

การประมาณค่าตัวแปรสแตทิสต์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง



นาย พฤทธิ ประเสริฐธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0470-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Harmonic State Estimation in Power Systems

Mr. Prut Praserttam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0470-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประมาณค่าตัวแปรสแตทิสติกอนินิในระบบไฟฟ้ากำลัง
โดย นายพฤทธิ ประเสริฐธรรม
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะ
วิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... กรรมการ
(นายพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

พฤทธิ ประเสริฐธรรม : การประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง
(HARMONIC STATE ESTIMATION IN POWER SYSTEMS)

อ. ที่ปรึกษา : อ. ไชยะ แซ่มซ้อย, 140 หน้า. ISBN 974-17-0470-4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์หาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้วิธีการประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าจากข้อมูลจากเครื่องมือวัดที่มีจุดเทียบทางเวลาเดียวกัน

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าสามเฟสได้ โดยคำนึงถึงเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อระบบไฟฟ้า เช่น ความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของพารามิเตอร์ของระบบ ผลของการเลื่อนเฟสของหม้อแปลงเมื่อมีการต่อชุดขดลวดของหม้อแปลงแบบวาย-เดลตา ผลของการเกิดการเหนี่ยวนำระหว่างเฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

นอกจากนี้ โปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งการประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกทั้งหมด หรือการประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกบางส่วน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าได้เพียงบางส่วน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนและตำแหน่งของเครื่องมือวัดที่ทำการติดตั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา _____ 2544 _____

437-04077-21 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: STATE ESTIMATION, HARMONIC ,OBSERVABLE
PRUT PRASERTTAM : HARMONIC STATE ESTIMATION
IN POWER SYSTEMS.
ADVISOR: CHAIYA CHAMCHOY
140 pp. ISBN 974-17-0470-4

This thesis emphasizes on the identification of harmonic current source locations in electrical power systems by using Harmonic State Estimation (HSE) algorithm based on the measured data with synchronization

The developed software can analyze unbalanced three phase power systems with certain constraints e.g. unbalanced system parameters , phase-shifting from delta-wye transformer winding connections and mutual coupling between transmission lines.

The other outstanding of this program is the ability to analyze both full and partial HSE depend on the quantity and location of the recorders.



Department Electrical engineering Student's signature _____
Field of study Electrical engineering Advisor's signature _____
Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการ ทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วยผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ คุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา – มารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุกๆท่าน ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

