



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลังแบบไม่สมมาตรโดยใช้โปรแกรม
ภาษาฟอร์แทรน 77

โดย นายเจตพล อังกิตานนท์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงษ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชนพงศ์ สุวรรณศรี)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.เชิดชัย ประภาณวรัตน์)

การวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังแบบไม่สมมาตร โดยใช้
โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน77

นายเจตพล อังกิดานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

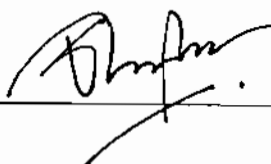
ชื่อ : นายเจตพล อังกิตานนท์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังแบบไม่สมมาตร
โดยใช้โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

การเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ในระบบ และสร้างความเสียหายแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในบริเวณที่เกิดความผิดพร่องนั้น ซึ่งประเภทของการเกิดความผิดปกติ โดยส่วนใหญ่ความผิดปกติชนิดขนาน (Shunt Fault) จะมีค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าความผิดปกติชนิดอนุกรม (Series Fault) และเกิดขึ้นบ่อยครั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการวิเคราะห์ความผิดปกติด้วยโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77 โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่เปิดเผย (Open Source) โดยไม่มีค่าใช้จ่าย ในการหาค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัส ในขณะที่เกิดความผิดปกติที่บัสใดบัสหนึ่ง ใช้วิธีการสร้างส่วนประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ จากข้อมูลของพารามิเตอร์ให้เป็นอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Z-Bus Matrix) ของระบบ โดยผู้ใช้งาน (User) เลือกบัสที่เกิดความผิดปกติ เลือกชนิดของความผิดปกติ และเลือกคุณผลการคำนวณของค่าขนาดกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรในช่วงทรานเซียนต์ ช่วงสภาวะอยู่ตัว และการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในระบบ เพื่อสามารถทราบถึงขนาดของกระแสลัดวงจรในแต่ละบัสที่จะให้เกิดความเสียหายกับระบบไฟฟ้าที่จะทดสอบ และสามารถออกแบบการป้องกันระบบไฟฟ้าจากความผิดปกติจากโปรแกรมนี้ได้ โดยทำการทดสอบกับระบบทดสอบของมาตรฐาน IEEE 14 บัส IEEE 30 บัส IEEE 57 บัส และ IEEE118 บัส เปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูป Power World และ PSCAD ที่เป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial)

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 127 หน้า)

คำสำคัญ : กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร, ทรานเซียนต์, สภาวะอยู่ตัว



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr. Jadtapol Angkitanon
Thesis Title : Analysis of Asymmetrical Fault in Power System Using FORTRAN 77
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Dr. Teratam Bunyagul
Academic Year : 2006

Abstract

The fault in the electrical power system effects to the electrical system, the electrical equipment, and the user in the area of that fault. There are many different types of faults happening in the electrical systems, which depend on the cause of the fault or the types of the fault. Most of them are the Shunt Fault that would have more short circuit current than Series Faults and they happen more frequently in the electrical power system.

Therefore, this research will present the analyzing the electrical faults by using an open source "FORTRAN 77" to calculate the short circuit current and voltage bus while the fault is happening on a bus by using positive, negative and zero sequence. The parameters using to analyze the electrical faults are collected from the distribution bus parameters, data bus parameters and generator transformer parameters, then convert them to Z-Bus Matrix of the system. The user can select the faulty bus, type of the fault, the calculation result of short circuit current at transient or steady-state to be displayed, and also the voltage change on each bus in the system. The user can identify the short circuit current on each bus which effecting to the electrical system, and can design the proper electrical protection system by using this program. This program has been tested with the universal standard IEEE14, IEEE30 BUS, IEEE57 BUS and IEEE118 BUS, and compared the result with the Commercial Software (Power World and PSCAD).

(Total 127 pages)

Keywords : Asymmetrical Fault Current, Transient, Steady-State



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จสมบูรณ์ออกมาเป็นรูปเล่มไม่ได้ หากขาดอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์นี้อย่าง อาจารย์ ดร. ชีรธรรม บุญยะกุล อาจารย์ที่มีส่วนช่วยในการแนะนำแนวทางการวิจัย การค้นคว้าศึกษา ประกอบกับความตั้งใจที่ต้องการเห็นศิษย์ทุกคนประสบความสำเร็จ และให้กำลังใจแก่ศิษย์ทุกครั้งไป

บุคคลในครอบครัวของข้าพเจ้าทุกคนที่มีพระคุณอย่างสูงในชีวิตของข้าพเจ้า ท่านได้ดูแลข้าพเจ้ามากตลอดและให้กำลังใจในทุกคราวไป

ในคราวที่ต้องออกมาใช้ชีวิตอยู่ในกรุงเทพฯ ข้าพเจ้าอยากกราบขอพระคุณพระครูปลัดอนันต์ อภิญญาโญ (หลวงปู่อนันต์) และหลวงพิมพ์หาวิเชียร แห่งวัดตะพาน(ดินแดง) ซึ่งพระท่านได้ให้ที่พักอาศัยอาหารและทุกอย่าง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถใช้ชีวิตอยู่ในกรุงเทพฯ และปฏิบัติตนตามพุทธศาสนิกชนได้อย่างดี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ท่านได้ให้ความรู้ ประสิทธิ์ประสานวิชาการในทุกๆ ด้าน ให้ข้าพเจ้าได้เล่าเรียน ฝึกฝนมาในทางตรงและทางอ้อมนั้น ทำให้ข้าพเจ้าเป็นคนที่ได้นำความรู้ต่างๆ มาพัฒนาตนเอง เปรียบเสมือนผู้ชี้ทางที่ถูก ที่ควรให้ข้าพเจ้าเดินก้าวต่อไป

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบริษัท ซีเมนส์ ประเทศไทย จำกัด โดยเฉพาะผู้จัดการแผนกของข้าพเจ้า และพี่ น้องที่ร่วมงานด้วยกันทุกคน ที่ช่วยให้งานประจำที่ข้าพเจ้าทำอยู่ด้วยมีประสิทธิภาพ และคุณภาพ ตลอดจนความมีน้ำใจของทุกคน

เหล่าเพื่อนพ้อง รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่ได้ศึกษาในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เป็นส่วนสำคัญที่ขาดไม่ได้ เพราะพวกท่านได้ให้คำปรึกษาในส่วนการศึกษาและการดำเนินงานวิจัยนี้ ให้กำลังใจ ร่วมทุกข์ร่วมสุขตลอดเวลาที่ได้ศึกษาที่สถาบันแห่งนี้

สุดท้าย ข้าพเจ้าขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยของข้าพเจ้านี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

หากขาดคอบกพร่องไม่ได้กล่าวขอบคุณท่านใด ข้าพเจ้าต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เจตพล อังกิตานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังคืออะไร	1
1.2 ประโยชน์ของการศึกษาความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง	1
1.3 สาเหตุของการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง	2
1.4 คุณลักษณะพื้นฐานของกระแสลัดวงจร	4
1.5 วัฒนาการของโปรแกรมการวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง	6
1.6 ภาษาฟอร์แทรน 77 (FORTRAN 77)	7
1.7 จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้	9
1.8 โครงสร้างงานวิจัย	9
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง	13
2.1 ส่วนนำเนื้อหา	13
2.2 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร	13
2.3 รีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุน	14
2.4 กระแสลัดวงจรสมมาตรและไม่สมมาตร	15
2.5 การเกิดกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง	17
2.6 ส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสลัดวงจรไม่สมมาตร	18
2.7 สภาวะทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ 3 เฟส	21
2.8 แรงดันภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโหลดภายใต้เงื่อนไขสภาวะทรานเซียนต์	24
2.9 การคำนวณกระแสฟอลต์ด้วยบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์	28
2.10 ส่วนประกอบสมมาตร	31
2.11 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 ลำดับของวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีโหลด	34
2.13 การวิเคราะห์ความผิดพลาดของระบบไฟฟ้ากำลัง	36
2.14 ส่วนสรุปเนื้อหา	39
บทที่ 3 อัลกอริทึมการวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง	41
3.1 ฟังก์ชันอิมพีแดนซ์เมตริกซ์	41
3.2 ฟังก์ชันคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะอยู่ตัว	44
3.3 ฟังก์ชันคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงทรานเซียนต์	46
บทที่ 4 การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า	49
4.1 ส่วนนำของเนื้อหา	49
4.2 โปรแกรมรับข้อมูลและแปรหน่วยจากพารามิเตอร์ของระบบ	49
4.3 โปรแกรมคำนวณแอดมิแดนซ์ (Y-Bus) ของระบบ	50
4.4 โปรแกรมคำนวณโหลดโพล์ของระบบ	51
4.5 โปรแกรมคำนวณอิมพีแดนซ์ (Z-Bus) ของระบบ	54
4.6 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสมมูล	54
4.7 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดสายกับดิน	55
4.8 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดสายกับสาย	56
4.9 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดสองสายกับดิน	56
4.10 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดในช่วงทรานเซียนต์	57
4.11 ฟังก์ชันการทำงานของวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า	58
4.12 ส่วนสรุปเนื้อหา	60
บทที่ 5 การทดลองและเปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรม	61
5.1 ส่วนนำของเนื้อหา	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสภาวะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	62
5.3 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสภาวะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	66
5.4 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสภาวะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส	70
5.5 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสภาวะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส	74
5.6 ผลวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่บัสในสภาวะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	78
5.7 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบ ไม่สมมาตรที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติ	82
5.8 ส่วนสรุปของเนื้อหา	87
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	89
6.1 สรุปผล	89
6.2 ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบทดสอบ	93
ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	94
ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	98
ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 57 บัส	104
ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 118 บัส	112
ภาคผนวก ข รูปแบบข้อมูลของระบบทดสอบ	123
รูปแบบของข้อมูลในระบบทดสอบ	124
รูปแบบของข้อมูลสายส่งและข้อมูลสายส่งของส่วนประกอบลำดับชั้นในระบบ ทดสอบ	125
ประวัติผู้วิจัย	127

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4-1 ชนิดของบัส	53
5-1 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase B) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสามเฟสสมมูลกับโปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus	78
5-2 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase B) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบไม่สมมูลกรณีสายกับดินกับโปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus	79
5-3 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase B) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบไม่สมมูลกรณีสายกับสายกับโปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus	80
5-4 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase A) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบไม่สมมูลกรณีสองสายกับดินกับโปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus	81
5-5 ตารางค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจรตามคาบเวลาตั้งแต่ 0.009 sec. ถึง 0.099 sec.	86
ก-1 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส	94
ก-2 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส	95
ก-3 ข้อมูลส่วนประกอบลำดับศูนย์ของสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส	96
ก-4 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส	98
ก-5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส	100
ก-6 ข้อมูลส่วนประกอบลำดับศูนย์ของสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส	101
ก-7 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 57 บัส	104
ก-8 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 57 บัส	107
ก-9 ข้อมูลส่วนประกอบลำดับศูนย์ของสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 57 บัส	109
ก-10 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 118 บัส	112
ก-11 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 118 บัส	118

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	ความผิดพลาดแบบอนุกรมหรือฟอลต์อนุกรม (Series Fault)	2
1-2	ความผิดพลาดแบบขนานหรือฟอลต์ขนาน (Shunt Fault)	3
1-3	วงจรสมมูลที่ประกอบด้วย R และ L อนุกรม	4
1-4	รูปคลื่นสัญญาณไซน์ของกระแสไหลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า	6
1-5	รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร	6
2-1	แผนผังในระบบไฟฟ้าแสดงกระแสไหลในสภาวะจ่ายโหลดปกติ	14
2-2	แผนผังในระบบไฟฟ้าแสดงกระแสไหลในสภาวะเกิดความผิดพลาด	14
2-3	การเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรตามเวลากับค่ารีแอกแตนซ์ต่างๆ แปรผันตามเวลา	15
2-4	รูปคลื่นกระแสลัดที่สมมาตรรอบแกนศูนย์	16
2-5	รูปคลื่นกระแสลัดที่ไม่สมมาตรรอบแกนศูนย์ หรือ กระแสลัดวงจรทั่วไป	16
2-6	ไดอะแกรมแสดงของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ	17
2-7	เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันและกระแสจากอัตราส่วนของวงจร (ไม่คิดโหลด)	17
2-8	กระแสลัดวงจรสมมาตรและแรงดันของระบบที่มีเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับศูนย์	18
2-9	รูปคลื่นของการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงและกระแสลัดวงจรไม่สมมาตรจะมีรูปคลื่นเป็นสมมาตรเมื่อส่วนประกอบกระแสตรงหมดไป	19
2-10	เวลาคงที่สำหรับการลดลงของกระแสตรง	20
2-11	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เกิดฟอลต์แบบสมมูล โดยให้อินดักแตนซ์มีค่าคงที่	21
2-12	รูปคลื่นของกระแสเกิดการลัดวงจรที่เวลา $t = 0$ สำหรับมุม $(\alpha - \theta) = -90^\circ$ เมื่อ $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ และมีแรงดัน $E_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$	23
2-13	วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายโหลดในสภาวะอยู่ตัว	24
2-14	วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณหากระแสฟอลต์ชั่วคราวเขียนต์	25
2-15	วงจรสมมูลเทวินินของวงจรภาพที่ 2-14	27
2-16	ตัวอย่างของไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ	29

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-17 วงจรจำลองของระบบในภาพที่ 2-16	29
2-18 วงจรเทวินินินของระบบในภาพที่ 2-16	30
2-19 วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้ต่อโหลด และจุดนิวทรัลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส คือ E_a , E_b และ E_c	34
2-20 การไหลของกระแสแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สอดคล้องกับลำดับของวงจรไฟฟ้า	35
2-21 ลักษณะการเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมดุลและลำดับวงจรไฟฟ้า	36
2-22 ลักษณะการเกิดความผิดปกติแบบสายกับดินและลำดับวงจรไฟฟ้า	37
2-23 การเกิดความผิดปกติของสายกับสายที่เฟส B และเฟส C และลำดับวงจรไฟฟ้า	38
2-24 ความผิดปกติของแบบสองสายกับดินที่เฟส B กับ C และลงดิน และลำดับวงจรไฟฟ้า	39
4-1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมรับและแปรข้อมูลของระบบ	50
4-2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณแอดมิแดนซ์ของระบบ	50
4-3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณโหลดโพล์ของระบบ	53
4-4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมอินเวอร์สเมตริกซ์ของ Y-Bus	54
4-5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดปกติในกรณีสามเฟสสมดุล	55
4-6 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดปกติในกรณีสายกับดิน	55
4-7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดปกติในกรณีสายกับสาย	56
4-8 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดปกติในกรณีสองสายกับดิน	57
4-9 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร	58
4-10 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร	59
5-1 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสมมาตรในระบบ IEEE 14 บัส	62
5-2 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับดินในระบบ IEEE 14 บัส	63
5-3 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับสายในระบบ IEEE 14 บัส	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5-18	เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณของกระแสลัดวงจรในกรณีสายกับสาย	84
5-19	เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณของกระแสลัดวงจรในกรณีสองสายกับดิน	85
ก-1	ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส	97
ก-2	ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	103
ก-3	ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส	111
ก-4	ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส	122

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

I_i	หมายถึง กระแสที่บัส i
I_{ij}	หมายถึง กระแสที่ไหลจากบัส i ไปบัส j
P_i	หมายถึง กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส i
P_{ij}	หมายถึง กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ไหลจากบัส i ไปบัส j
$P_{ij,max}$	หมายถึงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสูงสุดที่ไหลจากบัส i ไปบัส j
P_{Gi}	หมายถึงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
P_{Di}	หมายถึงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลดที่บัส i
$P_{i,sch}$	หมายถึงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟตามแผนงานที่บัส i
$P_{i,cal}$	หมายถึงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจากการคำนวณที่บัส i
Q_i	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
Q_{ij}	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลจากบัส i ไปบัส j
Q_{Gi}	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
Q_{Di}	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟของโหลดที่บัส i
$Q_{i,sch}$	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟตามแผนงานที่บัส i
$Q_{i,cal}$	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟจากการคำนวณที่บัส i
$Q_{Gi,min}$	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
$Q_{Gi,max}$	หมายถึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
S_{Gi}	หมายถึงกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
S_{ij}	หมายถึงกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลจากบัส i ไปบัส j
V_i	หมายถึงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส i

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังคืออะไร

โดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในปัจจุบันนั้นจะเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส สมดุล ซึ่งสิ่งที่ไม่ปรารถนาให้เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังแต่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ก็คือ กรณีเกิดสายตัวนำเปลือยสัมผัสกัน หรือฉนวนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบเกิดเสื่อมสภาพ สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด “ความผิดปกติ” หรือ “ฟอลต์” (Fault) ในระบบไฟฟ้ากำลังและยังมีสาเหตุของการเกิดฟอลต์ขึ้นกับระบบยังมีอีกหลายสาเหตุ เช่น ฟิวส์ล่งสายตัวนำ แรงลมพัดให้ตัวนำเปลือยสัมผัสกัน คั้นไม้พาดลงสายตัวนำ รถยนต์ชนเสาไฟฟ้า เป็นต้น ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีด้วยกันหลายแบบและแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ความผิดปกติแบบสมมูล (Symmetrical Fault) และความผิดปกติแบบไม่สมมูล (Unsymmetrical Fault) ความผิดปกติแบบสมมูลคือ การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล ส่วนความผิดปกติแบบไม่สมมูล คือ การลัดวงจรระหว่างสายกับดิน การลัดวงจรระหว่างสายกับสาย การลัดวงจรแบบสองสายกับดิน

1.2 ประโยชน์ของการศึกษาความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง [1, 2, 3, 4, 5, 6]

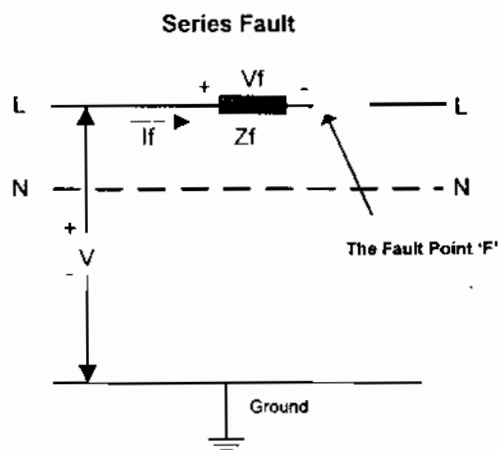
ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแรงสูงหรือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นสิ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงไม่เกิดขึ้นในระบบไม่ได้ โดยสามารถเกิดทั้งจากธรรมชาติเอง หรือความผิดพลาดของมนุษย์ รวมไปถึงความตั้งใจของมนุษย์ โดยทุกครั้งที่เกิดความบกพร่องภายในระบบจะมีกระแสไฟฟ้าไหลมากเกินไปปกติ และในระบบไม่มีอุปกรณ์ป้องกันทำให้เกิดความเสียหายขึ้นหรือระบบไม่สามารถตัดจุดที่เกิดความบกพร่องออกจากระบบได้ทันทีก็จะสร้างความเสียหายให้กับระบบเนื่องจากกระแสจำนวนสูงที่ไหลผ่าน ดังนั้นการรู้ถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นก่อนย่อมจะเตรียมการเพื่อหาวิธีการแก้ไข หรือหาอุปกรณ์ป้องกันภายในระบบไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงต่ำ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ คือ ฟิวส์หรือเบรกเกอร์ เป็นต้น

การศึกษาค้นคว้าความผิดปกติในระบบจะประกอบด้วยการศึกษาหาขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นว่ามีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด เพื่อหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม โดยอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมต้องมีความสามารถในการตัดกระแสลัดวงจรออกจากระบบ และสามารถป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดความเสียหายโดยสามารถที่จะกลับมาใช้งานได้ดังเดิม ซึ่งในการ

คัดกระแสลัดวงจรจะต้องไม่สูงเกินความจำเป็นทำให้เปลืองเงินลงทุน ดังนั้นการนำผลของการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไปใช้ในการดูแลระบบ หรือเลือกอุปกรณ์ป้องกัน คือสิ่งที่จำเป็นในทวาระของวิศวกรผู้ออกแบบหรือดูแลระบบไฟฟ้าที่ดีพึงจะมี เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป รวมไปถึงโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 สาเหตุของการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง [1, 2, 3, 4]

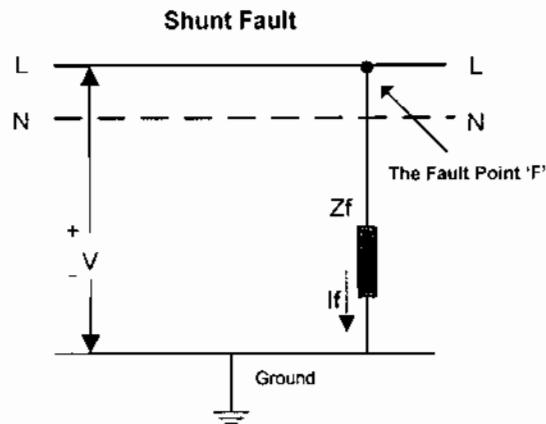
การเกิดความผิดปกติเป็นปรากฏการณ์ของสภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งแยกออกได้เป็น 2 แบบคือ ความผิดปกติอนุกรม หรือ ฟอลต์อนุกรม (Series Fault) และความผิดปกติขนาน หรือ ฟอลต์ขนาน (Shunt Fault) โดยฟอลต์อนุกรมเป็นสภาวะผิดปกติในเฟส (Phase) ของระบบ เช่นสายส่งขาด หรือไม่สามารถจ่ายไฟได้หนึ่งเฟสหรือสองเฟส เป็นต้นดังภาพที่ 1-1 ส่วนฟอลต์ขนานเป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างกราวด์ (Ground) ซึ่งได้แก่การลัดวงจรแบบต่างๆดังภาพที่ 1-2



ภาพที่ 1-1 ความผิดปกติแบบอนุกรมหรือฟอลต์อนุกรม (Series Fault)

ฟอลต์ขนานมีผลทำความเสียหายต่ออุปกรณ์มากกว่าฟอลต์อนุกรมเพราะกระแสที่เกิดขึ้นในฟอลต์ขนานมีขนาดสูงมากและทำให้เกิดอุณหภูมิสูงมากในอุปกรณ์มีผลต่อระบบการทำงานของอุปกรณ์ในระบบทำให้ระบบไฟฟ้าหรือระบบจำหน่ายขัดข้องได้ โดยการศึกษาฟอลต์ขนานก็เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรและหาขนาดของอุปกรณ์ และระบบการป้องกัน ส่วนการศึกษาฟอลต์อนุกรมจะวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยส่วนใหญ่การเกิดความผิดปกติจะเกิดใน

สายส่งเหนือดิน (Overhead) ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นเป็นฟอลต์ในสายส่งใต้ดิน
หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อย



ภาพที่ 1-2 ความผิดปกติแบบขนานหรือฟอลต์ขนาน (Shunt Fault)

1.3.1 ความผิดปกติในสายส่งแรงสูงเหนือดิน (Overhead) โดยส่วนใหญ่เกิดจากฟ้าผ่าหรือการเปิดปิดวงจร ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินอัตรา (Over Voltage) ขึ้นในสายส่งและฉนวนลูกถ้วยทนต่อแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ไม่ได้ก็เกิดแฟลช (Flashover) จากสายผ่านฉนวนลูกถ้วยลงดินไปตามเสาส่งลงสู่ดิน ด้วยเหตุนี้ก็มีการแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนลูกถ้วย เพื่อป้องกันการเกิดแฟลช โอเวอร์ที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเกินมากๆ แต่การเพิ่มลูกถ้วยก็เป็นการลงทุนเกินความจำเป็นเพราะแรงดันไฟฟ้าเกินอัตราสูงๆนั้นมีอัตราเกิดขึ้นน้อย และเมื่อออกแบบระบบจะต้องกำหนดจำนวนลูกถ้วยที่ใช้ให้เหมาะสมกับค่าการลงทุน ยิ่งจำนวนลูกถ้วยมากเกินไปเสาส่งที่ต้องรับน้ำหนักสูงเกินไปจึงต้องยอมให้อุปกรณ์ในระบบเสียหายบ้าง ดังนั้นในระบบสายส่งที่เป็นอยู่ในปัจจุบันนั้นจะเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีความดันไฟฟ้าเกินอัตราสูงๆ เกิดขึ้น

ความผิดปกติในสายส่งเหนือดินไม่ว่าระบบในระบบไฟแรงสูงหรือในระบบจำหน่ายก็เกิดขึ้นมากเนื่องจากฉนวนลูกถ้วยสกปรก เพราะฝุ่นผงเกาะมากหรือมีคราบเกลือเกาะ ส่วนการสาเหตุดังกล่าวทำให้ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเกินอัตราของฉนวนของลูกถ้วยลดลงมาก การเกิดความบกพร่องในระบบจำหน่ายจะมีสาเหตุจากต้นไม้ไปพาดลูกสายไฟฟ้า เกิดลัดวงจรลงดิน ฉนวนลูกถ้วยแตก รถเครนหรือปั้นจั่นไปเกี่ยวเอาสายไฟฟ้า ด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดแฟลชโอเวอร์ในระบบได้ง่ายขึ้น

1.3.2 การเกิดความบกพร่องในสายส่งใต้ดิน (Underground) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากความชื้นที่เข้าไปในสายและทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของเคเบิลเสื่อมลงจนเกิดการเบรคดาวน์ของฉนวนและลัดวงจรได้ นอกจากนี้รอยต่อ (Splicing) ของสายเคเบิลก็เป็นจุดที่มีเกิดการลัดวงจรได้

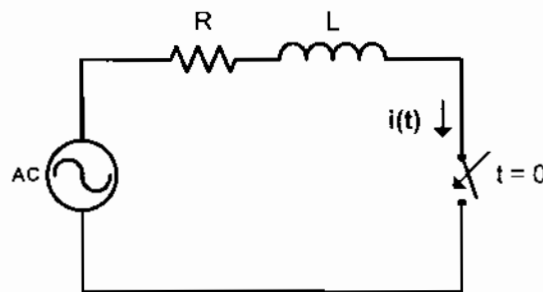
หรืออาจเกิดโคโรน่าและเกิดการกระทบของไอออนที่เกิดจากการดีสชาร์จกับฉนวนจนเกิดเบรคดาวน์

1.3.3 การเกิดความบกพร่องในสถานีไฟฟ้าย่อย ในระบบหรือในโรงงานเกิดความบกพร่องจากสาเหตุที่มาจาก สัตว์ต่างๆที่เข้าไปในสถานีไฟฟ้าย่อยแล้วไปพาดระหว่างสายของระบบไฟฟ้าหรือระหว่างสายกับดินทำให้เกิดลัดวงจรผ่านตัวสัตว์ หรือเกิดจากฝุ่นผงเกาะตามลูกถ้วยมากและไม่ได้มีการบำรุงรักษาความสะอาดของลูกถ้วย

1.4 คุณลักษณะพื้นฐานของกระแสลัดวงจร [1, 2, 3]

กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลานับตั้งแต่เริ่มเกิดความผิดปกติในช่วงทรานเซียนต์ (Transients) จนกระทั่งกระแสลัดวงจรเข้าสู่ค่าคงที่ (Steady State Value) เมื่อวิเคราะห์กระแสลัดวงจร โดยจะเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานวิธีการ ในอุดมคติที่คล้ายกับการปิด - เปิดสวิตช์ไฟ (Ideal Switch) เมื่อตำแหน่งของการสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งปิด (Closed Position) ค่าความต้านทานในวงจรจะมีค่าเป็นศูนย์ และในตำแหน่งของสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งเปิด (Opened Position) ค่าความต้านทานจะมีค่าเป็นอนันต์ (Infinite) โดยค่าเริ่มต้นของกระแสจะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ คุณลักษณะของการเกิดการเปลี่ยนแปลงจะมีผลมาจากค่าพารามิเตอร์ของค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ในระบบไฟฟ้า

โดยลักษณะการสวิตช์ในระบบที่มีความต้านทานและความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ดังภาพที่ 1-3 เป็นตัวอย่างเช่น การปิด - เปิดเบรกเกอร์ในระบบหนึ่งเฟสในระบบไฟฟ้าแรงสูง การลัดวงจรสายส่งในระบบ หรือการเกิดเบรคดาวน์ของสายส่งใต้ดิน ค่าแรงดันไฟฟ้าจะเปรียบเหมือนแหล่งกำเนิดเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าความเหนี่ยวนำเปรียบกับค่าอินดักแตนซ์ (Inductance: L) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า บัสบาร์ สายส่ง ส่วนความต้านทานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะเปรียบเป็นค่าความต้านทาน (Resistance: R)



ภาพที่ 1-3 วงจรสมมูลที่ประกอบด้วย R และ L อนุกรม

จากภาพที่ 1-3 จะเป็นวงจรง่ายในการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรซึ่งลักษณะเหมือนกับ การเกิดความคิดพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่ตาม สมการที่ 1-1

$$E = V_m \sin \omega t \quad (1-1)$$

กระแสที่ไหลในวงจรจะได้ตามสมการที่ 1-2

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = V_m \sin \omega t \quad (1-2)$$

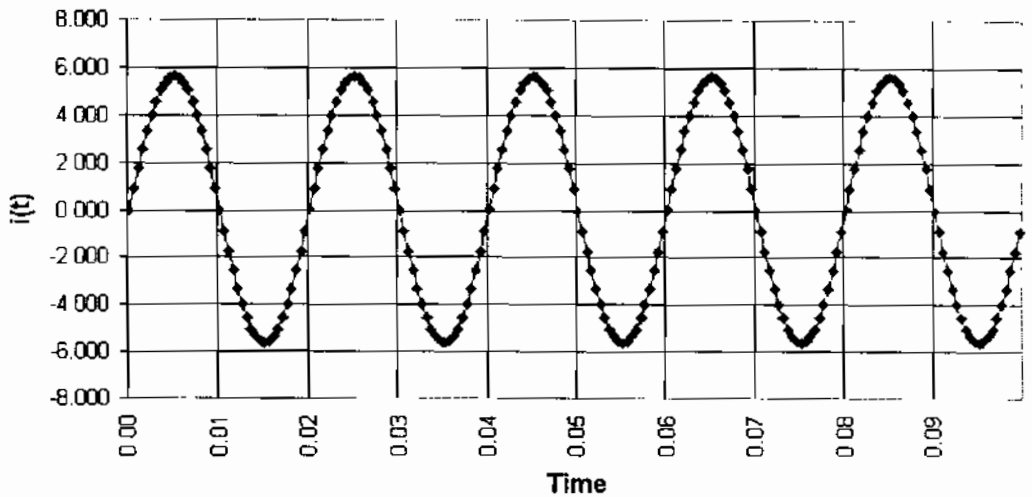
และ

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - I_m e^{-t/\tau} \sin(\alpha - \theta) \quad (1-3)$$

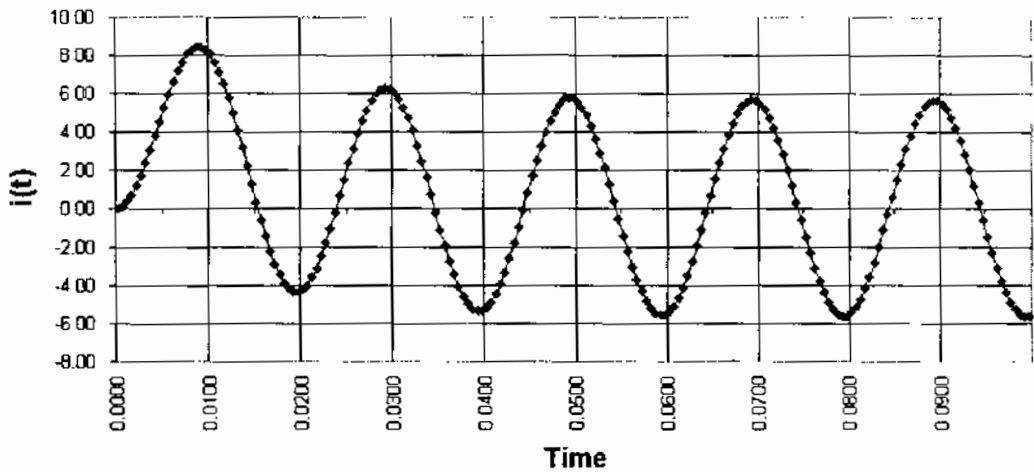
เมื่อ

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} \quad (1-4)$$

ซึ่งเมื่อสวิตช์สับลงจะเกิดกระแสไหลในวงจรโดยช่วงเวลาทรานเซียนส์จะประกอบด้วย ค่ากระแสสองส่วนคือ ส่วนของกระแสตรง (D.C. Component) และส่วนของกระแสสลับ (A.C. Component) โดยจะมีผลของค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานในวงจรที่ทำให้กระแสที่เกิดมีความไม่สมมาตร (Asymmetrical) กับแกนศูนย์หรือแนวแกน X (X-Axis) ซึ่งสัญญาณของ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นรูปคลื่นไซน์ตามแสดงในภาพที่ 1-4 และรูปคลื่นสัญญาณของกระแส ลัดวงจรในวงจรจะแสดงในภาพที่ 1-5 โดยกระแสลัดวงจรเริ่มแรกมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับ กระแสตรงที่เกิดขึ้น และกระแสตรงที่เกิดจะมีค่าตามสมการที่ 1-3 คือถ้า $(\alpha - \theta)$ มีค่าเป็น 0 กระแสตรงก็ไม่เกิดดังนั้นกระแสลัดวงจรก็จะมีเฉพาะกระแสสลับอย่างเดียว แต่ $(\alpha - \theta) = \pm \frac{\pi}{2}$ กระแสตรงที่เกิดขึ้นก็มีค่าสูงสุด ในระบบไฟฟ้า 1ϕ ค่าของ $(\alpha - \theta)$ มีโอกาสเป็นศูนย์แต่ในระบบ 3ϕ ส่วนกระแสตรงจะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้นและกระแสลัดวงจรจะเปลี่ยนแปลงไป ตามเวลาของรูปคลื่นสัญญาณ



ภาพที่ 1-4 รูปคลื่นสัญญาณไซน์ของกระแสไหลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 1-5 รูปคลื่นของกระแสตัววงจรแบบไม่สมมาตร

1.5 วิวัฒนาการของโปรแกรมการวิเคราะห์ความผิดพลาดของระบบไฟฟ้ากำลัง [5]

ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดของระบบไฟฟ้ากำลังมีการพัฒนารูปแบบของการคำนวณให้มีความรวดเร็ว ถูกต้อง และใช้งานได้สะดวก โดยในช่วงแรกของการพัฒนาประดิษฐ์เครื่องคำนวณ The Transient Network Analyzer สามารถคำนวณในช่วงสภาวะอยู่ตัว (Steady State) และ ช่วงทรานเซียนต์ได้โดยสามารถวิเคราะห์ปัญหาในด้านที่เกี่ยวกับความผิดพลาด เช่น Switching Surges Switching and Transients Caused by Fault เป็นต้น แล้วมีการประยุกต์โปรแกรมไหลคไฟฟ้า (Load Flow) เพื่อนำค่ามาหากระแสตัววงจร แล้วต่อมาเมื่อมีการพัฒนานานาอิมโครคอมพิวเตอร์หรือ

ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ (Digital Computer) ซึ่งมีข้อดีของตัวประมวลผลในการคำนวณด้วยความรวดเร็ว ถูกต้อง เทคนิคการสร้างพารามิเตอร์ของระบบและรูปแบบอัลกอริทึมของการคำนวณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของประมวลผลให้ดียิ่งขึ้น เช่น โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Programs) เป็นการพัฒนาในปี 1960 โดยความคิดริเริ่มของ H. W. Dommel ที่สถาบัน Munich Institute of Technology และได้มีการเริ่มพัฒนาเพื่อให้มีความสามารถเพิ่มขึ้นและมีผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยนำไปวิเคราะห์ระบบ และทฤษฎีใหม่หรือโมเดลของอุปกรณ์ป้องกันเพื่อทดสอบก่อนใช้งานจริง

ในส่วนของงานวิจัยนี้จะได้นำเอาผลของโปรแกรมสำเร็จรูปคือ Power World และ PSCAD มาเปรียบเทียบ ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปจะให้ผลที่มีความเชื่อถือได้ ถูกต้อง และมีการทดสอบกับการใช้งานจริงหรือทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังจริง

โปรแกรม Power World เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่หน่วยงานด้านพลังงานไฟฟ้าใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบ รวมถึงการวิเคราะห์การเกิดความผิดปกติหรือฟอลต์ (Fault) วิเคราะห์สถานะ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง และการออกแบบระบบไฟฟ้าให้มีความเสถียรภาพ

โปรแกรม PSCAD เป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเหมาะกับการวิเคราะห์การเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าทั้งระบบ 1φ และระบบ 3φ มีการริเริ่มตั้งแต่ปี 1988 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งรูปแบบของโปรแกรมจะเป็นกราฟฟิกให้ผู้ใช้งานเลือกให้เครื่องมือและฟังก์ชันของโปรแกรมได้ง่าย โดยสามารถวิเคราะห์ได้ในช่วงทรานเซียนต์ และสถานะอยู่ตัว ผลที่ได้มีความเชื่อถือได้ ถูกต้อง และรวดเร็ว และสามารถสร้างพารามิเตอร์ใหม่เพื่อการทดสอบได้ แต่ยังไม่เหมาะกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ๆ

