5.31



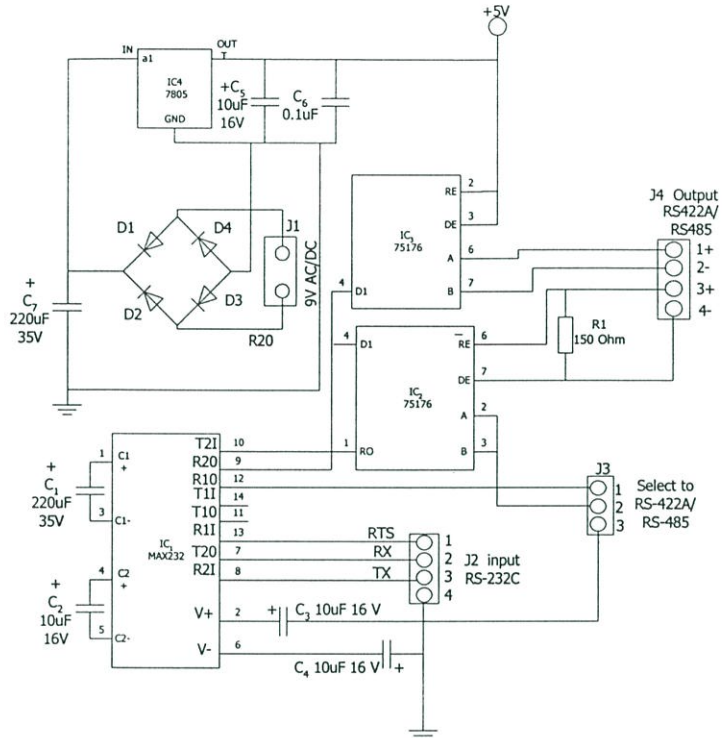
รูปที่ 5.31 ตัวอย่างโปรแกรมแลดเดอร์ใน PLC

5.8 โปรแกรมแสดงการประมาณการและทดสอบการติดต่อสื่อสาร

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อติดต่อกับเครื่องควบคุมบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยจะเขียนโปรแกรมบน Visual Basic 6.0 ซึ่งได้เขียนโปรแกรมแสดงตำแหน่งของการเกิดการผิดปกติในระบบจำลองในกรณีต่างๆบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและเชื่อมต่อระหว่างเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้โดยผ่านข้อกำหนดการสื่อสารมาตรฐาน RS422A ซึ่งมีหน้าที่แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์และคำนวณจาก PLC ในการบอกระยะทางและเก็บบันทึกลงในเครื่องคอมพิวเตอร์อีกด้วย

โปรแกรมแสดงการประมาณการเกิดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสของวิทยานิพนธ์นี้ นั้น ได้ทำการพัฒนาจากโปรแกรม Visual Basic 6.0 ให้แสดงถึงตำแหน่งกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นแบบเวลาจริงของเครื่องว่ามีประสิทธิภาพเพียงใดจากรูปที่ 5.32 โดยจะแสดงเฟสที่เกิดกระแสลัดวงจรในช่อง PHASE FAULT และตำแหน่งในการเกิดกระแสลัดวงจรเป็นโซนในช่อง FAULT ZONE ส่วนช่องในการแสดงสถานะในการรับส่งข้อมูลจะอยู่ในช่อง Status ในการเริ่มต้นโปรแกรมจะทำ

สัญญาณให้เป็นมาตรฐาน RS-422A หรือ RS-485 โดย RS-485 ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลแบบฮาร์ฟดูเพล็กซ์จะใช้สายสัญญาณ RTS มาทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของการสื่อสารภาคแหล่งจ่ายไฟก็จะใช้วงจรบริดจ์เรกติไฟล์และตัวเก็บประจุ C_7 สำหรับกรองแรงดันส่งผ่านไปให้ IC_4 ทำหน้าที่เป็นเรกกูเลเตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ไว้ที่ 5 โวลต์



รูปที่ 5.33 วงจรแปลงมาตรฐาน RS-232C เป็น RS-422A และ RS-485

บทที่ 6

การทดสอบการทำงานและผลการทดลอง

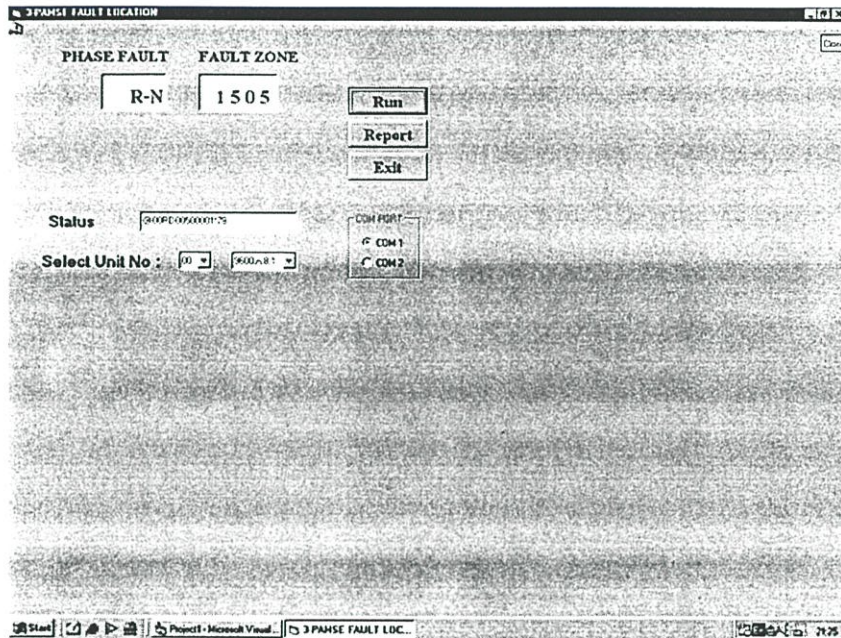
6.1 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองการประมาณระยะทางของตำแหน่งกระแสลัดวงจรไฟฟ้า 3 เฟสโดยเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถของเครื่องว่าสามารถทำได้ถูกต้องแม่นยำตามเงื่อนไขหรือไม่ และเพื่อทดสอบการติดต่อสื่อสารกันระหว่างเครื่องควบคุมแบบตรรกะกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และเนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่สะดวกในการให้ทดสอบกับระบบจริงของ กฟภ. ซึ่งอาจเกิดอันตรายหรือเกิดการผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. อันส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จึงได้ทำการจำลองค่ากระแสลัดวงจรบนชุดทดลองการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสและเชื่อมต่อกับเครื่องควบคุม PLC เพื่อทำการประมวลผลบน PLC แทนการทดสอบกับระบบจริงซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดกับระบบและเกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมากได้

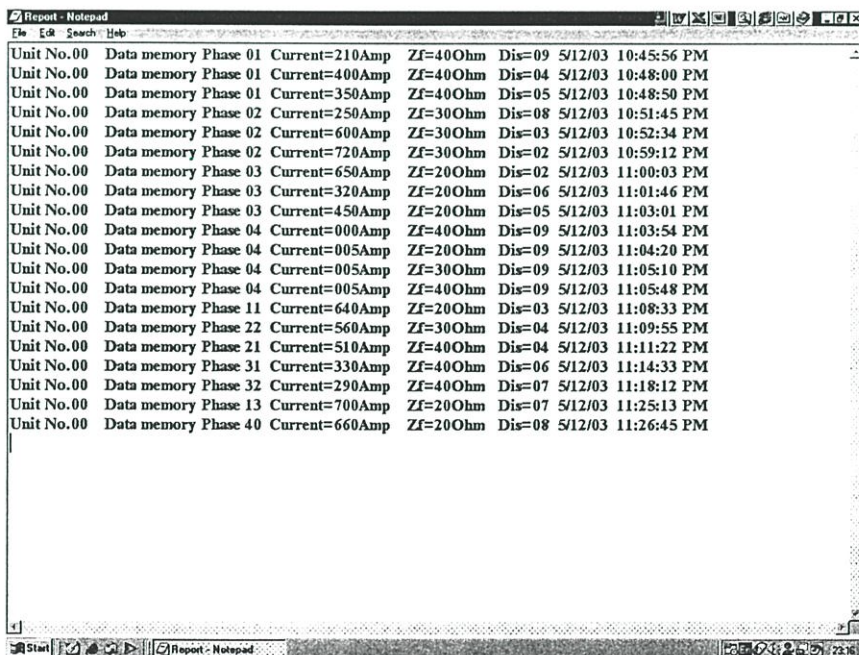
การทดลองเครื่องควบคุมแบบตรรกะโดยทำการทดลองในกรณีการเกิดกระแสลัดวงจรแบบ 1 เฟส(I_{L-G}) 2 เฟส(I_{L-L}) และสามเฟส($I_{3\phi}$) โดยการจำลองการเกิดกระแสลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามเฟสบนชุดทดลองการเกิดกระแสลัดวงจรโดยมีการกำหนดค่าแรงดันที่จ่ายให้กับสายส่งไฟฟ้าเท่ากับ 22 โวลต์และค่าความต้านทานที่จุดลัดวงจรเท่ากับ 40 โอห์ม ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่าเท่ากับ 7 โอห์มต่อเมตรซึ่งสายส่งไฟฟ้าในชุดทดลองมีความยาวทั้งหมด 6 เมตรทำให้การประมาณค่ากระแสลัดวงจรซึ่งจะทำโดยการจำลองเหตุการณ์ในกรณีต่างๆเช่น เมื่อเกิดการลัดวงจรที่เฟสกับกราวด์(I_{L-G}) เฟสกับเฟส(I_{L-L}) เฟสกับเฟสกับเฟส($I_{3\phi}$) โดยได้กำหนดช่วงของระยะทางการประมาณตำแหน่งของกระแสลัดวงจรได้ดังต่อไปนี้

- ตำแหน่งกระแสลัดวงจรอยู่ระหว่าง 0 เมตร ชุดแสดงผลจะแสดงหมายเลข "1"
- ตำแหน่งกระแสลัดวงจรอยู่ระหว่าง 0-1 เมตร ชุดแสดงผลจะแสดงหมายเลข "2"
- ตำแหน่งกระแสลัดวงจรอยู่ระหว่าง 1-2 เมตร ชุดแสดงผลจะแสดงหมายเลข "3"
- ตำแหน่งกระแสลัดวงจรอยู่ระหว่าง 2-3 เมตร ชุดแสดงผลจะแสดงหมายเลข "4"
- ตำแหน่งกระแสลัดวงจรอยู่ระหว่าง 3-4 เมตร ชุดแสดงผลจะแสดงหมายเลข "5"
- ตำแหน่งกระแสลัดวงจรอยู่ระหว่าง 4-5 เมตร ชุดแสดงผลจะแสดงหมายเลข "6"
- ตำแหน่งกระแสลัดวงจรอยู่ระหว่าง 5-6 เมตร ชุดแสดงผลจะแสดงหมายเลข "7"