พฤทธิ ประเสริฐธรรม

29 เมษายน 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	6
2 แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	7
2.1 แบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน.....	8
2.1.1 สายส่งกำลังไฟฟ้า.....	8
2.1.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	13
2.1.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	20
2.1.4 โหลดที่ไม่ทราบค่า.....	21
2.1.5 ตัวเก็บประจุ.....	23
2.1.6 ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	24
2.2 แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิก.....	29
2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	30
2.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	30
2.2.3 สายส่งกำลังไฟฟ้า.....	31
2.2.4 ตัวเก็บประจุและตัวกรองฮาร์มอนิก.....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 หลักการและทฤษฎี.....	37
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการประมาณค่าตัวแปรสเตรท.....	37
3.1.1 ระเบียบวิธีประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด.....	37
3.1.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์ระบบในขั้นต้น.....	39
3.2 ทฤษฎีการประมาณค่าตัวแปรสเตรทฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	44
3.2.1 ระบบการวัดของ HSE.....	44
3.2.2 จุดวัดเสมือน.....	45
3.2.3 รูปแบบสมการและการคำนวณ.....	45
3.2.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	50
4 การพัฒนาโปรแกรม.....	52
4.1 โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	52
4.2 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม.....	54
4.3 การป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม.....	55
4.4 การคำนวณและการแสดงผล.....	63
5 ตัวอย่าง ผลการคำนวณ และการวิเคราะห์.....	70
5.1 ระบบ 14 บัส(1).....	70
5.1.1 ระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 1 (กรณีปกติ).....	72
5.1.2 ระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 2 (กรณีใช้จุดวัดเสมือนที่บัส 7).....	77
5.1.3 ระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 3 (กรณีประมาณค่าตัวแปรสเตรทฮาร์มอนิกบางส่วนในระบบไฟฟ้ากำลัง).....	79
5.2 ระบบ 14 บัส(2).....	84
5.2.1 ระบบ 14 บัส(2) กรณีปกติ.....	87
5.2.2 ระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ Partial HSE.....	99
5.2.3 วิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	105
6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ชุดของเมตริกซ์ย่อยที่ใช้ในการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลง.....18
2.2	ค่าคงที่ของแพกเตอร์ในสมการที่ (2.56).....31
2.3	พารามิเตอร์ของสายส่งเมื่อเลือกใช้แบบจำลองต่างๆ.....34
4.1	สัญลักษณ์แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบไฟฟ้า.....55
5.1	ข้อมูลของระบบ 14 บัส(1).....71
5.2	ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 1.....73
5.3	ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 1.....73
5.4	ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 1.....74
5.5	สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 1.....76
5.6	ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 2.....77
5.7	สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 2.....78
5.8	ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 3.....80
5.9	ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 3.....80
5.10	ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 3.....81
5.11	สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส(1) กรณีที่ 3.....82
5.12	สถานะของระบบเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดที่บัสต่างๆกัน.....83
5.13	ข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ 14 บัส(2) (ค่าเบส:100 MVA).....85
5.14	ข้อมูลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกของระบบ 14 บัส(2).....86
5.15	ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส(2).....87
5.16	ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส(2).....89
5.17	ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าในระบบ 14 บัส(2).....89
5.18	สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส(2).....90
5.19	ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสของระบบ 14 บัส(2) เมื่อเปรียบเทียบกับ เอกสารอ้างอิง [7].....91
5.20	แรงดันฮาร์มอนิกสูงสุดที่แต่ละความถี่.....94
5.21	สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าที่ความถี่ฮาร์มอนิก.....95
5.22	สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของบัส 3 (HVDC 12 pulse).....95
5.23	สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของบัส 8 (SVC 6 pulse).....96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.24 ผลการคำนวณอิมพีแดนซ์อนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง [7].....	97
5.25 ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส(2) กรณี partial HSE.....	99
5.26 ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส(2) กรณี partial HSE.....	100
5.27 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส(2) กรณี partial HSE.....	101
5.28 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสของระบบ 14 บัส(2) เมื่อเปรียบเทียบกับ เอกสารอ้างอิง [7].....	102
5.29 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าที่ความถี่ฮาร์มอนิก.....	103
5.30 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าที่บัส 8 (เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก).....	104
5.31 สถานะของระบบเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดที่บัสต่างๆกัน.....	104
5.32 แรงดันฮาร์มอนิกโดยประมาณที่บัส 3.....	106

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบไฟฟ้าแรงสูง.....	2
1.2 (a) ระบบ 8 บัส (1).....	3
(b) ระบบ 8 บัส (2).....	3
1.3 เครื่องมือวัดเฟสเซอร์.....	4
2.1 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส	
(a) วงจรสมมูลย์ของอิมพีแดนซ์อนุกรม.....	8
(b) วงจรสมมูลย์ของอิมพีแดนซ์ขนาน.....	9
2.2 พารามิเตอร์แบบกระจายของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	11
2.3 แบบจำลองของแอดมิตแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	12
2.4 แบบจำลองสมมูล PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะยาว.....	13
2.5 แบบจำลองไดอะแกรมของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด.....	14
2.6 วงจรปฐมภูมิของหม้อแปลง.....	14
2.7 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-สตาร์.....	16
2.8 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-เดลตา.....	16
2.9 แบบจำลองของหม้อแปลง 3 เฟสแบบ 2 ขดลวด.....	17
2.10 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	20
2.11 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก.....	20
2.12 แบบจำลองของโหลดที่ไม่ทราบค่า.....	22
2.13 ลักษณะของกระแสที่จ่ายออกจากโหลดที่ไม่ทราบค่า เมื่อเทียบกับแรงดัน ทั้ง 4 ควอดแดนซ์.....	22
2.14 การต่อตัวเก็บประจุแบบ delta.....	23
2.15 การต่อตัวเก็บประจุแบบ Wye G.....	24
2.16 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก.....	26
2.17 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับความถี่เดียว (1).....	26
2.18 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับความถี่เดียว (2).....	27
2.19 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูง (1).....	28
2.20 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูง (2).....	29
2.21 แบบจำลองฮาร์มอนิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	30