โปรแกรมสำเร็จรูปส่วนใหญ่มีพื้นฐานในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาฟอร์แทรนและตกแต่งหน้าต่างของโปรแกรมให้มีความสะดวก อ่านค่าคำนวณได้ง่าย และมีโมเดลเฉพาะให้เลือกใช้ได้ง่ายและถูกต้องตามมาตรฐาน ทำให้ผู้ใช้ไม่ต้องสร้างโมเดลเอง

1.6 ภาษาฟอร์แทรน 77 (Fortran 77) [7, 8, 9, 10, 11]

ภาษาฟอร์แทรน 77 เป็น Open Source และเป็นภาษาที่ออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับตัวเลข เช่น งานด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ คำว่า "FORTRAN" เป็นคำย่อมาจาก FORmula TRANslation โดยบริษัท IBM เป็นผู้พัฒนาและออกสู่ตลาดเมื่อปี ค.ศ. 1957 ต่อมาในปี ค.ศ. 1966 ภาษาฟอร์แทรนได้ปรับปรุงให้อยู่ในแบบมาตรฐานของ American National Standard Institute (ANSI X 3.9-1966) และพัฒนามาจนกระทั่งปี ค.ศ. 1977 จึงเป็นฟอร์แทรน 77

(FORTRAN 77) แล้วจัดให้อยู่ในแบบมาตรฐานของ American National Standard Institute (ANSI X 3.9-1978) ในปี ค.ศ. 1978 ภาษาฟอร์แทรน 77 คำสั่งถูกจัดระเบียบให้อยู่ในรูปหน่วยโปรแกรม (Program Unit) และมีคำสั่ง END เป็นคำสั่งสุดท้าย หน่วยโปรแกรมอาจเป็น โปรแกรมหลัก (Main Program) หรือ โปรแกรมย่อย (Subprogram) ก็ได้ ซึ่งในโปรแกรมหลักอาจจะมีโปรแกรมย่อย หรือไม่มีก็ได้ หากมีอาจจะมีมากกว่าหนึ่ง โปรแกรมย่อยก็ได้ คำสั่งในภาษาฟอร์แทรนแบ่งประเภท ได้ดังนี้

1.6.1 คำสั่งปฏิบัติการ (Executable Statement) เป็นคำสั่งที่มีผลต่อการดำเนินงานของ โปรแกรม เป็นคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณ ควบคุม อ่านและพิมพ์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้

1.6.1.1 คำสั่งในการกำหนดตัวแปร (Assignment Statement) ใช้สำหรับกำหนดค่าให้กับ ตัวแปร ซึ่งมีคำสั่งคือ คำสั่งกำหนดค่าเลขคณิต คำสั่งกำหนดค่าตรรก คำสั่งกำหนดค่าอักขระและ คำสั่ง ASSIGN

1.6.1.2 คำสั่งควบคุม (Control Statement) เป็นคำสั่งที่มีผลต่อลำดับของคำสั่งที่จะนำไป ปฏิบัติการในหน่วยโปรแกรมเปลี่ยนไป ซึ่งปกติคำสั่งในโปรแกรมจะปฏิบัติตามลำดับที่เขียน

1.6.1.3 คำสั่งในการนำข้อมูลเข้า/ออก (Input/Output Statement) เป็นคำสั่งในการ เคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ หรือระหว่างหน่วยความจำ และอุปกรณ์รับส่งข้อมูลตาม ลักษณะที่กำหนด

1.6.2 คำสั่งไม่ปฏิบัติการ (Non-Executable Statement) เป็นคำสั่งที่ใช้กำหนดให้แก่ Processor ถึงลักษณะ ข้อกำหนดข้อมูล เตรียมข้อความที่เกี่ยวกับรูปแบบของ Input และ Output และกำหนด ข้อมูลเริ่มต้นให้แก่ Object Program มีดังต่อไปนี้

1.6.2.1 คำสั่งเฉพาะ (Specification Statement) เป็นคำสั่งที่มีหน้าที่ป้อนข่าวสารให้กับ Processor ในด้านการแปลความหมายการใช้ชื่อ สัญลักษณ์ภายใน โปรแกรม การกำหนดค่าเริ่มต้น ให้ตัวแปร ตัวแปรชุด และการเก็บข้อมูล

1.6.2.2 คำสั่ง FORMAT เป็นคำสั่งที่ใช้กับคำสั่งในการนำข้อมูลเข้า/ออก โดยคำสั่ง FORMAT เป็นคำสั่งในกรกำหนดรูปแบบของข้อมูลที่จะเคลื่อนย้าย พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงชนิด ข้อมูล และการเรียงข้อมูล เพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนด

1.6.2.3 คำสั่งระบุโปรแกรมย่อย เช่น SUBROUTINE, FUNCTION เป็นหน่วย โปรแกรม ซึ่งโปรแกรมอื่นๆ สามารถเรียกใช้ได้ อาจมีอยู่แล้วในระบบหรือกำหนดขึ้นมาใช้งานเอง

1.6.2.4 คำสั่งในการกำหนด Statement Function เป็นคำสั่งกำหนดฟังก์ชันขึ้นมาใช้งาน เอง นอกเหนือจากฟังก์ชันภายในที่มีให้

ในงานวิจัยนี้ทำการรับข้อมูลภายนอก 2 ส่วน คือ ส่วนข้อมูลบัส และข้อมูลสายส่ง โดยรับข้อมูลจากข้อมูลภายนอกที่เป็น DAT File โดยมีรูปแบบข้อมูลแสดงในภาคผนวกที่ ข การเขียนโปรแกรมในงานวิจัยนี้ จะแบ่งส่วนของโปรแกรมเป็น 3 ส่วน คือ โปรแกรมหลัก (Main Program) โปรแกรมย่อยสับรoutines (Subroutine Subprogram) และโปรแกรมย่อยฟังก์ชัน (Function Subprogram) ในการกำหนดค่าตัวแปร ส่วนที่เป็นจำนวนจริงกำหนดเป็นแบบ Double Precision เพราะสามารถคำนวณได้มากกว่าแบบ Real ซึ่งแบบ Double Precision คำนวณได้ตั้งแต่ -10^{38} ถึง 10^{38} เพื่อให้สะดวกในการเขียนและตรวจสอบโปรแกรม

ฟังก์ชันภายในของ Fortran 77 ที่มีให้ เป็นฟังก์ชันสำหรับคำนวณฟังก์ชันอักขระ และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันบ่อยๆ แต่มีไม่มาก จึงต้องเขียนฟังก์ชันเพื่อใช้งานเอง ในงานวิจัยนี้สร้างโปรแกรมย่อยฟังก์ชันใช้งานเอง คือ ฟังก์ชันการคูณเมตริก อินเวอร์สเมตริก การแปลงจำนวนเชิงซ้อนจาก Polar เป็น Rectangular และจาก Rectangular เป็น Polar

1.7 จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้

ระบบการประมวลผลของไมโครโปรเซสเซอร์ในปัจจุบันนี้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ทำให้ถูกมาใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะประสิทธิภาพการทำงานสูง และคำนวณผลต่างๆ ได้รวดเร็วทำให้มีการนำข้อดีของชุดประมวลผลไปวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 ซึ่งเป็นภาษาโปรแกรมพื้นฐาน เขียนโปรแกรมเพื่อนำมาวิเคราะห์ความผิดพลาดของระบบไฟฟ้ากำลังในแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล ผลที่ได้จะมีค่ากระแสลัดวงจรที่บัสใดๆ ในช่วงทรานเซียนต์ และในช่วงสภาวะอยู่ตัว รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดพลาดของระบบ โดยผลที่ได้จะต้องแม่นยำ รวดเร็ว และมีความน่าเชื่อถือเมื่อเปรียบเทียบกับ โปรแกรมสำเร็จรูป และนำผลที่ได้มาพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบของระบบป้องกัน (Protection System) การควบคุมและการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง และยังสามารถนำส่วนของโปรแกรมไปพัฒนาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การเกิดความผิดพลาดของระบบไฟฟ้าหรือในส่วนต่างๆต่อไป

1.8 โครงสร้างงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท เพื่อให้เห็นภาพรวมของวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้อธิบายขอบเขตของเนื้อหาในแต่ละบท ดังต่อไปนี้

‘บทที่ 1’ บทนี้เป็นบทนำของวิทยานิพนธ์ ได้อธิบายถึง ความหมาย และความจำเป็นที่ต้องมีการวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง คุณลักษณะพื้นฐานของกระแสลัดวงจรแบบไม่

สมมาตร และรวมถึงวิวัฒนาการของโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และข้อดี ข้อเสียของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับผลงานวิจัย โดยอธิบายถึงคุณสมบัติและคำสั่งพื้นฐานของภาษาฟอร์แทรน 77 เช่น คำสั่งปฏิบัติการ และคำสั่งไม่ปฏิบัติการ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย และส่วนประกอบของเนื้อหาทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

‘บทที่ 2’ บทนี้เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้กล่าวถึงแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ซิงโครนัส และมอเตอร์ที่เป็นโหลด คำรีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ที่มีผลต่อกระแสลัดวงจร คุณลักษณะของกระแสลัดวงจรแบบสมมาตร และไม่สมมาตร การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ศึกษาการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังและวิเคราะห์การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร และแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดความผิดปกติในระบบ

‘บทที่ 3’ บทนี้เป็นการนำเสนอฟังก์ชันอัลกอริทึมและนิยามของตัวแปรที่ใช้ในฟังก์ชันที่อยู่ในโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันการสร้างอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ ฟังก์ชันการคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในช่วงสภาวะอยู่ตัว และฟังก์ชันการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้าที่จะแปรผันไปตามเวลาเนื่องจากต้องคำนวณค่าที่อยู่ในช่วงทรานเซียนต์ และสภาวะอยู่ตัวเพื่อวิเคราะห์การเกิดกระแสลัดวงจรในช่วงเวลาใดๆ

‘บทที่ 4’ บทนี้เป็นการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าโดยจะนำเสนอลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมย่อย ซึ่งจะโปรแกรมย่อยนั้นจะเรียกข้อมูลชนิดต่างๆ เข้าประมวลผลในโปรแกรมนั้น และได้ผลจากการคำนวณของโปรแกรมย่อยเพื่อเตรียมข้อมูลให้โปรแกรมถัดไปได้ใช้งาน โดยจะมีโปรแกรมการคำนวณค่าแอดมิแตนซ์เมตริก และอิมพีแดนซ์เมตริก โปรแกรมรันโหลดไฟล์ โปรแกรมคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในสภาวะอยู่ตัว และแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติขึ้นที่บัส โปรแกรมคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรตามคาบเวลา และแผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดปกติแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้า

‘บทที่ 5’ บทนี้เป็นการนำผลการทดลองของโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูป Power World และ โปรแกรม PSCAD โดยจะเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรในสภาวะอยู่ตัว ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดปกติ และค่ากระแสลัดวงจรในสภาวะทรานเซียนต์ โดยจะเปรียบเทียบกันกรณีเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมดุล แบบสายกับดิน แบบสายกับสาย และ

เปรียบเทียบกันในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมดุล แบบสายกับดิน แบบสายกับสาย และแบบสองสายกับดิน แล้วคำนวณหาค่าความผิดพลาดของโปรแกรมที่สร้างขึ้นกับโปรแกรมสำเร็จรูป

บทที่ 6 บทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้ทดสอบโปรแกรมมาในระบบ IEEE 14 บัส IEEE 30 บัส IEEE 57 บัส และ IEEE 118 บัส และข้อเสนอแนะในการนำโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดปกติแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลังไปพัฒนาต่อในรูปแบบอื่นหรือสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโปรแกรมของผู้ใช้งานเองเพราะเป็นการเขียนโปรแกรมที่เหมาะสมกับการคำนวณทางวิศวกรรมศาสตร์ ความรวดเร็วในการประมวลผล ความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ด้วยภาษาฟอร์แทรน 77

บทที่ 2

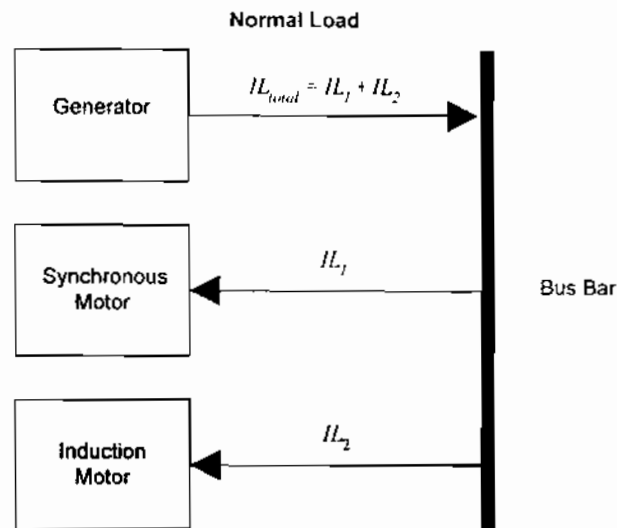
ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 ส่วนนำของเนื้อหา

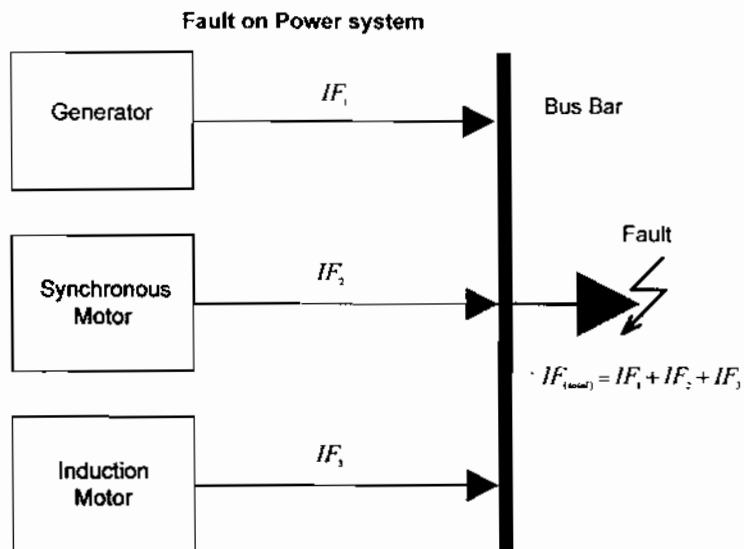
การวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในปัจจุบันจะเป็นการวิเคราะห์บนระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟสสมดุล ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีด้วยกันหลายแบบและแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือความผิดปกติแบบสมดุล (Symmetrical Fault) และความผิดปกติแบบไม่สมดุล (Unsymmetrical Fault) โดยความผิดปกติแบบสมดุลคือกรณีการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Three Phase Balanced Fault) ส่วนความผิดปกติแบบไม่สมดุลมีหลายกรณี คือกรณีการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Single Line to Ground Fault) กรณีการลัดวงจรระหว่างสายกับสาย (Line to Line Fault) และกรณีการลัดวงจรแบบสองสายกับดิน (Double Line to Ground Fault) โดยแรงดันและกระแสลัดวงจรนั้นจะเกิดในระบบไฟฟ้าจะต้องอาศัยแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรเป็นแหล่งกำเนิดกระแสให้ไหลในวงจรซึ่งต้องศึกษาถึงคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า คุณสมบัติแต่ละชนิดของความผิดปกติ การคำนวณกระแสลัดวงจรในส่วนของกระแสตรงและกระแสสลับที่อยู่ในช่วงทรานเซียนต์และช่วงสภาวะอยู่ตัวของแต่ละกรณีความผิดปกติ และความเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันในแต่ละเฟสในขณะที่เกิดความผิดปกติ

2.2 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร (Short of Short – Circuit Currents) [1, 2, 3]

การเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าสิ่งสำคัญที่สุดก็คือ การหาขนาดกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบนั้นๆ ดังนั้นการหาขนาดของกระแสลัดวงจรจำเป็นต้องทราบถึงแหล่งกำเนิดและคุณลักษณะรีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิดในระบบไฟฟ้านั้นด้วย โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่ 3 แหล่งกำเนิด คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารี (Generator) จะเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้า มอเตอร์เชิงโรตารี (Synchronous Motor) เป็นโหลดของระบบและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้ทั้งสองอย่าง และมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) จะเป็นโหลดของระบบไฟฟ้าอย่างเดียว จากภาพที่ 2-1 เป็นแผนผังระบบไฟฟ้าอย่างง่ายเพื่อแยกชนิดของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า



ภาพที่ 2-1 แผนผังในระบบไฟฟ้าแสดงกระแสไหลในสภาวะจ่ายโหลดปกติ



ภาพที่ 2-2 แผนผังในระบบไฟฟ้าแสดงกระแสไหลในสภาวะเกิดความผิดปกติ

2.3 รีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุน (Rotating-Machine Reactance) [1, 2]

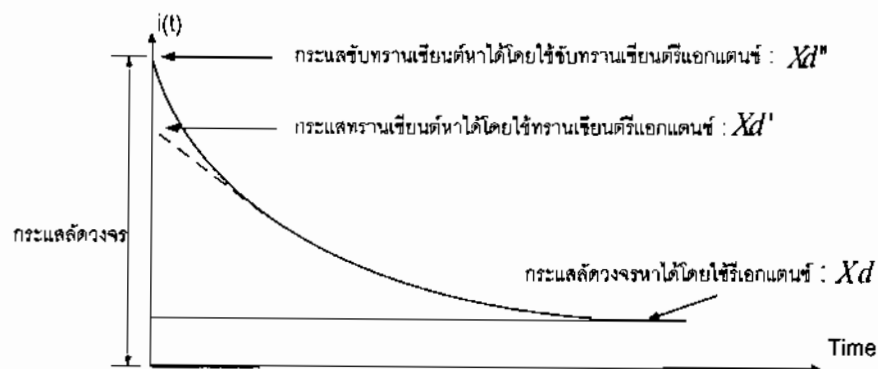
จากแหล่งกำเนิดกระแสตรงจะเห็นได้ว่าทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุน ซึ่งรูปแบบของรีแอกแตนซ์จะไม่เหมือนกับรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงกำลังหรือเคเบิลของสายส่งพลังไฟฟ้า แต่จะมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดย

ขั้นตอนของการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับเซอร์กิตเบรกเกอร์และรีเลย์ป้องกันนั้นจะมีรีเลย์ป้องกันนั้นจะมีแอกแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามอเตอร์ 3 ค่าคือ

2.3.1 ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ (Subtransient Reactance : X_d'') เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์จะปรากฏขึ้นทันทีที่เกิดลัดวงจรและใช้สำหรับหาค่ากระแสซับทรานเซียนต์ (Subtransient Current) ในระหว่างไซเคิลแรกๆ ของความถี่กระแสลัดวงจร

2.3.2 ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ (Transient Reactance : X_d') เป็นค่ารีแอกแตนซ์เริ่มต้น (Initial Reactance) ของขดลวดสเตเตอร์ ใช้สำหรับหากระแสทรานเซียนต์ (Transient Current) ในช่วงเวลาต่อมาจากซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์จะมีผลถึง 0.5 วินาที หรือนานกว่านี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.3.3 ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (Synchronous Reactance : X_d) เป็นรีแอกแตนซ์สำหรับใช้หารกระแสที่ไหลในสภาวะอยู่ตัว (Steady State) ซึ่งจะมีผลก็ต่อเมื่อเวลาได้ผ่านไปหลายวินาทีหลังจากการเกิดลัดวงจรขึ้น สำหรับค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์จะไม่นำมาใช้เพื่อคำนวณหารกระแสลัดวงจรเพื่อไปหาขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์ แต่จะใช้สำหรับการศึกษาคิดตั้งค่ารีเลย์ในการทำงาน (Relay Setting)



ภาพที่ 2-3 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรตามเวลากับค่ารีแอกแตนซ์ต่างๆแปรผันตามเวลา

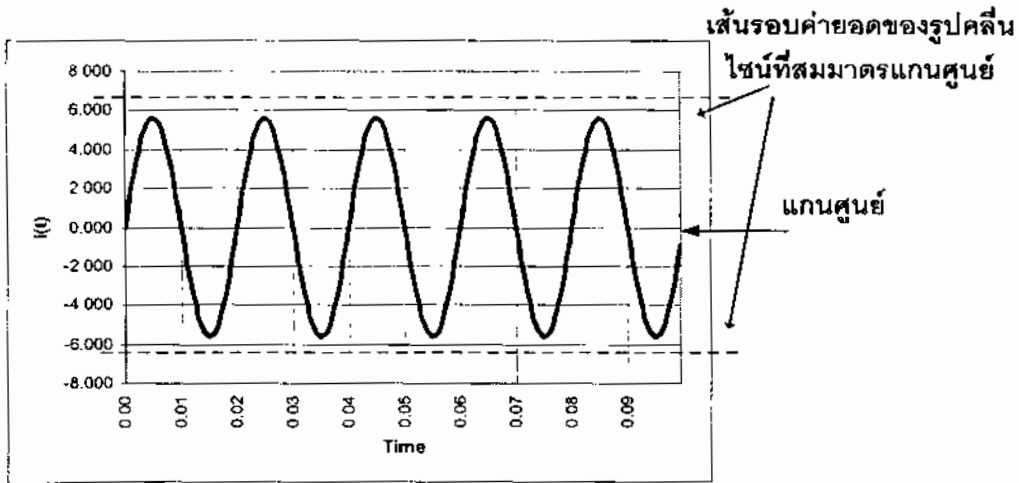
2.4 กระแสลัดวงจรสมมาตรและไม่สมมาตร (Symmetrical and Asymmetrical Short - Circuit Currents) [1, 2]

เทอมของกระแสสมมาตรและไม่สมมาตรจะใช้กับการบอกความสมมาตรของรูปคลื่นกระแสลัดรอบแกนศูนย์ ดังนี้

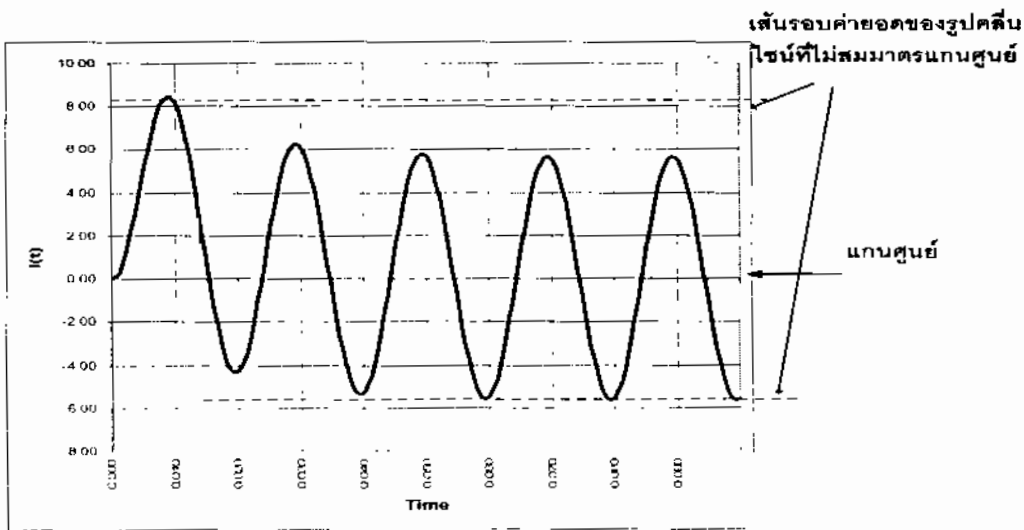
2.4.1 กระแสแบบสมมาตรหมายถึงรูปคลื่นของกระแสที่มีเส้นล้อมรอบ (Envelops) ค่ายอดของกระแส (Peak Current) สมมาตรแกนศูนย์ ดังภาพที่ 2-4

2.4.2 กระแสแบบไม่สมมาตรหมายถึงรูปคลื่นของกระแสที่มีเส้นล้อมรอบค่ายอดของกระแสไม่สมมาตรรอบแกนศูนย์ดังภาพที่ 2-5

โดยทั่วไปเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบกระแสสลับวงจรในช่วงไจเคล็ดแรกๆ หลังเกิดความผิดปกติจะมีส่วนไม่สมมาตร ซึ่งจะมีค่าไม่สมมาตรสูงสุดในทันทีที่เกิดความผิดปกติ แต่ในช่วงไจเคล็ดต่อๆ มาหลังเกิดความผิดปกติกระแสสลับวงจรจะค่อยๆ กลับเข้าสู่สภาพสมมาตรดังภาพที่ 2-5



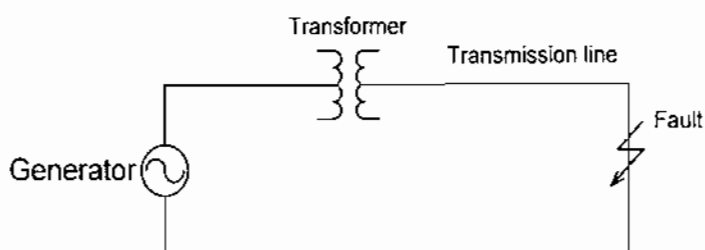
ภาพที่ 2-4 รูปคลื่นกระแสสลับที่สมมาตรรอบแกนศูนย์



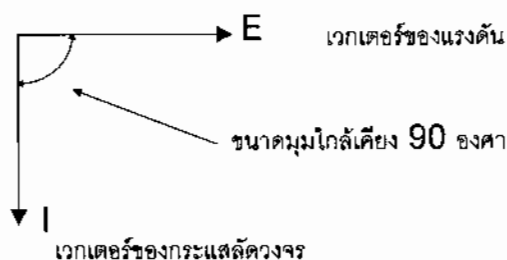
ภาพที่ 2-5 รูปคลื่นกระแสสลับที่ไม่สมมาตรรอบแกนศูนย์ หรือ กระแสสลับวงจรทั่วไป

2.5 การเกิดกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง (Asymmetrical Short Circuit Current in Power System) [1, 2, 3, 4]

ในระบบไฟฟ้ากำลังการผลิตไฟฟ้าจะมีสัญญาณแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบกระแสลัดวงจรก็จะมีรูปคลื่นสัญญาณไซน์ ดังนั้นเราจึงใช้รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเป็นไซน์ในการวิเคราะห์กระแสลัดวงจร



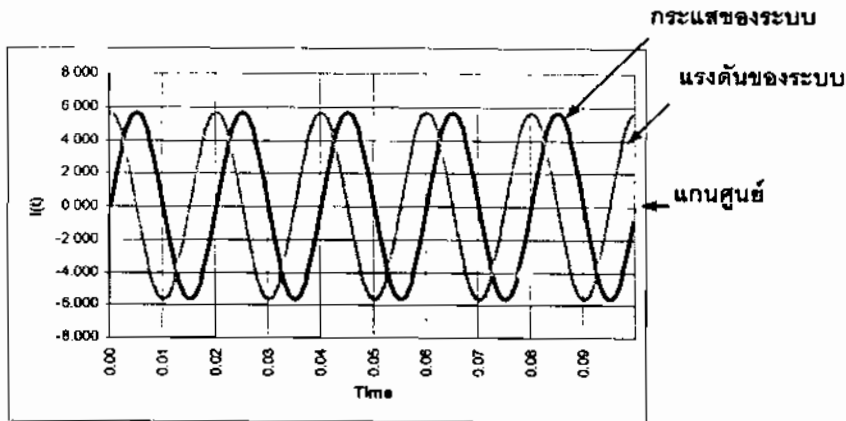
ภาพที่ 2-6 ไดอะแกรมแสดงของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบ



ภาพที่ 2-7 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันและกระแสจากอัตราส่วนของวงจร (ไม่คิดโหลด)

เมื่อพิจารณาของระบบไฟฟ้าดังภาพที่ 2-6 ถ้าระบบมีความต้านทานน้อยกว่า $\frac{1}{10}$ เท่าของรีแอกแตนซ์ เราสามารถตัดค่าของความต้านทานออกไปได้ ดังนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นจึงมีผลให้มุมเฟสแอมพลิจูดที่หาได้จากอัตราส่วนของความต้านทานและรีแอกแตนซ์เฉพาะของวงจร (ไม่คิดโหลด) มีค่าใกล้เคียง 90° ด้วยเหตุนี้กระแสลัดวงจรของวงจรจึงล้าหลังแรงดันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประมาณ 90° (ตามเวกเตอร์ไดอะแกรม) ดังภาพที่ 2-7

ถ้าวงจรในระบบไฟฟ้ามีรีแอกแตนซ์เป็นหลักและเมื่อเกิดลัดวงจรที่ค่าของรูปคลื่นแรงดัน ดังนั้นกระแสลัดวงจรจึงเริ่มต้นที่มุมศูนย์และจะมีรูปคลื่นไซน์ที่สมมาตรรอบแกนศูนย์ ดังภาพที่ 2-8 ซึ่งกระแสลัดวงจรนี้คือ กระแสลัดวงจรสมมาตร (Symmetrical Short-Circuit Current)



ภาพที่ 2-8 กระแสลัดวงจรสมมาตรและแรงดันของระบบที่มีเฟาเวอร์เฟกเตอร์เท่ากับศูนย์

ถ้าวงจรของระบบไฟฟ้าเดียวกันเกิดลัดวงจรขึ้นที่จุดศูนย์ของรูปคลื่นแรงดัน กระแสลัดวงจรก็เริ่มต้นที่จุดศูนย์เช่นกัน แต่ไม่สามารถเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมมาตรรอบแกนศูนย์ เพราะถ้าเป็นเช่นนั้นกระแสลัดวงจรก็จะมีเฟสเดียวกันกับแรงดัน ซึ่งความเป็นจริงแล้วรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรจะเหมือนกับแรงดันแต่มีมุมเฟสล้ำหลังอยู่ 90° ดังนั้นรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรสามารถที่จะเกิดขึ้นเพียงรูปแบบเดียวคือ ไม่สมมาตรรอบแกนศูนย์และเป็นรูปคลื่น ไซน์ที่ล้ำหลังแรงดันเป็นมุม 90°

ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นที่จุดใดๆ ของรูปคลื่นแรงดันยกเว้นที่ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน จะมีผลทำให้รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรมีค่าออฟเซต (Offset) ค่าออฟเซตขึ้นอยู่กับจุดใดบนรูปคลื่นแรงดันที่เกิดความผิดพลาดจนถึงจุดออฟเซตสูงสุด สำหรับกรณีที่วงจรของระบบประกอบทั้งรีแอกแตนซ์และความต้านทานค่าออฟเซตของกระแสลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับวงจรที่รีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียวแต่ในทางปฏิบัติส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว

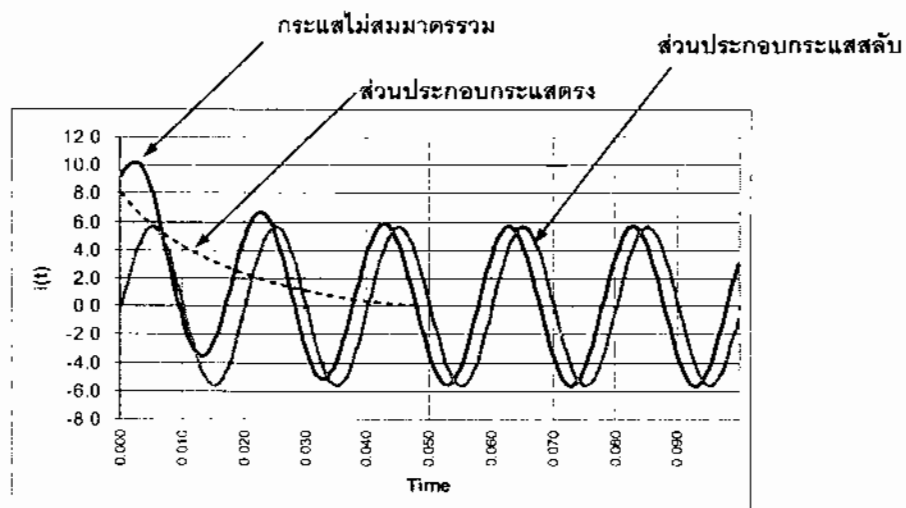
2.6 ส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสลัดวงจรไม่สมมาตร (D.C. Component of Asymmetrical Short – Circuit Currents) [1, 2, 3, 4]

ในความเป็นจริงกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรที่ถูกต้อนั้นจะประกอบด้วย กระแส 2 ส่วนไหลไปในเวลาเดียวกัน คือส่วนแรกเป็นส่วนประกอบกระแสลับที่เป็นรูปแบบสมมาตรกับแกนศูนย์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนประกอบกระแสตรง โดยผลรวมของกระแสทั้งสองส่วนที่ ณ เวลา

ใดๆจะเท่ากับขนาดของรูปคลื่นกระแสสลับไม่สมมาตรรวมที่เวลาเดียวกันจะได้ผลลัพธ์เป็นรูปคลื่นของกระแสไม่สมมาตร

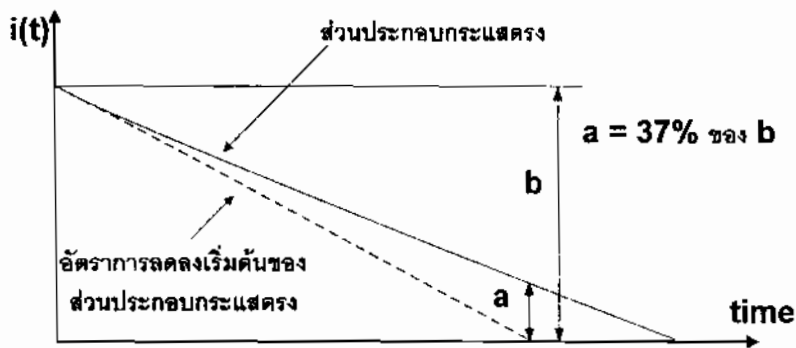
2.6.1 ค่าเริ่มต้นของส่วนประกอบกระแสตรง (Initial Magnitude of D.C. Component) ค่าเริ่มต้นของส่วนประกอบกระแสตรงขึ้นอยู่กับจุดที่เกิดความผิดปกติ และอาจเปลี่ยนแปลงจากค่าศูนย์ไปจนถึงค่าเริ่มต้นสูงสุดซึ่งเท่ากับค่ายอดของส่วนประกอบกระแสสลับ หรือจุดใดจุดหนึ่งบนรูปคลื่นของส่วนประกอบกระแสสลับ ในความเป็นจริงเมื่อเวลาผ่านไปขนาดของส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงโดยไม่ไหลลงที่อย่างต่อเนื่อง นอกเสียจากวงจรในระบบมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์

2.6.2 ค่าความลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง (Decrement of D.C. Component) ในปกติระบบไฟฟ้ากำลังจะไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ง่ายให้กับการไหลของกระแสตรงด้วยเหตุนี้พลังงานในรูปของส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสที่ไหลจะเป็นกำลังสูญเสีย I^2R โดยผ่านทางความต้านทานของวงจร และถ้าวงจรมีความต้านทานเป็นศูนย์กระแสตรงก็จะไหลด้วยค่าคงที่จนกระทั่งตัดวงจรนี้ออกจากระบบ อย่างไรก็ตามวงจรในทางปฏิบัติทั้งหมดต้องมีค่าความต้านทานอยู่ ดังนั้นส่วนประกอบกระแสตรงก็จะลดลงไปตามเวลา และการรวมกันของส่วนประกอบกระแสตรงที่ลดลง และส่วนประกอบกระแสสลับสมมาตรจะทำให้รูปคลื่นกระแสไม่สมมาตรเปลี่ยนเป็นรูปคลื่นสมมาตร เมื่อส่วนประกอบกระแสตรงหมดไป อัตราการลดลงของกระแสตรงนี้เรียกว่า “การลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง”



ภาพที่ 2-9 รูปคลื่นของการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงและกระแสสลับวงจรไม่สมมาตรจะมีรูปคลื่นเป็นสมมาตรเมื่อส่วนประกอบกระแสตรงหมดไป

2.6.3 เวลาคงที่ของกระแสตรง (D.C. Time Constant) จากอัตราส่วนการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงจะมีส่วนของเวลาคงที่ ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการสำหรับการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงประมาณ 37 % ของค่าเริ่มต้น เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น เวลาคงที่นี้คืออัตราส่วนของอินดักแตนซ์มีหน่วยเป็นเฮนรี (Henry: H) ต่อความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์มของวงจรหรือเครื่องจักรกลไฟฟ้า หรือเป็นเวลาสำหรับส่วนประกอบกระแสตรงลดลงจนเป็นศูนย์ ถ้ามันยังคงลดลงด้วยอัตราเดียวกันกับอัตราการลดลงของค่าเริ่มต้นดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 เวลาคงที่สำหรับการลดลงของกระแสตรง