ชุดแสดงผลจะแสดงเป็นตัวเลขในชุดแสดงผล 7 ส่วนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ผลิตภัณฑ์ Omron รุ่น C200HS [10] และยังสามารถรับ-ส่งข้อมูลกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลอีกด้วย โดยการเขียนโปรแกรมแสดงตำแหน่งกระแสลัดวงจรบนเครื่องคอมพิวเตอร์และสามารถเก็บข้อมูลการเกิดกระแสลัดวงจรขนาดต่างๆลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้



รูปที่ 6.1 โปรแกรมการแสดงผลตำแหน่งกระแสลัดวงจรบนเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 6.2 การเก็บข้อมูลต่างๆบนเครื่องคอมพิวเตอร์ในไฟล์ Notepad

6.2 การทดลอง

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของเครื่องว่าสามารถทำได้ถูกต้องแม่นยำตามเงื่อนไขหรือไม่โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสลัดวงจรในลักษณะต่างๆซึ่งค่าดังกล่าวนี้ในทางปฏิบัติจะเปลี่ยนแปลงหรือแปรผันตามลักษณะการเกิดกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆส่วนในการทดลองได้กำหนดค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดกระแสลัดวงจรเท่ากับ 40 โอห์ม และกำหนดตำแหน่งกระแสลัดวงจรตามขนาดของกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ จากนั้นทำการลัดวงจรด้วยตัวต้านทานด้านทาน 40 โอห์ม ซึ่งในลักษณะการลัดวงจร 1 เฟสจะทดลองลัดวงจรโดยต่อตัวต้านทานระหว่างเฟสหนึ่งเฟสใดกับกราวด์ แล้วสังเกตค่าการประมาณที่ได้แล้วจดบันทึกผล ส่วนลักษณะการลัดวงจรแบบ 2 เฟสจะทดลองโดยการนำตัวต้านทานต่อเชื่อมกันระหว่างเฟสคู่ใดคู่หนึ่งแล้วสังเกตค่าการประมาณที่ได้แล้วจดบันทึกผล ส่วนลักษณะการลัดวงจรแบบ 3 เฟสจะทดลองโดยการนำตัวต้านทาน 3 ตัวมาต่อกับทั้ง 3 เฟสส่วนปลายที่เหลืออีกข้างของตัวต้านทานต้องต่อถึงกันด้วยจากนั้นสังเกตค่าการประมาณที่ได้แล้วจดบันทึกผล จากนั้นทำการทดลองในลักษณะนี้ที่ตำแหน่งต่างๆแล้วทำการบันทึกผลผลการทดลองที่ได้ลงในตารางที่กำหนด

การทดสอบความแม่นยำของเครื่องจะสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์รีพีทาทิบิลิตี้ถ้ามีสูงแสดงว่าจำเป็นต้องปรับปรุงความมีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของเครื่อง ส่วนความถูกต้องของเครื่องจะสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัส ถ้าเปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสมีคะแนนต่ำกว่า 100% แล้ว แสดงว่าจำเป็นต้องปรับปรุงโปรแกรมเพื่อให้เครื่องสามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องต่อไป

นิยาม รีพีทาทิบิลิตี้(Repeatability)[13] คือ ความผันแปรภายใต้เงื่อนไขในการวัดด้วยเครื่องมือเดียวกัน และพนักงานคนเดียวกัน ซึ่งก็คือ ค่าความแปรปรวนที่ทำซ้ำๆ กันกล่าวคือ

$$\text{ค่ารีพีทาทิบิลิตี้} = R$$

$$\text{ที่ } R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_j^2$$

$$\text{โดย } \sigma_j^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}, \text{ ซึ่งเป็นการวัดค่าความผันแปรซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง}$$

เมื่อ \bar{x}_j คือ ค่าเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ j

x_{ji} คือ ค่าที่ทดลองครั้งที่ ji

m คือ จำนวนตัวอย่างในการทดลอง

n คือ จำนวนครั้งการทดลอง

$$\text{เปอร์เซ็นต์รีพีทาทิบิลิตี้} = \text{เปอร์เซ็นต์ } R = \frac{R}{\text{ความผันแปร}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณค่ารีพีทเทบิลิตี้จากตารางที่ 6.1

$$\begin{aligned}\sigma_j^2 &= \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1} \\ &= \frac{(7-7)^2}{5-1} + \frac{(6-6)^2}{5-1} + \frac{(6-6)^2}{5-1} + \frac{(5-5)^2}{5-1} + \\ &\quad \frac{(5-5)^2}{5-1} + \frac{(4-4)^2}{5-1} + \frac{(4-4)^2}{5-1} + \frac{(3-3)^2}{5-1} + \\ &\quad \frac{(3-3)^2}{5-1} + \frac{(2-2)^2}{5-1} + \frac{(2-2)^2}{5-1} + \frac{(2-2)^2}{5-1} + \\ &\quad \frac{(2-2)^2}{5-1} + \frac{(1-1)^2}{5-1} = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_j^2 \\ &= \frac{1}{15} [0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0] \\ &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{เปอร์เซ็นต์ } R &= \frac{R}{\text{ความผันแปร}} \times 100 \text{ เปอร์เซ็นต์} \\ &= \frac{0}{15} \times 100 = 0 \text{ เปอร์เซ็นต์}\end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์รีพีทเทบิลิตี้จะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าระบบที่ทำการวัดนั้นไม่มีความแปรปรวนในระบบ

นิยาม ค่าไบอัส คือ ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวังของเครื่องมือซึ่งแตกต่างจากค่าอ้างอิง กล่าวคือ

$$\text{ค่าไบอัส} = \text{ค่าเฉลี่ยของการวัด} - \text{ค่าอ้างอิง}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไบอัส} = \frac{\text{ค่าไบอัส}}{\text{ความผันแปร}} \times 100$$

ตัวอย่างแสดงการคำนวณค่าไบอัสจากตารางที่ 6.1

$$\begin{aligned}\text{ค่าไบอัส} &= (7-7)+(6-6)+(6-6)+(5-5)+(5-5)+(4-4)+(4-4)+(3-3)+(3-3)+(3-2) \\ &\quad +(2-2)+(2-2)+(2-2)+(1-2)+(1-1)\end{aligned}$$

$$= 2$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไบอัส} = \frac{2}{15} \times 100 = 13.3 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

เปอร์เซ็นต์ไม่ไบอัส = $100 - \text{เปอร์เซ็นต์ไบอัส} = 100 - 13.3 = 86.7$ เปอร์เซ็นต์

จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ไม่ไบอัสจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าระบบที่ทำการวัดนั้นมีค่าความใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดหรือว่าค่าอ้างอิง

ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองกระแสลัดวงจร 1 เฟส(I_{L-g}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแส

ขนาดกระแสลัดวงจรที่กำหนด (mA)	ตำแหน่งการประมาณที่กำหนด	ตำแหน่งการประมาณที่วัดได้				
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5
410	7	7	7	7	7	7
420	6	6	6	6	6	6
430	6	6	6	6	6	6
440	5	5	5	5	5	5
450	5	5	5	5	5	5
460	4	4	4	4	4	4
470	4	4	4	4	4	4
480	3	3	3	3	3	3
490	3	3	3	3	3	3
500	3	2	2	2	2	2
510	2	2	2	2	2	2
520	2	2	2	2	2	2
530	2	2	2	2	2	2
540	1	2	2	2	2	2
550	1	1	1	1	1	1
ผลสรุปทางสถิติ						
เปอร์เซ็นต์รีพีทะบิลิตี	จำนวนครั้งที่วัดได้เหมือนกัน/จำนวนค่าที่ทดสอบทั้งหมด					0
เปอร์เซ็นต์ไม่ไบอัส	จำนวนครั้งที่วัดได้เหมือนและถูกต้อง/จำนวนค่าที่ทดสอบทั้งหมด					93.3

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองกระแสลัดวงจร 2 เฟส(I_{L-L}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแส

ขนาดกระแสลัดวงจรที่ กำหนด (mA)	ตำแหน่งการ ประมาณที่กำหนด	ตำแหน่งการ ประมาณที่วัดได้				
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5
310	7	7	7	7	7	7
350	6	6	6	6	6	6
400	5	5	5	5	5	5
450	4	5	5	5	5	5
500	4	4	4	4	4	4
550	3	3	3	3	3	3
600	3	3	3	3	3	3
650	2	2	2	2	2	2
700	2	2	2	2	2	2
750	2	2	2	2	2	2
800	2	2	2	2	2	2
850	1	2	2	2	2	2
900	1	1	1	1	1	1
950	1	1	1	1	1	1
ผลสรุปทางสถิติ						
เปอร์เซ็นต์รีพีทะบิลิตี้	จำนวนครั้งที่วัดได้เหมือนกัน/จำนวนค่าที่ทดสอบทั้งหมด					0
เปอร์เซ็นต์ไม่ไบอัส	จำนวนครั้งที่วัดได้เหมือนและถูกต้อง/จำนวนค่าที่ทดสอบทั้งหมด					85.7

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองกระแสลัดวงจร 3 เฟส($I_{3\phi}$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแส

ขนาดกระแสลัดวงจรที่ กำหนด (mA)	ตำแหน่งการ ประมาณที่กำหนด	ตำแหน่งการ ประมาณที่วัดได้				
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5
270	7	7	7	7	7	7
290	6	6	6	6	6	6
310	6	5	5	5	5	5
330	5	5	5	5	5	5
350	4	4	4	4	4	4
370	4	4	4	4	4	4
390	4	3	3	3	3	3
410	3	3	3	3	3	3
430	3	3	3	3	3	3
450	2	2	2	2	2	2
470	2	2	2	2	2	2
490	2	2	2	2	2	2
510	1	1	1	1	1	1
530	1	1	1	1	1	1
550	1	1	1	1	1	1
ผลสรุปทางสถิติ						
เปอร์เซ็นต์รีพีทอะบิลิตี้	จำนวนครั้งที่วัดได้เหมือนกัน/จำนวนค่าที่ทดสอบทั้งหมด					0
เปอร์เซ็นต์ไม่ไบอัส	จำนวนครั้งที่วัดได้เหมือนและถูกต้อง/จำนวนค่าที่ทดสอบทั้งหมด					86.7