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.22	แบบจำลองฮาร์มอนิกของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	31
2.23	แบบจำลองฮาร์มอนิกของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	32
2.24	ค่าของ R_n เมื่อ $R_{dc}=100$ โอห์ม.....	33
2.25	ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำอนุกรมในสายส่ง.....	34
2.26	ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำขนานในสายส่ง.....	35
2.27	ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำในสายส่ง.....	35
3.1	วงจรไฟฟ้าอย่างง่าย.....	38
3.2	ระบบไฟฟ้าที่มีสวิตช์และเบรกเกอร์.....	40
3.3	สถานะของระบบไฟฟ้าในระเบียบวิธี HSE.....	41
3.4	แผนผังการทำงานของระเบียบวิธีวิเคราะห์ระบบในขั้นต้น.....	42
3.5	ระบบไฟฟ้าเพื่อการวิเคราะห์ระบบในขั้นต้น.....	42
3.6	ระบบการวัด.....	44
3.7	จุดวัดเสมือน.....	45
3.8	แบบจำลองของบัสและอุปกรณ์ที่ต่อ.....	46
3.9	(a) ระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (แบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน).....	48
	(b) ระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิก).....	49
3.10	แบบจำลอง PI ของสายส่งแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	50
3.11	แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	50
3.12	แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	51
3.13	แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าขององค์ประกอบขนาน.....	51
4.1	แผนผังการทำงานของโปรแกรม.....	53
4.2	แผนผังการทำงานของโปรแกรม (ต่อ).....	54
4.3	หน้าจอหลัก(Main program) ให้ผู้ใช้เลือกสร้างไดอะแกรมของระบบที่ต้องการ.....	56
4.4	เมนูลอย.....	56
4.5	เมนูอุปกรณ์.....	57
4.6	ข้อมูลบัส.....	57
4.7	ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	58

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 (a) ข้อมูลสายส่งแบบพายปกติ.....	59
(b) ข้อมูลสายส่งแบบพายแบบกระจาย.....	59
4.9 ข้อมูลหม้อแปลง.....	60
4.10 ข้อมูลตัวเก็บประจุ.....	60
4.11 (a) ข้อมูลตัวกรองฮาร์มอนิก (1).....	61
(b) ข้อมูลตัวกรองฮาร์มอนิก (2).....	61
4.12 ข้อมูลโวลต์มิเตอร์.....	62
4.13 ข้อมูลแอมป์มิเตอร์.....	62
4.14 ตารางแสดงผลแรงดันที่บัส.....	63
4.15 ตารางแสดงผลของอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างบัส.....	64
4.16 ตารางแสดงผลของอุปกรณ์ที่ต่อขนานกับระบบ.....	64
4.17 (a) ตารางแสดงผลของโหลดที่ไม่ทราบค่า (1).....	65
(b) ตารางแสดงผลของโหลดที่ไม่ทราบค่า (2).....	65
4.18 หน้าจอแสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส.....	66
4.19 หน้าจอแสดงผลของอุปกรณ์เชื่อมต่อบัส.....	66
4.20 หน้าจอแสดงผลของอุปกรณ์ที่ต่อขนานกับระบบ.....	67
4.21 หน้าจอแสดงผลของโหลดที่ไม่ทราบค่า.....	67
4.22 หน้าจอแสดงผลแอมิตแดนซ์เมตริกซ์.....	68
4.23 หน้าจอแสดงการตั้งเมตริกซ์สมการ.....	69
5.1 แผนภาพเส้นเดียวระบบ 14 บัส (1).....	72
5.2 ระบบ 14 บัส (1) กรณีปกติ.....	72
5.3 ระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 2.....	77
5.4 ระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 3.....	79
5.5 แผนภาพเส้นเดียว ระบบ 14 บัส (2).....	85
5.6 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกของระบบ 14 บัส (2).....	85
5.7 ระบบ 14 บัส (2) กรณีปกติ.....	87
5.8 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 3.....	93
5.9 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 8.....	94

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2.....	94
5.11 แบบจำลองของโหลด.....	96
5.12 ระบบ 14 บัส (2) กรณี Partial HSE.....	99
5.13 อิมพีแดนซ์สแกนที่บัส 3 [7].....	105
5.14 อิมพีแดนซ์สแกนที่บัส 8 [7].....	105
5.15 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 13.....	106
5.16 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 23.....	107
5.17 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 25.....	107