2.6.4 ค่าประสิทธิผลรวมส่วนประกอบกระแสตรง (RMS Value Including D.C. Component) ค่าประสิทธิผลของรูปคลื่นกระแสสลับจะมีความสำคัญต่อการกำหนดพิคคของเซอร์กิต เบรกเกอร์ ฟิวส์ และมอเตอร์สตาร์ทเตอร์ในเทอมของกระแสประสิทธิผลหรือเควีเอสเอ็มยูล(Equivalent kVA) ค่าประสิทธิผลสูงสุดของกระแสสลับวงจรจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 1 ไซเคิลหลังเกิดความผิดปกติ ดังภาพที่ 2-10 ถ้าไม่มีการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงค่าประสิทธิผลในไซเคิลแรกของกระแสจะมีค่า 1.732 เท่าของค่าประสิทธิผลส่วนประกอบกระแสสลับแต่วงจรในทางปฏิบัติจะมีการลดลงของกระแสตรงในช่วงไซเคิลแรกเสมอ สำหรับค่าประสิทธิผลโดยประมาณของรูปคลื่นออฟเซต 1 ไซเคิล ไม่ว่าจะเป็ออฟเซตบางส่วนหรือออฟเซตทั้งหมดคือ

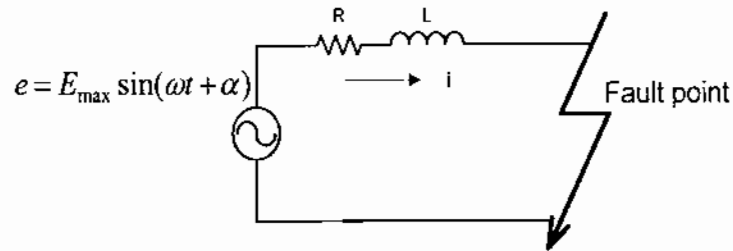
$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2-1)$$

เมื่อ C คือ ค่าประสิทธิผลของรูปคลื่นออฟเซตหรือกระแสไม่สมมาตรมากกว่า 1 ไซเคิล

a คือ ค่าประสิทธิผลของส่วนประกอบกระแสสลับ

b คือ ค่าของส่วนประกอบกระแสตรงที่ไหลเคลื่อนที่

2.7 สถานะทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ 3 เฟส (Generator Transients During a Three- Phase Fault) [4, 5, 6]



ภาพที่ 2-11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิง โครนัสที่เกิดฟอลต์แบบสมมูล โดยให้อินดักแตนซ์มีค่าคงที่

เมื่อ α คือ มุมเลื่อนเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ

จากภาพที่ 2-11 สมมติให้เกิดฟอลต์แบบสมมูลขึ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เวลา $t = 0$ ดังนั้น สมการของแรงดันชั่วขณะสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ

$$\begin{aligned} Ri + L \frac{di}{dt} &= Em \sin(\omega t + \alpha) \\ &= Em(\sin \omega t \cos \alpha + \sin \alpha \cos \omega t) \end{aligned} \quad (2-2)$$

จากสมการที่ 2-2 เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่อยู่ในโดเมนเวลา (Time Domain) สามารถทำได้โดยวิธีการแปลงลาปลาซให้เป็นสมการพีชคณิตในโดเมนความถี่เชิงซ้อน (Complex Frequency Domain) ดังนี้

$$\begin{aligned} I(s)(R + Ls) &= Em \left[\cos \alpha \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) + \sin \alpha \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) \right] \\ I(s) &= Em \left[\frac{s(\sin \alpha) + \omega(\cos \alpha)}{(s^2 + \omega^2)(R + Ls)} \right] \end{aligned}$$

$$I(s) = \frac{Em}{L} \left[\frac{As+B}{s^2+\omega^2} + \frac{C}{s+\frac{R}{L}} \right] \quad (2-3)$$

จากสมการที่ 2-3 เป็นสมการลาปลาซที่อยู่ในรูปแบบของเศษส่วนย่อย (Partial - Fraction Form) เพื่อความสะดวกเราจะอินเวอร์ตสมการนี้กลับให้อยู่ในโดเมนเวลาได้โดยการใช้ตารางลาปลาซสำหรับค่าคงที่ A, B และ C มีค่าดังนี้

$$\text{เมื่อ } A = \frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta), \quad B = \frac{\omega L}{Z} \cos(\alpha - \theta) \text{ และ } C = -\frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta)$$

$$\text{และ } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \text{ และ } \theta = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

แทนค่า A, B และ C ลงในสมการที่ (2-3) จะได้

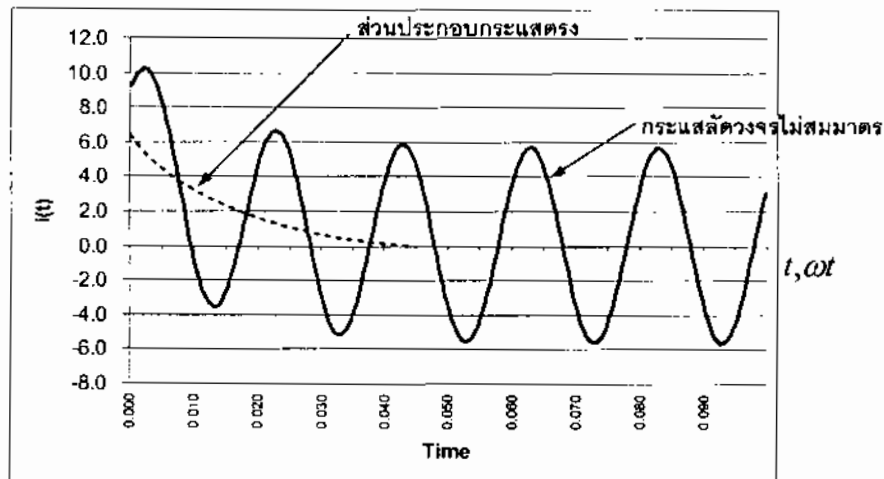
$$\begin{aligned} I(s) &= \frac{Em}{L} \left[\frac{s \frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta)}{s^2 + \omega^2} + \frac{\frac{\omega L}{Z} \cos(\alpha - \theta)}{s^2 + \omega^2} - \frac{\frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta)}{s + \frac{R}{L}} \right] \\ &= \frac{Em}{L} \left[\sin(\alpha - \theta) \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) + \cos(\alpha - \theta) \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) - \frac{\sin(\alpha - \theta)}{s + \frac{R}{L}} \right] \end{aligned}$$

จากการอินเวอร์ตสมการแปลงลาปลาซจะได้สมการกระแสในโดเมนเวลาดังนี้

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{Em}{Z} \left[\sin(\alpha - \theta) \cos \omega t + \cos(\alpha - \theta) \sin \omega t - \sin(\alpha - \theta) e^{-Rt/L} \right] \\ &= \frac{Em}{Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-Rt/L} \right] \quad (2-4) \end{aligned}$$

จะเห็นว่ากระแสทรานเซียนต์ขึ้นอยู่กับมุม α ของรูปคลื่นแรงดันในขณะที่เกิดลัดวงจรที่เวลา $t = 0$ โดยเทอมแรกของสมการที่ 2-4 จะแปรไปตามเวลาด้วยฟังก์ชันไซน์ซอซอด้ ซึ่งเป็นเทอม

ของกระแสคงที่ (Steady State Current) หรือส่วนของกระแสสลับสมมาตร ส่วนที่สองเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นคาบ (Nonperiodic) และมีค่าลดลงในลักษณะของเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) ด้วยเวลาคงที่ของ $\frac{L}{R}$ ซึ่งเป็นเทอมของส่วนประกอบกระแสตรง แล้วจะไม่เกิดส่วนประกอบกระแสตรงขึ้น ถ้าการลัดวงจรเกิดขึ้นที่จุดศูนย์ของรูปคลื่นแรงดันคือ $(\alpha - \theta) = 0^\circ$ หรือ $(\alpha - \theta) = 180^\circ$ ดังภาพที่ 2-4 ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสตามเวลาที่สอดคล้องกับสมการที่ 2-4 เมื่อ $(\alpha - \theta) = 0^\circ$ จึงทำให้กระแสลัดวงจรที่จุดนี้เป็นกระแสลัดวงจรที่สมมาตร และถ้าการลัดวงจรเกิดขึ้นที่จุดค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันคือ ที่มุม $\pm 90^\circ$ จะทำให้ส่วนประกอบกระแสตรงมีค่าสูงสุดซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของส่วนประกอบไซน์ซออยด์ ดังภาพที่ 2-12 แสดงกระแสเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อ $(\alpha - \theta) = -90^\circ$ ส่วนประกอบกระแสตรงอาจมีค่าใดๆก็ได้ที่อยู่ระหว่างศูนย์ถึงค่าสูงสุดเท่ากับ $\frac{E_{\max}}{Z}$ ขึ้นอยู่กับเกิดการเกิดความลัดวงจรขึ้นที่จุดใดบนรูปคลื่นแรงดันและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจร



ภาพที่ 2-12 รูปคลื่นของกระแสเกิดการลัดวงจรที่เวลา $t = 0$ สำหรับมุม $(\alpha - \theta) = -90^\circ$ เมื่อ

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \text{ และมีแรงดัน } E_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$$

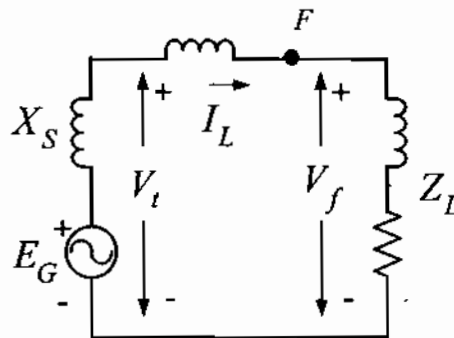
จากรูปคลื่นของกระแสในภาพที่ 2-12 เป็นรูปกระแสลัดวงจรไม่สมมาตร ถ้าสมมุติให้อินดักแตนซ์ (L) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่ ซึ่งทางปฏิบัติจะไม่เป็นจริงอย่างที่สมมุตินี้ การพิจารณาส่วนประกอบกระแสตรงจะมีผลต่อการเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยผลของส่วนประกอบกระแสตรงทำให้ต้องเพิ่มขนาดของเซอร์กิตด้วยการคูณขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่คำนวณมาได้

กับแฟกเตอร์การคูณ (Multiplying Factor) แฟกเตอร์การคูณนี้จะมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 1.6 ขึ้นอยู่กับชนิดและความเร็วของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่นำมาใช้งาน

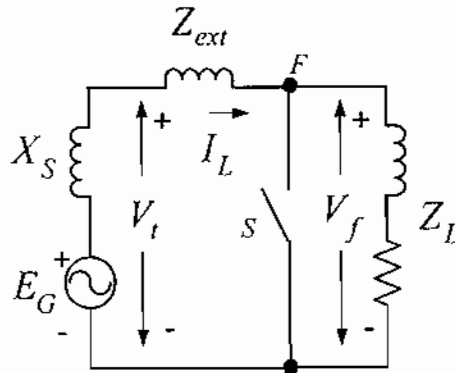
ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสโดยทั่วไปจับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์จะนำไปใช้หากระแสที่เริ่มต้นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นและสามารถนำค่ากระแสเริ่มต้นนี้ไปหาอินเตอร์รัปติงคาปาซิตี (Interrupting Capacity) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในการทำงานนั้นจับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์จะใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์จะใช้กับมอเตอร์ซึ่งโครนัส

2.8 แรงดันภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโหลดภายใต้เงื่อนไขสภาวะทรานเซียนต์ (Internal Voltage of Loaded Machines Under Transient Condition) [1, 2, 3, 4, 5]

2.8.1 การหากระแสฟอลต์ด้วยแรงดันภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า การคำนวณโดยวิธีนี้โดยหลักการต้องหาค่าแรงดันภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สร้างจากสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ให้ทุกเครื่องจักรในระบบแล้วหลังจากนั้นใช้หลักการของซูเปอร์โพสิชัน (Superposition) หากระแสลัดวงจรรวมที่ได้จากการรวมกันของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากแรงดันแต่ละเครื่องจักร



ภาพที่ 2-13 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายโหลดในสภาวะอยู่ตัว



ภาพที่ 2-14 วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณหากระแสฟอลต์ชั่วคราวชนิด

จากภาพที่ 2-13 และ ภาพที่ 2-14 จะพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นวงจรมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับโหลด 3 เฟสสมดุลโดยกำหนดให้

- เมื่อ E_G คือ แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด
- V_i คือ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- V_f คือ แรงดันก่อนเกิดความผิดปกติ (Prefault Voltage) ที่จุด F
- I_L คือ กระแสที่ไหลในวงจรก่อนเกิดฟอลต์ที่จุด F
- Z_{ext} คือ อิมพีแดนซ์ภายนอกที่ต่อระหว่างขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจุด F ที่เกิดฟอลต์

จากวงจรมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครน์สจะประกอบด้วยแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด E_G ที่มีขั้วโครน์สรีแอกแตนซ์ X_s ต่ออนุกรมอยู่ ถ้าเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟสขึ้นที่จุด F จากวงจรมูลเราจะเห็นว่าเกิดความผิดปกติระหว่างจุด F กับจุดนิวทรัล จะไม่รวมถึงการคำนวณกระแสลัดวงจรชั่วคราวชนิด ดังนั้นถ้าจะคำนวณกระแสชั่วคราวชนิด I''_f ก็จำเป็นต้องใช้รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น X''_d หรือถ้าจะคำนวณกระแสชั่วคราวชนิด I'_f ก็จำเป็นต้องใช้รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น X'_d

จากภาพที่ 2-14 เป็นวงจรสำหรับคำนวณกระแสฟอลต์เมื่อสวิตช์ S เปิดอยู่ วงจรจะมีแรงดัน E_G ต่ออนุกรมกับ X''_d โดยจะมีกระแสสถานะอยู่ตัว I_L ไหลในวงจรและเมื่อสวิตช์ S ปิดจะทำให้กระแสลัดวงจรไหลผ่าน X''_d และ Z_{ext} โดยถ้าหาค่าแรงดัน E''_G ได้กระแสที่ไหลผ่าน X''_d นี้ก็คือ กระแสชั่วคราวชนิด I''_f

พิจารณาภาพที่ 2-14 จะเห็นว่าเมื่อสวิตช์ S เปิดอยู่จะสามารถเขียนสมการของวงจรได้คือ

$$E''_G = V_t + jI_L X''_d \quad (2-5)$$

เมื่อ E''_G คือ แรงดันชั่วคราวภายใน (Subtransient Internal Voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การคำนวณหากระแสทรานเซียนต์ภายใน I'_f ที่ไหลผ่าน X'_d จะมีสมการของแรงดันเป็นดังสมการที่ 2-6

$$E'_G = V_t + jI_L X'_d \quad (2-6)$$

เมื่อ E'_G คือ แรงดันทรานเซียนต์ภายใน (Transient Internal Voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แรงดัน E''_G และ E'_G สามารถหาค่าได้ด้วย I_L และแรงดันทั้งสองจะเท่ากับแรงดันขณะไม่มีโหลด E_G ก็ต่อเมื่อ $I_L = 0$ ดังนั้น E_G ก็จะมีค่าเท่ากับ V_t และในกรณีของมอเตอร์ซิงโครนัสก็จะมีชนิดของรีแอกแตนซ์เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อมอเตอร์เกิดความผิดปกติของมอเตอร์ก็จะไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่าย แต่สนามแม่เหล็กในตัวมอเตอร์ก็ยังคงอยู่และ โรเตอร์ก็ยังคงหมุนด้วยความเฉื่อยอยู่ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นมอเตอร์จะมีคุณลักษณะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจ่ายกระแสเข้าสู่ระบบ โดยการเปรียบเทียบความสอดคล้องของสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำให้สามารถหาแรงดันชั่วคราวภายในและแรงดันทรานเซียนต์ภายในมอเตอร์ได้ดังนี้

$$E''_m = V_t + jI_L X''_d \quad (2-7)$$

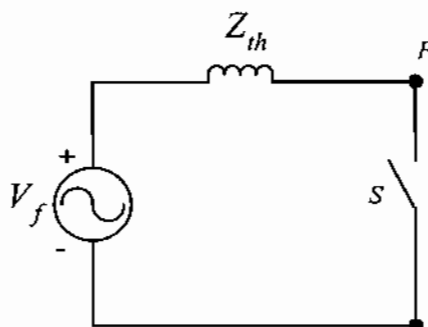
$$E'_m = V_t + jI_L X'_d \quad (2-8)$$

เมื่อ E''_m คือ แรงดันชั่วคราวภายในของมอเตอร์

E'_m คือ แรงดันทรานเซียนต์ภายในของมอเตอร์

2.8.2 การหากระแสฟอลต์ด้วยการใช้ทฤษฎีของเทวินิน การคำนวณหากระแสลัดวงจรที่จุดต่างๆ ภายในระบบโดยอาศัยแรงดันภายในเครื่องจักรแต่ละชุด ถ้าเป็นระบบใหญ่ๆ จะเสียเวลามาก เช่นระบบที่มีเครื่องจักร 60 ชุด จำเป็นต้องคำนวณกระแสลัดวงจรที่ไหลจนส่วนต่างๆ ของระบบ เนื่องจากแรงดันภายในของเครื่องจักรแต่ละชุดจากวงจรทั้งหมด 60 ชุด ดังนั้นวิธีการคำนวณหากระแสลัดวงจร โดยคิดจากแรงดันภายในของเครื่องจักรจึงไม่เหมาะสมสำหรับระบบใหญ่

การคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบใหญ่ๆ จำเป็นต้องใช้เวลาที่น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองเวลาของคอมพิวเตอร์ประมวลผล โดยผลผิดพลาดให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการพิจารณาการใช้เทวินินมาคิดหากระแสลัดวงจรในระบบในภาพที่ 2-14 เขียนเป็นวงจรสมมูลเทวินินได้ดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 วงจรสมมูลเทวินินของวงจรภาพที่ 2-14

เมื่อ Z_{th} คือ อิมพีแดนซ์สมมูลเทวินิน

$$Z_{th} = \frac{(Z_{ext} + jX''_d)Z_L}{(Z_L + Z_{ext} + jX''_d)} \quad (2-9)$$

เมื่อเกิดฟอลต์สมมาตร 3 เฟสขึ้นที่จุด F โดยการจำลองเสมือนการปิดสวิตช์ S สามารถหากระแสชั้ทรานเซียนต์ที่จุดเกิดฟอลต์ได้จากสมการ

$$I''_f = \frac{V_f}{Z_{th}} = \frac{V_f(Z_L + Z_{ext} + jX''_d)}{Z_L(Z_{ext} + jX''_d)} \quad (2-10)$$

เมื่อหาค่ากระแส I''_f ได้สมการหาค่าของแต่ละส่วนของวงจรได้ด้วยกฎหมายการแบ่งกระแสดังนี้

$$I''_{fG} = \frac{Z_L}{(Z_L + Z_{ext} + jX''_d)} I''_f \quad (2-11)$$

$$I''_{fL} = \frac{(Z_{ext} + jX''_d)}{(Z_L + Z_{ext} + jX''_d)} I''_f \quad (2-12)$$

เมื่อ I''_f คือ กระแสชั้บทรานเซียนต์รวมที่จุดเกิดฟอลต์

I''_{fG} คือ กระแสชั้บทรานเซียนต์จากส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

I''_{fL} คือ กระแสชั้บทรานเซียนต์จากส่วนของโหลด

สำหรับกระแสชั้บทรานเซียนต์ I''_{fG} และ I''_{fL} จะเป็นค่าของกระแสฟอลต์จากส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่ยังไม่ได้รวมค่ากระแสของโหลดก่อนเกิดฟอลต์ ดังนั้นกระแสชั้บทรานเซียนต์จากส่วนต่างๆ ของวงจรเมื่อรวมค่ากระแสโหลดที่ไหลในวงจรก่อนเกิดฟอลต์สามารถหาได้จากสมการ

$$I''_G = I''_{fG} + I_L \quad (2-13)$$

$$I''_L = I''_{fL} - I_L \quad (2-14)$$

เมื่อ I''_G คือ กระแสชั้บทรานเซียนต์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

I''_L คือ กระแสชั้บทรานเซียนต์ในส่วนของโหลด

2.9 การคำนวณกระแสฟอลต์ด้วยบั้สอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Fault Calculation by The Bus Impedance Matrix) [12, 13, 14]

การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีวิธีการที่เหมาะสม เพราะในระบบไฟฟ้ากำลังใหญ่ๆ เราไม่สามารถเขียนไดอะแกรมเส้นเดียวแล้วนำมาคำนวณโดยใช้หลักการของเทวินินได้ การคำนวณจำเป็นต้องใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยแก้ไขปัญหาค้นหาอย่างไรจึงจะจัดระบบไฟฟ้าและวิธีการคำนวณให้คอมพิวเตอร์ดำเนินการได้ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวก็ยังใช้หลักการของเทวินินอยู่เพียงแต่ต้องจัดรูปของระบบให้อยู่ในฟอร์มที่จะใช้คอมพิวเตอร์ได้ คือจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) โดยเมตริกซ์ที่นิยมใช้กันมากและสะดวกที่สุดในการคำนวณกระแสลัดวงจร คือ Z_{BUS}

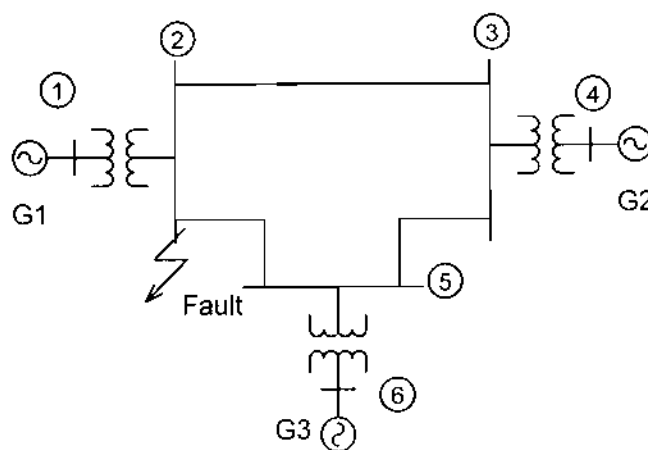
วิธีการคำนวณหา Z_{BUS} จากไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบสามารถทำได้หลายอย่าง แต่มักใช้กันมี 2 อย่าง คือ การอินเวอร์ส (Inverse) ของ Z_{BUS} และอีกวิธีคือ การเพิ่มอุปกรณ์เข้าไปทีละอุปกรณ์เพื่อฟอร์ม Z_{BUS} (Add Branch – Add Link) ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสบั้สเป็นไปตามสมการที่ 2-15

$$V_{BUS} = Z_{BUS} \times I_{BUS} \quad (2-15)$$

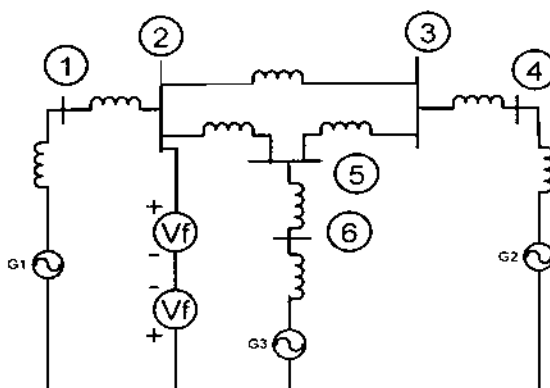
เมื่อ V_{BUS} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_{BUS} คือ กระแสจากแหล่งจ่ายไฟเข้าที่บัส (บัสใดไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าบัสนั้นมี $I = 0$)

พิจารณาหากระแสลัดวงจรจากบัสอิมพีแดนซ์โดยใช้ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบในภาพที่ 2-16 เป็นตัวอย่างซึ่งมีทั้งหมด 6 บัสและสมมติว่าเกิดลัดวงจรที่บัส 2



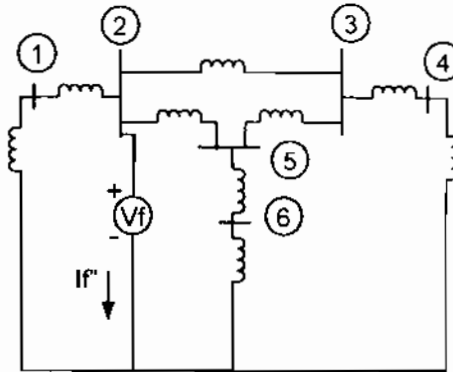
ภาพที่ 2-16 ตัวอย่างของไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ



ภาพที่ 2-17 วงจรจำลองของระบบในภาพที่ 2-16

วงจรสมมูลของระบบขณะเกิดลัดวงจรไว้ในภาพที่ 2-17 และวงจรสมมูลเทวินินแสดงในภาพที่ 2-18 จะเห็นว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียว คือ $-V_f$ ที่บัส 2 และกระแสลัดวงจร I''_f ที่ไหลดังในรูปจะปรากฏเป็น $-I''_f$ ในเมตริกซ์ I_{BUS} เพราะกระแสจะถูกนิยามว่าเป็นกระแสที่ไหล

เข้าบัส ส่วนกระแสในบัสอื่นๆ เป็นศูนย์เพราะไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าในวงจรเทวินิน ดังนั้นจะได้ สมการที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 วงจรเทวินินของระบบในภาพที่ 2-16

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ -V_f \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & \dots & \dots & Z_{16} \\ Z_{21} & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ Z_{61} & \dots & \dots & \dots & \dots & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I''_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

ดังนั้น

$$I''_f = \frac{V_f}{Z_{22}} \quad (2-17)$$

และ

$$V_1^\Delta = -I''_f Z_{12} = -\frac{Z_{12}}{Z_{22}} V_f \quad (2-18)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_3^\Delta = -I''_f Z_{32} = -\frac{Z_{32}}{Z_{22}} V_f \quad (2-19)$$

เมื่อทำความผิดพร้อมแหล่งจ่าย $-V_f$ ดังนั้นทำให้มีแรงดันและกระแสในส่วนก่อนวงจรก่อนเกิดฟอลต์ โดยการทับซ้อน (Superposition) จะมีการเพิ่มแรงดันก่อนเกิดฟอลต์ด้วยแรงดันตามสมการที่ 2-18 ถึง สมการที่ 2-19 ทำให้สามารถแรงดันหลังจากการเกิดฟอลต์ได้ โดยปกติจะสมมุติให้วงจรไฟฟ้าไม่มีโหลด จึงไม่มีกระแสไหลก่อนเกิดฟอลต์และแรงดันทั้งหมดของวงจรไฟฟ้านี้จะ

เหมือนกันหมดและมีค่าเท่ากับ V_f ซึ่งถ้าไม่พิจารณากระแสก่อนเกิดฟอลต์ สมการทั่วไปที่ใช้สำหรับหากระแสเมื่อเกิดฟอลต์ที่บัส k ใดๆ คือ

$$I_f = \frac{V_f}{Z_{kk}} \quad (2-20)$$

แรงดันหลังเกิดฟอลต์ที่บัสคือ

$$V_n = V_f - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_f \quad (2-21)$$

ถ้าพิจารณาแรงดันไฟฟ้าของสภาวะปกติเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในระบบจ่ายโหลดปกติมีค่ามาก ดังนั้นการหาแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติจุดต่างๆในระบบต้องนำแรงดันไฟฟ้าในวงจรเทวินินไปรวมกับแรงดันไฟฟ้าตอนจ่ายโหลดด้วยจะได้สมการดังนี้

$$V_{if} = V_m + \Delta V_i \quad (2-22)$$

เมื่อ V_{if} คือ แรงดันไฟฟ้าของบัสที่ i ขณะเกิดความผิดปกติ
 V_m คือ แรงดันไฟฟ้าของบัสที่ i สภาวะโหลดปกติ

2.10 ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) [7]

ในการวิเคราะห์ความผิดปกติแบบไม่สมมาตรนั้นจะต้องใช้วิธีการของส่วนประกอบสมมาตร โดยในปี ค.ศ.1918 ซี.แอล. ฟอรัทส์คู (C.L. Fortescue) ได้เสนอวิธีการสำหรับการแก้ปัญหาในระบบที่ไม่สมดุลของ n เฟสเซอร์ที่มีความสัมพันธ์กันด้วยระบบ n เฟสเซอร์ที่สมดุล เรียกว่า ส่วนประกอบเฟสเซอร์เดิม (Symmetrical Components of The Original Phasors) สามารถประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้ดีด้วยเฟสเซอร์ของส่วนประกอบต่อไปนี้

2.10.1 ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive-Sequence Components) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสแตกต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส (Phase Sequence) เหมือนกับเฟสเซอร์เดิม

2.10.2 ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative - Sequence Component) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสแตกต่างกัน 120° และมีลำดับเฟสเซอร์ตรงข้ามกับเฟสเดิม

2.10.3 ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero - Sequence Components) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสเดียวกัน

สำหรับเฟสเซอร์ของแรงดัน V_a, V_b และ V_c ที่ไม่สมดุล สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรได้ดังนี้

$$Va = Va_1 + Va_2 + Va_0 \quad (2-23)$$

$$Vb = Vb_1 + Vb_2 + Vb_0 \quad (2-24)$$

$$Vc = Vc_1 + Vc_2 + Vc_0 \quad (2-25)$$

และในทำนองเดียวกันเฟสเซอร์ของกระแส I_a, I_b และ I_c ที่ไม่สมดุลคือ

$$Ia = Ia_1 + Ia_2 + Ia_0 \quad (2-26)$$

$$Ib = Ib_1 + Ib_2 + Ib_0 \quad (2-27)$$

$$Ic = Ic_1 + Ic_2 + Ic_0 \quad (2-28)$$

2.11 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร (The Symmetrical Components of Unsymmetrical Phasors) [1, 2, 3, 4]

หากกำหนดให้เฟส a เป็นเฟสอ้างอิงและด้วยการใช้โอเปอเรเตอร์ a ($a = 1\angle 120^\circ$) ดังนั้นส่วนประกอบสมมาตรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} \\ V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} \\ V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{c0} = V_{a0} \end{aligned} \quad (2-29)$$

แทนค่าสมการที่ 2-29 ลงในสมการที่ 2-24 และ 2-25 จะได้

$$Va = Va_1 + Va_2 + Va_0 \quad (2-30)$$

$$Vb = a^2 V_{a1} + aV_{a2} + V_{a0} \quad (2-31)$$

$$Vc = aV_{a1} + a^2V_{a2} + V_{a0} \quad (2-32)$$

สมการที่ 2-30 ถึงสมการที่ 2-32 เรียกว่าสมการสังเคราะห์ (Synthesis Equation) สามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

หรือ
$$[V_{abc}] = [A][V_{012}] \quad (2-34)$$

และนำเมตริกซ์ A ไปอินเวอร์สจะได้ A^{-1} แล้วนำไปคูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2-34 จะได้สมการวิเคราะห์ (Analysis Equation)

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

หรือ
$$[V_{012}] = [A]^{-1}[V_{abc}] \quad (2-36)$$

สำหรับสมการสังเคราะห์และสมการวิเคราะห์ที่อยู่ในเทอมเฟสและลำดับของกระแส สามารถเขียนเป็นสมการในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

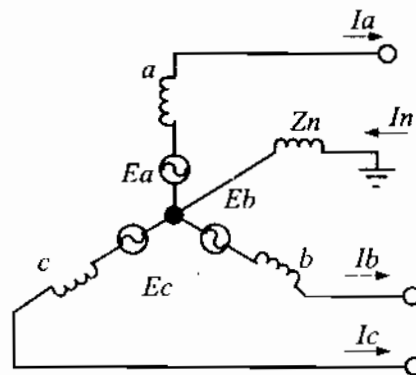
หรือ
$$[I_{abc}] = [A][I_{012}] \quad (2-38)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

หรือ
$$[I_{012}] = [A]^{-1}[I_{abc}] \quad (2-40)$$

2.12 ลำดับของวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีโหลด (Sequence Network of Unloaded Generators) [1, 2, 3, 4]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จุดต่อนิวทรัลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกแตนซ์และไม่ได้ต่อโหลดไว้ ดังภาพที่ 2-19 เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีกระแส I_a , I_b และ I_c ถ้าเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้นเกี่ยวกับดินก็จะมีเกิดกระแส I_n ไหลเข้าสู่จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 2-19 วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีต่อโหลด และจุดนิวทรัลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกแตนซ์แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส คือ E_a , E_b และ E_c

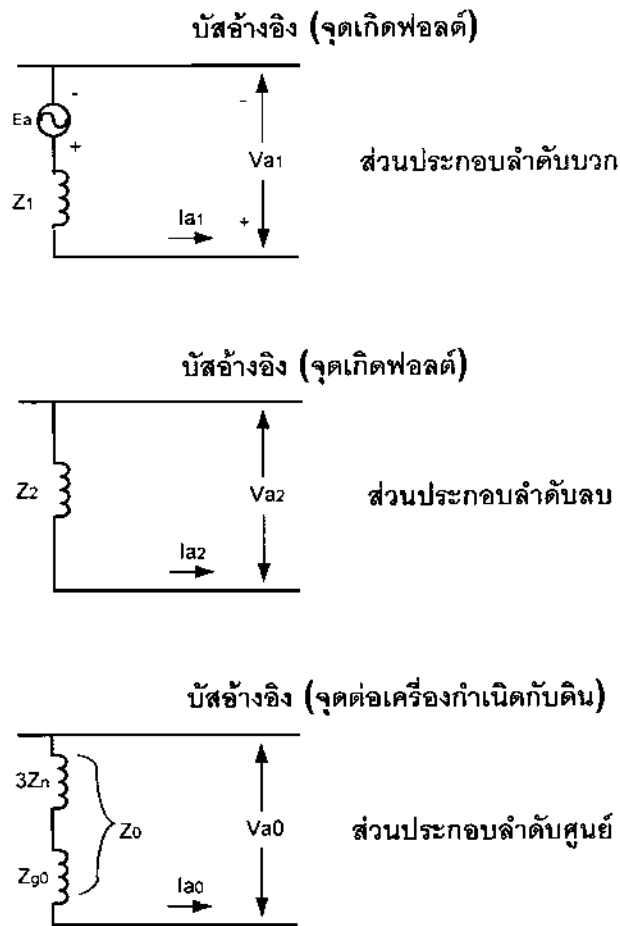
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกแบบให้จ่ายแรงดันให้กับระบบ 3 เฟสที่สมดุล ดังนั้นลำดับของวงจรจะมีส่วนประกอบดังนี้

วงจรลำดับบวก จะประกอบด้วยแรงดันเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วงจรลำดับลบ จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำแต่จะมีเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วงจรลำดับศูนย์ จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำแต่จะมีเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะมีส่วนประกอบของลำดับกระแสได้แสดงในภาพที่ 2-20 กระแสลำดับใดก็จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่มีลำดับเหมือนกับกระแสนั้น



ภาพที่ 2-20 การไหลของกระแสแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สอดคล้องกับลำดับของวงจรไฟฟ้า

ลำดับวงจรไฟฟ้าที่แสดงในภาพที่ 2-20 คือวงจรสมมูลต่อเฟสของวงจร 3 เฟสแบบสมดุลที่มีการพิจารณาการไหลของส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไม่สมมาตร ดังนั้นสามารถจะนำเอาคุณสมบัติของซบทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ หรือซิงโครไนส์รีแอกแตนซ์ มาศึกษาให้อยู่ในเงื่อนไขนั้น

บัสอ้างอิง (Reference Bus) สำหรับวงจรลำดับบวกและลำดับลบก็คือ จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนวงจรลำดับศูนย์ก็คือ จุดต่อของเครื่องกำเนิดกับดิน

เมื่อ Z_{g0} คืออิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรลำดับศูนย์จะต้องมีกระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ $3Z_n + Z_{g0}$ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวม (Total Zero-Sequence Impedance) ที่มีกระแส I_{o0} (กระแสต่อเฟส) ไหลผ่านคือ

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \tag{2-40}$$

โดยทั่วไปการเขียนสมการสำหรับลำดับของวงจรไฟฟ้า จะใช้ส่วนประกอบของแรงดันและกระแสในเฟส a สมการสำหรับส่วนประกอบของแรงดันตกคร่อมจากจุด a กับบัสอ้างอิงคือ

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \tag{2-41}$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \tag{2-42}$$

$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0 \tag{2-43}$$

- เมื่อ E_a คือ แรงดันขณะไม่มีโหลดลำดับบวกเป็นแรงดันระหว่างสายกับนิวทรัล
- Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับบวก
- Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับลบ
- Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวม ตามสมการที่ 2-40

2.13 การวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง (Unsymmetrical Faults on Power System)

2.13.1 การเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟสสมดุล (Three Phase Balanced Fault) การเกิดความผิดปกติ 3 เฟสสมดุลขึ้นอยู่กับระบบที่สมมาตรจะมีอิมพีแดนซ์ในแต่ละสายเท่ากันและมีกระแสลำดับบวกไหลในระบบเท่านั้น เมื่อฟอลต์อิมพีแดนซ์ Z_f ทุกเฟสมีค่าเท่ากัน ดังในภาพที่ 2-21 โดยสมการหาค่าแรงดันที่จุดเกิดความผิดปกติคือ



ภาพที่ 2-21 ลักษณะการเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมดุลและลำดับวงจรไฟฟ้า