6.3 สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 6.1-6.3 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนไปเมื่อมีค่ากระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนไปซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้สามารถประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจรได้ ดังแสดงให้เห็นโดยการทดลองเปอร์เซ็นต์รีพีทหะบิลิตี้และความไม่ไบอัส[13] ของเครื่องประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสลัดวงจร โดยการทดสอบเปอร์เซ็นต์รีพีทหะบิลิตี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความแม่นยำของเครื่องถ้าเปอร์เซ็นต์รีพีทหะบิลิตี้ มีค่าสูงแล้วแสดงว่าจำเป็นต้องปรับปรุงความมีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของเครื่อง ส่วนเปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความถูกต้องของเครื่อง ถ้าเปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสมีคะแนนต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์มากๆแล้วแสดงว่าอาจจะต้องปรับปรุงโปรแกรมเพื่อให้เครื่องสามารถวิเคราะห์ได้ถูกต้องจากผลการทดลองตารางที่ 6.1-6.3 จะเห็นได้ว่ามีเพียงค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของแต่ละตารางเท่านั้นที่มีคะแนนต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าวได้โดยการแก้ไขโปรแกรมให้เหมาะสมและถูกต้องโดยการปรับเปลี่ยนกฎการควบคุมหรือกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้มีความครอบคลุมของกระแสลัดวงจรและระยะทางของสายส่งไฟฟ้าเพื่อที่จะให้ได้ค่าที่เหมาะสม ดังแสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดในการทดลองจะมาจากค่าความไม่ไบอัสที่ต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากโปรแกรมในการทำงานนั่นเอง

สำหรับการรับ-ส่งข้อมูล และตรวจสอบสถานะการทำงานกับเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้โดยผ่านการแปลงสัญญาณแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232C เป็นแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-422A ทดสอบโดยการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครื่องควบคุม PLC จากการทดลองพบว่าสามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้แต่ละชุดได้โดยสมบูรณ์ และสามารถดูรูปภาพการของอุปกรณ์ขณะทำการทดลองได้ที่ภาคผนวก ข.

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีชซีในการประยุกต์ใช้กับเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ เพื่อใช้ในการประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟสได้อย่างถูกต้องดังแสดงให้เห็นถึงค่าเปอร์เซ็นต์รีพีทะบิลิตี้และเปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสซึ่งปัจจุบันการประมาณการตำแหน่งกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้นจะใช้ประสบการณ์ของผู้ควบคุมในสถานีนั่นๆเป็นผู้ประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจร อันเนื่องมาจากพนักงานประจำสถานีไฟฟ้าจะมีประสบการณ์โดยตรงอีกทั้งยังทราบข้อมูลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในสายส่งของสถานีไฟฟ้าเป็นอย่างดี ที่ผ่านมาประสบการณ์ของพนักงานประจำสถานีไฟฟ้าก็ไม่สามารถประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรได้ถูกต้องเสมอไป สาเหตุเนื่องจากปัจจัยหลายประการที่ทำให้การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรผิดพลาดไปเช่น ความผิดพลาดของเครื่องมือวัดหรือการไม่ทราบถึงลักษณะของการจ่ายกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า การประมาณระยะทางของตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบพีชซีโดยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ โดยการนำข้อมูลต่างๆของสถานีไฟฟ้าจริงมาแทนค่าและคำนวณกระแสลัดวงจรในสายส่งไฟฟ้าจริงเช่นค่าระดับแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า ซึ่งถ้านำมาคำนวณและออกแบบสร้างตัวควบคุมพีชซีแล้วนั้นจะทำให้ได้ผลการทำงานของเครื่องควบคุมเสมือนกับการคำนวณและออกแบบกับระบบจำลองของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาโดยอ้างอิงจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการประมาณการตำแหน่งกระแสไฟฟ้าลัดวงจรโดยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้สามารถประมาณระยะทางของตำแหน่งกระแสลัดวงจรได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและทดลองในบทที่ 5 และ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนและวิธีการในการสร้างตัวประมาณการแบบพีชซีลอจิกเพื่อประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรในระบบสายส่งที่จำลองแบบขึ้นมานั้นได้เป็นไปตามการคำนวณทางทฤษฎีระบบไฟฟ้าจริงจึงสามารถนำไปเทียบเคียงกับระบบการจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. ได้เพียงแต่นำค่าพารามเตอร์ต่างๆเช่นค่าระดับแรงดันในการส่งจ่ายไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า โดยทาง กฟภ. ได้แสดงเป็นลำดับอิมพีแดนซ์มาให้แล้วดังแสดงในตารางสี่คว้นอิมพีแดนซ์ของสาย ($Z=R+jX$) ในภาคผนวก ค. ซึ่งไม่เหมือนกับค่าอิมพีแดนซ์ในชุดทดลองที่คิดเฉพาะค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเนื่องจากมีความยาวของ

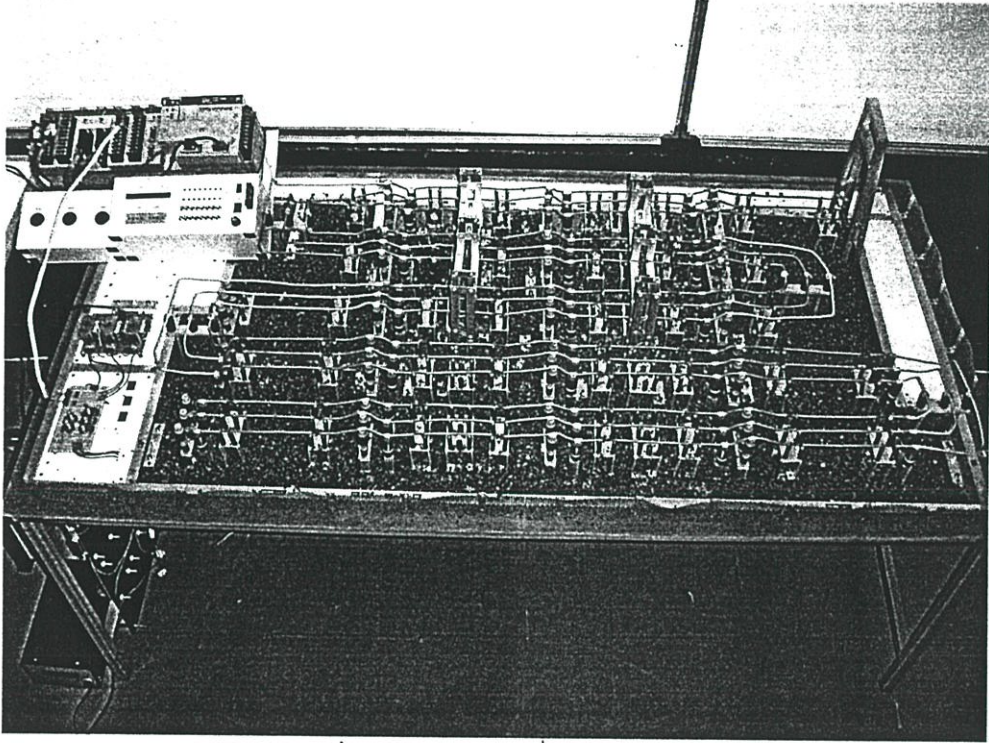
สายส่งไฟฟ้าที่สั้นกว่าและระดับแรงดันในการส่งจ่ายที่น้อยกว่า มาทำการคำนวณตามขั้นตอนในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรแทนที่ค่าพารามิเตอร์นั้นๆ แล้วนำค่ากระแสลัดวงจรที่ได้มาทำการออกแบบสร้างตัวประมาณแบบฟัซซี เช่นการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร (input) ระยะทางหรือความยาวของสายส่งไฟฟ้า(output) โดยอาศัยความสามารถในการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรของผู้ควบคุมสถานีไฟฟ้านั้นๆ ร่วมกับผู้ออกแบบสร้างตัวประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซีเพื่อที่จะปรับเปลี่ยนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร หรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระยะทาง เพื่อให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ส่วนวิธีการในการออกแบบตัวประมาณการแบบฟัซซีนั้นจำเป็นต้องใช้ความชำนาญของผู้ออกแบบเองอาทิเช่น การเลือกรูปแบบในการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระแสลัดวงจร ระยะทาง วิธีการฟัซซิฟิเคชัน(Fuzzification) การสร้างฐานความรู้(Rule base) และยังรวมไปถึงการดีฟัซซิฟิเคชัน(Defuzzification) ว่าจะใช้วิธีการใดจึงจะเหมาะสมกับการนำไปใช้กับสถานีนั้นๆ เช่น การเปลี่ยนวิธีการดีฟัซซิฟิเคชันจากวิธีหาค่ากลางสูงสุด(Mean of Max) ซึ่งเหมาะกับการบอกตำแหน่งเป็นโซนเป็นการหาค่าจุดศูนย์กลางของฟัซซี(Centroid) โดยมีความละเอียดในการหาข้อมูลมากกว่า แต่ใช้เวลาในการคำนวณและมีความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมรองรับมากขึ้นแต่สามารถบอกตำแหน่งในการเกิดกระแสลัดวงจรได้ละเอียดเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