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

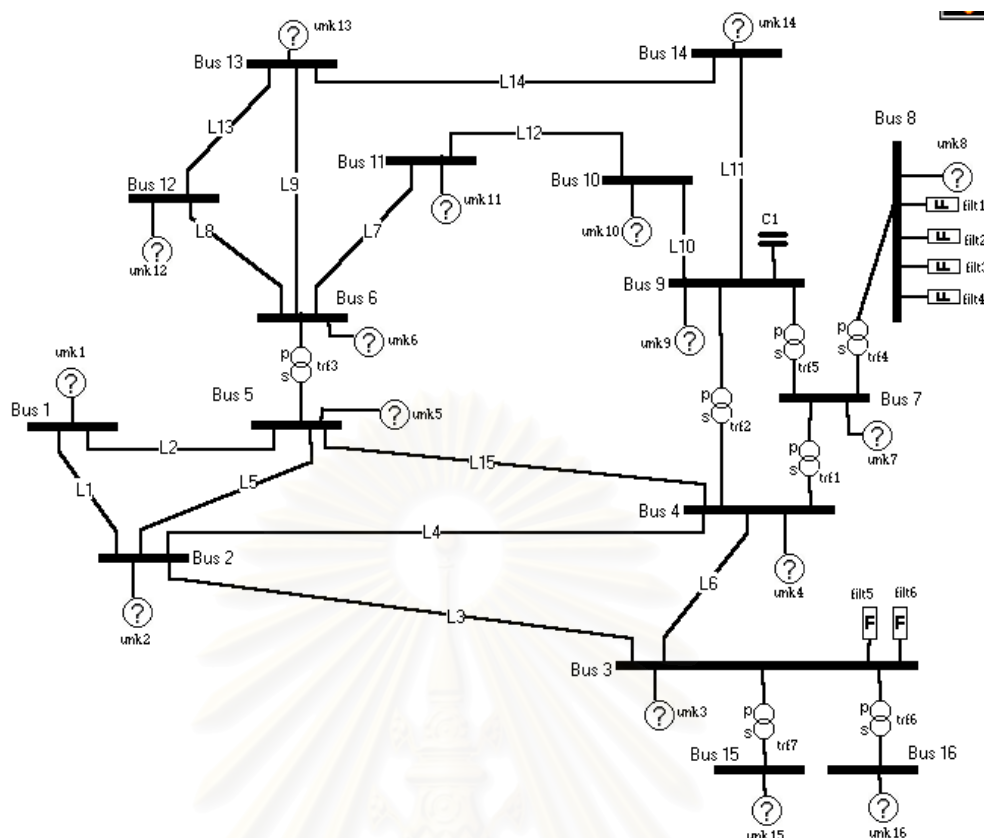
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กส่วนใหญ่มีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก อาทิเช่น เตาหลอมโลหะ คอนเวอร์เตอร์กำลังสวิต วจรเรียงกระแส เป็นต้น นอกจากนี้อาคารสำนักงาน รวมถึงบ้านอยู่อาศัยก็เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อุปกรณ์ในสำนักงาน เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องถ่ายเอกสาร หลอดฟลูออเรสเซนต์ เครื่องปรับอากาศ รวมถึงเครื่องอำนวยความสะดวกและความบันเทิงภายในบ้าน เช่น โทรทัศน์ เตาไมโครเวฟ เครื่องซักผ้า เป็นต้น ล้วนแล้วแต่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น การเกิดการระเบิดของคาปาซิเตอร์แบงค์เนื่องจากเกิดเรโซแนนซ์ การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน การรบกวนระบบสื่อสาร เป็นต้น

สำหรับเรื่องคุณภาพไฟฟ้า ตำแหน่งและขนาดของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกถือเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะจะนำไปสู่การออกแบบตัวกรองที่เหมาะสมและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม แต่เมื่อเรามองจากมุมมองของการไฟฟ้าแล้วเราจะพบว่า จำนวนลูกค้าที่มีมากกลายเป็นอุปสรรคในการตรวจวัด และเป็นไปไม่ได้ที่เราจะวัดค่าของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในหลายๆ จุดเพราะปัญหาด้านราคาของเครื่องมือวัดซึ่งมีราคาแพงกว่าเครื่องมือวัดแรงดันและกระแสในความถี่ปกติอยู่มาก

ในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยมากจะมุ่งเน้นไปที่การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในส่วนของผู้ใช้ไฟ อาทิ เกิดการขยายกระแสหรือไม่ ผลรวมกระแสที่ไหลกลับไปยังระบบมีค่าเท่าใด แต่งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การค้นหาแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก โดยอาศัยข้อมูลจากเครื่องมือวัดที่ทำการติดตั้งไว้ เป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์



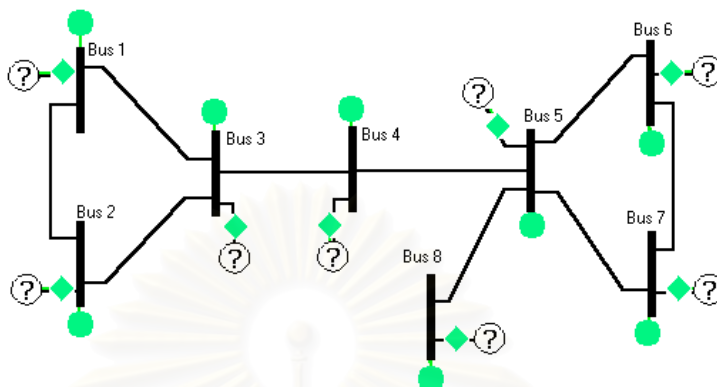
รูปที่ 1.1 ระบบไฟฟ้าแรงสูง

ในระบบไฟฟ้าแบบเก่าที่รัฐเป็นเจ้าของทั้งหมด โดยปกติจะมีการกำหนดมาตรฐานด้านฮาร์มอนิกแล้วให้ผู้ใช้ไฟแต่ละรายเป็นผู้รับผิดชอบ ในส่วนของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลออกมาจากแต่ละระบบจำหน่ายจะไหลไปที่ระบบจำหน่ายอื่น หรือเป็นภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดก็ไม่เป็นปัญหามากนัก เพราะรัฐเป็นเจ้าของระบบทั้งหมด

สำหรับการไฟฟ้าที่มีการแปรรูป โดยแยกออกเป็นแต่ละบริษัทเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และบริษัทระบบจำหน่าย ปัญหาในการจัดการกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแต่ละบริษัทจำหน่ายจะซับซ้อนขึ้นในส่วนของผู้รับผิดชอบ แต่ละบริษัทระบบจำหน่ายควรจะมีควมรับผิดชอบในส่วนของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกของตนเองอย่างจริงจังขึ้น รวมไปถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบไฟฟ้าโดยรวมว่ามีมากน้อยเพียงไร

ระเบียบวิธีประมาณค่าตัวแปรสเทตฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Harmonic State Estimation, HSE) จึงถูกนำมาใช้ในการรวบรวมข้อมูลการไหลของกระแสฮาร์มอนิก โดยปกติจะถูกใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบแรงสูง ว่ากระแสฮาร์มอนิกจากส่วนของผู้ใช้ไฟไหลในระบบอย่างไร ไหลไปยังผู้ใช้ไฟรายอื่น หรือว่าเป็นภาระที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดในระบบต้องจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัยทางด้านคุณภาพไฟฟ้าของการไฟฟ้าหลายๆแห่ง โดยจะมีการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณฮาร์มอนิกไว้ที่บัสต่างๆ ของการไฟ

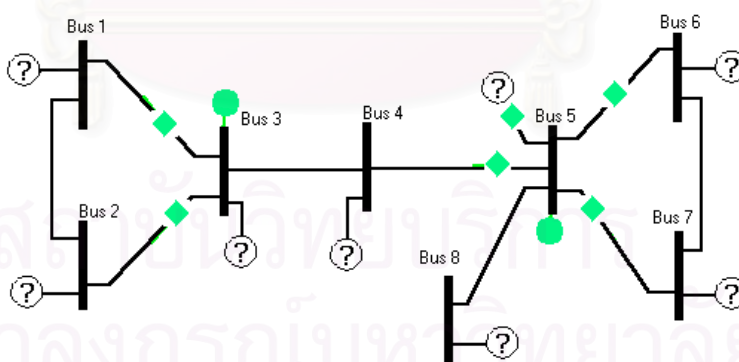
ฟ้า และอาศัยพารามิเตอร์ของระบบที่รู้ค่าอยู่แล้ว เพื่อช่วยในการคำนวณหาค่ากระแส และหรือแรงดันฮาร์มอนิกในจุดที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องมือวัดเอาไว้