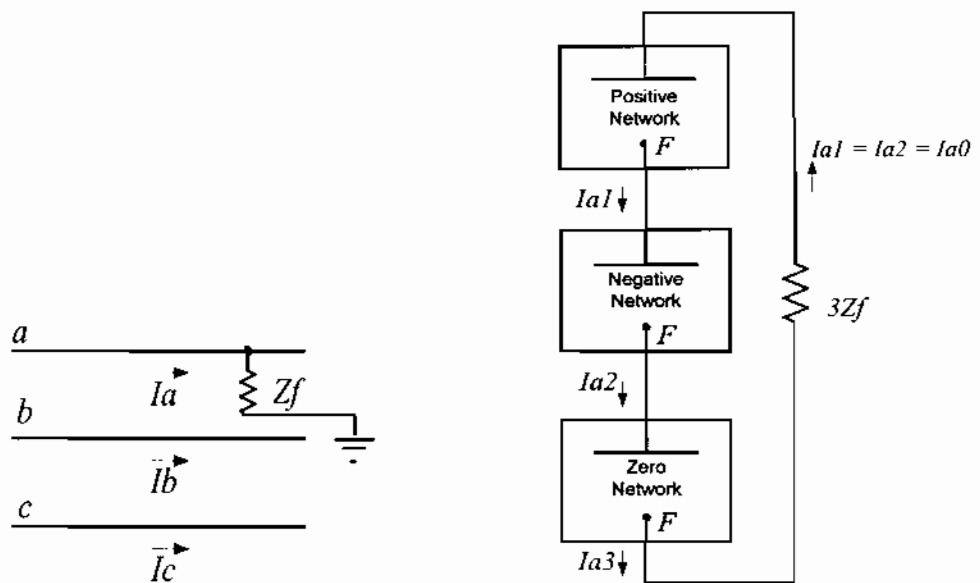
$$V_a = I_a Z_f \tag{2-44}$$

กระแสที่ไหลในระบบจะมีเฉพาะกระแสลำดับบวกเท่านั้น ดังนั้น

$$V_{a1} = I_{a1}Z_f = V_f - I_{a1}Z_1 \tag{2-45}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \tag{2-46}$$

2.13.2 การเกิดความผิดปกติระหว่างสายกับดินที่ระบบไฟฟ้ากำลัง (Single Line to Ground Fault) การเกิดความผิดปกติระหว่างสายกับดิน จะพิจารณาเมื่อเกิดความผิดปกติผ่านอิมพีแดนซ์ Z_f จะมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_f อยู่ระหว่างนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับดิน นั่นคือจะต้องเพิ่ม $3Z_f$ เข้าไปในวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ ดังภาพที่ 2-22



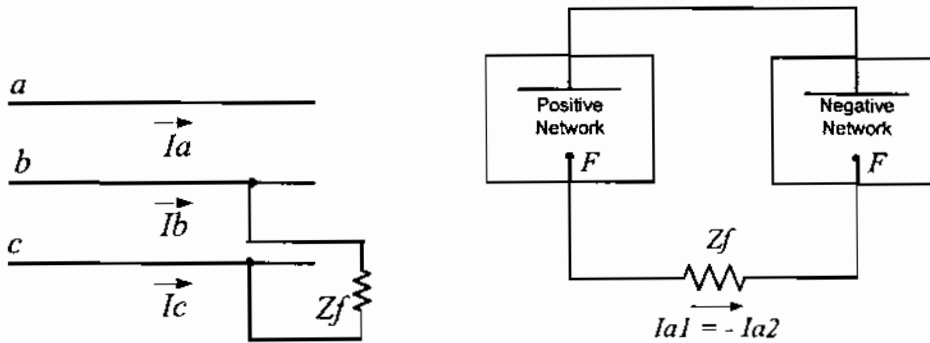
ภาพที่ 2-22 ลักษณะการเกิดความผิดปกติแบบสายกับดินและลำดับวงจรไฟฟ้า

จะพิจารณาสมการของฟอลต์ระหว่างสายกับดินผ่านอิมพีแดนซ์จะมีสมการส่วนประกอบ ดังนี้

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \tag{2-47}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2-48)$$

2.13.3 การเกิดความผิดปกติสายกับสาย (Line to Line Fault) การเกิดฟอลต์ระหว่างสายกับสายผ่านอิมพีแดนซ์ Z_f จะมีเงื่อนไขการเกิดความผิดปกติ โดยสภาพการเกิดความผิดปกติสมมุติให้เกิดความผิดปกติที่เฟส B และ C



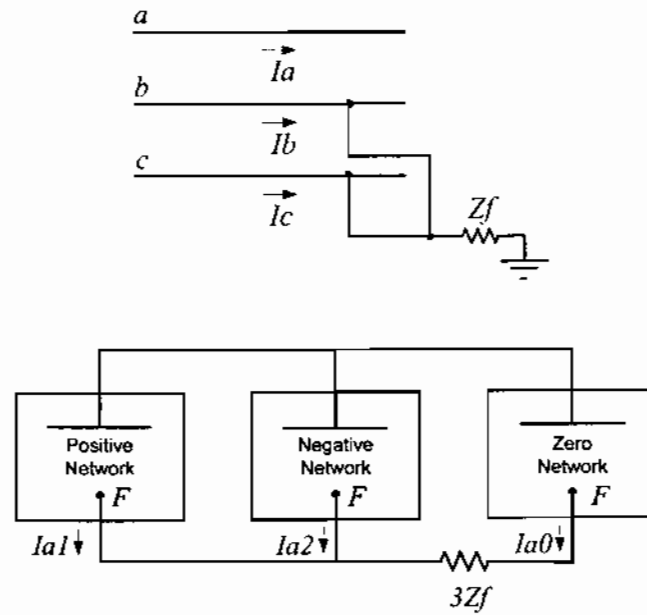
ภาพที่ 2-23 การเกิดความผิดปกติสายกับสายที่เฟส B และเฟส C และลำดับวงจรไฟฟ้า

จะพิจารณาสมการของฟอลต์ระหว่างสายกับสายผ่านอิมพีแดนซ์ จะมีสมการส่วนประกอบดังนี้

$$I_{A1} = -I_{A2} = \frac{V_i}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_f} \quad (2-49)$$

$$V_{A1} = V_{A2} = V_i - I_{A1}(Z_{th1} + Z_f) = -I_{A2}(Z_{th2} + Z_f) \quad (2-50)$$

2.13.4 การเกิดความผิดปกติสองสายกับดิน (Double Line to Ground Fault) การเกิดความผิดปกติแบบสองสายกับดินผ่านอิมพีแดนซ์ สามารถวิเคราะห์ตามขั้นตอนได้ดังนี้โดยสภาพการเกิดความผิดปกติสมมุติให้เกิดความผิดปกติขึ้นที่เฟส B กับ C และลงดิน



ภาพที่ 2-24 ความผิดปกติแบบสองสายกับดินที่เฟส B กับ C และลงดิน และลำดับวงจรไฟฟ้า

จะพิจารณาสมการของฟอลต์ระหว่างสายกับสายผ่านอิมพีแดนซ์จะมีสมการส่วนประกอบ
ดังนี้

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_{th1} + \frac{Z_{th2} \times Z_{th0}}{Z_{th2} + Z_{th0}}} \quad (2-50)$$

$$I_{A2} = -\frac{Z_{th0}}{Z_{th0} + Z_{th2}} \times I_{A1} \quad (2-51)$$

$$I_{A0} = -\frac{Z_{th2}}{Z_{th0} + Z_{th2}} \times I_{A1} \quad (2-52)$$

$$V_{A1} = V_f - I_{A1} Z_{th1} \quad (2-53)$$

$$V_{A2} = -I_{A2} Z_{th2} \quad (2-54)$$

$$V_{A0} = -I_{A0} Z_{th0} \quad (2-55)$$

2.14 ส่วนสรุปเนื้อหา

ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยระบบที่สำคัญ หากเราทราบเกี่ยวกับรายละเอียด หน้าที่การทำงาน แบบจำลอง วงจรสมมูลและองค์ประกอบในระบบไฟฟ้าแล้วสามารถทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าได้ โดยสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าคือ การ

วิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะการเกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง ในหนังสือจะกล่าวถึงทฤษฎีและสมการหลักเท่านั้น จะไม่มีลำดับขั้นตอนการคำนวณละเอียด ในบทนี้จะแสดงวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดความผิดปกติ เป็นขั้นตอนตามสมการ ในด้านการปฏิบัติการวิเคราะห์ความผิดปกติจะมีตัวแปรอื่นๆมาเพิ่มในระบบ เช่น โหลดของแต่ละบัส ตำแหน่งการเกิดความผิดปกติในระบบ การเปลี่ยนแปลงด้านแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และโหลดของระบบเป็นต้น ซึ่งมีผลต่อการคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้า

ดังนั้นการการจำลองระบบไฟฟ้าและนำอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของระบบมาคำนวณด้วยจะมีผลต่อการวิเคราะห์ความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นบนระบบของการเกิดความผิดปกติ โดยเหมาะกับการระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ทำให้การคำนวณมีความเร็ว ความแม่นยำ และมีประสิทธิภาพในการดูแลระบบ รวมถึงการป้องกันระบบ และเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันอย่างเหมาะสม

บทที่ 3

อัลกอริทึมการวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำได้ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง และทดลองการเขียน โปรแกรมขึ้นในรูปแบบต่างๆตามทฤษฎีที่ศึกษามา พบว่าการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลังและแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในขณะเกิดความผิดพลาดเป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันระบบ ออกแบบระบบและเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้า โดยศึกษาโปรแกรมสำเร็จรูปที่เกี่ยวกับการจำลองระบบไฟฟ้าและโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งโปรแกรมจัดสร้างจำลองระบบไฟฟ้าและคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทั้งในช่วงชับทรานเซียนต์ ทรานเซียนต์ และสถานะอยู่ตัว ประกอบกับได้ศึกษางานวิจัยในสถาบันที่ได้วิจัยและทำจัดทำขึ้นพบว่าโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาพื้นฐานฟอร์แทรน 77 ที่สามารถพัฒนาได้ต่อเนื่อง และมีเหมาะสมกับการคำนวณทางวิศวกรรมศาสตร์ที่เป็นกรคำนวณแบบวนลูป (Loop) หรือ วนซ้ำ ทำให้ศึกษาการเขียนภาษาฟอร์แทรนและคำสั่งต่างๆ และรวมถึงเทคนิคในพัฒนาให้ภาษาฟอร์แทรนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประมวลผลเร็วขึ้น มีความถูกต้องมากขึ้น และสิ่งที่จำเป็นในการเขียน โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบจะต้องมีอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสร้าง โปรแกรมที่สมบูรณ์ต่อไป

ในบทนี้จะเสนออัลกอริทึมที่เขียนโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า โดยจะแบ่งอัลกอริทึมตามฟังก์ชันการทำงานของ โปรแกรมย่อยที่เพื่อความสะดวกในการประมวลผลและเรียกใช้งานโปรแกรม

3.1 ฟังก์ชันอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

ฟังก์ชันนี้จะสร้างอิมพีแดนซ์เมตริกซ์จากข้อมูลของระบบที่นำมาทดสอบ โดยนำข้อมูลของสายส่วนประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ ซึ่งส่วนประกอบลำดับบวก และลบจะมีค่าเท่ากันทุกๆ บัส ส่วนประกอบลำดับศูนย์จะมีข้อมูลของสายแยกกัน

โดยในระบบไฟฟ้าที่ใช้วิเคราะห์ตามทฤษฎีจะวิเคราะห์จากข้อมูลพารามิเตอร์ในสายส่ง แปลงมาเป็นอิมพีแดนซ์เมตริกซ์แต่ในทางเป็นจริงในระบบไฟฟ้าจะมีค่าอินดักแตนซ์ คาปาซิแตนซ์ และความต้านทานของโหลด ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือมอเตอร์ซึ่งโครนัสในระบบ ซึ่งจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของ โหลดรวม และอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอิมพีแดนซ์ของแต่ละบัสใน

ระบบไฟฟ้า ซึ่งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่บัสนั้น จึงต้องนำค่าเหล่านี้มาคิดในฟังก์ชันอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ด้วย

3.1.1 เมตริกซ์ส่วนประกอบลำดับศูนย์ เมตริกซ์ส่วนประกอบลำดับศูนย์จะประกอบด้วยข้อมูลสองส่วน โดยจะนำข้อมูลสายส่งของส่วนประกอบลำดับศูนย์ และข้อมูลในส่วนประกอบลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาบวกกันเป็นแอดมิแดนซ์เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับศูนย์ในระบบโดยจะมีสมการดังนี้

$$Y_{bus0_{ii}} = \sum_{i=1}^N Y_{bus0_{ii}} + Y_{busG_{ii}} \quad (3-1)$$

- เมื่อ $Y_{bus0_{ii}}$ คือ ขนาดของสมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ในบัสแอดมิแดนซ์เมตริกซ์ของส่วนประกอบศูนย์
- $Y_{busG_{ii}}$ คือ ขนาดของสมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ในบัสแอดมิแดนซ์เมตริกซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ
- N คือ จำนวนบัสในระบบ

3.1.2 เมตริกซ์ส่วนประกอบลำดับบวก และลำดับลบ ในส่วนประกอบลำดับบวกและลบจะประกอบด้วยสามส่วนก็จะนำข้อมูลสายส่งของส่วนประกอบลำดับบวกหรือข้อมูลสายส่งในระบบ (Y-Matrix) ข้อมูลในส่วนประกอบลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้าเอกทีฟของโหลดและรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แต่ละบัส มาบวกกันเป็นแอดมิแดนซ์เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับศูนย์ในระบบ โดยจะมีสมการดังนี้

สมการหาเมตริกซ์กำลังไฟฟ้าเอกทีฟของโหลดและรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แต่ละบัสหาได้จากสมการที่ 3-2

$$Zload_{ii} = \sum_{i=0}^N [PD_i, (-QD_i)] \quad (3-2)$$

- เมื่อ $Zload_{ii}$ คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $Zload$ เมตริกซ์
- PD_i คือ กำลังไฟฟ้าเอกทีฟของโหลด ที่บัส i
- QD_i คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่บัส i
- N คือ จำนวนบัสในระบบ

นำสมาชิกใน $Zload$ เมตริกซ์มาแปลงเป็นแอดมิแดนซ์ของแต่ละบัสโดยจะขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของแรงดันที่บัสในสถานะจ่ายโหลด

$$YLoad_{ii} = \sum_{i=1}^N \frac{Zload_{ii}}{(Vbus_i)^2} \quad (3-3)$$

เมื่อ $YLoad_{ii}$ คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $YLoad$ เมตริกซ์
 $Zload_{ii}$ คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $Zload$ เมตริกซ์
 $Vbus_i$ คือ แรงดันไฟฟ้าในสถานะโหลดปกติ ที่บัส i
 N คือ จำนวนบัสในระบบ

นำ $YLoad$ เมตริกซ์ที่คำนวณได้รวมกับ Y-Bus เมตริกซ์และค่าชับเซพแดนซ์ของแต่ละบัส ของระบบไฟฟ้านั้นๆ จะได้สมการที่ 3-4

$$YBus1_{ii} = \sum_{i=1}^N YBus_{ii} + YLoad_{ii} + BC1_i \quad (3-4)$$

เมื่อ $YBus1_{ii}$ คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $YBus1$ เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก
 $YBus_{ii}$ คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $YBus$ เมตริกซ์เดิมของระบบ
 $YLoad_{ii}$ คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $YLoad$ เมตริกซ์
 $BC1_i$ คือ ค่าชับเซพแดนซ์ของระบบไฟฟ้า ที่บัส i
 N คือ จำนวนบัสในระบบ

เมื่อกำหนดหาแอดมิแดนซ์เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก ลบ ($YBus1$) และ ศูนย์ ($Ybus0$) จะนำหลักการแปลงแอดมิแดนซ์เมตริกซ์เป็นอินเวอร์สเมตริกซ์ โดยการอินเวอร์ส (Inverse Matrix) แล้วนำไปคำนวณหากระแสลัดวงจรที่บัสและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิด ความผิดปกติในระบบไฟฟ้านั้น

3.2 ฟังก์ชันคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะอยู่ตัว

ในฟังก์ชันการคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสนั้น จะเป็นการนำค่าอิมพีแดนซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ที่บัสนั้นๆ แรงดันไฟฟ้าที่บัสขณะ โหลดปกติ เพื่อคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรในสถานะอยู่ตัว ซึ่งจะแบ่งตามกรณีของการเกิดความผิดปกติ ดังนี้

3.2.1 กรณีการเกิดความผิดปกติแบบสมมูลหรือสามเฟสสมมูล จะใช้สมการที่ 3-5 หากกระแสลัดวงจรที่บัสใดๆในระบบ

$$I_{f_i} = \frac{V_{Bus_i}}{Z_{Bus1_{ii}} + Z_f} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-5)$$

เมื่อ	I_{f_i}	คือ กระแสลัดวงจรที่บัส i
	V_{Bus_i}	คือ แรงดันไฟฟ้าในสถานะโหลดปกติ ที่บัส i
	$Z_{Bus1_{ii}}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน Z_{Bus1} เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก
	Z_f	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของการเกิดความผิดปกติ
	n	คือ จำนวนบัสในระบบ

สมการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดๆในระบบขณะเกิดความผิดปกติที่บัสใดบัสหนึ่ง หาได้จากสมการที่ 3-6

$$V_{f_i} = [V_{Bus_i} - (Z_{Bus_{ik}} \times I_{f_k})] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-6)$$

เมื่อ	V_{f_i}	คือ แรงดันไฟฟ้าในสถานะเกิดความผิดปกติ ที่บัส i
	V_{Bus_i}	คือ แรงดันไฟฟ้าในสถานะโหลดปกติ ที่บัส i
	$Z_{Bus1_{ik}}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, k) ใน Z_{Bus1} เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก
	I_{f_k}	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของการเกิดความผิดปกติ
	n	คือ จำนวนบัสในระบบ
	k	คือ บัสที่เกิดความผิดปกติ

3.2.2 กรณีการเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน จะใช้สมการที่ 3-7 หากระแสลัดวงจรที่บัสใดๆในระบบ

$$I_{f_i} = \frac{3(V_{Bus_i})}{Z_{Bus1_{ii}} + Z_{Bus2_{ii}} + Z_{Bus0_{ii}} + 3(Z_f)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-7)$$

เมื่อ	I_{f_i}	คือ กระแสลัดวงจรที่บัส i
	V_{Bus_i}	คือ แรงดันไฟฟ้าในสถานะโหลดปกติ ที่บัส i
	$Z_{Bus1_{ii}}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน Z_{Bus1} เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก
	$Z_{Bus2_{ii}}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน Z_{Bus2} เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับลบ
	$Z_{Bus0_{ii}}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน Z_{Bus0} เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับศูนย์
	Z_f	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของการเกิดความผิดปกติ
	n	คือ จำนวนบัสในระบบ

สมการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดๆในระบบขณะเกิดความผิดปกติที่บัสใดบัสหนึ่ง หาได้จากสมการที่ 3-6

3.2.3 กรณีการเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับสาย จะใช้สมการที่ 3-8 หากระแสลัดวงจรที่บัสใดๆในระบบ

$$I_{f_i} = \frac{V_{Bus_i}}{Z_{Bus1_{ii}} + Z_{Bus2_{ii}} + Z_f} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-8)$$

เมื่อ	I_{f_i}	คือ กระแสลัดวงจรที่บัส i
	V_{Bus_i}	คือ แรงดันไฟฟ้าในสถานะโหลดปกติ ที่บัส i
	$Z_{Bus1_{ii}}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน Z_{Bus1} เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก
	$Z_{Bus2_{ii}}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน Z_{Bus2} เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับลบ
	Z_f	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของการเกิดความผิดปกติ
	n	คือ จำนวนบัสในระบบ

สมการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดๆในระบบขณะเกิดความผิดปกติที่บัสใดบัสหนึ่ง หาได้จากสมการที่ 3-6 และสมการที่ 3-9

$$Vf_i = [-(ZBus_{ik} \times If_i)] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-9)$$

3.2.4 กรณีการเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดินจะใช้สมการที่ 3-10 หากระแสลัดวงจรที่บัสใดๆในระบบ

$$If_i = \frac{VBus_i}{ZBus1_{ii} + \frac{(ZBus2_{ii} \times ZBus0_{ii}) + 3Zf}{(ZBus2_{ii} + ZBus0_{ii}) + 3Zf}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-10)$$

เมื่อ If_i	คือ	กระแสลัดวงจรที่บัส i
$VBus_i$	คือ	แรงดันไฟฟ้าในสถานะโหลดปกติ ที่บัส i
$ZBus1_{ii}$	คือ	สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $ZBus1$ เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับบวก
$ZBus0_{ii}$	คือ	สมาชิกตำแหน่งที่ (i, i) ใน $ZBus0$ เมตริกซ์ของส่วนประกอบลำดับศูนย์
Zf	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของการเกิดความผิดปกติ
n	คือ	จำนวนบัสในระบบ

สมการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดๆในระบบขณะเกิดความผิดปกติที่บัสใดบัสหนึ่ง หาได้จากสมการที่ 3-6 และสมการที่ 3-9

3.3 ฟังก์ชันคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงทรานเซียนต์

จากฟังก์ชันการคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสในสถานะอยู่ตัวนั้นจะเป็นฟังก์ชันเพื่อหาค่าในช่วงที่กระแสลัดวงจรไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่าง โดยจะเหลือเฉพาะส่วนประกอบกระแสลัดเท่านั้น แต่การวิเคราะห์เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ในกระแสลัดวงจรทำให้รูปของกระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแกนศูนย์หรือตามแกนเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปตลอด ฉะนั้นสมการที่นำมาหาค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรคือสมการที่ 3-11

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - I_m e^{-t/\tau} \sin(\alpha - \theta) \quad (3-11)$$

เมื่อ $i(t)$ คือ กระแสลัดวงจรในช่วงเวลา t ใดๆ

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - I_m e^{-t/\tau} \sin(\alpha - \theta) \quad (3-11)$$

- เมื่อ $i(t)$ คือ กระแสลัดวงจรในช่วงเวลา t ใดๆ
 I_m คือ ค่ายอดสูงสุดของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
 α คือ มุมขณะเกิดของความผิดร่อบนรูปคลื่นกระแสลัดวงจร
 θ คือ มุมที่เกิดจาก $\tan^{-1} \left[\frac{\omega L}{R} \right]$
 τ คือ ค่าของ $\frac{L}{R}$ ของวงจร

จากสมการที่ 3-11 จะเห็นว่าสมการจะแปรผันตามเวลาจะมีสองส่วนด้วยฟังก์ชันไซน์ซุชอยด์ ซึ่งเป็นเทอมของกระแสอยู่ตัว หรือกระแสสลับสมมาตร ส่วนเทอมที่สองเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นคาบ (Nonperiodic) และมีค่าลดลงในลักษณะของเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) ด้วยเวลาคงที่ของ $\frac{L}{R}$ ฉะนั้นฟังก์ชันนี้จะเป็นการเลื่อนค่าเวลาไปตามลำดับเพื่อที่เมื่อวิเคราะห์สัญญาณของกระแสลัดวงจร ผู้ใช้งานจะต้องเลือกช่วงเวลาที่วิเคราะห์ให้โปรแกรมเพื่อสังเกตผลคำนวณเวลาผ่านไปช่วงขณะหนึ่งขณะใด

ในบทนี้ได้นำเสนอฟังก์ชันการทำงานที่อยู่ในส่วนของการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญของ โปรแกรม ซึ่งฟังก์ชันต่างๆที่กล่าวไว้ในบทนี้จะมีอยู่ในโปรแกรมย่อยเพื่อสามารถถูกเรียกใช้งานตามการใช้งานของผู้ใช้งาน โปรแกรมได้อย่างสมบูรณ์ โดยในบทต่อไปจะนำเสนอขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรมทั้งหมด

บทที่ 4

การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

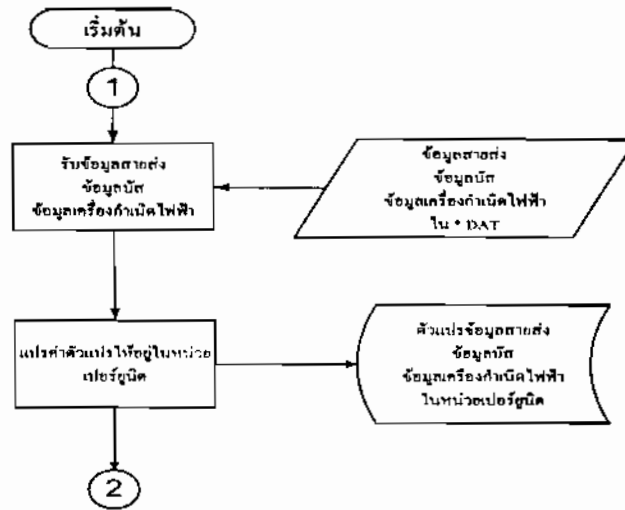
4.1 ส่วนนำของเนื้อหา

เนื้อหาในบทนี้ ได้อธิบายถึงขั้นตอนโครงสร้างของโปรแกรมในงานวิจัย โดยจะออกแบบโครงสร้างการทำงานให้ผู้ใช้งาน (User) เป็นผู้กำหนดการแสดงผลลัพธ์เอง ซึ่งผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์การเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนในระบบ โดยสามารถระบุการเกิดความบกพร่องที่บัสใด ๆ ในระบบไฟฟ้า เลือกลักษณะการเกิดความผิดปกติในแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล และสามารถพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์นี้ โดยจะเป็นกระแสลัดวงจรในช่วงสถานะอยู่ตัว และสถานะทรานเซียนต์ที่บัสของระบบ และแรงดันไฟฟ้าของบัสใด ๆ ในขณะที่เกิดความผิดปกติที่บัสใดบัสหนึ่งในระบบ ซึ่งในโปรแกรมหลักจะมีโปรแกรมย่อยหรือ สับรูทีนย่อยเพื่อใช้สำหรับการเรียกใช้งานเฉพาะ โปรแกรมที่ใช้งานบ่อยหรือเพื่อสะดวกต้องการใช้งาน และดูชอร์โค้ดได้สะดวกขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาโปรแกรมเดิมให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้มีการนำเอาหลักโปรแกรมย่อยที่ต้องการมาจากงานวิจัยต่างๆบ้าง ซึ่งในบทนี้จึงจะนำเสนอเฉพาะ โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นเองและจะกล่าวถึง โปรแกรมที่เสริมเข้ามาอย่างคร่าวๆเท่านั้น

4.2 โปรแกรมรับข้อมูลและแปรหน่วยจากพารามิเตอร์ของระบบ

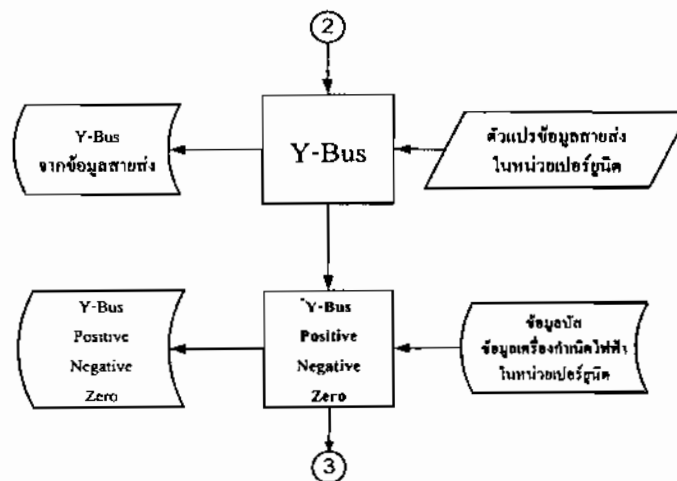
โปรแกรมนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลจากข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่ง ข้อมูลบัสต่างๆ ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลของส่วนประกอบลำดับ บวก ลบ และศูนย์ โดยจะเก็บข้อมูลหรือเพิ่มชื่อ *.DAT มาเก็บไว้ในตัวแปรที่กำหนดชนิดของตัวแปรนั้นๆ ไว้ ซึ่งจะเก็บไว้ในลักษณะชื่อตัวแปรหนึ่งชื่อและมีค่าหลายค่า หรือเรียกว่าตัวแปรแบบอาร์เรย์ (Array) และชนิดของตัวแปรจะมีทั้งตัวเลขทั่วไป (Integer) ตัวเลขที่มีจุดทศนิยมทั่วไป (Real) หรือ ตัวเลขที่มีจุดทศนิยมพิเศษ (Double Precision) การประกาศตัวแปรในขั้นต้นของ โปรแกรมจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการนำไปใช้คำนวณในลักษณะต่างๆ หลังจากนั้นข้อมูลตัวแปรต่างๆจะถูกเปลี่ยนเป็นอัตราส่วนของปริมาณจริง (Actual Quantity) ต่อปริมาณเบส (Quantity) ซึ่งมีค่าเป็นทศนิยมแล้วเก็บเข้าตัวแปรที่สำหรับดึงเข้าใช้งานโปรแกรมต่อไป



ภาพที่ 4-1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมรับและแปรข้อมูลของระบบ

4.3 โปรแกรมคำนวณแอดมิแตนซ์ (Y- Bus) ของระบบ

โปรแกรมคำนวณแอดมิแตนซ์จะเป็นโปรแกรมที่นำตัวแปรของข้อมูลสายส่ง ทำการคำนวณหาแอดมิแตนซ์ของระบบไฟฟ้าต่างๆ โดยจะจัดตัวแปรที่เป็นเมตริกซ์เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน และสามารถระบุค่าหรือชี้ตำแหน่งของอิมพีแดนซ์นั้นได้รวดเร็วขึ้น โดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือคำนวณหาแอดมิแตนซ์จากข้อมูลสายส่งของระบบทั่วไป และคำนวณแอดมิแตนซ์จากข้อมูลสายส่ง ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลของโหลดแต่ละบัสดังแสดงในภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณแอดมิแตนซ์ของระบบ

4.4 โปรแกรมคำนวณโหลดพลั่วของระบบ

ในการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมกำลังไฟฟ้าแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง จะถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมความเร็ว (Governor) ซึ่งระบบควบคุมความเร็วนี้ทำหน้าที่ปรับวาล์วขาเข้าของกังหัน (Turbine Input Valve) เพื่อเปลี่ยนระดับกำลังทางกลที่ป้อนเข้า ทำให้ความเร็วมีค่าอยู่ในสถานะคงตัว ส่งผลให้ได้กำลังไฟฟ้าแอคทีฟตามความต้องการ แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าสูงสุดในด้าน Stator Heating ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยการควบคุมการกระตุ้นสนาม (Exciter) ซึ่งชุดควบคุมกระตุ้นสนามนี้ทำหน้าที่ปรับขนาดแรงดันสนาม (Field Voltage) เพื่อให้แรงดันของระบบไฟฟ้ามีค่าตามต้องการ แต่การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดอยู่ คือ กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟสูงสุด ($Q_{Gi,max}$) มีขีดจำกัดในด้าน Rotor Heating ส่วนขอบเขตกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟต่ำสุด ($Q_{Gi,min}$) มีขีดจำกัดในด้าน Steady State Stability

ในการวิเคราะห์โหลดพลั่ว กำลังไฟฟ้าแอคทีฟจะถูกปรับให้มีค่าคงที่ เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับระบบตามแผนงานที่กำหนด ส่วนกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟจะปรับเปลี่ยนได้ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสให้เป็นไปตามที่กำหนด แต่การผลิตกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟต้องไม่เกินค่าขอบเขตของกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($Q_{Gi,max} \geq Q_{Gi} \geq Q_{Gi,min}$) ในการตรวจสอบกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าเกินขอบเขต $Q_{Gi,min}$ หรือ $Q_{Gi,max}$ หรือไม่ทำได้โดยการวิเคราะห์โหลดพลั่ว ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์โหลดพลั่วแล้ว ทำให้ทราบค่าขนาดและมุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ จึงสามารถหาค่ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ตามสมการที่ 4-1 และสมการที่ 4-2

$$P_{Gi} = P_{Di} + |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (4-1)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} - |V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (4-2)$$

เมื่อ P_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้าแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่บัส i

P_{Di} คือ กำลังไฟฟ้าแอคทีฟของโหลด ที่บัส i

Q_{Di} คือ กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่บัส i

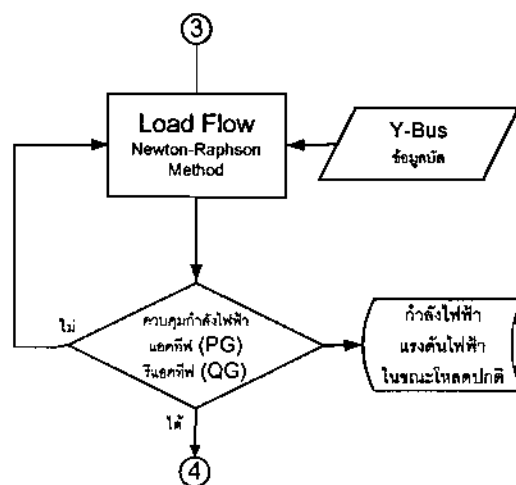
- Q_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโหลด ที่บัส i
 $|V_i|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 δ_i คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 G_{ii} คือ ค่าคอนดักแตนซ์ตำแหน่งที่ (i,i) ในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
 B_{ii} คือ ค่าซัพเซพแตนซ์ตำแหน่งที่ (i,i) ในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
 Y_{in} คือ ขนาดของสมาชิกตำแหน่งที่ (i,n) ในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
 θ_{in} คือ มุมของสมาชิกตำแหน่งที่ (i,n) ในบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
 N คือ จำนวนบัสในระบบ

ในบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าค่อนั้น ชนิดของบัสเป็น Generator Bus Code 2 หลังจากการคำนวณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Q_{Gi} มีค่าอยู่ในขอบเขตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($Q_{Gi,max} \geq Q_{Gi} \geq Q_{Gi,min}$) ชนิดของบัสยังเป็น Generator Bus Code 2 หากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Q_{Gi} มีค่าเกินขอบเขตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($Q_{Gi} > Q_{Gi,max}$ or $Q_{Gi} < Q_{Gi,min}$) ชนิดของบัสจะเปลี่ยนเป็น Generator Bus Code 0 โดยที่ไม่ต้องคงค่าขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับขอบเขตค่าสุดหรือสูงสุด ($Q_{Gi} = Q_{Gi,min}$ or $Q_{Gi} = Q_{Gi,max}$) ส่วนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_{Gi}) ให้เป็นไปตามแผนงานที่กำหนด และหากคำนวณต่อไปจากบัสที่เป็น Generator Bus Code 0 โดยที่ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $Q_{Gi} = Q_{Gi,max}$ และแรงดันไฟฟ้าที่บัส $V_i < V_{i,spec}$ ชนิดของบัสยังคงเป็น Generator Bus Code 0 ต่อไป หากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $Q_{Gi} = Q_{Gi,max}$ และแรงดันไฟฟ้าที่บัส $V_i > V_{i,spec}$ ชนิดของบัสจะเปลี่ยนเป็น Generator Bus Code 2 ในกรณีเดียวกัน หากชนิดบัสที่เป็น Generator Bus Code 0 โดยที่ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $Q_{Gi} = Q_{Gi,min}$ และแรงดันไฟฟ้าที่บัส $V_i > V_{i,spec}$ ชนิดของบัสยังคงเป็น Generator Bus Code 0 ต่อไป หากกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $Q_{Gi} = Q_{Gi,min}$ และแรงดันไฟฟ้าที่บัส $V_i < V_{i,spec}$ ชนิดของบัสจะเปลี่ยนเป็น Generator Bus Code 2 ซึ่งชนิดของบัสแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ชนิดของบัส

Bus Type	Code	Comment
Slack Bus	1	$V_i = V_{ispec}$ $P_i = 0$ $\delta_i = 0$ $Q_i = 0$
Load Bus	0	P_{Gi} and Q_{Gi} constant δ_i and V_i variable
Generator Bus	2	P_{Gi} constant $V_i = V_{ispec}$ δ_i and Q_{Gi} variable
Generator Bus	0	P_{Gi} constant $Q_{Gi} = Q_{Gi,min}$ or $Q_{Gi,max}$ δ_i and V_i variable

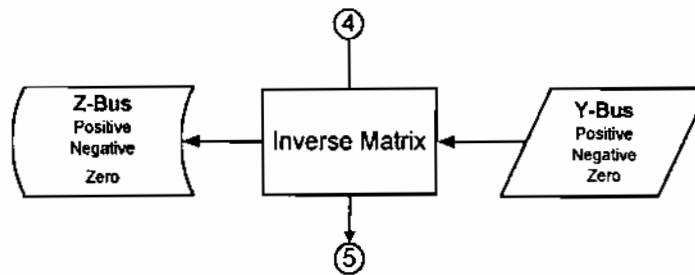
ในโปรแกรมคำนวณ โหลดโพล์นี้ได้มีการประยุกต์นำมาใช้เป็นโปรแกรมย่อยและได้มีการปรับปรุงพารามิเตอร์บางส่วนเพื่อให้ผลได้ดีขึ้นและสามารถนำไปใช้วิเคราะห์กับโปรแกรมหลักได้ตามภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณ โหลดโพล์ของระบบ