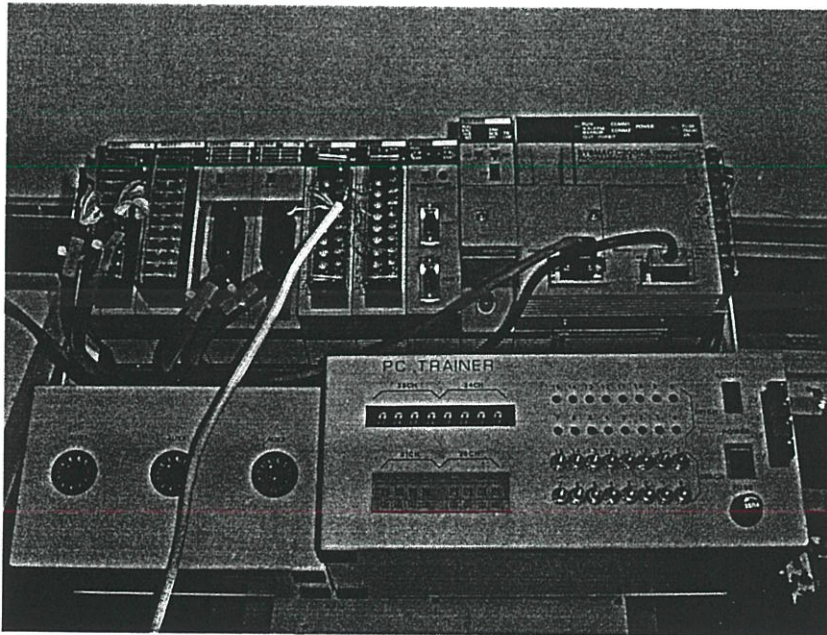
- [1] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] Turan G, Electric Power Distribution System Engineering, 1st Ed. Singapore : McGraw-Hill Book Company, Inc, 1986.
- [3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2543, เอกสารประกอบการฝึกอบรม “พนักงานประจำสถานีไฟฟ้า 115 เควี”, กรุงเทพฯ : กองฝึกอบรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [4] Li-Xin W., Adaptive Fuzzy System and Control, The United States of America : Prentice-Hall International, Inc. 1994.
- [5] H. J. Zimmermann, “Fuzzy set theory and its applications”, Kluwer Academic Pub, 1991.
- [6] C.T. Lin and C.S George Lee, Neural Fuzzy System, USA Prentice-Hall International, 1996.
- [7] J. M. Zurada, Introduction to Artificial Neural Systems, West Publishing Company, Singapore, 1992.
- [8] กฤษดา วิศวะวิธานนท์, PC ตัวควบคุมซีเคิร์นซ์ หลักการทำงานและการประยุกต์, กรุงเทพฯ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [9] พรจิต ประทุมสุวรรณ และคณะ, ทฤษฎีการใช้งาน(PC/PLC), กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์เรือนแก้ว.
- [10] Omron co. ltd., User’s Manual Programmable Logic Controller C200H.
- [11] กฤษดา ใจเย็น, 2540, “เครื่องแปลงพอร์ตอนุกรม RS-232 ให้เป็น RS-422/485”, เซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 168 : หน้า 38-43.
- [12] สุธี รุกขพันธ์ และคณะ. “การประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบพีซีด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 พ.ศ. 2544 หน้า 19-23 Vol.1.
- [13] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, การวิเคราะห์ระบบการวัด, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537.
- [14] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2543. เอกสารประกอบการฝึกอบรม”วิศวกรใหม่”. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : กองฝึกอบรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [15] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2531. การจัดอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าของ กฟภ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : ศูนย์ฝึกอบรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [16] มงคล ทองสงคราม, การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



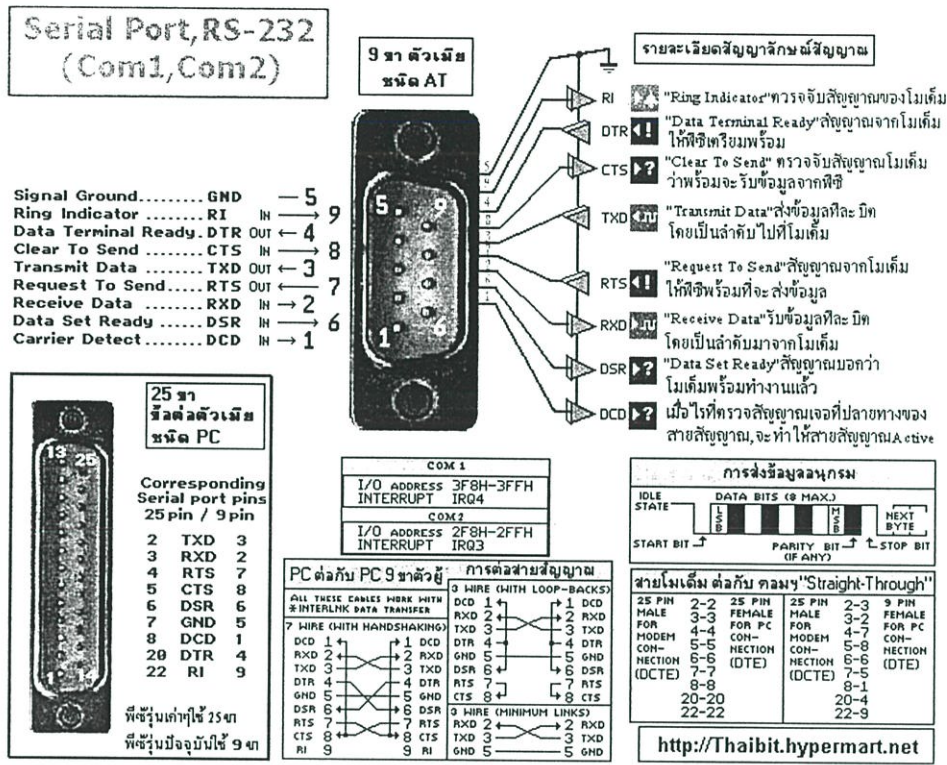
รูปที่ ก.1 ชุดทดลองที่ใช้ในการวิจัย



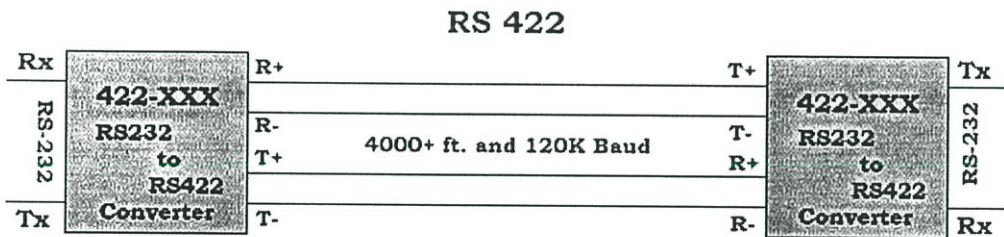
รูปที่ ก.2 เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ของ OMRON รุ่น C200HS

ภาคผนวก ข.

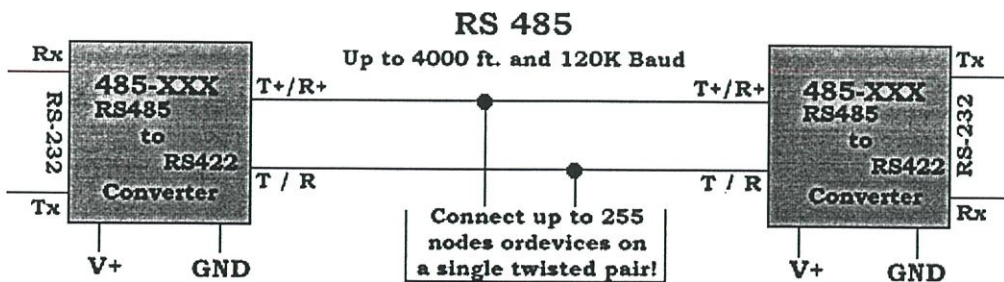
การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าและรูปแบบการแปลงสัญญาณ



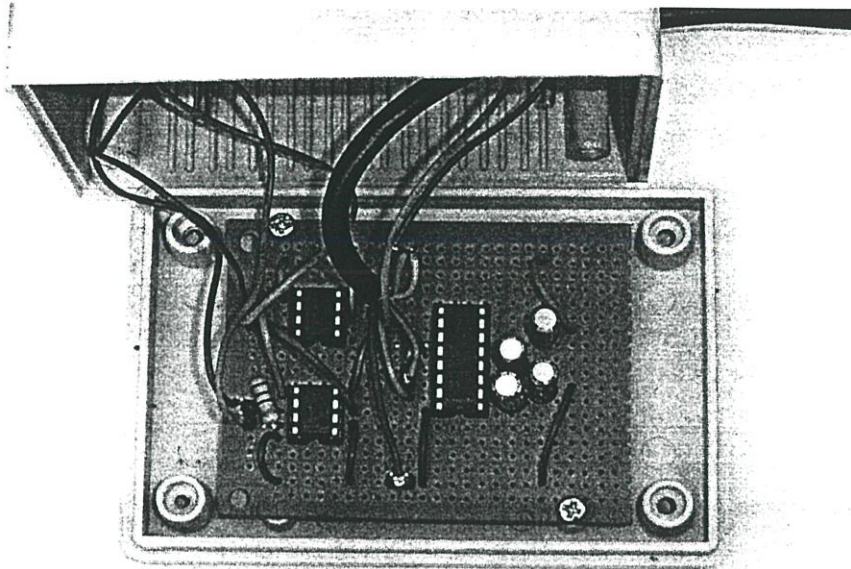
รูปที่ ข.1 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232C



รูปที่ ข.2 รูปแบบการแปลงสัญญาณมาตรฐาน RS-232C เป็นสัญญาณมาตรฐาน RS-422A



รูปที่ ข.3 รูปแบบการแปลงสัญญาณมาตรฐาน RS-232C เป็นสัญญาณมาตรฐาน RS-485



รูปที่ ข.4 ภาพการต่อวงจรแปลงสัญญาณ RS-232C เป็น RS-422A หรือ RS-485

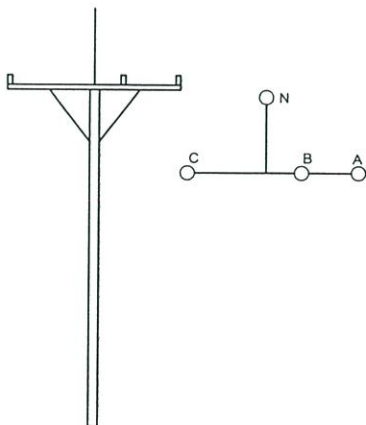
ภาคผนวก ค.

ตารางซีเคิร์ฟัฒนซ์อิมพีแดนซ์ของสาย

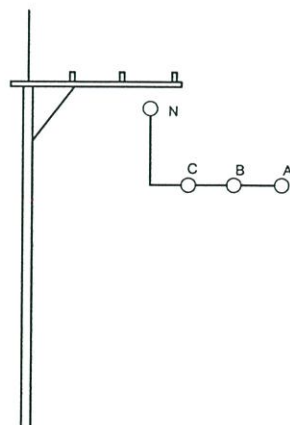
ตารางซีเคิร์ฟัฒนซ์อิมพีแดนซ์ของสายหุ่มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดสำหรับสายจำหน่วย 22 กิโลโวลต์
ชนิดวงจรเดี่ยว