รูปที่ 1.2 (a) ระบบ 8 บัส(1)

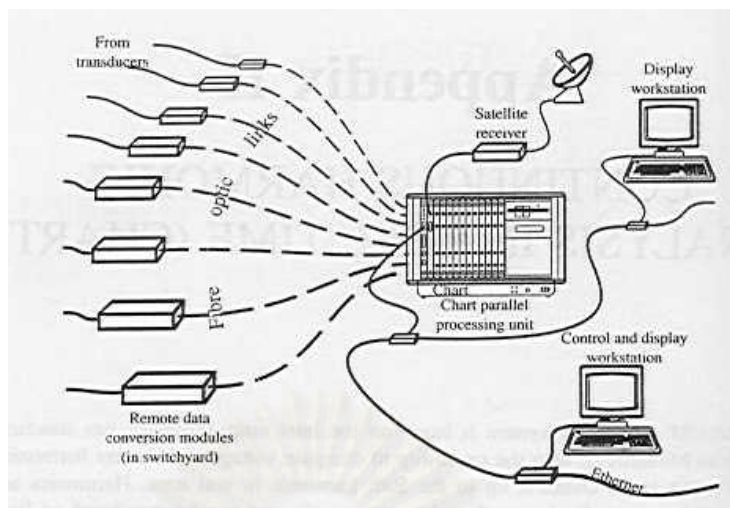
จากระบบไฟฟ้ากำลัง 8 บัส ข้างต้น ถ้าต้องการทราบว่าโหลดของแต่ละบัสมีพฤติกรรมเป็นอย่างไรที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สนใจ ต้องทำการวัดทั้งแรงดันและกระแสของทุกบัส ดังนั้นต้องใช้จำนวนเครื่องมือเท่ากับจำนวนบัสของระบบซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองจนเกินไป

จากระเบียบวิธี HSE และข้อมูลของระบบได้แก่ ข้อมูลของสายส่ง และหม้อแปลง รวมไปถึง อุปกรณ์ที่ต่อขนานกับระบบต่างๆ ทำให้เราสามารถลดจำนวนเครื่องมือวัดลงได้ โดยยังคงสามารถทราบถึงพฤติกรรมของโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สนใจได้



รูปที่ 1.2 (b) ระบบ 8 บัส(2)

ระบบไฟฟ้ากำลังแปดบัสนี้ สามารถคำนวณ HSE ได้โดยใช้เครื่องมือเพียงสองตัว โดยเครื่องมือวัดตัวแรกติดตั้งไว้ที่บัส 5 มีจำนวนช่องสัญญาณ 15 ช่อง วัดแรงดันที่บัสและกระแสในสายส่งที่ต่อกับบัส 5 ดังรูป และเช่นเดียวกันเครื่องมือวัดตัวที่สองติดตั้งไว้ที่บัส 3 มีจำนวนช่องสัญญาณ 9 ช่อง วัดสัญญาณไฟฟ้างดังรูป



รูปที่ 1.3 เครื่องมือวัดเฟสเซอร์

งานวิจัยนี้ยังครอบคลุมถึง ระเบียบวิธีประมาณค่าตัวแปรเสตทฮาร์โมนิกบางส่วน (*Partial Harmonic State Estimation, Partial HSE*) ซึ่งจะใช้กับระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ และทำการวิเคราะห์เพียงบางส่วนจากระบบไฟฟ้าที่สนใจออกมา โดยไม่จำเป็นต้องทำการยุบระบบ ซึ่งอาศัยผลของ ระเบียบวิธีวิเคราะห์ระบบสมการในขั้นต้น (*Observability Analysis, OA*)

การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์โมนิก โดยเฉพาะในระบบไฟฟ้าจริงๆจะมีสถานะไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า จากความไม่สมดุลของโหลด จากการที่สายส่งเกิดมีสายที่เฟสใดเฟสหนึ่งขาดไป ซึ่งผลของความไม่สมดุลของระบบจะนำไปสู่ความเสียหายมากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะของระบบ และความรุนแรงมากน้อยของความไม่สมดุล