4.5 โปรแกรมคำนวณอิมพีแดนซ์ (Z- Bus) ของระบบ

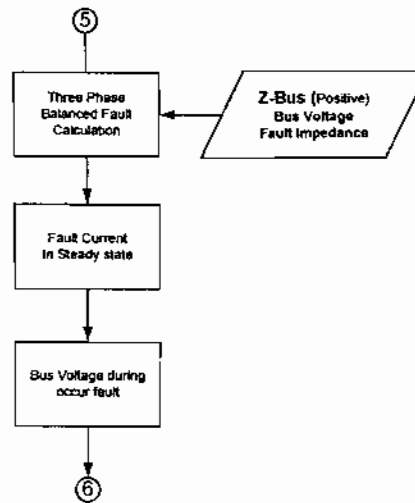
โปรแกรมคำนวณอิมพีแดนซ์จะเป็นโปรแกรมที่นำแอดมิแดนซ์เมตริกซ์ของระบบมาแปรเป็นอิมพีแดนซ์เมตริกซ์โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ อินเวอร์สเมตริกซ์ โดยโปรแกรมจะรับข้อมูลของแอดมิแดนซ์ของระบบและเรียกใช้โปรแกรมย่อยอินเวอร์สมาใช้ และเอาที่พุดจะได้ค่าอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ที่มีค่าเท่ากันดังแสดงในภาพที่ 4-4 จากการทดสอบโปรแกรมย่อยนี้พบว่าค่าที่คำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกับโปรแกรมสำเร็จรูป Power World ประมาณค่าใกล้เคียงหรือเกิดความผิดพลาดประมาณ 1×10^{-5} กับโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77



ภาพที่ 4-4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมอินเวอร์สเมตริกซ์ของ Y-Bus

4.6 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสมดุล

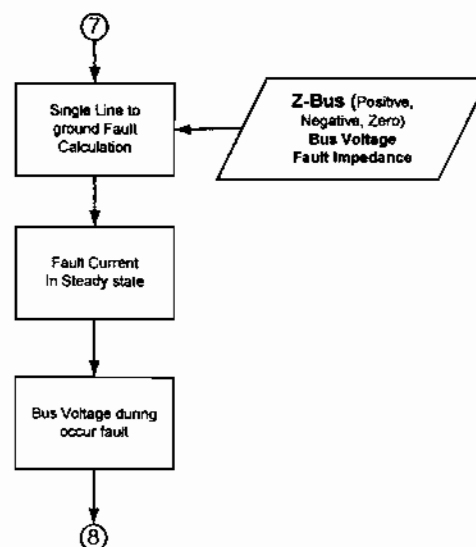
โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลเป็นโปรแกรมที่จะรับข้อมูลของอิมพีแดนซ์ในส่วนประกอบลำดับบวกอย่างเดียว แรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะที่ยังไม่เกิดผิดปกติ และค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ Z_f ทุกเฟสจะมีค่าเท่ากันจากผู้ใช้งานต้องป้อนข้อมูลเพื่อกำหนดค่าให้ Z_f จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ตามสมการที่ 3-5 และตามสมการที่ 3-6 ดังแสดงในภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดพลาดในกรณีสามเฟสสมดุล

4.7 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดสายกับดิน

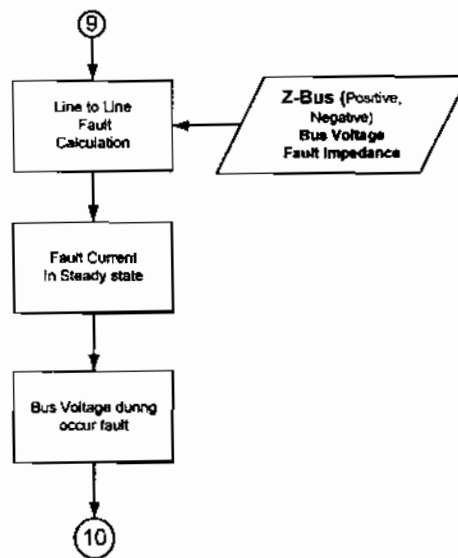
โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมดุลในกรณีเป็นโปรแกรมที่จะรับข้อมูลของอิมพีแดนซ์ในส่วนประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะที่ยังจ่ายโหลดปกติ และค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ Z_f ทุกเฟสจะมีค่าเท่ากันจากผู้ใช้งานต้องป้อนข้อมูลเพื่อกำหนดค่าให้ Z_f จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสายกับดิน และแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดพลาด ตามสมการที่ 3-7 และตามสมการที่ 3-6 ดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดพลาดในกรณีสายกับดิน

4.8 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติสายกับสาย

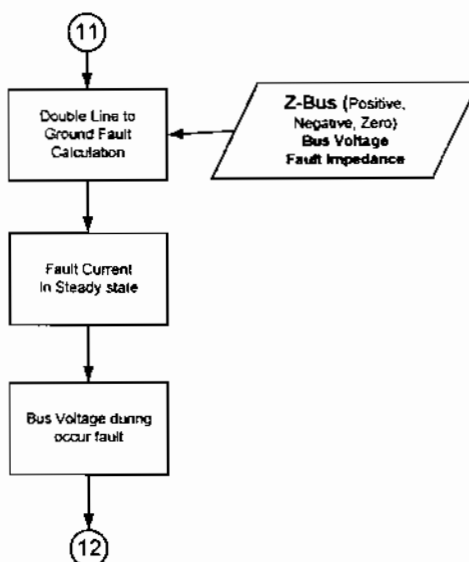
โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบกรณีสายกับสายเป็นโปรแกรมที่จะรับข้อมูลของอิมพีแดนซ์ในส่วนประกอบลำดับบวก และลำดับลบ แรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะที่บัสจ่ายโหลดปกติ และค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ Z_f ทุกเฟสจะมีค่าเท่ากันจากผู้ใช้งานต้องป้อนข้อมูลเพื่อกำหนดค่าให้ Z_f จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสายกับสาย และแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดปกติ ตามสมการที่ 3-8 สมการที่ 3-6 และสมการที่ 3-9 ดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดปกติในกรณีสายกับสาย

4.9 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติสองสายกับดิน

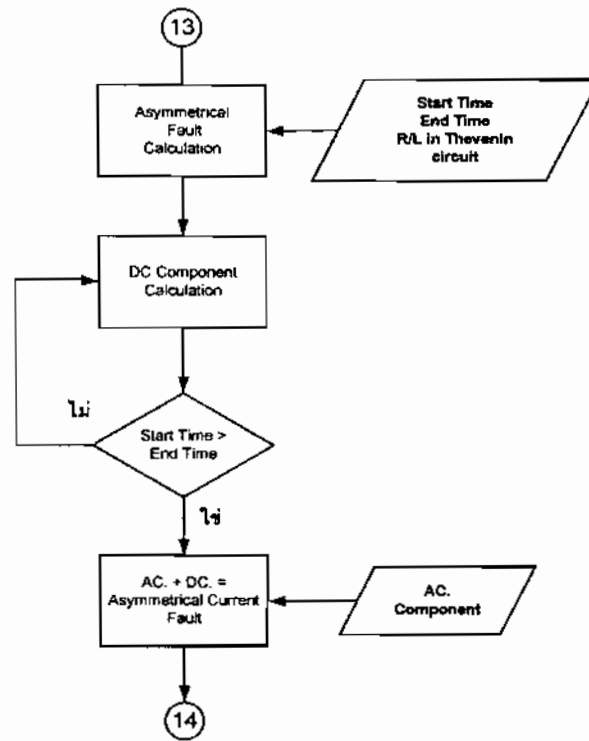
โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบกรณีสองสายกับดินเป็นโปรแกรมที่จะรับข้อมูลของอิมพีแดนซ์ในส่วนประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะที่บัสจ่ายโหลดปกติ และค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ Z_f ทุกเฟสจะมีค่าเท่ากันจากผู้ใช้งานต้องป้อนข้อมูลเพื่อกำหนดค่าให้ Z_f จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มคำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสองสายกับดิน และแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดปกติ ตามสมการที่ 3-10 และตามสมการที่ 3-6 ดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณความผิดพลาดในกรณีสองสายกับดิน

4.10 โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดในช่วงทรานเซียนต์

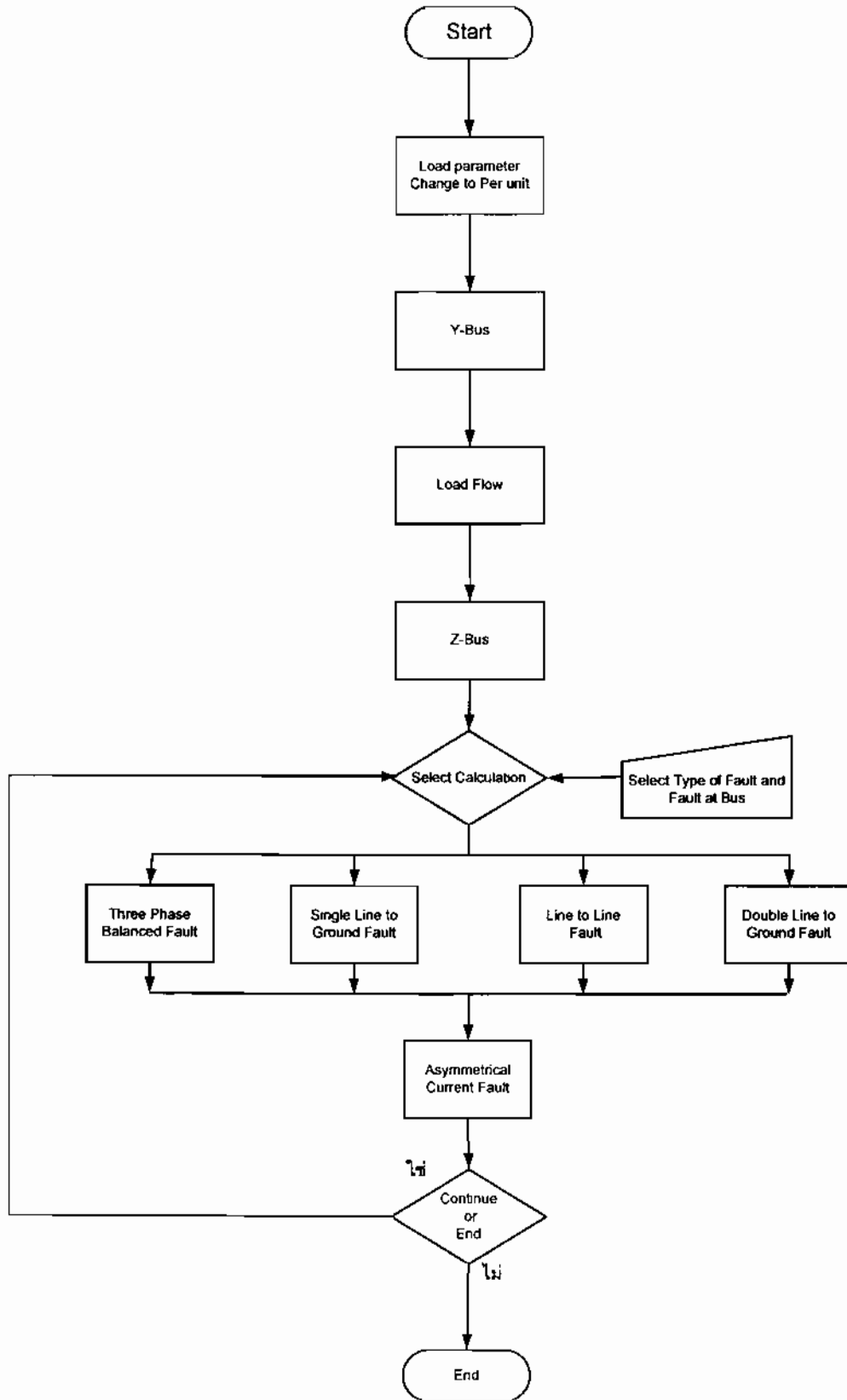
โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงทรานเซียนต์นี้จะแตกต่างจากโปรแกรมย่อยที่ผ่านมาเพราะ โปรแกรมนี้จะคำนวณขนาดของกระแสตามช่วงเวลาที่ผ่านมา โดยจะนำส่วนกระแสกลับของกระแสลัดวงจรที่อยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวมารวมกับส่วนกระแสตรงของกระแสลัดวงจรตามสมการที่ 1-3 และผู้ใช้งานจะต้องกำหนดช่วงเวลาการคำนวณ โดยผลที่ได้จะเป็นค่ากระแสลัดวงจรในช่วงเวลาที่ต้องการ ดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 แสดงขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

4.11 ผังการทำงานของ การวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

จากโปรแกรมย่อยของแต่ละโปรแกรมต่างก็คำนวณกระแสลัดวงจรแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติ ซึ่งแต่ละโปรแกรมย่อยได้มีการทดสอบแต่ละโปรแกรมก่อนที่นำมารวมกันไว้ในโปรแกรมหลัก โดยจะถูกกำหนดจากผู้ใช้งานเองว่าผู้ใช้ต้องการคุณสมบัติการคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสหนึ่งบัสใดในระบบ หรือทุกๆบัสในระบบหลังเกิดความผิดปกติทั้ง 4 แบบ หรือต้องการทราบถึงแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติที่บัสหนึ่งบัสใดในระบบทดสอบนั้น โดยแผนผังของโปรแกรมการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าตามภาพที่ 4-10 ซึ่งจะเข้าใจลำดับการทำงานของโปรแกรมได้อย่างเข้าใจมากขึ้น



ภาพที่ 4-10 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

4.12 ส่วนสรุปของเนื้อหา

การออกแบบโปรแกรมการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า จะทำงานตามลำดับขั้นตอนของโปรแกรม ตามภาพที่ 4-10 โดยจากจุดเริ่มต้นโปรแกรมจะทำการ โหลดข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่ง ข้อมูลบัส แปลงเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ แล้วนำค่าอิมพีแดนซ์ของ ข้อมูลมาสร้างเป็นแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ (Y-Bus) ของระบบไฟฟ้า เพื่อนำค่าไปคำนวณในโปรแกรม คำนวณโหลดโพล์ของระบบทำให้ทราบถึงความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าให้กับโหลดในแต่ละบัส จากนั้นจะนำแอดมิแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดที่บัส มารวมกับแอดมิแตนซ์ของระบบ ทำให้ได้เมตริกซ์ส่วนประกอบลำดับบวก และลบ ของระบบ รวมไปถึงเมตริกซ์ส่วนประกอบลำดับศูนย์ซึ่งไม่รวมค่าโหลดที่บัส เมื่อผลที่ได้ในขั้นตอนนี้จะมี ค่าตัวแปรครบสำหรับการเริ่มต้นเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณความผิดปกติในชนิดต่างๆของกรณี ความผิดปกติ โดยผู้ใช้งานจะเป็นผู้ระบุความต้องการวิเคราะห์ เลือกชนิดความผิดปกติ เลือกบัสที่เกิดความผิดปกติ เลือกช่วงเวลาของการคำนวณในโปรแกรมการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่ สมมาตรในช่วงเวลาทรานเซียนต์ และสามารถเลือกการแสดงผลของค่าต่างๆจากการคำนวณของ โปรแกรมเพื่อแสดงผลบนหน้าจอให้ผู้ใช้นำค่ามาวิเคราะห์ต่อได้

ในบทต่อไปได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำงานของโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77 ที่ได้ออกแบบขึ้น ซึ่งได้เปรียบเทียบระหว่าง โปรแกรมสำเร็จรูป Power World และ PSCAD โดยใช้ ข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 14 บัส IEEE 30 บัส IEEE 57 บัส และ IEEE 118 บัส และเปรียบเทียบ ค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณในแต่ละบัสจาก โปรแกรมที่สร้างขึ้น

บทที่ 5

การทดสอบและเปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรม

5.1 ส่วนนำของเนื้อหา

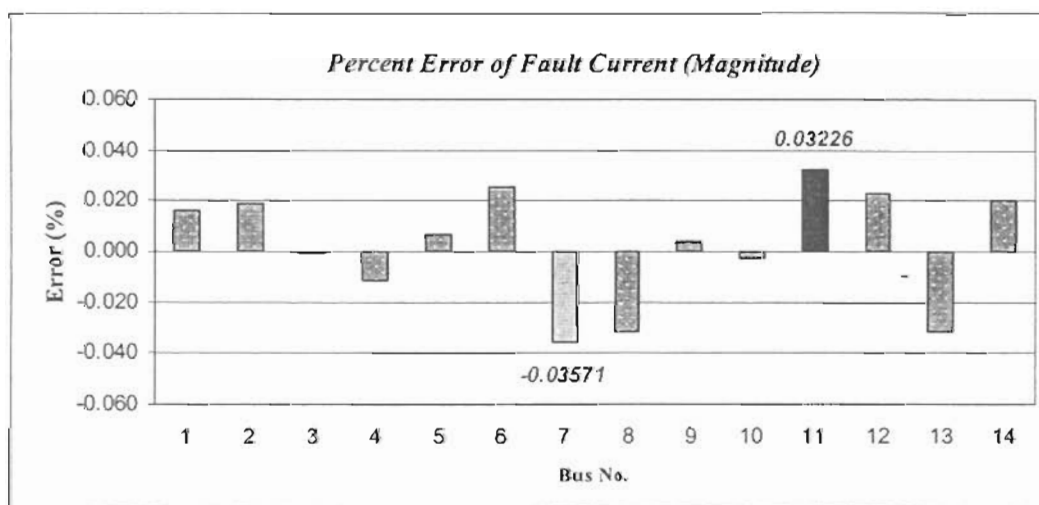
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการเขียนโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 โดยนำส่วนของโปรแกรมมาพัฒนาต่อจากเดิมเพื่อหาค่าของกระแสไฟฟ้า และแรงดันที่เกิดที่บัสในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ระบบ ใช้เลือกอุปกรณ์ป้องกันใช้ในระบบ โดยโปรแกรมที่เขียนจะรับค่าพารามิเตอร์ของระบบมาสร้างแอดมิแดนซ์เมตริกซ์ หรือ วายบัส (Y-Bus) โดยจะสร้างสามเมตริกซ์คือ แอดมิแดนซ์เมตริกซ์แบบบวกและแบบลบ โดยเมตริกซ์ทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน และแอดมิแดนซ์เมตริกซ์แบบศูนย์ แล้วคำนวณในโปรแกรมย่อยอินเวอร์เมตริกซ์เพื่อจะได้อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Z-Bus) ของแต่ละเมตริกซ์ จากนั้นโปรแกรมจะนำค่าของแรงดันที่บัสต่างๆมาจากการรันโหลดโพลล์แล้วนำค่ามาคำนวณในโปรแกรมคำนวณความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยผู้ใช้งานต้องเลือกประเภทการเกิดความผิดปกติคือ การเกิดความบกพร่องแบบสมมาตร หรือ สามเฟสสมดุล และการเกิดความบกพร่องแบบไม่สมมาตร เช่น สายกับดิน (Single Line to Ground Fault) สายกับสาย (Line to Line Fault) และสองสายกับดิน (Double Line to Ground Fault) และสามารถเลือกบัสที่เกิดความผิดปกติในระบบเพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่บัสและแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในระบบ หรือวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่ทุกๆบัสในระบบเมื่อเกิดความผิดปกติที่บัสนั้นๆและในแต่ละประเภทของความผิดปกติ และยังสามารถวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่อยู่ในช่วงสภาวะชัตทรานเซียนต์ ทรานเซียนต์ และสภาวะอยู่ตัว

โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบคือ ระบบไฟฟ้าของมาตรฐานIEEE คือ 14 Bus, 30 Bus, 57 Bus และ 118 Bus ซึ่งผลลัพธ์และการแสดงผลของโปรแกรมงานวิจัยจะถูกให้ผู้ใช้งานกำหนดเองเพื่อเลือกผลลัพธ์ที่ผู้ใช้งานต้องการรับทราบหรือแสดงผลออกมาหน้าจอ เพื่อวิเคราะห์ระบบทั้งหมด บางบัสหรือบางจุดบนระบบไฟฟ้า และช่วงเวลาของการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่อยู่ในช่วงทรานเซียนต์และสภาวะอยู่ตัว โดยมีผลการทดสอบที่เปรียบเทียบกับ โปรแกรม Power World จะเป็นผลการทดลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสลัดวงจรที่อยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัว และเปรียบเทียบผลในช่วงสภาวะทรานเซียนต์กับ โปรแกรม PSCAD โดยผลการทดลองหลังจากทำการ

รันโปรแกรมวิเคราะห์ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าแล้ว ผลของการทดลองของโปรแกรมจะมีการแสดงผลเป็นลำดับดังนี้

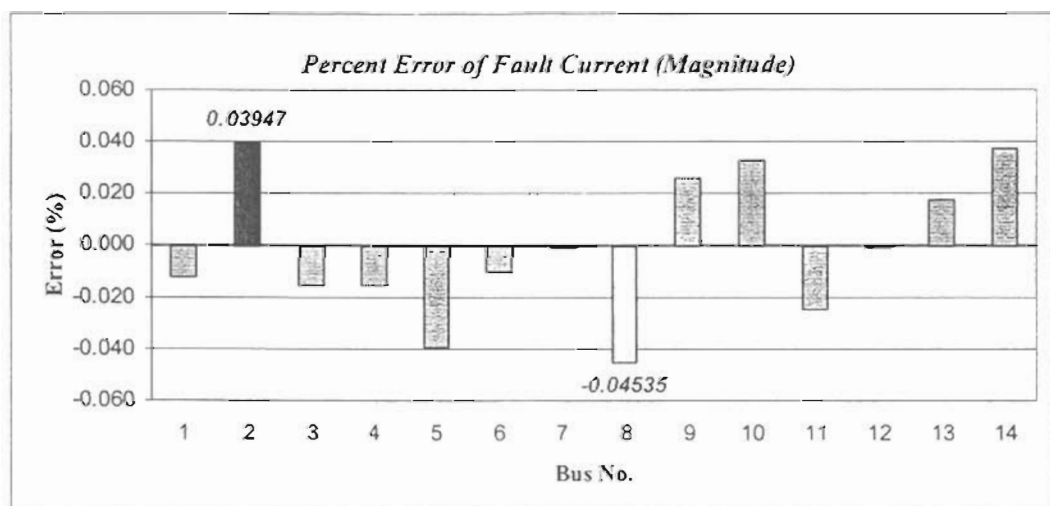
5.2 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสถานะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

5.2.1 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสมมูลหรือสามเฟสสมมูล ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 ซึ่งผลจะเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 14 บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสมมาตรหรือ สามเฟสสมมูล เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณซึ่งจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-1 มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 7 เท่ากับ -0.00036 p.u. คิดเป็น -0.03571 เปอร์เซ็นต์ หรือ คิดเป็น 0.15061 Amp. และผลคำนวณมุมของค่ากระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 1 เท่ากับ 0.00468 p.u. คิดเป็น 0.46800 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



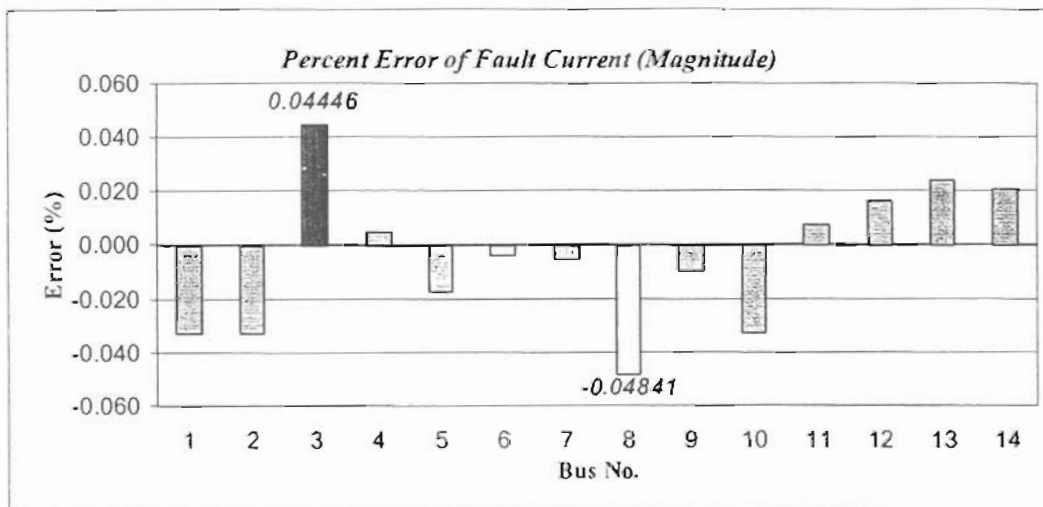
ภาพที่ 5-1 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสมมาตรในระบบ IEEE 14 บัส

5.2.2 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 14 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน เปรียบเทียบกับ โปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-2 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่สร้างขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 8 เท่ากับ -0.00045 p.u. คิดเป็น -0.04535 เปอร์เซ็นต์ หรือ คิดเป็น 0.18827 Amp. และผลของขนาดของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 2 เท่ากับ -0.00482 p.u. คิดเป็น -0.48226 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมากไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



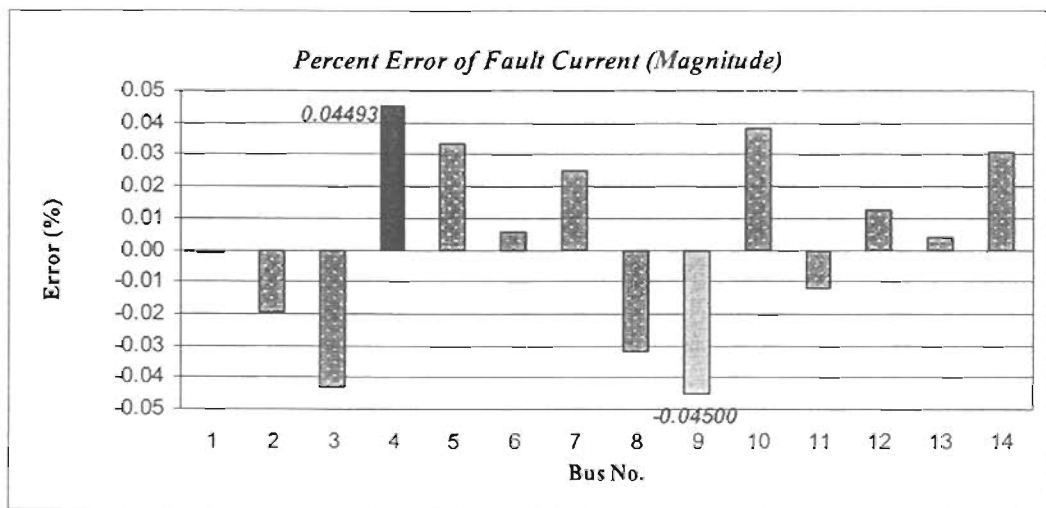
ภาพที่ 5-2 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับดินในระบบ IEEE 14 บัส

5.2.3 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับสาย ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 14 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับสาย เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-3 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น ผลที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 8 เท่ากับ -0.00048 p.u. คิดเป็น -0.04841 เปอร์เซ็นต์ หรือเป็น 0.2007 Amp. และในผลของมุมของกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 1 เท่ากับ 0.00467 p.u. คิดเป็น 0.46730 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมากไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-3 ค่าความคลาดเคลื่อนของ โปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับสายในระบบ IEEE 14 บัส

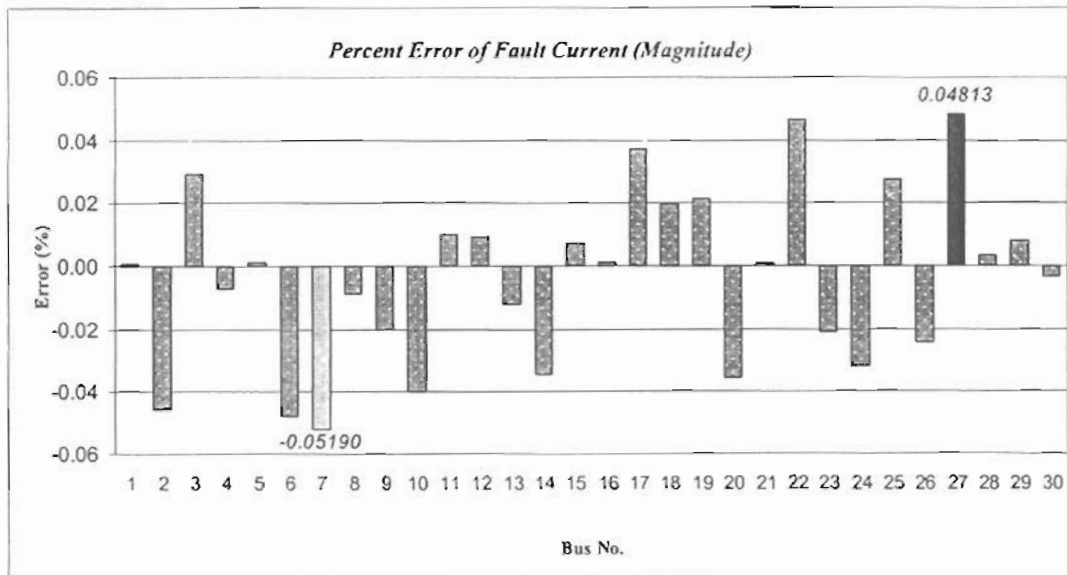
5.2.4 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดิน ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 14 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดิน เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-4 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น ผลเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 9 เท่ากับ -0.00045 p.u. คิดเป็น -0.04500 เปอร์เซ็นต์ หรือเป็น 0.18824 Amp. ในผลของมุมของกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 11 เท่ากับ 0.00548 p.u. คิดเป็น 0.54782 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-4 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสองสายกับดินในระบบ IEEE 14 บัส

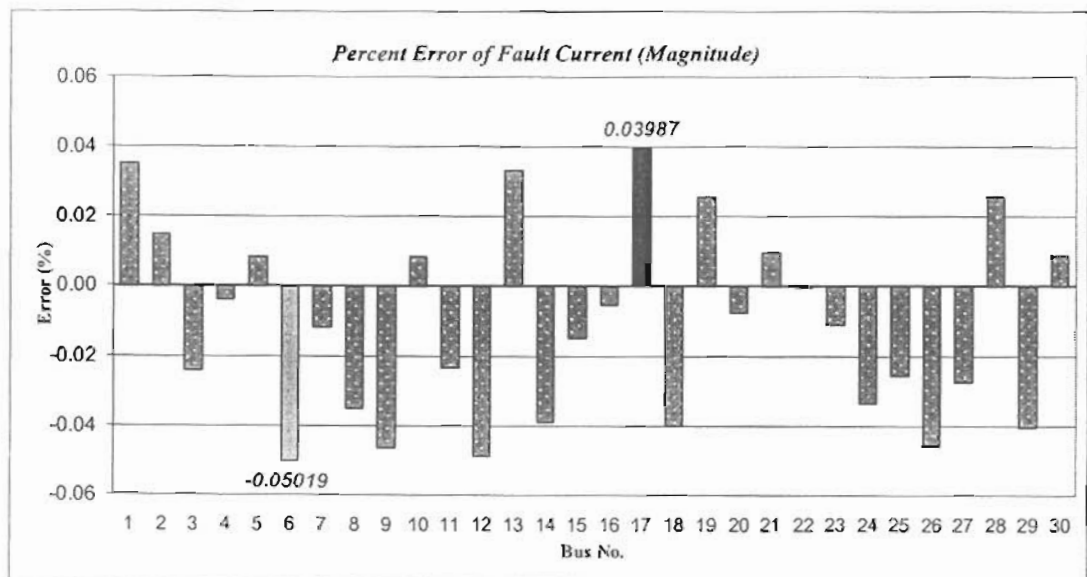
5.3 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสถานะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

5.3.1 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสมมูลหรือสามเฟสสมมูล ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 30 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสมมาตรหรือสามเฟสสมมูล เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-5 มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 30 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 7 เท่ากับ -0.00052 p.u. คิดเป็น -0.05190 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.21755 ส่วนผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 12 เท่ากับ -0.00463 p.u. คิดเป็น -0.46319 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



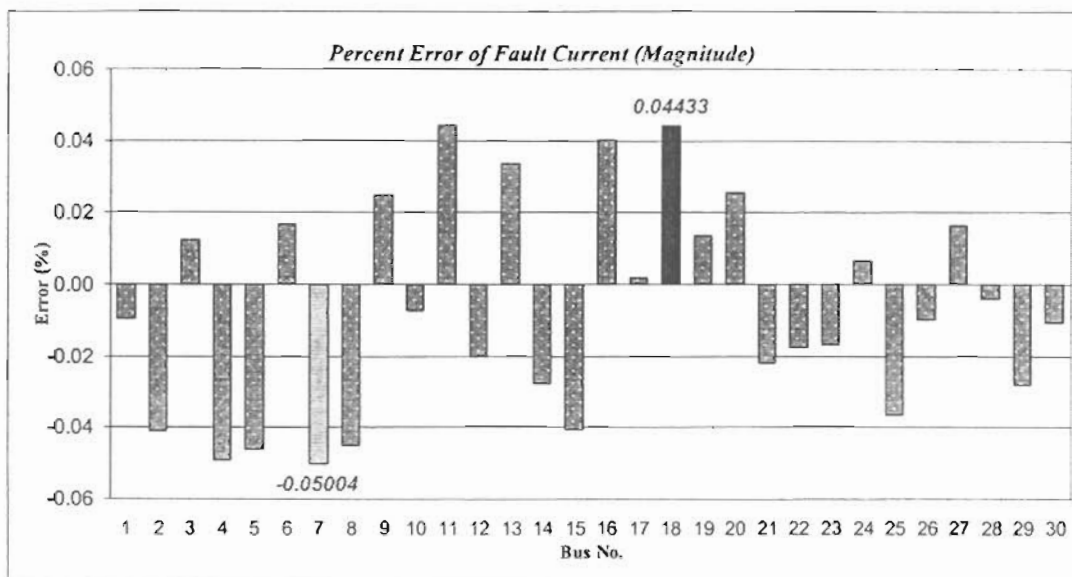
ภาพที่ 5-5 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมมูลในระบบ IEEE 30 บัส

5.3.2 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุล ในกรณีสายกับดิน ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 30 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World เป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-6 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 6 เท่ากับ -0.00050 p.u. คิดเป็น -0.05019 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.20919 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 27 เท่ากับ 0.00458 p.u. คิดเป็น 0.45817 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



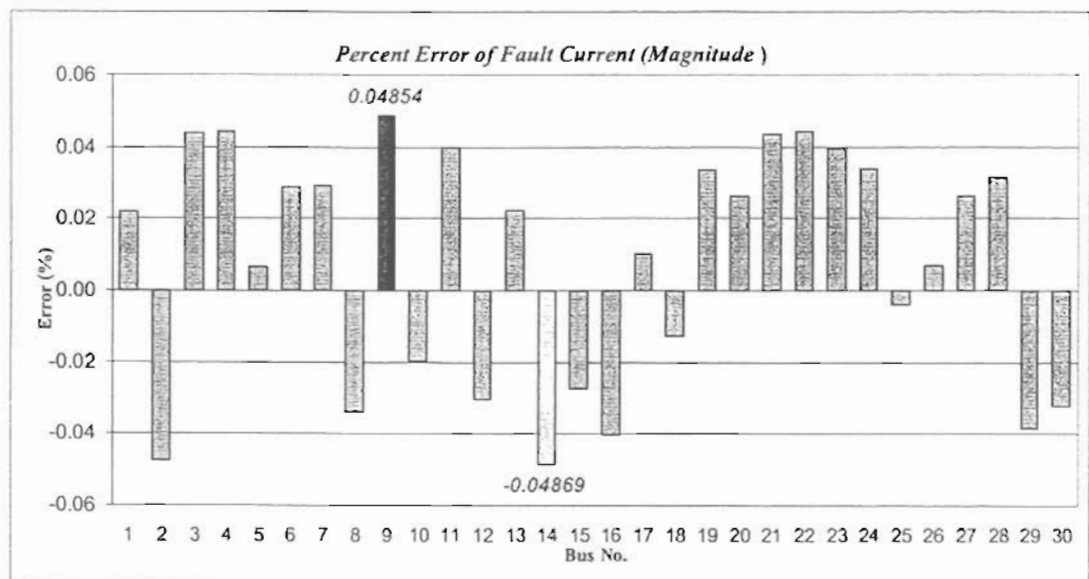
ภาพที่ 5-6 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับดินในระบบ IEEE 30 บัส

5.3.3 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุล ในกรณีสายกับสาย ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 30 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตรในกรณีสายกับสาย เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-7 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 30 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 7 เท่ากับ -0.00050 p.u. คิดเป็น -0.05004 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.20919 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 12 เท่ากับ -0.00464 p.u. คิดเป็น -0.46378 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-7 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับสายในระบบ IEEE 30 บัส