Cond. Size mm ²	Line Type	Sequence	Source impedance		Attenuation db/km	Velocity Km/sec *E+05	Wavelength ohm/km	Resistance ohm/km	Reactance ohm/km	Suscep tance S/km *E-06
			Magnitude ohm	Angle degree						
50	1	Zero	1133.30	-15.25	0.0037319	1.9932	3986.30	0.939530	1.595300	1.4416
		Positive	528.71	-31.76	0.0073798	2.2886	4557.30	0.763930	0.380690	3.0534
	2	Zero	1184.60	-14.89	0.0035594	2.0382	4076.40	0.983300	1.639900	1.3463
		Positive	511.60	-32.43	0.0076911	2.2540	5080.00	0.763930	0.358570	3.2310
	3	Zero	1167.10	-14.98	0.0036198	2.0169	4033.90	0.939700	1.630400	1.3816
		Positive	512.86	-32.29	0.0076524	2.2533	4506.60	0.763930	0.363110	3.2158
120	1	Zero	1024.10	-8.83	0.0021036	2.0146	4029.30	0.498800	1.567100	1.5143
		Positive	379.66	-21.16	0.0039432	2.6790	5357.90	0.321470	0.352970	3.3122
	2	Zero	1096.60	-8.57	0.0019912	2.0655	4131.00	0.497190	1.611900	1.4026
		Positive	361.93	-22.09	0.0041630	2.6601	5320.10	0.321480	0.330850	3.5216
	3	Zero	1075.8	-8.65	0.0020378	2.0372	4074.40	0.499040	1.602100	1.4500
		Positive	364.05	-21.89	0.0041331	2.6531	5306.30	0.321470	0.335390	3.5054
185	1	Zero	1018.50	-7.08	0.0016838	2.0121	4024.20	0.391860	1.553800	1.5448
		Positive	341.14	-16.12	0.0028406	2.7771	5554.10	0.214350	0.339760	3.4519
	2	Zero	1037.50	-6.86	0.0015900	2.0643	4128.50	0.390210	1.598600	1.4279
		Positive	322.74	-17.01	0.0030165	2.7669	5533.80	0.214360	0.317640	3.6790
	3	Zero	1052.20	-6.93	0.0016304	2.0348	4069.50	0.392120	1.588900	1.4781
		Positive	325.03	-16.82	0.0029921	2.7567	5513.40	0.214350	0.322180	3.6629

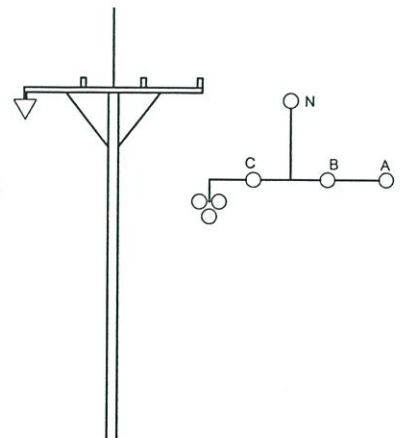
Line Type 1



Line Type 2



Line Type 3



ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิจัยอันเป็นส่วนหนึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการแสดงดังต่อไปนี้

- [1] สุธี รุกขพันธุ์, วิทยา ทิพย์สุวรรณพร, สมพล รัตนไพบูลย์, ทวีพล ชื้อสัสดี และ ยุทธพงศ์ ทัพผดุงค์, “การประมาณระยะทางตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบพีซีด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 2544.
- [2] V. Tipsuwanporn, S. Rukkaphan, V. Kongratana, A. Numsomran and Y. Tuppadung. “Neurofuzzy Estimation for Fault Location Based on PLC”. Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems. (16th Korea Automation Control Conference) Korea, 2001.

๕

การประมาณระยะทางตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซี่ด้วย เครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้

Fuzzy Logic Estimation for Fault Location using Programmable Logic Controller

ศุภี รุกขพันธุ์¹ วิชา ทิพย์สุวรรณพร¹ สมพล รัตนไพบูลย์¹ ทวีพล ชื้อสัคย์¹ ยุทธพงศ์ ทัพผดุง²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร (02) 326-7346-7 ต่อ 103, โทรสาร (02) 326-7346-7 ต่อ 103

² การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เลขที่ 200 ถ.งามวงศ์วาน เขต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

E-mail : ktvittay@kmitl.ac.th, sutheeme@yahoo.com

บทคัดย่อ

การแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากกระแสลัดวงจรด้วยความรวดเร็วจะช่วยลดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าการธุรกิจและอุตสาหกรรมทำให้เกิดเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายเพิ่มขึ้น ในบทความนี้นำเสนอการประมาณการหาระยะทางของตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซี่ โดยนำทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลังและค่าความต้านทานดินของบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์เป็นข้อมูลอ้างอิงและนำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีของฟัซซี่ลอจิกมาเขียนโปรแกรมในรูปแบบของแลคเตอร์ลงในเครื่องควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (PLC) นอกจากนี้เครื่องควบคุมที่แอลซียังถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรมเพื่อบันทึกข้อมูลและสามารถทำการแก้ไขฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่ได้ด้วยซึ่งได้นำระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นกรณีศึกษา

ABSTRACT

Fast fault clearing reduces effect to consumers, which also increases stability and reliability. This paper presents the fuzzy logic estimation for fault location by using Electrical Power System theory and local ground impedance as database. For programming inform of ladder diagram base on PLC. Moreover, The Programmable Logic Controller is connected with the computer via serial port in order to record data and it can change fuzzy membership functions also. The case study in this paper referred to the distribution lines of Provincial Electricity Authority (PEA).

Keyword : fuzzy logic, PLC, fault location

1. คำนำ

บทความนี้ได้นำเสนอแนวทางการประมาณหาระยะทางของตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซี่ทำงานบนเครื่องควบคุมที่แอลซี ซึ่งใช้ในการบอกการประมาณการตำแหน่งของการเกิดกระแสลัดวงจรและ

เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อจัดทำฐานข้อมูลและสถิติการเกิดกระแสลัดวงจร รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้เป็นฐานข้อมูลของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่ในเครื่องที่แอลซีและรายงานผล โดยการส่งสัญญาณผ่านพอร์ต RS232C และแปลงเป็น RS422[1] จากคอมพิวเตอร์มายังเครื่องที่แอลซีเพื่อให้ได้ระยะทางในการสื่อสารที่มากขึ้น ซึ่งโปรแกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์นี้สร้างขึ้นด้วย Microsoft Visual Basic 6.0[2] ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์98 นอกจากนั้นยังสามารถตรวจสอบข้อมูลได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เดียวกันด้วยคุณสมบัติODBC(Open Data Base Connectivity) ของวินโดวส์ การทำงานของเครื่องที่แอลซีจะใช้วิธีการเขียนโปรแกรมแลคเตอร์ที่สัมพันธ์กับฐานข้อมูลบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะสามารถตรวจสอบสถานะและโอนถ่ายข้อมูลได้ตลอดเวลา

บทความนี้ได้นำเสนอแนวทางการประมาณหาระยะทางตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซี่ โดยอ้างอิงระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นกรณีศึกษา ซึ่งปัจจุบันระบบจำหน่ายของกฟภ. ได้จัดระบบเป็นแบบเรเดียล[3] เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องที่ระบบต้นทางไฟฟ้าก็จะดับหมดทั้งฟีดเคอร์ ระบบการจ่ายไฟแบบนี้จะมีความเชื่อถือได้(Reliability)ต่ำ ดังนั้นการหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดสาเหตุกระแสไฟฟ้าขัดข้องและการแก้ไขที่รวดเร็ว จะช่วยลดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าการธุรกิจและอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนในการหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดสาเหตุกระแสไฟฟ้าขัดข้องในระบบจำหน่ายโดยการประมาณการแบบฟัซซี่ สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักได้ดังนี้คือ การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดต่างๆในระบบจำหน่ายและประมาณการแบบฟัซซี่

2.1 การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดต่างๆ

สำหรับบทความนี้จะใช้ซึ่งเกิด โลมโคโระแกรมของสถานีควบคุมการจ่ายไฟฟ้าสะเคาดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า

2.2 ฟัชชันเพื่อการจำลองการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร

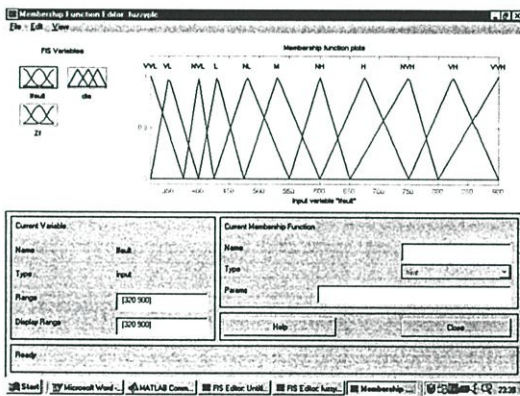
การใช้ฟัชชัน[6]เพื่อจำลองการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร สำหรับบทความนี้ได้นำโปรแกรม MATLAB ซึ่งมี Toolbox เพื่อใช้จำลองและสร้างตัวควบคุมแบบฟัชชัน มาช่วยจำลองตัวประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรของบทความนี้ขึ้น โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3 การสร้างฟังก์ชันในความเป็นสมาชิกฟัชชัน

การสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก(Membership Function) ของฟัชชันนั้นกำหนดให้ ค่ากระแสลัดวงจรแบบ เฟส-ดิน และ ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจรเป็นความเป็นสมาชิกของอินพุตและความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเป็นระยะทางหรือความยาวของสายเคเบิลคั้งในรายละเอียดแต่ละความเป็นสมาชิกดังต่อไปนี้

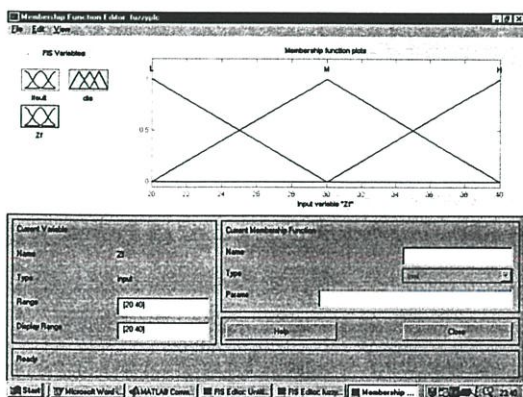
2.3.1 ความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจรแบบ เฟส-ดิน

การกำหนดความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจรแบบ เฟส-ดิน ซึ่งสามารถเพิ่มลดความเป็นสมาชิกตามความเหมาะสมเพื่อหาความเป็น



รูปที่ 2 ความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจรแบบจุดเฟส-ดิน

รูปที่ 2 ความเป็นสมาชิกของค่ากระแสลัดวงจรแบบจุดเฟส-ดิน



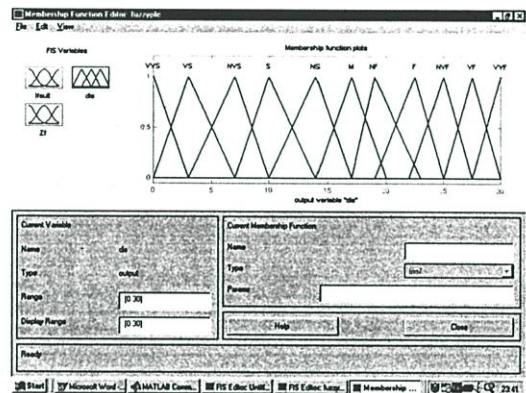
รูปที่ 3 ความเป็นสมาชิกของค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร

2.3.2 ความเป็นสมาชิกของค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจร

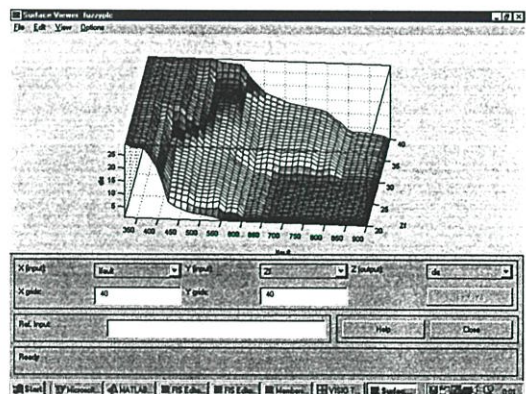
การกำหนดความเป็นสมาชิกของค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจร ซึ่งสามารถเพิ่มลดความเป็นสมาชิกตามความเหมาะสมเพื่อหาความเป็นสมาชิกของฟัชชันได้เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 3

2.3.3 ความเป็นสมาชิกของระยะทางของสายเคเบิล

การกำหนดความเป็นสมาชิกของระยะทางหรือความยาวของสายเคเบิล ซึ่งสามารถเพิ่มลดความเป็นสมาชิกตามความเหมาะสมเพื่อหาความเป็นสมาชิกของฟัชชัน[7] ได้เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความเป็นสมาชิกของระยะทางหรือความยาวความสามารถและสมรรถนะของของสายเคเบิลความยาว



รูปที่ 5 พื้นผิวความสามารถและสมรรถนะของตัวประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจร

2.4 การสร้างฐานความรู้แบบฟัชชัน

ในส่วนของฐานความรู้จะประกอบไปด้วยกฎที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งกฎต่างๆนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอินพุต ซึ่งในการประมาณแบบฟัชชันในบทความนี้ประกอบด้วยทั้งหมด 33 กฎ โดยมีอินพุตที่ 1 คือค่ากระแสลัดวงจรจำนวน 11 ค่ากับอินพุตที่ 2 คือค่าความต้านทานดินมี 3 ค่าทำให้เกิดกฎจำนวน 33 กฎ

2.5 การดีฟัซซิฟิเคชัน(Defuzzification)

การดีฟัซซิฟิเคชัน(Defuzzification) เป็นกระบวนการแปลงตัวแปร ฟัซซีเอทท์ให้เป็นค่า Crisp Set ซึ่งในโปรแกรม MATLAB ได้มีการดีฟัซซิฟิเคชันหลายวิธี สำหรับการจำลองของบทความนี้ได้ใช้วิธีจุดศูนย์กลาง(Centroid method) เป็นการประมาณค่าของตัวแปรเอทท์ทุกโศกโดยการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ของกฎทุกข้อที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าศูนย์ ดังสมการที่ 10

$$z^* = \frac{\int \mu_C(z) \bullet z dz}{\int \mu_C(z) dz} \tag{10}$$

จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซี ทำให้ทราบถึงความสามารถและสมรรถนะในการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร ดังรูปที่ 5

2.6 การประยุกต์เครื่องควบคุมแบบตรรกเพื่อการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร

พื้นที่ผิวแสดงความสามารถและสมรรถนะจากการใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการวิเคราะห์และจำลองจนกระทั่งได้สมรรถนะที่เหมาะสมที่สุดแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำให้โปรแกรมความสัมพันธ์ต่างของพื้นที่ผิวแสดงความสามารถและสมรรถนะลงบนเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมได้ เริ่มต้นโดยกำหนดช่วงของระยะทางเพื่อประมาณตำแหน่งเป็น 4 ช่วงโดยใช้ความสัมพันธ์ในรูปที่ 5 แล้วโปรแกรมความสัมพันธ์จากรูปที่ 5 ลงบนเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้ต่อจากนั้นเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องควบคุมแบบตรรก ขั้นสุดท้ายเขียนโปรแกรมสนับสนุนการจำลองเหตุการณ์บนเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้แบบเวลาจริง

2.7 พัฒนาโปรแกรมเพื่อสนับสนุนการจำลองเหตุการณ์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อสนับสนุนการจำลองเหตุการณ์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยจะเขียนโปรแกรมบน Visual Basic 6.0 ซึ่งได้เขียนโปรแกรมสนับสนุนการจำลองเหตุการณ์ในกรณีต่างๆบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและเชื่อมต่อระหว่างเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมได้โดยผ่านข้อกำหนดการสื่อสารมาตรฐาน RS232[1] สำหรับโปรแกรมสนับสนุนการจำลองเหตุการณ์ในกรณีต่างๆนั้นได้ออกแบบความสามารถในการจำลองเหตุการณ์ซึ่งแสดงรายละเอียดของการจำลองดังต่อไปนี้

2.8 การรับส่งข้อมูลเพื่อปรับตั้งค่าต่างๆที่เป็นของเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมได้

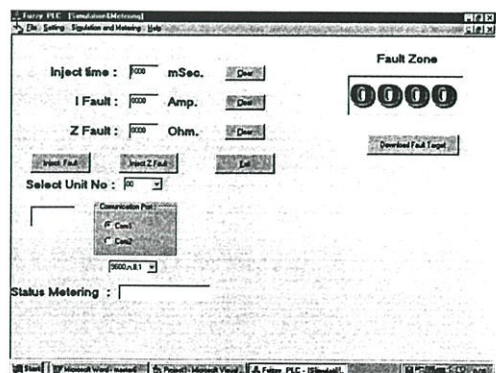
การรับส่งข้อมูลไปยังเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมนั้นมีจุดประสงค์เพื่อทำการปรับตั้งค่าที่เรากำหนดลงไป ใน DATA MEMORY[1] ของเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมได้ โดยจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการใช้งานเครื่องประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรแล้วเป็นระยะเวลาบางๆบางครั้งเมื่อมีความจำเป็นต้องปรับปรุงฐานความรู้ของเครื่องดังกล่าวก็สามารถกระทำได้ง่ายเนื่องจากเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมได้มีโปรโตคอล[1] ที่เป็นมาตรฐานซึ่งถ้าเราใช้เครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมของผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้อย่างกว้างขวางแล้วนั้นก็จะมิใช่ซอฟต์แวร์[2] ที่สนับสนุนเพื่อพัฒนาโปรแกรมช่วยการคิดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องควบคุมทางตรรกที่โปรแกรมได้กับมนุษย์(Man Machine Interface)

2.9 การจำลองเหตุการณ์การประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจร

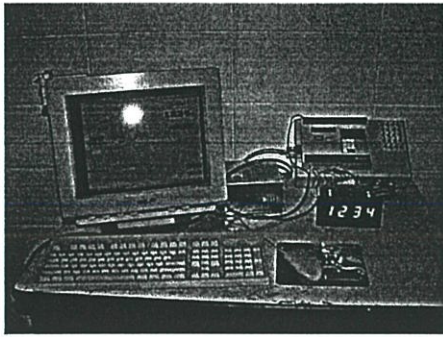
การจำลองเหตุการณ์กระแสลัดวงจรแบบ เฟส-คิน ของโรงงานนั้น ได้ทำการพัฒนาให้โปรแกรมเพื่อให้สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นและยังสามารถตั้งเวลาช่วงที่เกิดกระแสลัดวงจร[4] ได้เพื่อทดสอบความสามารถในการประมาณตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบเวลาจริงของเครื่องว่ามีประสิทธิภาพและมีความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใด และยังสามารถตั้งค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจรเพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจรซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่างเช่นสภาพอากาศคุณสมบัติของดินภูมิประเทศของพื้นที่นั้นๆ

3. การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองจะทำโดยการจำลองกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆโดยการป้อนข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ได้แสดงในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ามีการการประมาณการระยะทางตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซีโดยแบ่งเป็น 4 โซนด้วยกันในแต่ละโซนจะมีระยะห่างกัน 6 กิโลเมตรวิเคราะห์หาตำแหน่งที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั้นมีความใกล้เคียงกับการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีระบบไฟฟ้ากำลัง(Power System) ซึ่งมีความสลับซับซ้อน



รูปที่ 8 การจำลองเหตุการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องประมาณการตำแหน่งกระแสลัดวงจร



รูปที่ 9 แสดงชุดทดลองการประมาณการหาระยะทางตำแหน่ง
กระแสลัดวงจรแบบฟัซซี่

การลดค่าความคลาดเคลื่อนสามารถทำได้โดยใช้ประสบการณ์ของพนักงาน เพื่อนำไปสร้างกฎ และสร้างสมาชิกของอิมพีแดนซ์ของดินเป็นอินพุตร่วมกับสมาชิกของกระแสลัดวงจร เพื่อให้ทราบค่าอิมพีแดนซ์ของดินบริเวณที่วิเคราะห์ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ก็จะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล สำหรับบทความนี้จะใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของดินเท่ากับ 40 โอห์ม ซึ่งโดยปกติแล้ว กฟภ.จะใช้ค่าเท่ากับ 40 หรือ 25 โอห์มในการคำนวณการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่และภูมิประเทศที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

ตารางแสดงผลการทดลอง

I fault	Zf	Fault of Zone
350	20	4
350	30	4
350	35	4
350	40	4
500	20	1
500	30	3
500	35	3
500	40	4
600	20	1
600	30	1
600	35	2
600	40	3
750	20	1
750	30	1
750	35	2
750	40	2

4. สรุป

จากบทความนี้แสดงให้เห็นว่าแนวทางการประมาณการระยะทางตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซี่เป็นแนวทางหนึ่งในการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่ทำให้เกิดสาเหตุกระแสไฟฟ้าขัดข้องได้ และจะช่วยลดระยะเวลาในการหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดสาเหตุกระแสไฟฟ้าขัดข้องได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งในปัจจุบันในเขตความรับผิดชอบของ กฟภ. ในถิ่นทุรกันดารระบบจำหน่ายต้องผ่านป่าไม้และภูเขา ต้องใช้พนักงานขับรถยนต์สำรวจระบบจำหน่ายเพื่อหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดสาเหตุกระแสไฟฟ้าขัดข้องทำให้สิ้นเปลืองเวลา จากการวิเคราะห์จะช่วยพนักงาน กฟภ. ทราบตำแหน่งที่ทำให้เกิดสาเหตุที่ทำให้กระแสไฟฟ้าขัดข้องได้ ทำให้ลดเวลาในการหาตำแหน่งดังกล่าวได้รวดเร็ว และลดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sysmac way Host link units operation manual, Omron electronics, JAPAN, 1990.
- [2] Paul Bonner, PC MAGAZINE VISUAL BASIC UTILITYS, Ziff-Daus press emery ville, California, 1993.
- [3] กองฝึกอบรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "การจัดอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าของ กฟภ.", หน้า 64-67, 2531.
- [4] B. RAVINDRANATH, M. CHANDER AND C.S.JHA, "POWER-SYSTEM PROTECTION and SWITCHGEAR, John Wiley & - Sons., pp. 3-34, 1987.
- [5] D. William, Jr. Stevenson, "Element of Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc., pp. 275-336, 1982.
- [6] J.Ross, "FUZZY LOGIC WITH ENGINEERING - APPLICATIONS", McGraw-Hill, Inc., pp. 130-150, 1995.
- [8] รัชนี้ สุภักพานิช และ กิตติ ไพฑูรย์วัฒน์กิจ, "การประยุกต์ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่นิวรอลไลเซนชัน", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 15, หน้า 45-53, ฉบับที่ 1 สิงหาคม 2541.