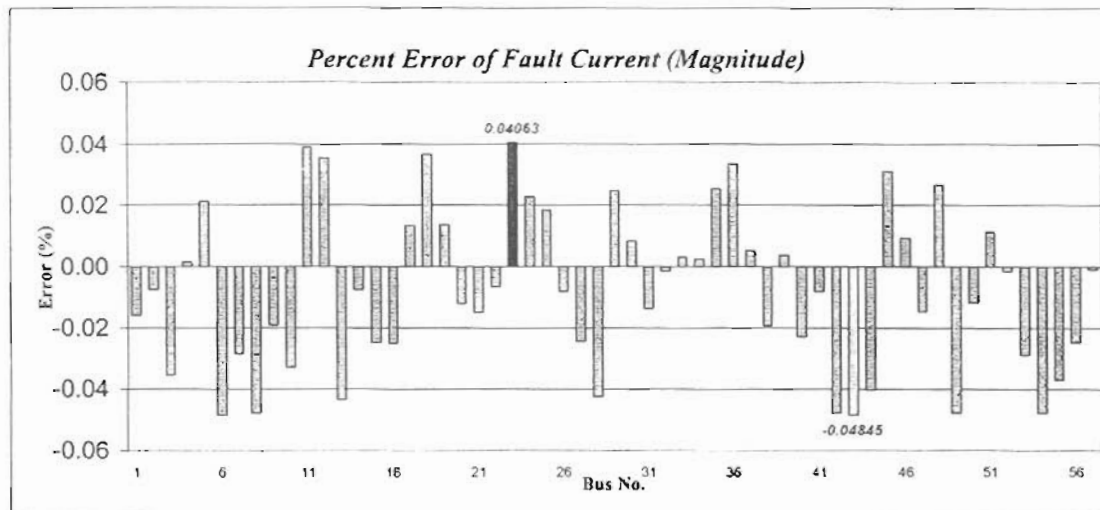
5.3.4 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติรูปแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดิน ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 30 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติรูปแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดิน เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-8 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น เป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 30 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 14 เท่ากับ -0.00048 p.u. คิดเป็น -0.04869 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.20082 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 4 เท่ากับ 0.00485 p.u. คิดเป็น 0.48570 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมากไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-8 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสองสายกับดินในระบบ IEEE 30 บัส

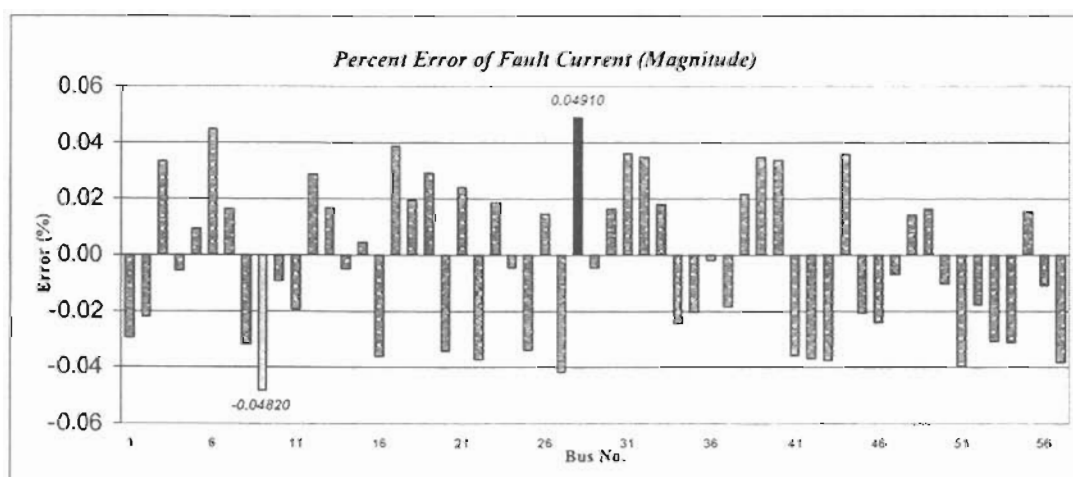
5.4 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสถานะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

5.4.1 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสมมูลหรือสามเฟสสมมูล ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ผลการเปรียบเทียบจะแสดงค่า จำนวนของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 57 บัส ในกรณีเกิดความผิดปกติแบบ สมมาตรหรือ สามเฟสสมมูล เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่า ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งจะแสดงเป็น เปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-9 มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร มากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบ กับขนาดของกระแสลัดวงจรจาก โปรแกรมที่ทำขึ้น ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 57 บัส จะ มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 43 เท่ากับ -0.00048 p.u. คิดเป็น -0.04845 เปอร์เซ็นต์ ในผลของมุม กระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 39 เท่ากับ 0.00525 p.u. คิดเป็น 0.52478 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



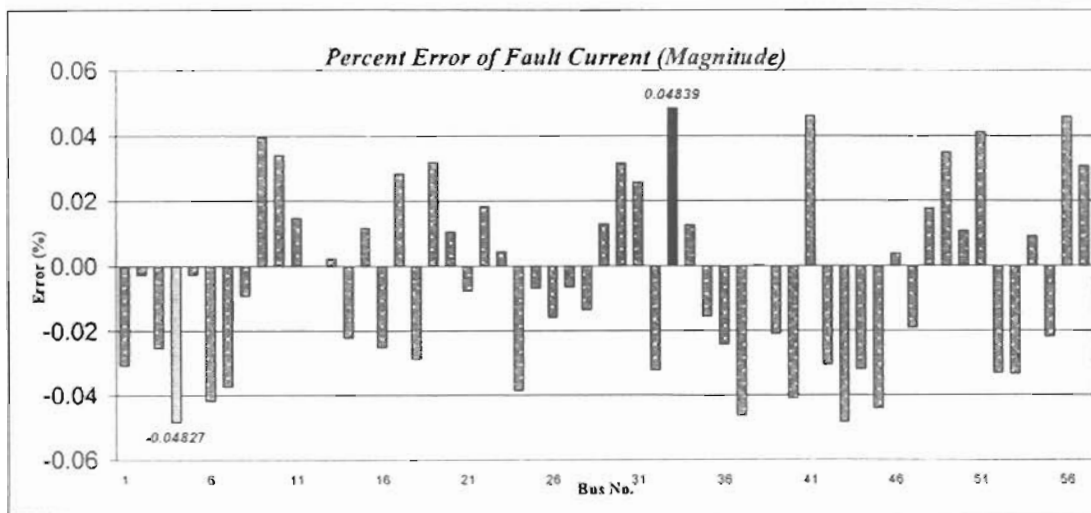
ภาพที่ 5-9 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัส กรณีเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมมูลในระบบ IEEE 57 บัส

5.4.2 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดินในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 57 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-10 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัส จะมีความเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 28 เท่ากับ 0.00049 p.u. คิดเป็น 0.04910 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.20500 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 5 เท่ากับ 0.0051 p.u. คิดเป็น 0.51077 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



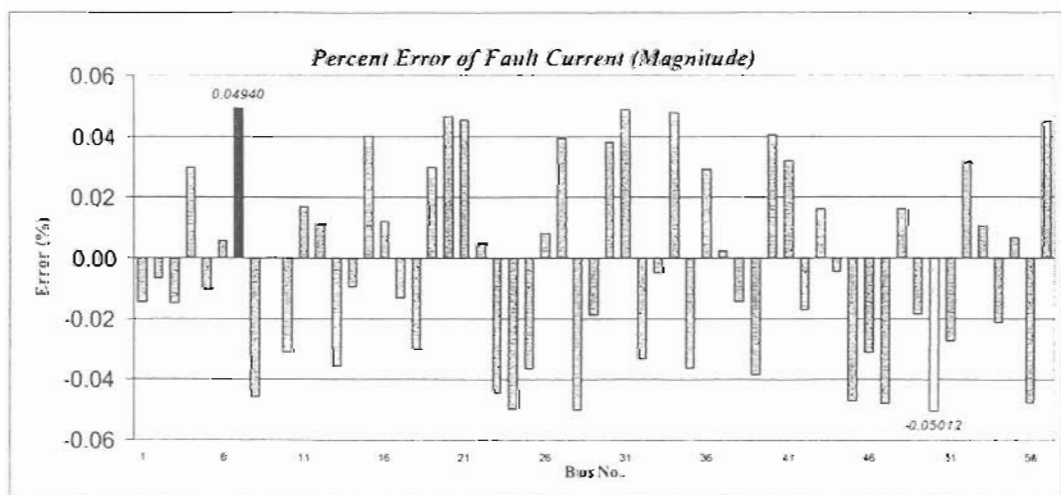
ภาพที่ 5-10 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับดินในระบบ IEEE 57 บัส

5.4.3 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุล ในกรณีสายกับสาย ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 57 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตรในกรณีสายกับสาย เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-11 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น เป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 57 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 33 เท่ากับ 0.00048 p.u. คิดเป็น 0.04839 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.20245 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 39 เท่ากับ 0.00524 p.u. คิดเป็น 0.52424 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-11 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับสายในระบบ IEEE 57 บัส

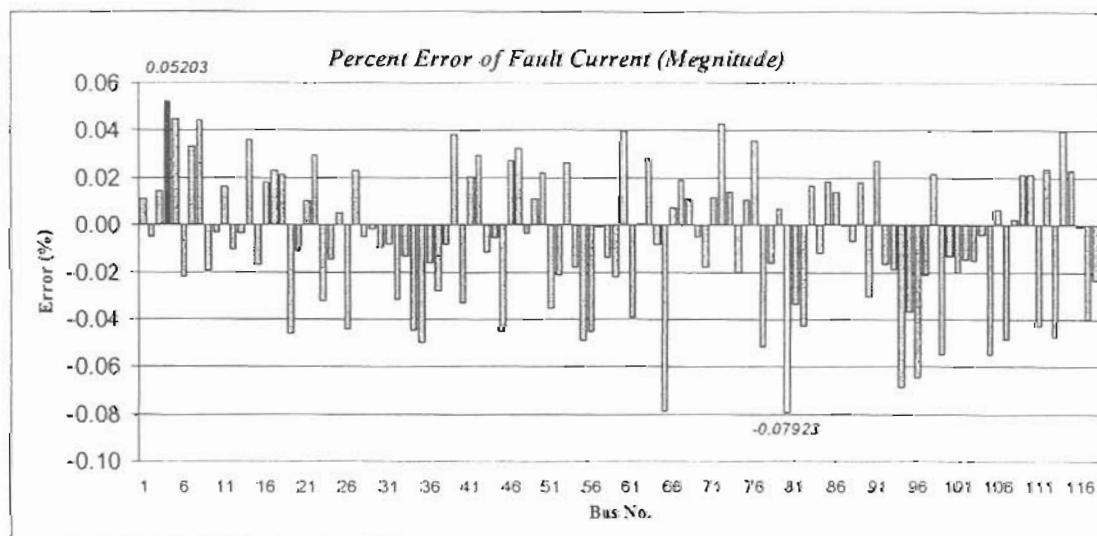
5.4.4 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดิน ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 57 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตรในกรณีสองสายกับดิน เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-12 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่สร้างขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 30 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 50 เท่ากับ -0.00050 p.u. คิดเป็น -0.05012 เปอร์เซ็นต์ หรือเป็น 0.209693 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 12 เท่ากับ 0.00488 p.u. คิดเป็น 0.48868 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-12 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสองสายกับดินในระบบ IEEE 57 บัส

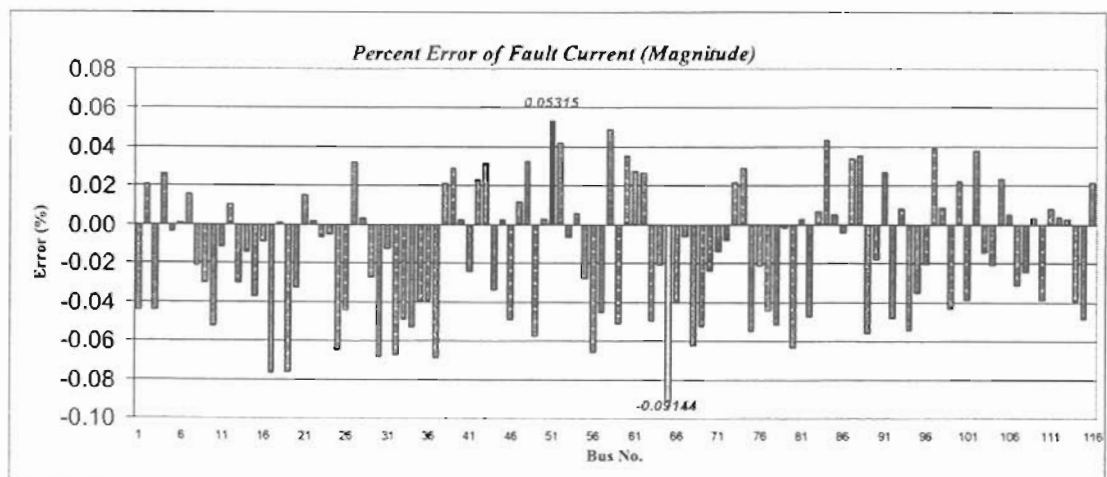
5.5 ผลวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในสถานะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

5.5.1 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสมมูลหรือสามเฟสสมมูล ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 118 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสมมาตรหรือ สามเฟสสมมูล เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-13 มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 118 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 80 เท่ากับ -0.00079 p.u. คิดเป็น -0.07923 เปอร์เซ็นต์ หรือเป็น 0.3313 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 22 เท่ากับ 0.00543 p.u. คิดเป็น 0.54308 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



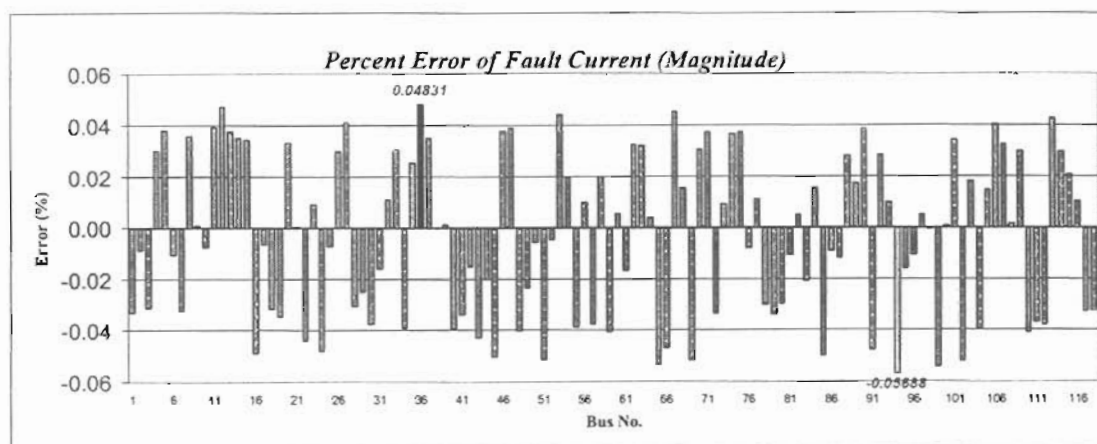
ภาพที่ 5-13 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมมูลในระบบ IEEE 118 บัส

5.5.2 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 118 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-14 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 118 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 65 เท่ากับ -0.00091 p.u. คิดเป็น -0.09144 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.38240 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 67 เท่ากับ -0.00091 p.u. คิดเป็น -0.91793 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



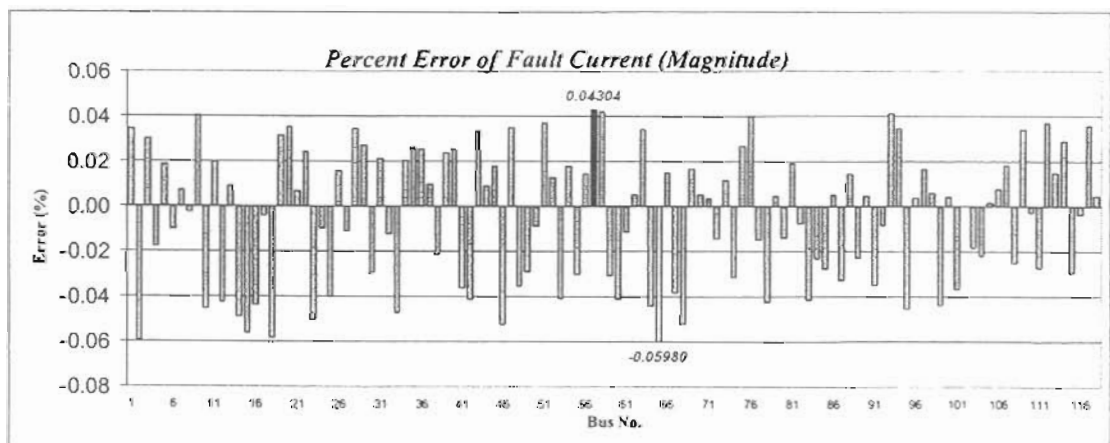
ภาพที่ 5-14 ค่าความคลาดเคลื่อนของ โปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับดินในระบบ IEEE 118 บัส

5.5.3 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุล ในกรณีสายกับสาย ในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 118 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตร ในกรณีสายกับสาย เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งแปลงเป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-15 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่สร้างขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 118 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 94 เท่ากับ -0.00057 p.u. คิดเป็น -0.05688 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.23847 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 22 เท่ากับ 0.00543 p.u. คิดเป็น 0.54262 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-15 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับสายในระบบ IEEE 118 บัส

5.5.4 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดินในผลทดสอบของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 นี้ ผลการเปรียบเทียบค่าคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสของระบบ IEEE 118 บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตรในกรณีสองสายกับดิน เปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World เป็นกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 5-16 โดยผลออกมาเป็นค่าของกระแสลัดวงจร มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-6} หาได้จากค่า Absolute ของขนาดกระแสลัดวงจรจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดของกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ทำขึ้น แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจร ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 118 บัส จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 65 เท่ากับ -0.00060 p.u. คิดเป็น -0.05980 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 0.250192 Amp. ในผลของมุมกระแสลัดวงจรจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 4 เท่ากับ -0.00619 p.u. คิดเป็น -0.61991 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ



ภาพที่ 5-16 ค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละบัสกรณีเกิดความผิดปกติแบบสองสายกับดินในระบบ IEEE 118 บัส

จากผลของการคำนวณกระแสลัดวงจรของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World ปรากฏว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77 มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสลัดวงจรอยู่ที่ 1×10^{-6} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมกระแสลัดวงจรอยู่ที่ 1×10^{-5} ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรในความผิดปกติแบบ

สมดุลและไม่แบบสมดุลเมื่อวิเคราะห์การเกิดที่บัสนั้นจะเห็นว่าค่ากระแสลัดวงจรในแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดินนั้นมีค่าขนาดสูงกว่าความผิดพลาดชนิดอื่น ซึ่งโดยปกติแล้วการเกิดความผิดพลาดกรณีสายกับดินจะเกิดขึ้นบ่อยครั้งกว่าความผิดพลาดชนิดอื่นคิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดที่เกิดบนสายส่งทั้งหมด โดยความผิดพลาดแบบสมดุลคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ แบบกรณีสองสายกับดินคิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ และ แบบกรณีสายกับสายคิดเป็น 15 เปอร์เซ็นต์

5.6 ผลวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่บัสในสถานะอยู่ตัวของระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าได้สมมุติการเกิดความผิดพลาดขึ้นที่บัส 1 ทั้งแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล เนื่องจากผลจากการวิเคราะห์จะดูทุกๆ เฟส และทุกๆ บัสและเปรียบเทียบกันทำให้มีข้อมูลมากแต่ผู้จัดทำได้เลือกระบบ IEEE 14 บัส และเปรียบเทียบกับโปรแกรม Power World เพื่อให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อนของโปรแกรม

5.6.1 ผลคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสมดุลหรือสามเฟสสมดุล

ตารางที่ 5-1 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase B) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดพลาดสามเฟสสมดุลกับโปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus

Bus no.	Voltage (P.U.)		Error (pu.)	Error (%)
	Power World	Fortran 77		
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.16233	0.16233	0.00000	0.00027
3	0.28840	0.28840	0.00000	0.00028
4	0.24346	0.24346	0.00000	0.00019
5	0.21749	0.21749	0.00000	0.00020
6	0.38855	0.38855	0.00000	0.00043
7	0.37077	0.37077	0.00000	0.00006
8	0.50252	0.50252	0.00000	0.00015
9	0.35452	0.35452	0.00000	0.00024
10	0.35782	0.35782	0.00000	0.00002
11	0.37154	0.37154	0.00000	0.00012
12	0.37215	0.37215	0.00000	0.00026
13	0.35875	0.35875	0.00000	0.00046
14	0.35000	0.35001	0.00001	0.00054

ตารางที่ 5-1 แสดงผลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะที่เกิดความผิดปกติ โดยแสดงผลออกมาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-8} โดยคอลัมน์ที่ 1 แสดงบัส คอลัมน์ที่ 2 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรม Power World คอลัมน์ที่ 3 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรมที่ทำขึ้น (Fortran 77) คอลัมน์ที่ 4 แสดงความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า (Error) เป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้จากค่า Absolute ของขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรมที่ทำขึ้น และคอลัมน์ที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัสโดยจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 14 เท่ากับ -0.00001 p.u. คิดเป็น -0.00054 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ

5.6.2 ผลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับดิน

ตารางที่ 5-2 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase B) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลกรณีสายกับดินกับ โปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus

Bus_no.	Voltage (P.U.)		Error (pu.)	Error (%)
	Power World	Fortran 77		
1	1.21440	1.21440	0.00000	0.00010
2	1.17213	1.17213	0.00000	-0.00045
3	1.11282	1.11282	0.00000	-0.00004
4	1.12899	1.12899	0.00000	-0.00050
5	1.13352	1.13352	0.00000	-0.00044
6	1.18112	1.18112	0.00000	-0.00043
7	1.17085	1.17085	0.00000	0.00040
8	1.15276	1.15276	0.00000	0.00021
9	1.17213	1.17213	0.00000	0.00016
10	1.16762	1.16762	0.00000	-0.00029
11	1.17142	1.17143	-0.00001	-0.00088
12	1.15425	1.15425	0.00000	-0.00011
13	1.13195	1.13195	0.00000	0.00003
14	1.14044	1.14044	0.00000	-0.00042

ตารางที่ 5-2 แสดงผลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดปกติ โดยแสดงผลออกมาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-8} โดยคอลัมน์ที่ 1 แสดงบัส คอลัมน์ที่ 2 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรม Power World คอลัมน์ที่ 3 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรมที่ทำขึ้น (Fortran 77) คอลัมน์ที่ 4 แสดงความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า (Error) เป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้จากค่า Absolute ของขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรมที่ทำขึ้น และคอลัมน์ที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัสโดยจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 11 เท่ากับ -0.00001 p.u. คิดเป็น -0.00088 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ

5.6.3 ผลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสายกับสาย

ตารางที่ 5-3 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase B) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลกรณีสายกับสายกับโปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus

Bus_no.	Voltage (P.U.)		Error (pu.)	Error (%)
	Power World	Fortran 77		
1	0.53000	0.53000	0.00000	0.00001
2	0.58665	0.58666	-0.00001	-0.00071
3	0.63226	0.63226	0.00000	-0.00016
4	0.61715	0.61715	0.00000	-0.00007
5	0.60675	0.60676	-0.00001	-0.00071
6	0.69203	0.69203	0.00000	-0.00036
7	0.67650	0.67650	0.00000	-0.00024
8	0.74275	0.74276	-0.00001	-0.00075
9	0.66583	0.66584	-0.00001	-0.00069
10	0.66535	0.66536	-0.00001	-0.00070
11	0.67587	0.67588	-0.00001	-0.00083
12	0.66765	0.66765	0.00000	-0.00019
13	0.64733	0.64733	0.00000	-0.00035
14	0.64601	0.64601	0.00000	-0.00022

ตารางที่ 5-3 แสดงผลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดปกติ โดยแสดงผลออกมาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-8} โดยคอลัมน์ที่ 1 แสดงบัส คอลัมน์ที่ 2 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรม Power World คอลัมน์ที่ 3 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรมที่ทำขึ้น (Fortran 77) คอลัมน์ที่ 4 แสดงความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า (Error) เป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้จากค่า Absolute ของขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรมที่ทำขึ้น และคอลัมน์ที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัสโดยจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 8 เท่ากับ -0.00001 p.u. คิดเป็น -0.00075 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ

5.6.4 ผลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลในกรณีสองสายกับดิน

ตารางที่ 5-4 เปรียบเทียบค่าคำนวณแรงดันไฟฟ้า (Phase A) ที่บัสเมื่อเกิดความผิดปกติแบบไม่สมดุลกรณีสองสายกับดินกับโปรแกรม Power World ในระบบของ IEEE 14 Bus

Bus_no.	Voltage (P.U.)		Error (pu.)	Error (%)
	Power World	Fortran 77		
1	1.17957	1.17957	0.00000	-0.00028
2	1.10470	1.10470	0.00000	0.00043
3	1.01937	1.01937	0.00000	0.00014
4	1.04324	1.04324	0.00000	0.00006
5	1.05280	1.05280	0.00000	0.00023
6	1.09532	1.09532	0.00000	0.00007
7	1.08475	1.08475	0.00000	0.00041
8	1.07847	1.07847	0.00000	0.00022
9	1.07955	1.07956	-0.00001	-0.00053
10	1.07586	1.07586	0.00000	-0.00027
11	1.08246	1.08247	-0.00001	-0.00084
12	1.06559	1.06559	0.00000	-0.00025
13	1.04414	1.04414	0.00000	0.00016
14	1.04770	1.04770	0.00000	0.00039

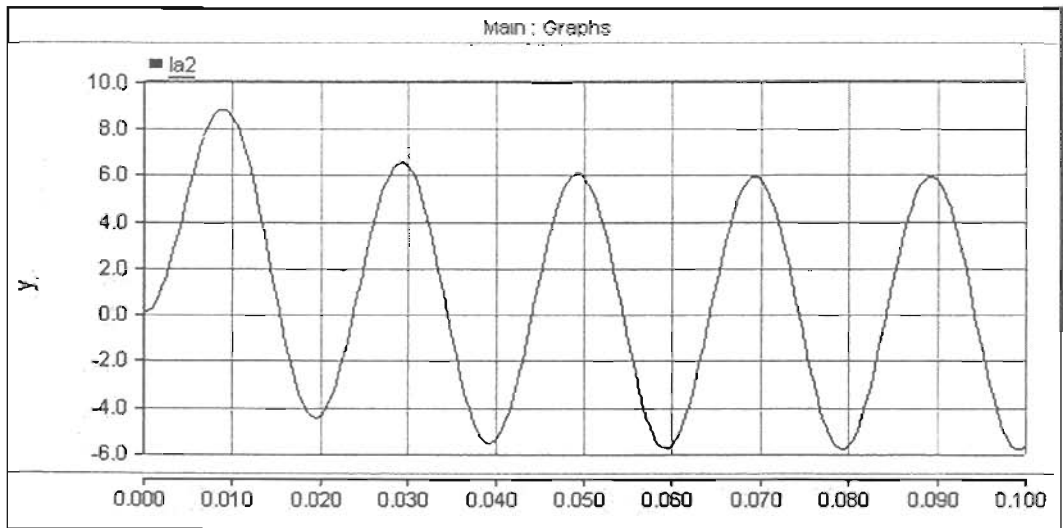
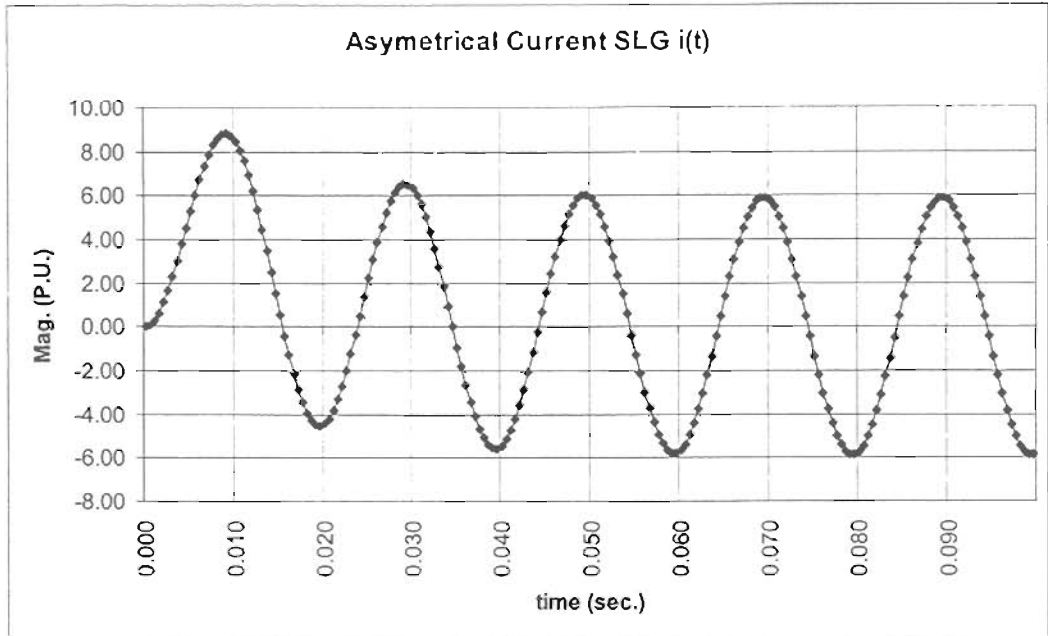
ตารางที่ 5-4 แสดงผลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดปกติ โดยแสดงผลออกมาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกระแสลัดวงจรมากกว่า 1×10^{-8} โดยคอลัมน์ที่ 1 แสดงบัส คอลัมน์ที่ 2 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรม Power World คอลัมน์ที่ 3 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นเปอร์เซ็นต์ของโปรแกรมที่ทำขึ้น (Fortran 77) คอลัมน์ที่ 4 แสดงความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า (Error) เป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้จากค่า Absolute ของขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม Power World ลบกับขนาดแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรมที่ทำขึ้น และคอลัมน์ที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ขนาดของกระแสลัดวงจรทั้ง 14 บัสโดยจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่บัส 11 เท่ากับ -0.00001 p.u. คิดเป็น -0.00084 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้าในด้านอื่นๆ

จากผลทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่บัสในขณะเกิดความผิดปกติด้วยการเปรียบเทียบของโปรแกรม Fortran 77 กับ Power World โดยในระบบทดสอบ IEEE 30 บัส IEEE 57 บัส และ IEEE 118 บัสได้ทำการทดลองและเปรียบเทียบก็พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับ 1×10^{-6} เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเกิดความผิดปกติแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดบัสหนึ่งทำให้บัสใกล้เคียงบริเวณที่เกิดความผิดปกติมีการเปลี่ยนแปลงที่สูงถึงแม้จะเป็นเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าวเกิดความเสียหายได้และเราสามารถออกแบบและเลือกอุปกรณ์ป้องกันใช้ในระบบ

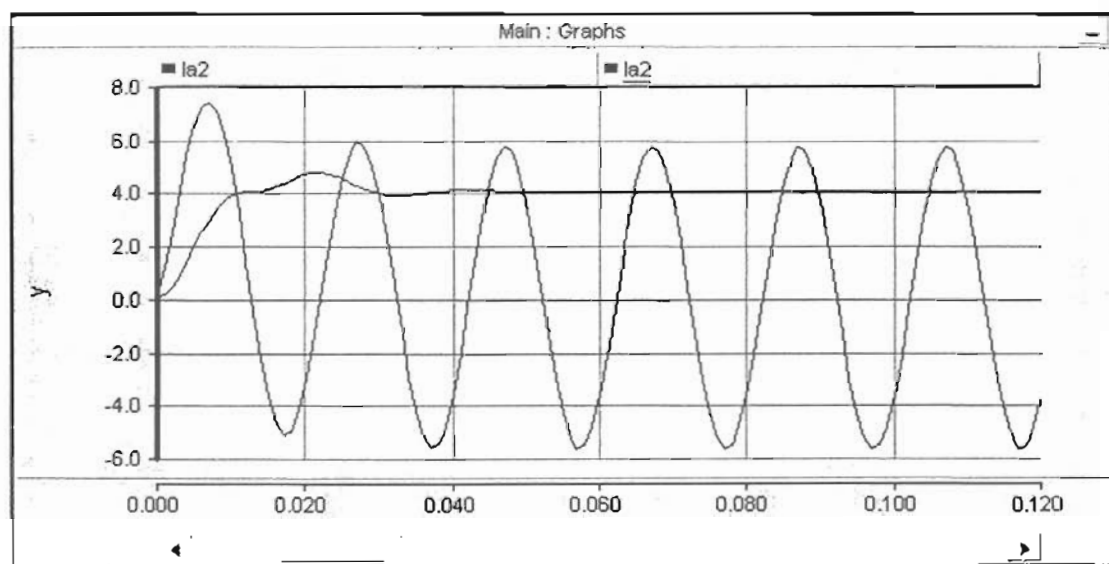
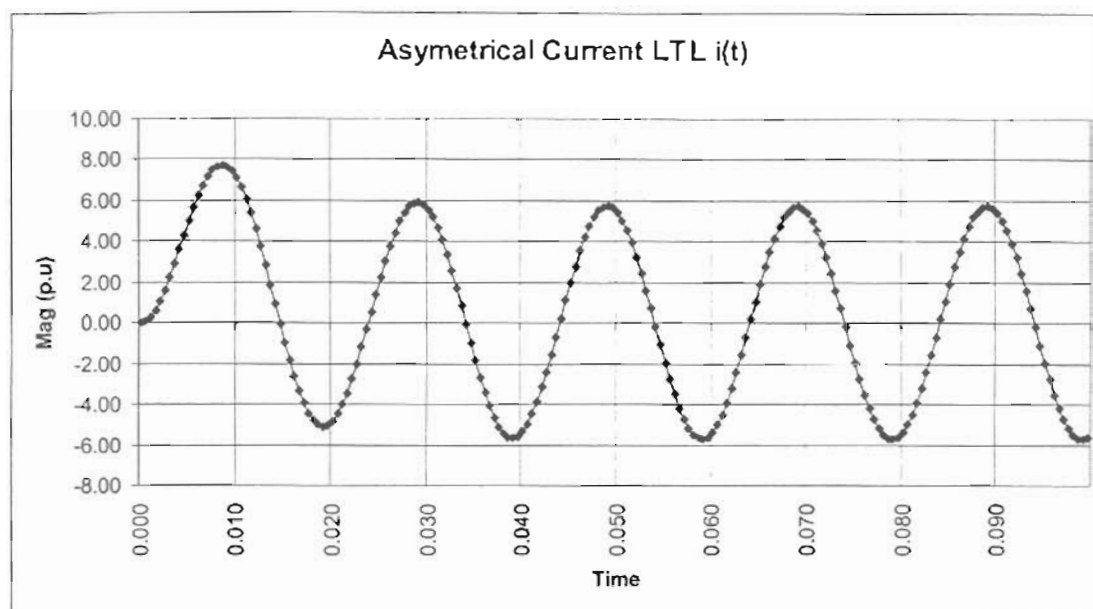
5.7 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรที่บัสในกรณีเกิดความผิดปกติ

ในการทดสอบกระแสลัดวงจรที่คำนวณจากโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77 นั้นจะมีลักษณะเป็นค่ากระแสลัดวงจรที่ ณ เวลาใดๆของคาบเวลา ลักษณะการทดลองจะนำสมการที่ 1-3 มาคำนวณเป็นพื้นฐาน โดยจะกำหนดให้วงจรสมมูลอยู่ในรูปของวงจรเทวินิน โดยแรงดันไฟฟ้าที่บัสเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายไฟฟ้าในวงจรเทวินิน มีค่าอิมพีแดนซ์เทวินินเท่ากับค่าของอิมพีแดนซ์รวมของบัสนั้นๆในแต่ละกรณีของความผิดปกติบนระบบ แล้วแยกออกมาเป็นค่าความต้านทานและค่าอินดักแตนซ์ในวงจรเทวินินเพื่อง่ายต่อการคำนวณซึ่งจะผลของกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรจะมีดังผลการทดลองในแต่ละจุดต่างๆบนรูปคลื่นกระแสลัดวงจร

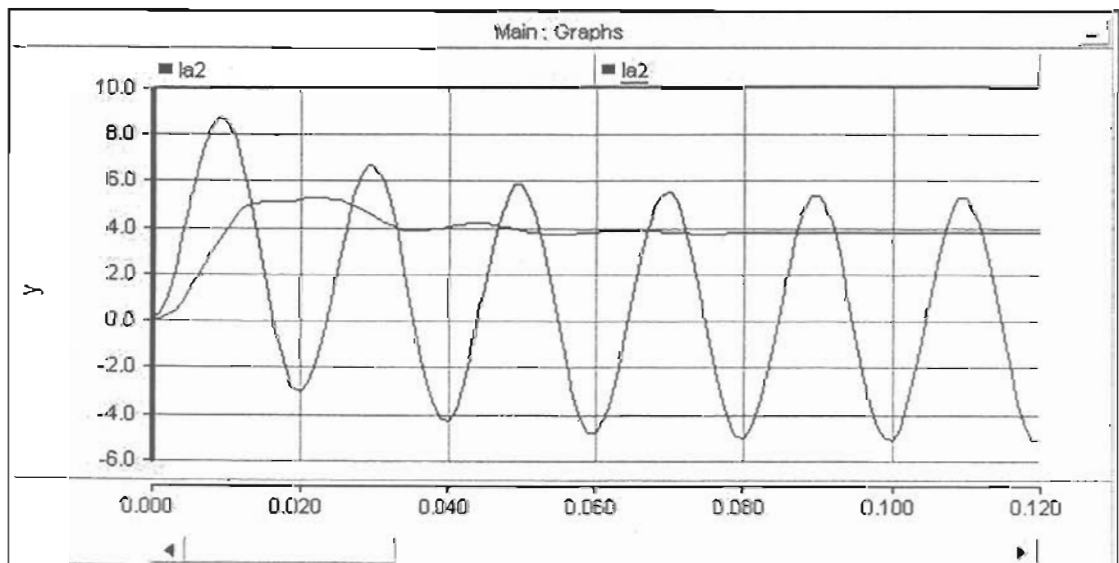
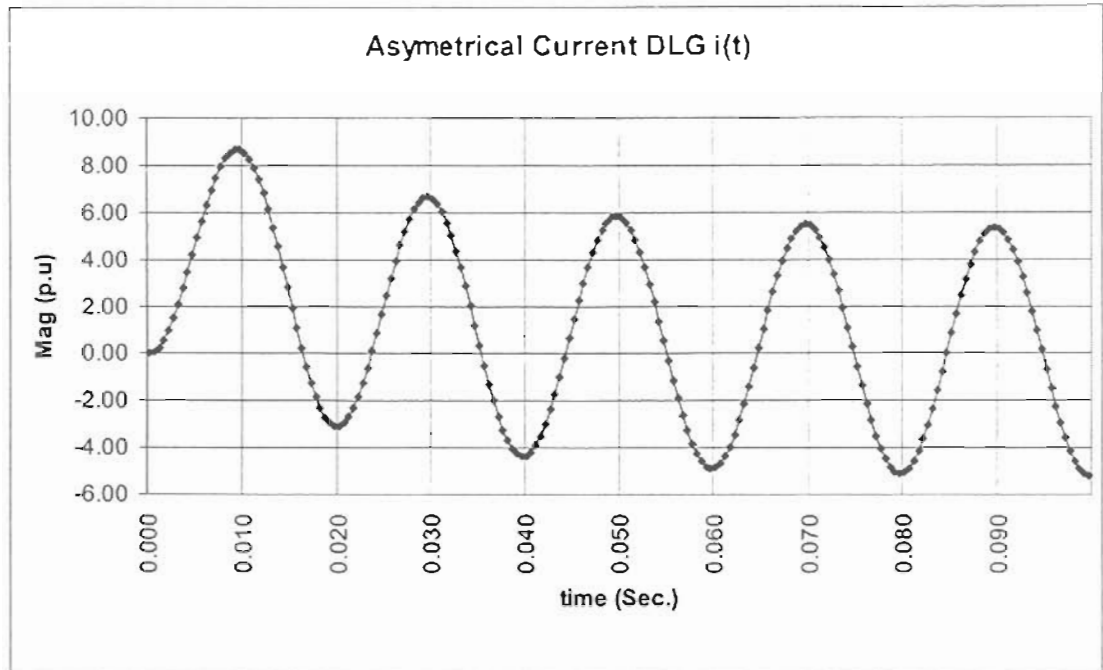
ผลการทดลองที่โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรในกรณีเกิดความผิดปกติแบบสายกับดิน สายกับสาย และสองสายกับดิน โดยจะแปรผันไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเรื่อย โดยในการทดลองจะนำผลเป็นกราฟเพื่อให้เกิดรูปสัญญาณของกระแสลัดวงจรเพื่อดูลักษณะของรูปคลื่นแล้วนำไปเปรียบเทียบกับโปรแกรม PSCAD โดยกำหนดให้เกิดความผิดปกติที่บัส 1 ซึ่งจะแสดงในภาพที่ 5-18 เป็นความผิดปกติแบบสายกับดิน ภาพที่ 5-19 เป็นความผิดปกติแบบสายกับสาย และภาพที่ 5-20 เป็นความผิดปกติแบบสองสายกับดิน



ภาพที่ 5-17 เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณของกระแสคววจรในกรณีสายกับดิน



ภาพที่ 5-18 เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณของกระแสลัดวงจรในกรณีสายกับสาย



ภาพที่ 5-19 เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณของกระแสลัดวงจรในกรณีสองสายกับดิน

จากภาพผลทดลองการที่ 5-18 ภาพที่ 5-19 และภาพที่ 5-20 พบว่ารูปคลื่นกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติในกรณี สายกับดิน สายกับสาย และสองสายกับดิน มีลักษณะสัญญาณที่เหมือนกับของโปรแกรม PSCAD โดยภาพบนเป็นภาพที่ได้จากการพล็อตกราฟจากค่าของโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77 และภาพล่างเป็นภาพจากโปรแกรม PSCAD แล้วทำการตรวจสอบค่าจุดต่างๆของรูปคลื่นของโปรแกรม PSCAD พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งทำการวิเคราะห์ตามจุดต่างบนรูปคลื่นได้ดังตารางที่ 5-18

ตารางที่ 5-5 ตารางค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจรตามคาบเวลาดังแต่ 0.009 sec. ถึง 0.099 sec.