ร.ศ. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร อาจารย์ระดับ 8
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด
กระบัง งานวิจัยการควบคุมระบบด้วยคัจฉิลล



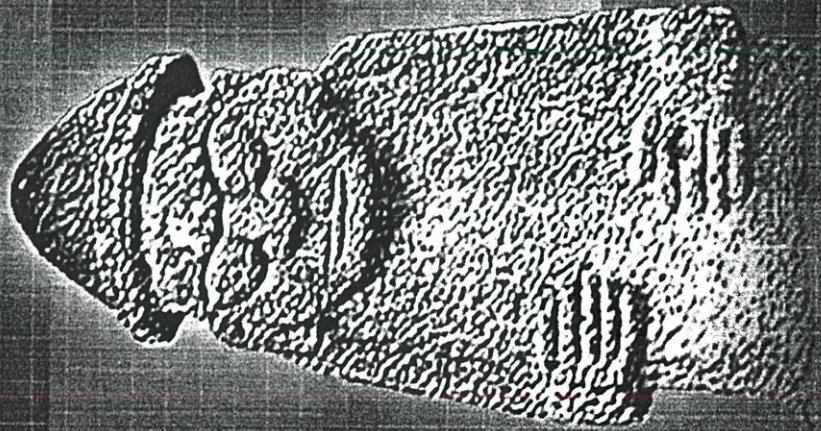
นาย สุธี รุกขพันธุ์ นักศึกษาระดับปริญญาโท
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด
กระบัง งานวิจัยเรื่องวิเคราะห์ตำแหน่งกระแสลัด

วงจรของระบบไฟฟ้ากำลัง

International Conference
on Control, Automation and Systems

ICCAS 2001

October, 17~21, 2001
Cheju National University, Jeju Island, Korea



<http://www.iccas.org>



October, 17~21, 2001
Cheju National University,
Jeju Island, Korea

Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Table of Contents

Author Index

Search This CD-ROM

CD-ROM Help

EXIT



Institute of Control,
Automation and Systems Engineers, Korea

Neurofuzzy Estimation for Fault Location Based on PLC

V. Tipsuwanporn, S. Rukkaphan, V. Kongratana, A. Numsomran and Y. Tuppadung *
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
 Tel: (66-2) 326-7346 Ext.102, (66-34) 324-129, E-mail: ktvittay@kmitl.ac.th, sutheeme@yahoo.com
 * Electrical System Training Section, Provincial Electricity Authority, Bangkok, Thailand

Abstract : Generally, the application of Programmable Logic Controller (PLC) is emphasized on the Process Control. This paper presents Neurofuzzy application, Which can estimate the distance to a fault by means of PLC and based up on the Electrical Power System theory and ground resistance. The case study refers to the distribution lines of the Provincial Electricity Authority (PEA). Also, the thesis is supposed to be of much benefit: saving time both to go to the scene and to clear fault, reducing unpleasant impacts on customers and stabilizing reliability of the distribution lines.

Keywords: Neurofuzzy, PLC, Fault location

1. Introduction

The distribution line of PEA has supplied the voltage level at 22 and 33 kV to consumer and mostly arraignment of the distribution line to increasing reliability and stability of system is Open Loop Schemes. Which each feeders are Radial Schemes and installed Load Break Switch at tie line as shown in Fig. 1.

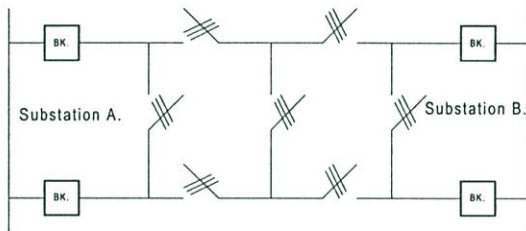


Fig. 1. The Open-Loop Schemes.

An immediate synergy can be found between fuzzy and neural control. The former exploits an important feature of fuzzy system, that is the capability to build the rule base by acquiring the knowledge from human experts (human-friendly approach). On the other hand, neural networks (NN's) are trained with a suitable set of data samples (Computer-friendly approach), although without taking advantage from available human knowledge. The objective of the Neurofuzzy Estimation for Fault Location are to assist line crews in locating[1] both momentary and permanent faulted line sections, to provide immediate notification of outage and to enhance control of crews during outage.

2. Fault Location Determination

The fault location design can be divided into three parts such as the following:

2.1 Fault Calculation

For this papers referred the single line diagram of Ubonrachathanee Substation is in Fig.2 on a base of 25 MVA, 22kV[2].

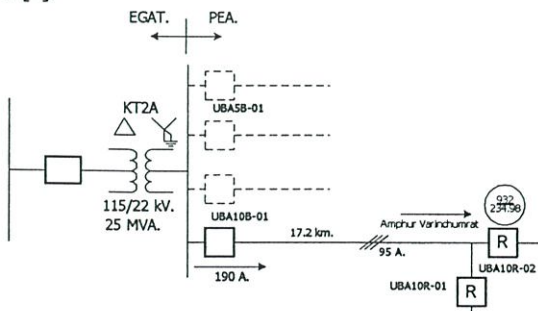


Fig. 2. The Single line Diagram of Ubonrachathanee Substation.

$$I_{base} = \frac{KVA_{base}}{\sqrt{3}KV_{base}} = \frac{25,000}{\sqrt{3} \times 22} = 656 \text{ A} \quad (1)$$

$$Z_{base} = \frac{(MVA_{base})^2}{MVA_{base}} = \frac{(22)^2}{25} = 19.36 \text{ } \Omega \quad (2)$$

The fault current at busbar was informed by Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) and able to fine impedance (Z_1 = Positive Sequence, Z_2 = Negative Sequence and Z_0 = Zero Sequence) of system from Power Plant to 22 kV busbar of PEA are

At Busbar :

$$I_{3\phi} = 2,380 \text{ A}$$

$$I_{\phi-G} = 3,154 \text{ A}$$

$$I_{3\phi} = \frac{V_{pu} \times I_{base}}{Z_{1pu}} \text{ A} \quad (3)$$

$$Z_{1pu} = \frac{V_{pu} \times I_{base}}{I_{3\phi}} \text{ pu} \quad (4)$$

$$= \frac{1 \times 656}{2,380} = 0.27563 \text{ pu}$$

$$I_{\phi-G} = \frac{3 \times V_{pu} \times I_{base}}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)_{pu}} \text{ A} \quad (5)$$

$$(Z_1 + Z_2 + Z_0)_{pu} = \frac{3 \times V_{pu} \times I_{base}}{I_{\phi-G}} \text{ A} \quad (6)$$

$$= \frac{3 \times 1 \times 656}{3,154} = j0.62397 \text{ pu}$$

To determine the fault current at Feeder UBA10R-01 referred to the cable technical data (Bare Aluminum Conductor Type, Double Circuits Arangment and Size=95 sq.mm.) and for this paper assume the distance estimation between 22 kV Busbar and Recloser is 17.2 km.

For fault current calculation;
 The cable sequence impedance are

$$Z_1 = Z_2 = 0.396144 + j0.371552 \text{ } \Omega / \text{km}$$

$$Z_0 = 0.692144 + j2.709221 \text{ } \Omega / \text{km}$$

The fault current calculation of each points on the cable were determined by multiply the cable impedance with the desire distance and plus impedance as follow $I_{3\phi}$:

$$\begin{aligned}
 Z_{1total} &= j0.27563 + \frac{(0.396144 + j0.371552) \times 17.2}{19.36} \\
 &= 0.351946 + j0.605728 \\
 &= 0.703862 \angle 60^\circ \Omega \\
 I_{3\phi} &= \frac{V_{pu} \times I_{base}}{Z_{1pu}} \text{ A} \\
 &= \frac{1 \times 656}{0.703862} = 932 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\phi-G}, I_{\phi-Gmin} : \\
 (Z_1 + Z_2 + Z_o)_{total} &= j0.62397 + \frac{2(0.396144 + j0.371552) \times 17.2}{19.36} \\
 &\quad + \frac{(0.692144 + j2.710922) \times 17.2}{19.36} \\
 &= 1.318813 + j3.692692 \\
 &= 3.921068 \angle 70^\circ \Omega \\
 I_{\phi-G} &= \frac{3 \times V_{pu} \times I_{base}}{(Z_1 + Z_2 + Z_o)_{pu}} \text{ A} \\
 &= \frac{3 \times 1 \times 6536}{3.921068} \\
 &= 502 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

To determine the minimum line to ground fault ($I_{\phi-Gmin}$) able to calculate as Eq. 9, But $I_{\phi-Gmin}$ depending on Z_f (between 0 and 40 Ω). In this paper used the Z_f between 20 and 40 Ω . Such as Example The calculation for $I_{\phi-Gmin}$, at $Z_f = 40 \Omega$.

Then $3Z_f = 3 \times 40 = 120 \Omega$

or $\frac{120}{19.36} = 6.198 \text{ pu}$

$$\begin{aligned}
 I_{\phi-Gmin} &= \frac{3 \times V_{pu} \times I_{base}}{(Z_1 + Z_2 + Z_o + 3Z_f)_{pu}} \text{ A} \\
 &= \frac{3 \times 1 \times 656}{1.318813 + j3.692629 + 6.198} \\
 &= 234.98 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$I_{\phi-Gmin}$ calculated based on $Z_f = 20, 30$ and 40Ω as shown in Fig. 3.

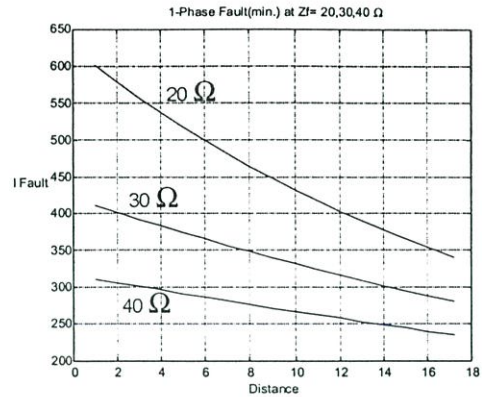


Fig. 3. The Minimum Single Line to Ground are depending on Z_f .