Time (sec)	Magnitude i(t) (p.u)		Error (p.u)	Error (%)
	PSCAD	Fortran 77		
0.009	8.79860	8.80160	-0.00300	-0.30000
0.019	-4.46623	-4.46814	0.00191	0.19100
0.029	6.52830	6.53061	-0.00231	-0.23070
0.039	-5.54667	-5.54900	0.00233	0.23300
0.049	6.01388	6.01397	-0.00009	-0.00870
0.059	-5.79970	-5.79972	0.00002	0.00196
0.069	5.90000	5.90100	-0.00100	-0.10000
0.079	-5.84710	-5.84929	0.00219	0.21900
0.089	5.87110	5.87320	-0.00210	-0.21000
0.099	-5.86000	-5.86186	0.00186	0.18574

จากตารางที่ 5-5 เป็นตารางการเปรียบเทียบค่ากระแสสูงสุดของกระแสลัดวงจร ณ เวลาใดๆ โดยทำการจำลองการคำนวณตั้งแต่ 0.00 sec. ถึง 0.100 sec. ซึ่งกำหนดลำดับการคำนวณไว้ที่ทุกๆ เวลา 0.0005 sec. เพราะตัวเลขการคำนวณนี้จะเหมาะสมกับการนำไปจำลองรูปคลื่นสัญญาณกระแสลัดวงจรมากที่สุด ซึ่งจะเกิดจุดค่ากระแสลัดวงจร 200 จุด คือ เวลา 0.1 sec. และตารางที่ 5-18 จะนำเสนอเฉพาะที่อยู่ในช่วงทรานเซียนต์เท่านั้น โดยหลังจากเปรียบเทียบค่ากับโปรแกรม PSCAD พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากที่สุดคือ -0.0030 หรือ -0.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในเมื่อขนาดของกระแสลัดวงจรที่บัส 1 ในกรณีสายกับดิน มีค่า 4.162 เปอรูยูนิต หรือ 1741.310 แอมป์ (Amp.) ฉะนั้นค่าคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปจะมีค่าเท่ากับ 1.25514 A. หลังจากการทดสอบทุกระบบทดสอบก็จะมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.3 เปอร์เซ็นต์

5.8 ส่วนสรุปของเนื้อหา

สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังคือ ความถูกต้อง รวดเร็ว และมีความเชื่อถือได้ จากการทดสอบโปรแกรมการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่จัดทำขึ้น กับระบบทดสอบ IEEE 14 บัส IEEE 30 บัส IEEE 57 บัสและ IEEE 118 บัส ทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรมเชิงพาณิชย์ คือ โปรแกรม Power World และ โปรแกรม PSCAD โดยพิจารณาถึงความถูกต้องในด้านขนาดของกระแสลัดวงจรที่บัสในช่วงทรานเซียนต์ ในช่วงสภาวะอยู่ตัว และแรงดันไฟฟ้าที่บัสขณะเกิดความผิดปกติ ผลการทดสอบของโปรแกรมที่ทำการขึ้นขนาดกระแสลัดวงจรที่บัสในสภาวะอยู่ตัวของระบบทดสอบทั้งหมดมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 0.09179 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าไม่เกิน 0.3840 Amp. ที่ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส มุมของกระแสลัดวงจรมีความคลาดเคลื่อน -0.05980 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าไม่เกิน 1 องศาที่ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส ส่วนกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรมีความคลาดเคลื่อน 0.3 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าไม่เกิน 1.6069 Amp. ที่ระบบ IEEE 118 บัส ซึ่งความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมที่ทำการขึ้นมีค่าน้อยมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้านอื่นๆ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอขั้นตอนและรายละเอียดการวิเคราะห์ผิดพ่วงในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรมภาษา Fortran 77 โดยทำการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 14 บัส IEEE 30 บัส IEEE 57 บัส และ IEEE 118 บัส และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับโปรแกรม Power World และโปรแกรม PSCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ โดยพิจารณาถึงความถูกต้อง แม่นยำ ของโปรแกรมที่จัดทำขึ้น

6.1 สรุปผล

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์เชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์โดยอาศัยการสร้างส่วนประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์จากการสร้างแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์และอินเวอร์สเพื่อแปลงเป็นอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาฟอร์แทรน 77 ทำให้เป็นวิธีที่ได้คำตอบมีความถูกต้องเชื่อถือได้สูง สามารถตรวจสอบไปพร้อมโปรแกรมสำเร็จรูปได้ ในการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรสามารถกำหนดชนิดของความผิดพ่วงได้ด้วยผู้ใช้งานเอง กำหนดบัสที่เกิดความผิดพ่วงและวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะเกิดความผิดพ่วง และค่ากระแสลัดวงจรในสถานะอยู่ตัวและสถานะทรานเซียนต์ ทำให้ทราบถึงความสามารถของระบบที่ทดสอบว่าจะทนต่อสถานะขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้หรือไม่ โดยการออกแบบให้ระบบสามารถจะป้องกันอันตรายจากสถานะความผิดพ่วงได้อย่างสมบูรณ์ รวมไปถึงการหาอุปกรณ์ป้องกันระบบมาแก้ไขปัญหาหรือเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสูงขึ้น ซึ่งความสามารถของโปรแกรมนี้อาจจะไม่สามารถแสดงผลออกเป็นภาพที่สวยงาม และไม่สามารถเลือกใช้เครื่องมือได้ทำให้ผู้ใช้งานเกิดปัญหาขึ้นบ้าง แต่ค่าคำนวณที่ได้มามีค่าความผิดพลาดน้อยเมื่อเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปอย่าง Power World และ PSCAD โดยมีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของการคำนวณของโปรแกรม คือ ระบบจะต้องต่อหม้อแปลงแบบการต่อสายกับดินทั้งสองด้าน อัตราส่วนของหม้อแปลงต้องคงที่ ฟอลต์ที่ต้องเกิดเฉพาะเฟสที่กำหนดของฟอลต์ ค่าแรงฟอลต์ที่เกิดที่บัสเท่านั้น ค่าแรงฟอลต์แบบขนานอย่างเดียวไม่สามารถคำนวณการเกิดฟอลต์แบบหลายจุดได้ และกรณีค่าการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งระบบพารามิเตอร์ของสายจะไม่นำมาคิด

การเขียนโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77 เป็นภาษาที่ต้องใช้ความเข้าใจค่อนข้างมากในการเขียนโปรแกรม เมื่อทำการรันโปรแกรมแล้วเกิดการผิดพลาด หรือค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ (Error) เนื่องจากการเขียนโปรแกรมไม่ตรงกับหลักไวยากรณ์ของภาษา (Syntax) การตรวจสอบทำได้ยากกว่าโปรแกรมประยุกต์ทั่วไป และการประกาศตัวแปรต้องให้ตรงกับความยาวของการคำนวณเพื่อให้คำนวณได้รวดเร็วและมีความถูกต้อง

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการเริ่มต้นเขียนโปรแกรมเพื่อใช้งาน โปรแกรมนี้สามารถพัฒนาและเพิ่มการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังด้านอื่นๆ เพื่อให้ครอบคลุมการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าได้ เช่น

6.2.1 พัฒนาโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์ความผิดปกติ (Fault) ของระบบไฟฟ้าให้มีเงื่อนไขครอบคลุมเหมือนโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น เงื่อนไขต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ อัตราส่วนของหม้อแปลงต้องปรับเปลี่ยนได้ กำหนดเฟสของความผิดปกติได้ จำนวนฟอลต์ที่เกิดที่บัสและสายส่ง จำนวนฟอลต์แบบขนานและฟอลต์อนุกรม จำนวนการเกิดฟอลต์แบบหลายจุดได้ และสามารถคิดกรณีค่าการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งในระบบ

6.2.2 พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบไฟฟ้า

6.2.3 พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ระบบป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

6.2.4 พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารอ้างอิง

1. Grainger, J. J. and W. D. Stevenson. Power System Analysis. New Jersey : McGraw-Hill, c1994.
2. Saadat, H. Power Systems Analysis. New Jersey : McGraw-Hill, c1999.
3. Charles, A. G. Power Systems Analysis. New York : John Wiley & Sons, c1996.
4. Anderson, P. M. Analysis of Faulted Power System. Power System Engineering Series : IEEE Press, c1995.
5. Greenwood, A. Electrical Transient in Power System. New York : John Wiley & Sons, c1991.
6. Ruedenberg, R. Transient Performance of Electric Power System. New York : John Wiley & Sons, c1950.
7. Fortescue, C. L. Method of Symmetrical Coordinates Applied to The Solution of Polyphase Networks. New York : John Wiley & Sons, c1918.
8. Nyhoff, L. and S. Leestma. Fortran 77 for Engineers and Scientists with an Introduction to Fortran 90. 4th ed. New Jersey : Prentice-Hall, c1996.
9. ดร.ณิ ศมาวรรณกุล. การเขียนโปรแกรมภาษา Fortran 77. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2526.
10. ศูนย์ภาษาคอมพิวเตอร์. ภาษาฟอร์แทรนกับไมโครคอมพิวเตอร์. กรุงเทพมหานคร : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์การพิมพ์, 2528.
11. รสสุคนธ์ หังสพฤกษ์. การเขียนโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2532.
12. Wood, A. J. and B. F. Wollenberg. Power generation operation and control. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, c1996.
13. Heydt, G.T. Computer Analysis Methods for Power Systems. New York : Macmillan, c1986.
14. Boyce, W. E. Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems. New York : John Wiley & Sons, c1996.

15. Christie, R. "14 Bus Power Flow Test Case". Power System Test Case Archive [Serial Online] 1993 Nov-Dec [Cited 2006, Jan 13]. Available from :
http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm.
16. _____. "30 Bus Power Flow Test Case". Power System Test Case Archive [Serial Online] 1993 Nov-Dec [Cited 2006, Jan 13]. Available from :
http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca30bus.htm.
17. _____. "57 Bus Power Flow Test Case". Power System Test Case Archive [Serial Online] 1993 Nov-Dec [Cited 2006, Jan 13]. Available from :
http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca57bus.htm.
18. _____. "118 Bus Power Flow Test Case". Power System Test Case Archive [Serial Online] 1993 Nov-Dec [Cited 2006, Jan 13]. Available from :
http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca118bus.htm.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลระบบทดสอบ

1. ระบบทดสอบ IEEE14 บัส [15]

ระบบทดสอบ 14 บัส เป็นระบบทดสอบที่มี เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 เครื่อง สายส่ง 15 เส้น หม้อแปลงไฟฟ้า 3 ตัว และชั้นตัดปาซิเตอร์ 1 ตัว ซึ่งมีข้อมูลสายส่งและข้อมูลบัสระบบทดสอบ 14 บัส ดังตารางที่ ก-1 ตารางที่ ก-2 และ ตารางที่ ก-3 ตามลำดับ

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1	2
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1	1.2
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1	1.2
2	4	0.05811	0.17632	0.034	1	1
2	5	0.05695	0.17388	0.0346	1	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0128	1	0.5
4	5	0.01335	0.04211	0	1	1
4	7	0	0.20912	0	0.978	0.5
4	9	0	0.55618	0	0.969	0.3
5	6	0	0.25202	0	0.932	0.8
6	11	0.09498	0.1989	0	1	0.15
6	12	0.12291	0.25581	0	1	0.15
6	13	0.06615	0.13207	0	1	0.3
7	8	0	0.17615	0	1	0.01
7	9	0	0.11001	0	1	0.5
9	10	0.03181	0.0845	0	1	0.15
9	14	0.12711	0.27038	0	1	0.15
10	11	0.08205	0.19207	0	1	0.15
12	13	0.22092	0.19988	0	1	0.15
13	14	0.17093	0.34802	0	1	0.15

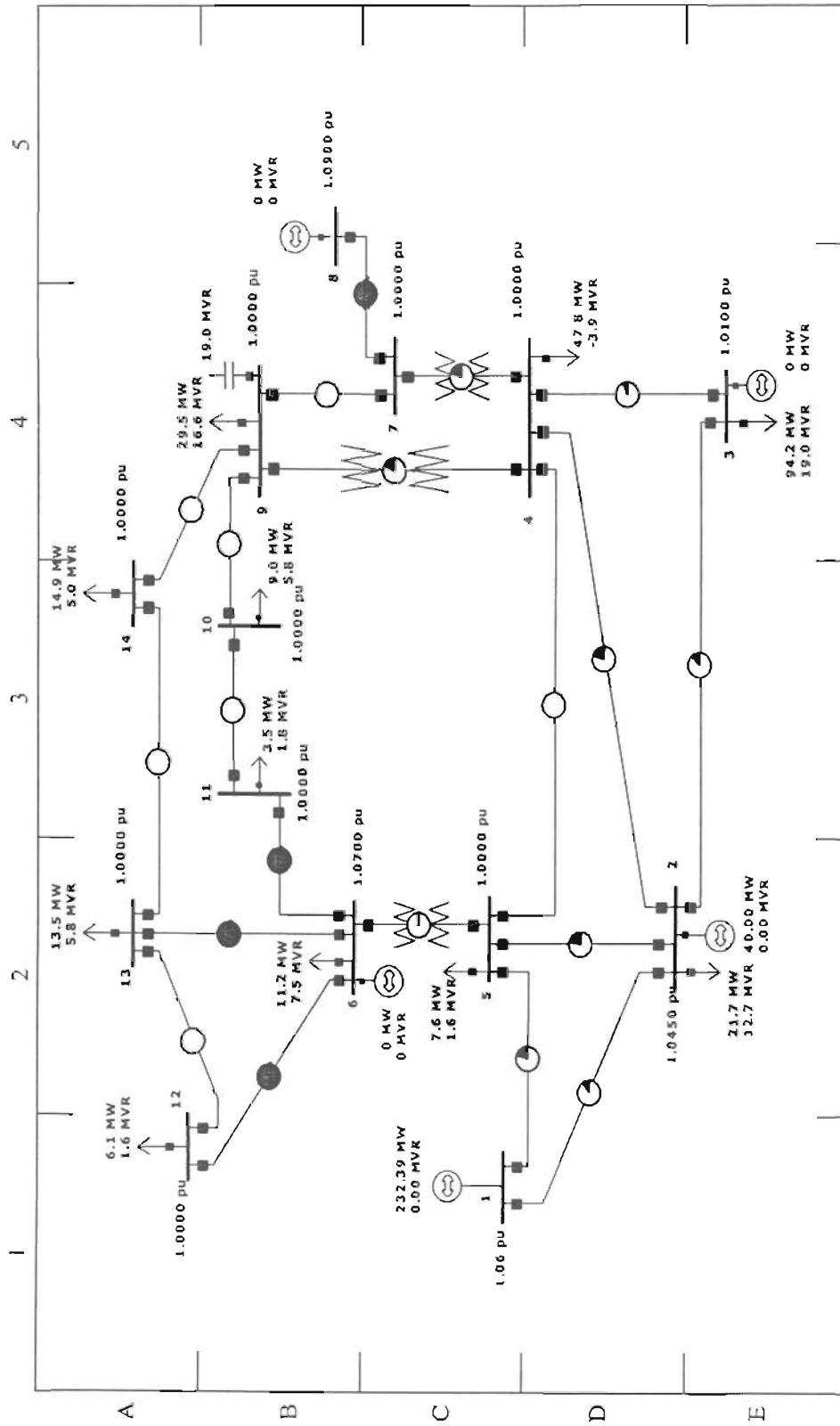
ตารางที่ ก-2 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส

Bus No.	Bus Type	V pu.	Angle Degree	Pload MW	Qload Mvar	Pgen MW	Qgen Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar	Inject Mvar	Vmin pu.	Vmax pu.
1	1	1.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
2	2	1.045	0	21.7	12.7	40	0	-40	50	0	0.9	1.1
3	2	1.01	0	94.2	19	0	0	0	0	0	0.9	1.1
4	0	1	0	47.8	-3.9	0	0	0	0	0	0.9	1.1
5	0	1	0	7.6	1.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
6	2	1.07	0	11.2	7.5	0	0	-6	24	0	0.9	1.1
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
8	2	1.09	0	0	0	0	0	-6	24	0	0.9	1.1
9	0	1	0	29.5	16.6	0	0	0	0	19	0.9	1.1
10	0	1	0	9	5.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
11	0	1	0	3.5	1.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
12	0	1	0	6.1	1.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
13	0	1	0	13.5	5.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
14	0	1	0	14.9	5	0	0	0	0	0	0.9	1.1

โดยที่ Bus Type คือ ชนิดของบัส (0 = Load Bus, 1 = Slack Bus, 2 = Generator Bus)

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลส่วนประกอบลำดับศูนย์ของสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
1	2	0.04845	0.147925	0.0528	1	2
1	5	0.135075	0.22304	0.0492	1	1.2
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1	1.2
2	4	0.05811	0.17632	0.034	1	1
2	5	0.05695	0.17388	0.0346	1	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0128	1	0.5
4	5	0.01335	0.04211	0	1	1
4	7	0	0.20912	0	0.978	0.5
4	9	0	0.55618	0	0.969	0.3
5	6	0	0.25202	0	0.932	0.8
6	11	0.09498	0.1989	0	1	0.15
6	12	0.12291	0.25581	0	1	0.15
6	13	0.06615	0.13207	0	1	0.3
7	8	0	0.17615	0	1	0.01
7	9	0	0.11001	0	1	0.5
9	10	0.03181	0.0845	0	1	0.15
9	14	0.12711	0.27038	0	1	0.15
10	11	0.08205	0.19207	0	1	0.15
12	13	0.22092	0.19988	0	1	0.15
13	14	0.17093	0.34802	0	1	0.15



ภาพที่ ก-1 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

2. ระบบทดสอบ 30 บัส [16]

ระบบทดสอบ 30 บัส เป็นระบบทดสอบที่มี เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง สายส่ง 41 เส้น หม้อแปลงไฟฟ้า 4 ตัว และชั้นตัดค่าปาซิเตอร์ 2 ตัว ซึ่งมีข้อมูลสายส่งและข้อมูลบัสระบบทดสอบ 30 บัส ดังตารางที่ ก-4 ตารางที่ ก-5 และ ตารางที่ ก-6 ตามลำดับ

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

From Bus	To Bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
2	1	0.0192	0.0575	0.0528	1	2.3
3	1	0.0452	0.1852	0.0408	1	1.3
4	2	0.057	0.1737	0.0368	1	0.65
4	3	0.0132	0.0379	0.0084	1	1.3
5	2	0.0472	0.1983	0.0418	1	1.3
6	2	0.0581	0.1763	0.0374	1	0.9
6	4	0.0119	0.0414	0.009	1	0.9
7	5	0.046	0.116	0.0204	1	0.7
7	6	0.0267	0.082	0.017	1	1.3
8	6	0.012	0.042	0.009	1	0.65
6	9	0	0.208	0	0.978	0.65
6	10	0	0.556	0	0.969	0.32
11	9	0	0.208	0	1	0.65
10	9	0	0.11	0	1	0.65
4	12	0	0.256	0	0.932	0.65
13	12	0	0.14	0	1	0.65
14	12	0.1231	0.2559	0	1	0.32
15	12	0.0662	0.1304	0	1	0.32
16	12	0.0945	0.1987	0	1	0.32
15	14	0.221	0.1997	0	1	0.16
17	16	0.0524	0.1923	0	1	0.16
18	15	0.1073	0.2185	0	1	0.16
19	18	0.0639	0.1292	0	1	0.16
20	19	0.034	0.068	0	1	0.32
20	10	0.0936	0.209	0	1	0.32
17	10	0.0324	0.0845	0	1	0.32

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

From Bus	To Bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
22	10	0.0727	0.1499	0	1	0.32
22	21	0.0116	0.0236	0	1	0.32
23	15	0.1	0.202	0	1	0.16
24	22	0.115	0.179	0	1	0.16
24	23	0.132	0.27	0	1	0.16
25	24	0.1885	0.3292	0	1	0.16
26	25	0.2544	0.38	0	1	0.16
27	25	0.1093	0.2087	0	1	0.16
28	27	0	0.396	0	0.968	0.65
29	27	0.2198	0.4153	0	1	0.16
30	27	0.3202	0.6027	0	1	0.16
30	29	0.2399	0.4533	0	1	0.16
28	3	0.0636	0.2	0.0428	1	0.32
28	6	0.0169	0.0599	0.13	1	0.32

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

Bus No.	Bus Type	V pu.	Angle Degree	Pload MW	Qload Mvar	Pgen MW	Qgen Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar	Inject Mvar	Vmin pu.	Vmax pu.
1	1	1.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
2	2	1.043	0	21.7	12.7	40	0	-40	50	0	0.9	1.1
3	0	1	0	2.4	1.2	0	0	0	0	0	0.9	1.1
4	0	1	0	7.6	1.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
5	2	1.01	0	94.2	19	0	0	-40	40	0	0.9	1.1
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
7	0	1	0	22.8	10.9	0	0	0	0	0	0.9	1.1
8	2	1.01	0	30	30	0	0	-10	40	0	0.9	1.1
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
10	0	1	0	5.8	2	0	0	0	0	19	0.9	1.1
11	2	1.082	0	0	0	0	0	-6	24	0	0.9	1.1
12	0	1	0	11.2	7.5	0	0	0	0	0	0.9	1.1
13	2	1.071	0	0	0	0	0	-6	24	0	0.9	1.1
14	0	1	0	6.2	1.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
15	0	1	0	8.2	2.5	0	0	0	0	0	0.9	1.1
16	0	1	0	3.5	1.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
17	0	1	0	9	5.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
18	0	1	0	3.2	0.9	0	0	0	0	0	0.9	1.1
19	0	1	0	9.5	3.4	0	0	0	0	0	0.9	1.1
20	0	1	0	2.2	0.7	0	0	0	0	0	0.9	1.1
21	0	1	0	17.5	11.2	0	0	0	0	0	0.9	1.1
22	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
23	0	1	0	3.2	1.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
24	0	1	0	8.7	6.7	0	0	0	0	4.3	0.9	1.1
25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
26	0	1	0	3.5	2.3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
27	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
28	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
29	0	1	0	2.4	0.9	0	0	0	0	0	0.9	1.1
30	0	1	0	10.6	1.9	0	0	0	0	0	0.9	1.1

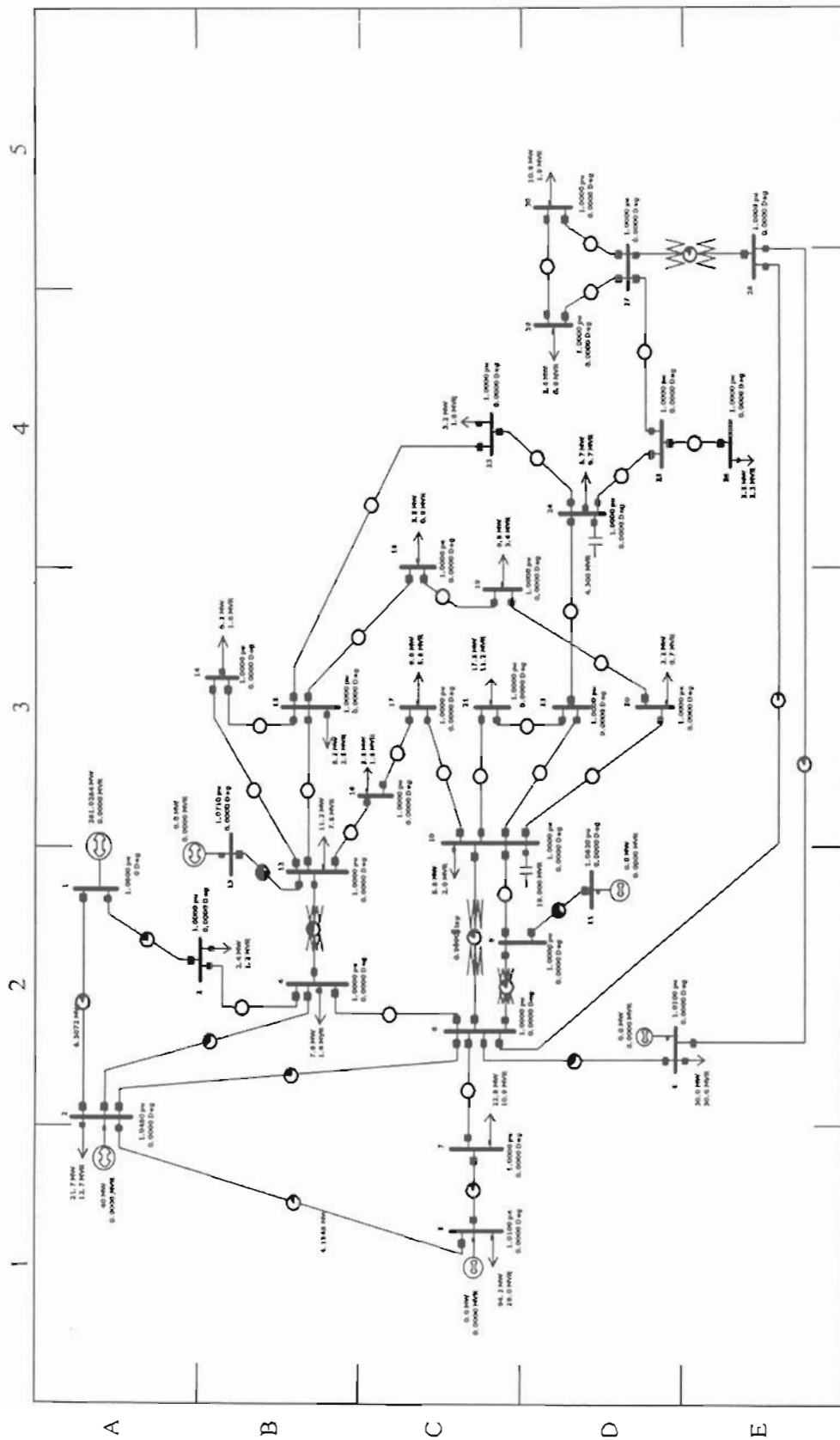
โดยที่ Bus Type คือ ชนิดของบัส (0 = Load Bus, 1 = Slack Bus, 2 = Generator Bus)

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลส่วนประกอบลำดับศูนย์ของสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
1	2	0.048	0.14375	0.132	1	2.3
1	3	0.113	0.463	0.102	1	1.3
2	4	0.1425	0.43425	0.092	1	0.65
3	4	0.33	0.09475	0.0084	1	1.3
2	5	0.118	0.49575	0.1045	1	1.3
2	6	0.14525	0.44075	0.0935	1	0.9
4	6	0.02975	0.1035	0.0225	1	0.9
6	7	0.06675	0.205	0.0425	1	1.3
5	7	0.115	0.29	0.051	1	0.7
6	8	0.03	0.105	0.0225	1	0.65
6	9	0	0.208	0	0.978	0.65
6	10	0	0.556	0	0.969	0.32
9	10	0	0.275	0	1	0.65
9	11	0	0.52	0	1	0.65
4	12	0	0.256	0	0.932	0.65
12	13	0	0.35	0	1	0.65
12	14	0.30775	0.63975	0	1	0.32
12	15	0.1655	0.326	0	1	0.32
14	15	0.5525	0.49925	0	1	0.16
12	16	0.23625	0.49675	0	1	0.32
10	17	0.081	0.21125	0	1	0.32
16	17	0.131	0.48075	0	1	0.16
15	18	0.26825	0.54625	0	1	0.16
18	19	0.15975	0.323	0	1	0.16
10	20	0.234	0.5225	0	1	0.32
19	20	0.085	0.17	0	1	0.32
10	21	0.087	0.18725	0	1	0.32
10	22	0.18175	0.37475	0	1	0.32
21	22	0.029	0.059	0	1	0.32
15	23	0.25	0.505	0	1	0.16
22	24	0.2875	0.4475	0	1	0.16
23	24	0.33	0.675	0	1	0.16
24	25	0.47125	0.823	0	1	0.16

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
24	25	0.47125	0.823	0	1	0.16
25	26	0.636	0.95	0	1	0.16
25	27	0.27325	0.52175	0	1	0.16
28	27	0	0.396	0	0.968	0.65
6	28	0.04225	0.14975	0.0325	1	0.32
8	28	0.159	0.5	0.107	1	0.32
27	29	0.5495	1.03825	0	1	0.16
27	30	0.8005	1.50675	0	1	0.16
29	30	0.59975	1.13325	0	1	0.16



ภาพที่ ก-2 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

3. ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส [17]

ระบบทดสอบ 57 บัส เป็นระบบทดสอบที่มี เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง สายส่ง 80 เส้น หม้อแปลงไฟฟ้า 14 ตัว และชั้นคัทปาซิเตอร์ 3 ตัว ซึ่งมีข้อมูลสายส่งและข้อมูลบัสระบบทดสอบ 118 บัส ดังตารางที่ ก-7 ตารางที่ ก-8 และ ตารางที่ ก-9 ตามลำดับ

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 57 บัส

From Bus	To Bus	Resistance pu.	Reactance pu.	Line Charging pu.	Tap Change Transformer	Line Limit pu.
1	2	0.0083	0.028	0.129	1	2
1	15	0.0178	0.091	0.0988	1	2.2
1	16	0.0454	0.206	0.0546	1	1.6
1	17	0.0238	0.108	0.0286	1	1.6
2	3	0.0298	0.085	0.0818	1	2
3	4	0.0112	0.0366	0.038	1	2
3	15	0.0162	0.053	0.0544	1	0.2
4	5	0.0625	0.132	0.0258	1	0.2
4	6	0.043	0.148	0.0348	1	0.2
4	18	0	0.43	0	0.97	0.6
4	18	0	0.555	0	0.97	0.6
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	1	3
6	7	0.02	0.102	0.0276	1	0.6
6	8	0.0339	0.173	0.047	1	0.8
7	8	0.0139	0.0712	0.0194	1	10
7	29	0	0.0648	0	0.967	12
8	9	0.0099	0.0505	0.0548	1	2.2
9	10	0.0369	0.1679	0.044	1	0.3
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	1	0.3
9	12	0.0648	0.295	0.0772	1	0.2
9	13	0.0481	0.158	0.0406	1	0.2
9	55	0	0.1205	0	0.94	3
10	12	0.0277	0.1262	0.0328	1	2
10	51	0	0.0712	0	0.93	6
11	13	0.0223	0.0732	0.0188	1	2
11	41	0	0.749	0	0.955	2
11	43	0	0.153	0	0.958	3

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

From Bus	To Bus	Resistance pu.	Reactance pu.	Line Charging pu.	Tap Change Transformer	Line Limit pu.
12	13	0.0178	0.058	0.0604	1	6
12	16	0.018	0.0813	0.0216	1	3
12	17	0.0397	0.179	0.0476	1	6
13	14	0.0132	0.0434	0.011	1	0.3
13	15	0.0269	0.0869	0.023	1	0.7
13	49	0	0.191	0	0.895	7
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	1	10
14	46	0	0.0735	0	0.9	10
15	45	0	0.1042	0	0.955	7
18	19	0.461	0.685	0	1	2
19	20	0.283	0.434	0	1	2
21	20	0	0.7767	0	1.043	2
21	22	0.0736	0.117	0	1	2
22	23	0.0099	0.0152	0	1	2
22	38	0.0192	0.0295	0	1	2
23	24	0.166	0.256	0.0084	1	2
24	25	0	1.182	0	1	2
24	25	0	1.23	0	1	2
24	26	0	0.0473	0	1.043	3
25	30	0.135	0.202	0	1	2
26	27	0.165	0.254	0	1	3
27	28	0.0618	0.0954	0	1	6
28	29	0.0418	0.0587	0	1	6
29	52	0.1442	0.187	0	1	6
30	31	0.326	0.497	0	1	2
31	32	0.507	0.755	0	1	2
32	33	0.0392	0.036	0	1	2
34	32	0	0.953	0	0.975	2
34	35	0.052	0.078	0.0032	1	2
35	36	0.043	0.0537	0.0016	1	3
36	37	0.029	0.0366	0	1	3
36	40	0.03	0.0466	0	1	2
37	38	0.0651	0.1009	0.002	1	6

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

From Bus	To Bus	Resistance pu.	Reactance pu.	Line Charging pu.	Tap Change Transformer	Line Limit pu.
37	39	0.0239	0.0379	0	1	2
38	44	0.0289	0.0585	0.002	1	6
38	48	0.0312	0.0482	0	1	3
38	49	0.115	0.177	0.006	1	2
39	57	0	1.355	0	0.98	2
40	56	0	1.195	0	0.958	2
41	42	0.207	0.352	0	1	2
41	43	0	0.412	0	1	3
56	41	0.553	0.549	0	1	2
56	42	0.2125	0.354	0	1	0.2
44	45	0.0624	0.1242	0.004	1	7
46	47	0.023	0.068	0.0032	1	7
47	48	0.0182	0.0233	0	1	3
48	49	0.0834	0.129	0.0048	1	0.2
49	50	0.0801	0.128	0	1	3
50	51	0.1386	0.22	0	1	3
52	53	0.0762	0.0984	0	1	3
53	54	0.1878	0.232	0	1	2
54	55	0.1732	0.2265	0	1	2
57	56	0.174	0.26	0	1	2

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 57 บัส

Bus No.	Bus Type	V (pu.)	Angle (Degree)	Pload MW	Qload Mvar	Pgen MW	Qgen Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar	Inject Mvar	Vmin pu.	Vmax pu.
1	1	1.04	0	55	17	0	0	0	500	0	0.9	1.1
2	2	1.01	0	3	88	0	0	-17	50	0	0.9	1.1
3	2	0.985	0	41	21	40	0	-10	60	0	0.9	1.1
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
5	0	1	0	13	4	0	0	0	0	0	0.9	1.1
6	2	0.98	0	75	2	0	0	-8	25	0	0.9	1.1
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
8	2	1.005	0	150	22	450	0	-140	200	0	0.9	1.1
9	2	0.98	0	121	26	0	0	-3	9	0	0.9	1.1
10	0	1	0	5	2	0	0	0	0	0	0.9	1.1
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
12	2	1.015	0	377	24	310	0	-150	155	0	0.9	1.1
13	0	1	0	18	2.3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
14	0	1	0	10.5	5.3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
15	0	1	0	22	5	0	0	0	0	0	0.9	1.1
16	0	1	0	43	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
17	0	1	0	42	8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
18	0	1	0	27.2	9.8	0	0	0	0	10	0.9	1.1
19	0	1	0	3.3	0.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
20	0	1	0	2.3	1	0	0	0	0	0	0.9	1.1
21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1	0
22	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
23	0	1	0	6.3	2.1	0	0	0	0	0	0.9	1.1
24	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
25	0	1	0	6.3	3.2	0	0	0	0	5.9	0.9	1.1
26	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
27	0	1	0	9.3	0.5	0	0	0	0	0	0.9	1.1
28	0	1	0	4.6	2.3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
29	0	1	0	17	2.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
30	0	1	0	3.6	1.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
31	0	1	0	5.8	2.9	0	0	0	0	0	0.9	1.1
32	0	1	0	1.6	0.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
33	0	1	0	3.8	1.9	0	0	0	0	0	0.9	1.1

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

Bus No.	Bus Type	V (pu.)	Angle (Degree)	Pload MW	Qload Mvar	Pgen MW	Qgen Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar	Inject Mvar	Vmin pu.	Vmax pu.
34	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
35	0	1	0	6	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
36	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
37	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
38	0	1	0	14	7	0	0	0	0	0	0.9	1.1
39	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
40	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
41	0	1	0	6.3	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
42	0	1	0	7.1	4.4	0	0	0	0	0	0.9	1.1
43	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0.9	1.1
44	0	1	0	12	1.8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
45	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
46	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
47	0	1	0	29.7	11.6	0	0	0	0	0	0.9	1.1
48	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
49	0	1	0	18	8.5	0	0	0	0	0	0.9	1.1
50	0	1	0	21	10.5	0	0	0	0	0	0.9	1.1
51	0	1	0	18	5.3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
52	0	1	0	4.9	2.2	0	0	0	0	0	0.9	1.1
53	0	1	0	20	10	0	0	0	0	6.3	0.9	1.1
54	0	1	0	4.1	1.4	0	0	0	0	0	0.9	1.1
55	0	1	0	6.8	3.4	0	0	0	0	0	0.9	1.1
56	0	1	0	7.6	2.2	0	0	0	0	0	0.9	1.1
57	0	1	0	6.7	2	0	0	0	0	0	0.9	1.1

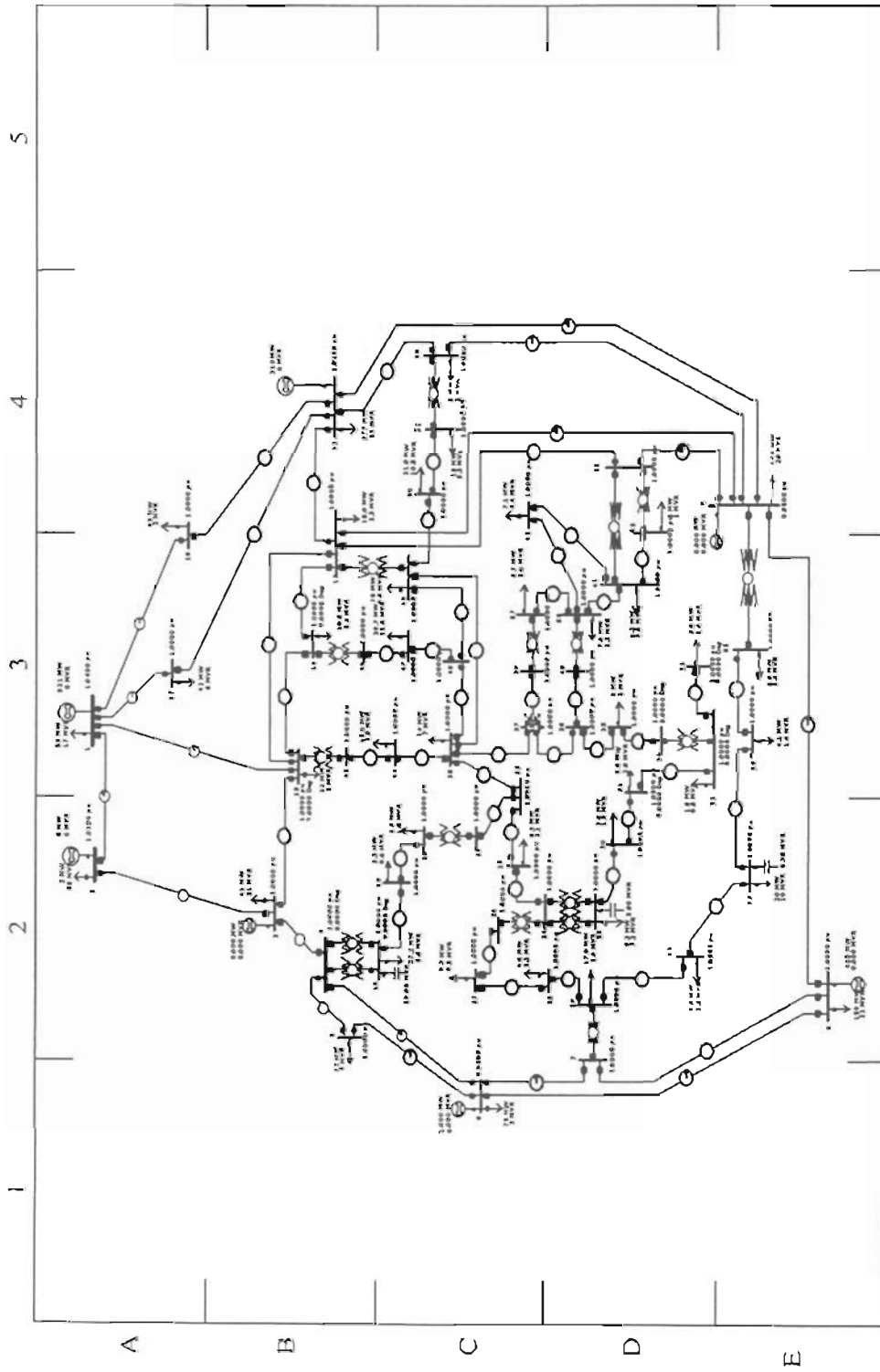
โดยที่ Bus Type คือ ชนิดของบัส (0 = Load Bus, 1 = Slack Bus, 2 = Generator Bus)

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลส่วนประกอบลำดับศูนย์ของสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 57 บัส

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
1	2	0.02075	0.07	0.3225	1	2
1	15	0.0445	0.2275	0.247	1	2.2
1	16	0.1135	0.515	0.1365	1	1.6
1	17	0.0595	0.27	0.0715	1	1.6
2	3	0.0745	0.2125	0.2045	1	2
3	4	0.028	0.0915	0.095	1	2
3	15	0.0405	0.1325	0.136	1	0.2
4	5	0.15625	0.33	0.0645	1	0.2
4	6	0.1075	0.37	0.087	1	0.2
4	18	0	0.43	0	0.97	0.6
4	18	0	0.555	0	0.97	0.6
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	1	3
6	7	0.05	0.255	0.069	1	0.6
6	8	0.08475	0.4325	0.1175	1	0.8
7	8	0.03475	0.178	0.0485	1	10
7	29	0	0.0648	0	0.967	12
8	9	0.02475	0.12625	0.137	1	2.2
9	10	0.09225	0.41975	0.11	1	0.3
9	11	0.0645	0.212	0.0545	1	0.3
9	12	0.162	0.7375	0.193	1	0.2
9	13	0.12025	0.395	0.1015	1	0.2
9	55	0	0.1205	0	0.94	3
10	12	0.06925	0.3155	0.082	1	2
10	51	0	0.0712	0	0.93	6
11	13	0.05575	0.183	0.047	1	2
11	41	0	0.749	0	0.955	2
11	43	0	0.153	0	0.958	3
12	13	0.0445	0.145	0.151	1	6
12	16	0.045	0.20325	0.054	1	3
12	17	0.09925	0.4475	0.119	1	6
13	14	0.033	0.1085	0.0275	1	0.3
13	15	0.06725	0.21725	0.0575	1	0.7
13	49	0	0.191	0	0.895	7

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
14	15	0.04275	0.13675	0.037	1	10
14	46	0	0.0735	0	0.9	10
15	45	0	0.1042	0	0.955	7
18	19	1.1525	1.7125	0	1	2
19	20	0.7075	1.085	0	1	2
21	20	0	0.7767	0	1.043	2
21	22	0.184	0.2925	0	1	2
22	23	0.02475	0.038	0	1	2
22	38	0.048	0.07375	0	1	2
23	24	0.415	0.64	0.021	1	2
24	25	0	1.182	0	1	2
24	25	0	1.23	0	1	2
24	26	0	0.0473	0	1.043	3
25	30	0.3375	0.505	0	1	2
26	27	0.4125	0.635	0	1	3
27	28	0.1545	0.2385	0	1	6
28	29	0.1045	0.14675	0	1	6
29	52	0.3605	0.4675	0	1	6
30	31	0.815	1.2425	0	1	2
31	32	1.2675	1.8875	0	1	2
32	33	0.098	0.09	0	1	2
34	32	0	0.953	0	0.975	2
34	35	0.13	0.195	0.008	1	2
35	36	0.1075	0.13425	0.004	1	3
36	37	0.0725	0.0915	0	1	3
36	40	0.075	0.1165	0	1	2
37	38	0.16275	0.25225	0.005	1	6
37	39	0.05975	0.09475	0	1	2
38	44	0.07225	0.14625	0.005	1	6
38	48	0.078	0.1205	0	1	3
38	49	0.2875	0.4425	0.015	1	2
39	57	0	1.355	0	0.98	2
41	42	0.5175	0.88	0	1	2



ภาพที่ ก-3 ระบบทดสอบ IBEF 57 บัต์

4. ระบบทดสอบ 118 บัส [18]

ระบบทดสอบ 118 บัส เป็นระบบทดสอบที่มี เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 54 เครื่อง สายส่ง 186 เส้น หม้อแปลงไฟฟ้า 9 ตัว และชั้นค้ำปาซิเตอร์ 14 ตัว ซึ่งมีข้อมูลสายส่งและข้อมูลบัสระบบทดสอบ 118 บัส ดังตารางที่ ก-10 และ ตารางที่ ก-11 ตามลำดับ

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลสายส่งระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 118 บัส

From Bus	To Bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
1	2	0.0303	0.0999	0.0254	1	0.8
1	3	0.0129	0.0424	0.01082	1	0.8
4	5	0.00176	0.00798	0.0021	1	1.5
3	5	0.0241	0.108	0.0284	1	1
5	6	0.0119	0.054	0.01426	1	1.5
6	7	0.00459	0.0208	0.0055	1	0.8
8	9	0.00244	0.0305	1.162	1	6
8	5	0	0.0267	0	0.985	5
9	10	0.00258	0.0322	1.23	1	6
4	11	0.0209	0.0688	0.01748	1	1
5	11	0.0203	0.0682	0.01738	1	1.5
11	12	0.00595	0.0196	0.00502	1	1
2	12	0.0187	0.0616	0.01572	1	0.8
3	12	0.0484	0.16	0.0406	1	0.3
7	12	0.00862	0.034	0.00874	1	0.5
11	13	0.02225	0.0731	0.01876	1	0.5
12	14	0.0215	0.0707	0.01816	1	0.5
13	15	0.0744	0.2444	0.06268	1	0.5
14	15	0.0595	0.195	0.0502	1	0.3
12	16	0.0212	0.0834	0.0214	1	0.5
15	17	0.0132	0.0437	0.0444	1	1.5
16	17	0.0454	0.1801	0.0466	1	0.3
17	18	0.0123	0.0505	0.01298	1	1.5
18	19	0.01119	0.0493	0.01142	1	0.8
19	20	0.0252	0.117	0.0298	1	0.5
15	19	0.012	0.0394	0.0101	1	0.8
20	21	0.0183	0.0849	0.0216	1	0.5

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
21	22	0.0209	0.097	0.0246	1	0.8
22	23	0.0342	0.159	0.0404	1	0.8
23	24	0.0135	0.0492	0.0498	1	1
23	25	0.0156	0.08	0.0864	1	2.5
26	25	0	0.0382	0	0.96	1.5
25	27	0.0318	0.163	0.1764	1	2
27	28	0.01913	0.0855	0.0216	1	0.5
28	29	0.0237	0.0943	0.0238	1	0.3
30	17	0	0.0388	0	0.96	4
8	30	0.00431	0.0504	0.514	1	1.5
26	30	0.00799	0.086	0.908	1	3
17	31	0.0474	0.1563	0.0399	1	0.5
29	31	0.0108	0.0331	0.0083	1	0.5
23	32	0.0317	0.1153	0.1173	1	1.5
31	32	0.0298	0.0985	0.0251	1	0.5
27	32	0.0229	0.0755	0.01926	1	0.8
15	33	0.038	0.1244	0.03194	1	0.5
19	34	0.0752	0.247	0.0632	1	0.3
35	36	0.00224	0.0102	0.00268	1	0.3
35	37	0.011	0.0497	0.01318	1	0.5
33	37	0.0415	0.142	0.0366	1	0.5
34	36	0.00871	0.0268	0.00568	1	0.5
34	37	0.00256	0.0094	0.00984	1	1.5
38	37	0	0.0375	0	0.935	4
37	39	0.0321	0.106	0.027	1	0.8
37	40	0.0593	0.168	0.042	1	0.8
30	38	0.00464	0.054	0.422	1	1.5
39	40	0.0184	0.0605	0.01552	1	0.5
40	41	0.0145	0.0487	0.01222	1	0.5
40	42	0.0555	0.183	0.0466	1	0.5
41	42	0.041	0.135	0.0344	1	0.8
43	44	0.0608	0.2454	0.06068	1	0.8
34	43	0.0413	0.1681	0.04226	1	0.3

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

From bus	To bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
44	45	0.0224	0.0901	0.0224	1	0.8
45	46	0.04	0.1356	0.0332	1	0.8
46	47	0.038	0.127	0.0316	1	0.5
46	48	0.0601	0.189	0.0472	1	0.5
47	49	0.0191	0.0625	0.01604	1	0.3
42	49	0.0715	0.323	0.086	1	1.5
42	49	0.0715	0.323	0.086	1	1.5
45	49	0.0684	0.186	0.0444	1	0.8
48	49	0.0179	0.0505	0.01258	1	0.5
49	50	0.0267	0.0752	0.01874	1	0.8
49	51	0.0486	0.137	0.0342	1	1
51	52	0.0203	0.0588	0.01396	1	0.5
52	53	0.0405	0.1635	0.04058	1	0.3
53	54	0.0263	0.122	0.031	1	0.5
49	54	0.073	0.289	0.0738	1	0.5
49	54	0.0869	0.291	0.073	1	0.5
54	55	0.0169	0.0707	0.0202	1	0.3
54	56	0.00275	0.00955	0.00732	1	0.5
55	56	0.00488	0.0151	0.00374	1	0.5
56	57	0.0343	0.0966	0.0242	1	0.5
50	57	0.0474	0.134	0.0332	1	0.5
56	58	0.0343	0.0966	0.0242	1	0.3
51	58	0.0255	0.0719	0.01788	1	0.3
54	59	0.0503	0.2293	0.0598	1	0.5
56	59	0.0825	0.251	0.0569	1	0.5
56	59	0.0803	0.239	0.0536	1	0.5
55	59	0.04739	0.2158	0.05646	1	0.5
59	60	0.0317	0.145	0.0376	1	0.8
59	61	0.0328	0.15	0.0388	1	0.8
60	61	0.00264	0.0135	0.01456	1	1.5
60	62	0.0123	0.0561	0.01468	1	0.3
61	62	0.00824	0.0376	0.0098	1	0.5
63	59	0	0.0386	0	0.96	2.5

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

From Bus	To Bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
64	61	0	0.0268	0	0.985	0.5
38	65	0.00901	0.0986	1.046	1	2.5
64	65	0.00269	0.0302	0.38	1	2.5
49	66	0.018	0.0919	0.0248	1	2.5
49	66	0.018	0.0919	0.0248	1	2.5
62	66	0.0482	0.218	0.0578	1	0.5
62	67	0.0258	0.117	0.031	1	0.5
65	66	0	0.037	0	0.935	0.8
66	67	0.0224	0.1015	0.02682	1	0.8
65	68	0.00138	0.016	0.638	1	0.8
47	69	0.0844	0.2778	0.07092	1	0.8
49	69	0.0985	0.324	0.0828	1	0.8
68	69	0	0.037	0	0.935	2
69	70	0.03	0.127	0.122	1	1.5
24	70	0.00221	0.4115	0.10198	1	0.8
70	71	0.00882	0.0355	0.00878	1	0.5
24	72	0.0488	0.196	0.0488	1	0.8
71	72	0.0446	0.18	0.04444	1	0.3
71	73	0.00866	0.0454	0.01178	1	0.3
70	74	0.0401	0.1323	0.03368	1	0.3
70	75	0.0428	0.141	0.036	1	0.3
69	75	0.0405	0.122	0.124	1	1.5
74	75	0.0123	0.0406	0.01034	1	0.8
76	77	0.0444	0.148	0.0368	1	1
69	77	0.0309	0.101	0.1038	1	0.8
75	77	0.0601	0.1999	0.04978	1	0.5
77	78	0.00376	0.0124	0.01264	1	0.8
78	79	0.00546	0.0244	0.00648	1	0.5
77	80	0.017	0.0485	0.0472	1	1.5
77	80	0.0294	0.105	0.0228	1	0.8
79	80	0.0156	0.0704	0.0187	1	1
68	81	0.00175	0.0202	0.808	1	1
81	80	0	0.037	0	0.935	1

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

From Bus	To Bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
77	82	0.0298	0.0853	0.08174	1	0.3
82	83	0.0112	0.03665	0.03796	1	0.8
83	84	0.0625	0.132	0.0258	1	0.5
83	85	0.043	0.148	0.0348	1	0.8
84	85	0.0302	0.0641	0.01234	1	0.5
85	86	0.035	0.123	0.0276	1	0.3
86	87	0.02828	0.2074	0.0445	1	0.3
85	88	0.02	0.102	0.0276	1	0.8
85	89	0.0239	0.173	0.047	1	1
88	89	0.0139	0.0712	0.01934	1	1.5
89	90	0.0518	0.188	0.0528	1	0.8
89	90	0.0238	0.0997	0.106	1	1.5
90	91	0.0254	0.0836	0.0214	1	0.3
89	92	0.0099	0.0505	0.0548	1	2.5
89	92	0.0393	0.1581	0.0414	1	1
91	92	0.0387	0.1272	0.03268	1	0.3
92	93	0.0258	0.0848	0.0218	1	0.8
92	94	0.0481	0.158	0.0406	1	0.8
93	94	0.0223	0.0732	0.01876	1	0.8
94	95	0.0132	0.0434	0.0111	1	0.8
80	96	0.0356	0.182	0.0494	1	0.5
82	96	0.0162	0.053	0.0544	1	0.3
94	96	0.0269	0.0869	0.023	1	0.3
80	97	0.0183	0.0934	0.0254	1	0.5
80	98	0.0238	0.108	0.0286	1	0.5
80	99	0.0454	0.206	0.0546	1	0.3
92	100	0.0648	0.295	0.0472	1	0.5
94	100	0.0178	0.058	0.0604	1	0.8
95	96	0.0171	0.0547	0.01474	1	0.3
96	97	0.0173	0.0885	0.024	1	0.3
98	100	0.0397	0.179	0.0476	1	0.3
99	100	0.018	0.0813	0.0216	1	0.3

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

From Bus	To Bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line Charging (pu)	Tap Change Transformer	Line Limit (pu)
100	101	0.0277	0.1262	0.0328	1	0.5
92	102	0.0123	0.0559	0.01464	1	0.8
101	102	0.0246	0.112	0.0294	1	0.8
100	103	0.016	0.0525	0.0536	1	1.5
100	104	0.0451	0.204	0.0541	1	0.8
103	104	0.0466	0.1584	0.0407	1	0.5
103	105	0.0535	0.1625	0.0408	1	0.8
100	106	0.0605	0.229	0.062	1	0.8
104	105	0.00994	0.0378	0.00986	1	0.8
105	106	0.014	0.0547	0.01434	1	0.3
105	107	0.053	0.183	0.0472	1	0.5
105	108	0.0261	0.0703	0.01844	1	0.8
106	107	0.053	0.183	0.0472	1	0.8
108	109	0.0105	0.0288	0.0076	1	0.5
103	110	0.03906	0.1813	0.0461	1	0.8
109	110	0.0278	0.0762	0.0202	1	0.3
110	111	0.022	0.0755	0.02	1	0.5
110	112	0.0247	0.064	0.062	1	1
17	113	0.00913	0.0301	0.00768	1	0.3
32	113	0.0615	0.203	0.0518	1	0.5
32	114	0.0135	0.0612	0.01628	1	0.5
27	115	0.0164	0.0741	0.01972	1	0.5
114	115	0.0023	0.0104	0.00276	1	0.3
68	116	0.00034	0.00405	0.164	1	2.5
12	117	0.0329	0.14	0.0358	1	0.3

ตารางที่ ก-11 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง 118 บัส

Bus No.	Bus Type	V pu.	Angle Degree	Pload MW	Qload Mvar	Pgen MW	Qgen Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar	Inject Mvar	Vmin pu.	Vmax pu.
1	2	0.955	0	51	27	0	0	-5	15	0	0.9	1.1
2	0	1	0	20	9	0	0	0	0	0	0.9	1.1
3	0	1	0	39	10	0	0	0	0	0	0.9	1.1
4	2	0.998	0	30	12	-9	0	-300	300	0	0.9	1.1
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-40	0.9	1.1
6	2	0.99	0	52	22	0	0	-13	50	0	0.9	1.1
7	0	1	0	19	2	0	0	0	0	0	0.9	1.1
8	2	1.015	0	0	0	-28	0	-300	300	0	0.9	1.1
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
10	2	1.05	0	0	0	450	0	-147	200	0	0.9	1.1
11	0	1	0	70	23	0	0	0	0	0	0.9	1.1
12	2	0.99	0	47	10	85	0	-35	120	0	0.9	1.1
13	0	1	0	34	16	0	0	0	0	0	0.9	1.1
14	0	1	0	14	1	0	0	0	0	0	0.9	1.1
15	2	0.97	0	90	30	0	0	-10	30	0	0.9	1.1
16	0	1	0	25	10	0	0	0	0	0	0.9	1.1
17	0	1	0	11	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
18	2	0.973	0	60	34	0	0	-16	50	0	0.9	1.1
19	2	0.962	0	45	25	0	0	-8	24	0	0.9	1.1
20	0	1	0	18	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
21	0	1	0	14	8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
22	0	1	0	10	5	0	0	0	0	0	0.9	1.1
23	0	1	0	7	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
24	2	0.992	0	0	0	-13	0	-300	300	0	0.9	1.1
25	2	1.05	0	0	0	220	0	-47	140	0	0.9	1.1
26	2	1.015	0	0	0	314	0	-1000	1000	0	0.9	1.1
27	2	0.968	0	62	13	-9	0	-300	300	0	0.9	1.1
28	0	1	0	17	7	0	0	0	0	0	0.9	1.1
29	0	1	0	24	4	0	0	0	0	0	0.9	1.1
30	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
31	2	0.967	0	43	27	7	0	-300	300	0	0.9	1.1
32	2	0.963	0	59	23	0	0	-14	42	0	0.9	1.1
33	0	1	0	23	9	0	0	0	0	0	0.9	1.1

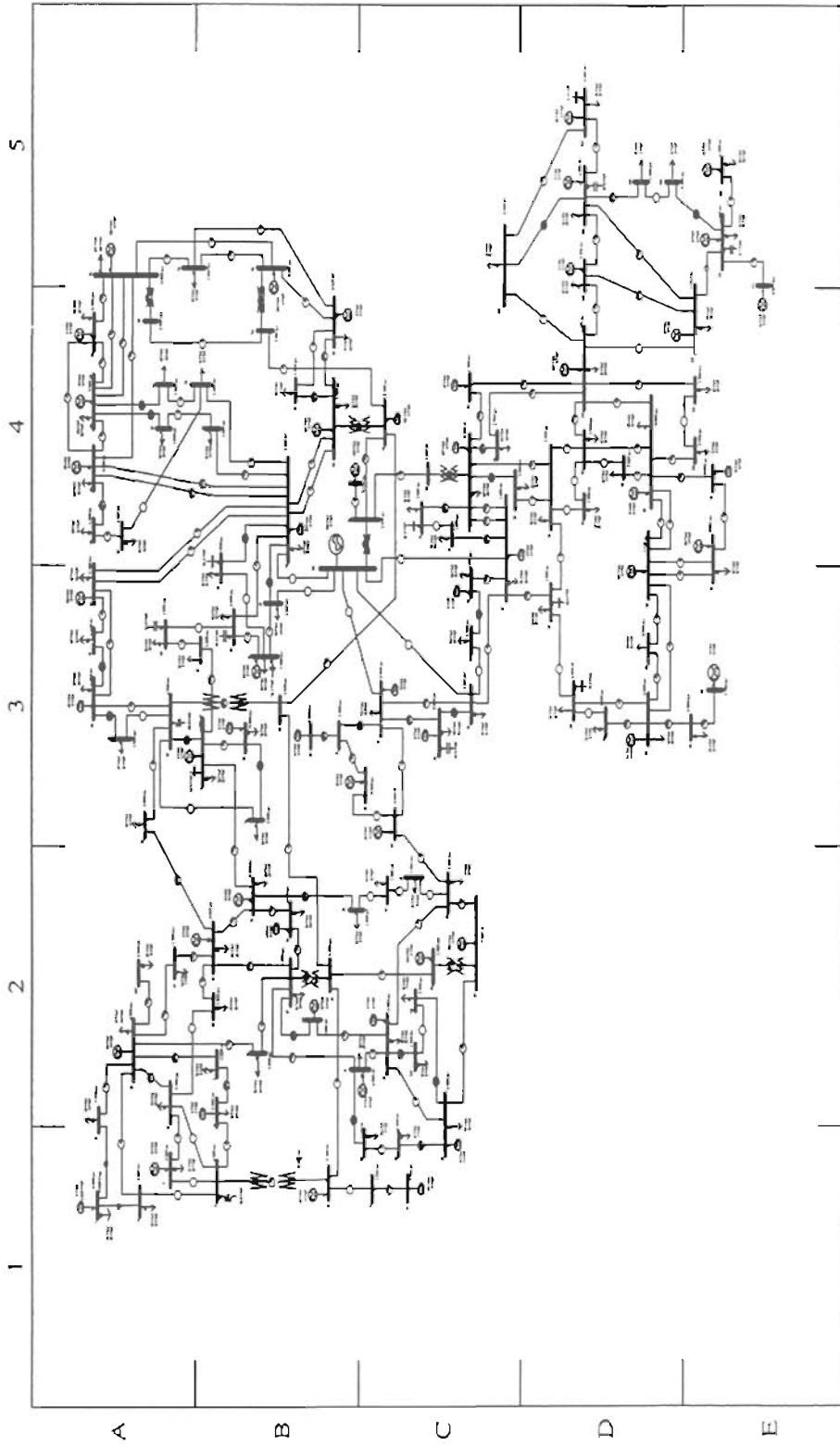
ตารางที่ ก-11 (ต่อ)

Bus No.	Bus Type	V pu.	Angle Degree	Pload MW	Qload Mvar	Pgen MW	Qgen Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar	Inject Mvar	Vmin pu.	Vmax pu.
64	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
65	2	1.005	0	0	0	391	0	-67	200	0	0.9	1.1
66	2	1.05	0	39	18	392	0	-67	200	0	0.9	1.1
67	0	1	0	28	7	0	0	0	0	0	0.9	1.1
68	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
69	1	1.035	30	0	0	0	0	-300	300	0	0.9	1.1
70	2	0.984	0	66	20	0	0	-10	32	0	0.9	1.1
71	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
72	2	0.98	0	0	0	-12	0	-100	100	0	0.9	1.1
73	2	0.991	0	0	0	-6	0	-100	100	0	0.9	1.1
74	2	0.958	0	68	27	0	0	-6	9	12	0.9	1.1
75	0	1	0	47	11	0	0	0	0	0	0.9	1.1
76	2	0.943	0	68	36	0	0	-8	23	0	0.9	1.1
77	2	1.006	0	61	28	0	0	-20	70	0	0.9	1.1
78	0	1	0	71	26	0	0	0	0	0	0.9	1.1
79	0	1	0	39	32	0	0	0	0	20	0.9	1.1
80	2	1.04	0	130	26	477	0	-165	280	0	0.9	1.1
81	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.1
82	0	1	0	54	27	0	0	0	0	20	0.9	1.1
83	0	1	0	20	10	0	0	0	0	10	0.9	1.1
84	0	1	0	11	7	0	0	0	0	0	0.9	1.1
85	2	0.985	0	24	15	0	0	-8	23	0	0.9	1.1
86	0	1	0	21	10	0	0	0	0	0	0.9	1.1
87	2	1.015	0	0	0	4	0	-100	1000	0	0.9	1.1
88	0	1	0	48	10	0	0	0	0	0	0.9	1.1
89	2	1.005	0	0	0	607	0	-210	300	0	0.9	1.1
90	2	0.985	0	78	42	-85	0	-300	300	0	0.9	1.1
91	2	0.98	0	0	0	-10	0	-100	100	0	0.9	1.1
92	2	0.99	0	65	10	0	0	-3	9	0	0.9	1.1
93	0	1	0	12	7	0	0	0	0	0	0.9	1.1
94	0	1	0	30	16	0	0	0	0	0	0.9	1.1
95	0	1	0	42	31	0	0	0	0	0	0.9	1.1
96	0	1	0	38	15	0	0	0	0	0	0.9	1.1

ตารางที่ ก-11 (ต่อ)

Bus No.	Bus Type	V pu.	Angle Degree	Pload MW	Qload Mvar	Pgen MW	Qgen Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar	Inject Mvar	Vmin pu.	Vmax pu.
97	0	1	0	15	9	0	0	0	0	0	0.9	1.1
98	0	1	0	34	8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
99	2	1.01	0	0	0	-42	0	-100	100	0	0.9	1.1
100	2	1.017	0	37	18	252	0	-50	155	0	0.9	1.1
101	0	1	0	22	15	0	0	0	0	0	0.9	1.1
102	0	1	0	5	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
103	2	1.01	0	23	16	40	0	-15	40	0	0.9	1.1
104	2	0.971	0	38	25	0	0	-8	23	0	0.9	1.1
105	2	0.965	0	31	26	0	0	-8	23	20	0.9	1.1
106	0	1	0	43	16	0	0	0	0	0	0.9	1.1
107	2	0.952	0	28	12	-22	0	-200	200	6	0.9	1.1
108	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0.9	1.1
109	0	1	0	8	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
110	2	0.973	0	39	30	0	0	-8	23	6	0.9	1.1
111	2	0.98	0	0	0	36	0	-100	1000	0	0.9	1.1
112	2	0.975	0	25	13	-43	0	-100	1000	0	0.9	1.1
113	2	0.993	0	0	0	-6	0	-100	200	0	0.9	1.1
114	0	1	0	8	3	0	0	0	0	0	0.9	1.1
115	0	1	0	22	7	0	0	0	0	0	0.9	1.1
116	2	1.005	0	0	0	-184	0	-1000	1000	0	0.9	1.1
117	0	1	0	20	8	0	0	0	0	0	0.9	1.1
118	0	1	0	33	15	0	0	0	0	0	0.9	1.1

โดยที่ Bus Type คือ ชนิดของบัส (0 = Load Bus, 1 = Slack Bus, 2 = Generator Bus)



ภาพที่ ก-4 ระบบทดสอบ IEEE 118 บิต

ภาคผนวก ข

รูปแบบข้อมูลของระบบทดสอบ

1. รูปแบบของข้อมูลในระบบทดสอบ

- คอลัมน์ที่ 1 คือ จำนวนบัส (Bus Number)
- คอลัมน์ที่ 2 คือ ชนิดบัส (Bus Type)
- คอลัมน์ที่ 3 คือ ขนาดแรงดันบัส (Amplitude Bus Voltage)
- คอลัมน์ที่ 4 คือ มุมแรงดันบัส (Angle Bus Voltage)
- คอลัมน์ที่ 5 คือ โหลดกำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (Load Real Power)
- คอลัมน์ที่ 6 คือ โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Load Reactive Power)
- คอลัมน์ที่ 7 คือ กำลังไฟฟ้าแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generate Real Power)
- คอลัมน์ที่ 8 คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generate Reactive Power)
- คอลัมน์ที่ 9 คือ พิกัดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าน้อยที่สุด
(Minimum Reactive Power)
- คอลัมน์ที่ 10 คือ พิกัดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากที่สุด
(Maximum Reactive Power)
- คอลัมน์ที่ 11 คือ อุปกรณ์กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Inject Reactive Power)
- คอลัมน์ที่ 12 คือ พิกัดขนาดแรงดันบัสน้อยที่สุด (Minimum Bus Voltage)
- คอลัมน์ที่ 13 คือ พิกัดขนาดแรงดันบัสมากที่สุด (Maximum Bus Voltage)
- คอลัมน์ที่ 14 คือ ขนาดแรงดันบัสที่ควบคุม (Regulate Bus Voltage)

เมื่อ ชนิดของบัส

0 = Load Bus

1 = Slack Bus

2 = Generator Bus

2. รูปแบบของข้อมูลสายส่งและข้อมูลสายส่งของส่วนประกอบลำดับชั้นในระบบทดสอบ

คอลัมน์ที่ 1 คือ บัสต้น (From Bus Number)

คอลัมน์ที่ 2 คือ บัสปลาย (To Bus Number)

คอลัมน์ที่ 3 คือ ความต้านทานของสายส่ง (Resistance)

คอลัมน์ที่ 4 คือ อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่ง (Inductive Reactance)

คอลัมน์ที่ 5 คือ โลนชาร์จิงแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง (Line Charging Admittance)

คอลัมน์ที่ 6 คือ แทปหม้อแปลงไฟฟ้า (Tap Change Transformer)

คอลัมน์ที่ 7 คือ ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Auto Tap Change Transformer)

คอลัมน์ที่ 8 คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าของสายส่งที่รับได้สูงสุด (Power Line Limit)

เมื่อ ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Auto Tap Change Transformer)

0 = Tap Change Transformer

1 = Auto Tap Change Transformer

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายเจตพล อังกิตานนท์

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังแบบไม่สมมาตร โดยใช้โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน 77

สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

ข้าพเจ้าชื่อ นายเจตพล อังกิตานนท์ เป็นคนจังหวัดลำปางโดยกำเนิด ข้าพเจ้าเกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม 2523 ได้ศึกษาในระดับปริญญาตรีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544 ที่สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาไฟฟ้ากำลัง และได้สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีในปี พ.ศ. 2546

ปัจจุบันข้าพเจ้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรซ่อมบำรุง บริษัท ซีเมนส์ ประเทศไทย จำกัด แผนกระบบเก็บค่าโดยสาร ในส่วนของระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน (ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าใต้ดิน พระราม 9) โดยทำงานมาเป็นระยะเวลา 3 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546

สถานที่ที่สามารถติดต่อข้าพเจ้า บริษัท บริษัท ซีเมนส์ ประเทศไทย จำกัด แผนกระบบเก็บค่าโดยสารระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน (ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าใต้ดิน พระราม 9) 181 ถ.พระราม 9 แขวง ห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10301