2.2 Neurofuzzy Approach

Recently, knowledge representation combining neural network [3],[4] with fuzzy logic[5] seems a promising approach in artificial intelligence. The main advantage of neural networks is fast computation due to parallel processing. Therefore, many researchers have applied neural networks not only as a database but also as an inference engine. Another advantage of neural networks is that it has mature learning algorithms. For example, the Back-Propagation (BP) learning algorithm and the learning vector quantization algorithm are most popular approaches for learning internal representation. The BP algorithm can to some extent approximate a fuzzy controller mapping by repeatedly updating the weights. But it has serious problems-adding a new rule, removing a useless rule or modifying a bad rule will be difficult; i.e. it contradicts the aforementioned second property of a good fuzzy rule base. In other words, the approach only suits static rule base. In the following, we shall recommend an intuitive knowledge representation for fuzzy rules. It can suit both static and dynamical rule bases. As shown in Fig. 4, only three layers are required.

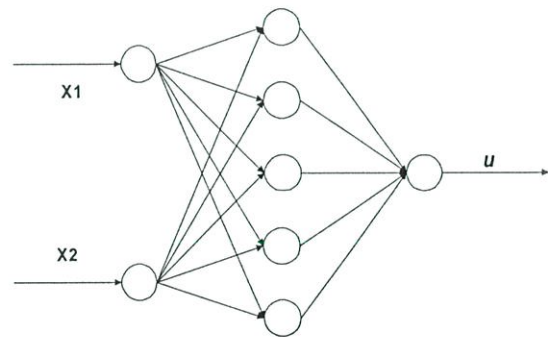


Fig.4. The configuration of Neurofuzzy.

The nodes in the first layer just transmit input values to the next layer directly. The second-layered nodes are used to compute firing strength for fuzzy rules. Firstly, we must define membership functions. In the second layer, the membership functions used most often are the Gaussian or triangular functions. The Gaussian function is given by

$$g_G(x) = \exp \left[-\frac{1}{2\sigma} (x-w)^2 \right] \tag{10}$$

Where σ is called the *width* of the Gaussian functions because the larger the value of σ is, the more the Gaussian spreads out, and w is called the *center*. The triangular function is

$$g_T(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x-w|}{b} & \text{if } |x-w| < b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{11}$$

Where b and w are the half-base length and base center of a triangular function, respectively. Both (10) and (11) achieve maximum value (=1.0) while $x = w$. Note that no matter which of the two membership function is used, it is in fact a function of $|x - w|$ and the larger the $|x - w|$ is, the smaller the membership value is.

For an n -input system, we define the second-layer input as $|x - w|$ for $1 \leq i \leq n$, which is similar to the distance measure in Kohonen's feature map. A basic structure of a node in Neurofuzzy is shown in Fig. 5.

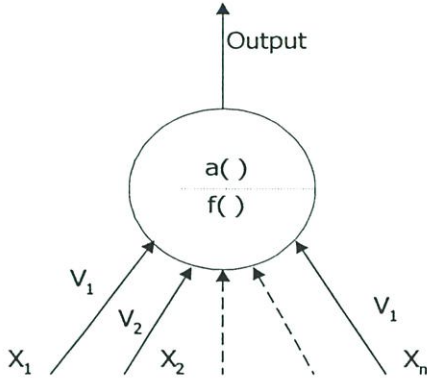


Fig. 5. Basic structure of a node in a neural network

In the conventional approach, the net input of a node is given by

$$\begin{aligned}
 \text{Net - input} &= f(x_1, \dots, x_n; w_1, \dots, w_n) \\
 &= \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (12)
 \end{aligned}$$

The output of the node is an activation value

$$\text{Output} = a(f) \quad (13)$$

Where $a(\cdot)$ denotes the activation function; for example a sigmoid function.

In Neurofuzzy, we define the function f in the second layer by

$$\begin{aligned}
 f(x_1, \dots, x_n; w_1, \dots, w_n) \\
 = \max(|x_1 - w_1|, \dots, |x_n - w_n|) \quad (14)
 \end{aligned}$$

and

$$\text{Output} = g_i(f) \text{ or } g_G(f) \quad (15)$$

The outputs of nodes in layer 2 are the firing strengths for fuzzy rules, which correspond to the result of applying max-min compositional operation. The number of the nodes in the second layer represents number of the fuzzy rules.

For an on-line system, inference speed is the most important issue. Hence we assume that the consequences of the rules are singleton sets; i.e. their membership functions are simply pulses rather than triangular or Gaussian functions. The singleton set is defined as

$$s(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x = v \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

There is only one node in the third layer. Assume v_i is the weight connecting the i th node in layer 2 and the node in output layer. Then the weights are recorded as

$$v_i = a_i \quad (17)$$

Where a_i is the action part of the i th rule. The third-layer node achieves a defuzzification job. Assume the output for the i th node in layer 2 is u_i , that is the firing strength of the i th rules. The node output in layer 3 is given by

$$u = \frac{\sum u_i \cdot a_i}{\sum u_i} \quad (18)$$

Thus the fuzzy inference result is extracted from Neurofuzzy [5].

2.3 Programmable Logic Controller Application

Referred Table II transfers to PLC. The advantage of PLC is easy programming, not complicate for network communication and High reliability. This paper will applied Nerofuzzy estimation the distance to a fault based on PLC as show in fig. 6. The purpose of the Simulation as shown in Fig. 6 to evaluate the repeatability and applications RS 422 and RS 485 for networking communication.

TABLE I
Training Data

Training Data		
SLG current (Amp.)	Fault Impedance (Ohm.)	Fault Distance (km.)
600.82	20	1.0
558.28	20	3.0
499.26	20	6.0
432.10	20	10.0
390.19	20	13.0
341.79	20	17.2
410.65	30	1.0
392.19	30	3.0
365.67	30	6.0
332.09	30	10.0
309.14	30	13.0
280.46	30	17.2
311.10	40	1.0
301.29	40	3.0
286.45	40	6.0
267.05	40	10.0
253.16	40	13.0
234.16	40	17.2

Table II
Experiment Result

Input Data		Result
SLG current (Amp.)	Fault Impedance (Ohm.)	Estimated Fault Distance (km.)
490	20	5.85
450	20	8.71
400	20	12.29
375	20	12.97
345	20	13.94
490	25	-0.87
450	25	2.72
400	25	7.22
375	25	8.92
345	25	11.19
400	30	2.15
375	30	4.88
325	30	10.92
300	30	14.19
325	38	0.718
320	38	1.66
300	38	5.44
275	38	10.06

3. Experiment Result

There are four type of faults which can occur in distribution system and the average probabilities of occurrence of various of fault are[6]:

- Single line-to-ground fault(SLG) = 70 %
- Line-to-Line fault(L-L) = 15 %
- Double line-to-ground fault(2LG) = 10 %
- Three-phase ground or ungrounded fault(3 ϕ)=5 %

As the average probabilities of occurrence of various of fault above, then this paper was interested only SLG simulation by using the relation of I_f , Z_f and Fault distance as shown in Fig.3 to be training data as shown in Table I and the experiment result as shown in Table II can be accepted, base upon the compared to the Power System theory calculating.

In the practice should be acquiring the knowledge from line crew to be training data. Because of Z_f is a highly variable item depending on the cause of the fault, the type of fault and the environment a fallen conductor will be a low Z_f fault if the cable to drops into a stream or ground water, but it can be a high Z_f fault if it drop to a dry pavement where ground contact resistance is high.

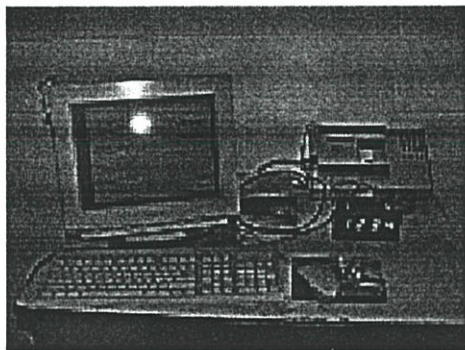


Fig. 6. Nerofuzzy estimation the distance to a fault simulation.

4. Conclusion

Knowing the 3 ϕ level at the substation, SLG levels along the feeder and having experience for the fault levels along the feeder, it is possible to estimate fault distance.

The NF is approach alternatively for estimated distribution fault location by using Power system theory, fault impedance as databases and if the NF has modified based on experienced line crew, the NF has correctly estimated fault distance when the distribution system is operated in the normal configuration.

References

- [1] G. E. Hager, A. S. Baum, "Automated Distribution Fault Locating System", *IEEE Trans. Ind.*, vol. 32, no. 3, pp. 704-708, May./June. 1996.
- [2] V. Tipsuwanporn, Y. Tuppadung, T. Suesut, S. Rukkaphan and N. junkrob, "Fuzzy Estimation for Fault Location", Proceedings of the 15rd Korea Automatic Control Conference 2000, pp. 453-455, Oct. 2000.
- [3] S. M. Halpin, R. F. Burch, "Applicability of Neural Networks to Industrial and Commercial Power Systems" : A Tutorial Overview, *IEEE Trans. Ind.*, vol. 33, no. 5, pp. 1355-1361, Sep./Oct. 1997.
- [4] B. Lazzarini, L. M. Reyneri, "A Neuro-Fuzzy Approach to Hybrid Intelligent Control", *IEEE Trans. Ind.*, vol. 35, no. 2, pp. 413-425, Mar./Apr. 1997.
- [5] C.H. Lee, S.D. Wang, "A self-organizing adaptive fuzzy controller", *Fuzzy Sets and System*, 80(1996), pp. 295-313.
- [6] B. Ravindrath, M. Chander and C. S. Jha, *Power System Protection and Switchgear*, John Wiley & Sons, pp. 3-34, 1987.

ประวัติผู้เขียน

นายสุธี รุกขพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2541

ขณะศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม ณ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์จำนวน 2 เรื่อง

ผลงานทางวิชาการ

- [1] สุธี รุกขพันธุ์, วิทยา ทิพย์สุวรรณพร, สมพล รัตนไพบูลย์, ทวีพล ชี้อัสตัย และ ยุทธพงศ์ ทัพผดุงค์, “การประมาณระยะทางตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบพีซีด้วยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 2544.
- [2] V. Tipsuwanporn, S. Rukkaphan, V. Kongratana, A. Numsomran and Y. Tuppadung. “ Neurofuzzy Estimation for Fault Location Based on PLC.” Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems. (16th Korea Automation Control Conference) Korea, 2001.