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อค้นหาตำแหน่งและขนาดของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกที่อยู่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถจะคำนวณได้ทั้ง Full HSE และ Partial HSE
2. สร้างแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า ในระบบเฟส A B C
3. เพื่อศึกษาการไหลของกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า ว่าใครเป็นผู้รับภาระการจ่ายกระแส อาทิ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดในระบบ หรือบัสใดทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวกรอง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ คิดเป็นแบบจำลองแบบเชิงเส้น(Linear Model)
- 2) สายส่งกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกใช้แบบจำลองพายแบบกระจาย (Distributed PI Model)
- 3) เครื่องมือวัดทุกเครื่องมีจุดเทียบทางเวลาเดียวกัน (time synchronous)
- 4) การคำนวณที่ความถี่ฮาร์มอนิก จะถือว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นแหล่งกำเนิดกระแสอุดมคติ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการคำนวณแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ในระบบ 3 เฟส แบบ ABC ทั้งที่ความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์มอนิก
- 2) พัฒนาโปรแกรม HSE เพื่อคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิก และ ค้นหาตำแหน่ง และขนาดของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า
- 3) ทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น และปรับปรุงแก้ไข
- 4) ประเมินผลการวิจัยและสรุปผลที่ได้จากการวิจัย
- 5) เรียบเรียง จัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไข

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการพิสูจน์ทฤษฎีของ HSE ในระบบไฟฟ้า
2. พัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณ HSE
3. ผลจากการคำนวณสามารถบอกถึงสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้าได้ และบอกถึงพฤติกรรมของโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สนใจได้
4. หากมีการติดตั้งเครื่องมือวัด และทำการคำนวณเก็บผลอยู่เป็นเวลานาน จนมีฐานข้อมูลเพียงพอ สามารถใช้ผลที่ได้จากการคำนวณนำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกได้

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์แต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งแบบจำลองที่
ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิก

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการวิเคราะห์ HSE และหลักการวิเคราะห์ OA

บทที่ 4 กล่าวถึงโครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยแยกออกเป็น
ป้อนข้อมูลเข้า และส่วนแสดงผล

บทที่ 5 กล่าวถึงระบบทดสอบที่ใช้กับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบ

แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบ จะใช้แบบจำลอง 3 เฟสในระบบเฟส ABC อันเนื่องมาจากเหตุผล ดังต่อไปนี้

- การใช้ ระบบวงจรลำดับ ศูนย์ หนึ่ง สอง . เป็นที่นิยมกันมานาน ซึ่งเหมาะกับการใช้กับระบบที่มีพารามิเตอร์ที่สมดุลกันทั้งสามเฟส จะทำให้เทอมของความเหนี่ยวนำเกี่ยวกับคล่อง (mutual coupling) หายไป ซึ่งถ้าระบบของเรามีโหลดที่ไม่สมดุล ข้อได้เปรียบนี้จะหายไป และจะกลายเป็นความยุ่งยากที่ต้องคอยแปลงค่าในระบบไฟฟ้าไปมา ระหว่างทั้งสองระบบ
- ถ้าระบบมีอุปกรณ์บางตัวที่อิมพีแดนซ์อันดับศูนย์มีค่าเป็นอนันต์ (อันได้แก่อุปกรณ์ที่ต่อแบบ unground) ก็จะทำให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์
- ใช้พารามิเตอร์ของระบบจริงๆ ความคลาดเคลื่อนจะน้อย
- สามารถรวมผลความเหนี่ยวนำเกี่ยวกับคล่องระหว่างเฟส และระหว่างองค์ประกอบอื่นๆ ได้ง่าย
- ไม่มีปัญหาในการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงที่มีการเลื่อนเฟส

ลักษณะของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นอุปกรณ์แบบสถิตย์ทั้งหมด กล่าวคือ สามารถเขียนค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของอุปกรณ์แต่ละตัวได้ โดยไม่ติดอยู่ในรูปของตัวแปรอื่นๆ ตัวอย่างของอุปกรณ์แบบไม่สถิตย์ได้แก่ หม้อแปลงที่มีการเลื่อนเฟสซึ่งค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลง จะติดอยู่ในรูปของแท็บของหม้อแปลง และ ชุดปรับแก้ค่าตัวประกอบกำลังซึ่งค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์จะติดอยู่ในรูปของจำนวนชุดตัวเก็บประจุที่ถูกลับเข้าไป

ในระบบไฟฟ้า จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สองแบบคือ แบบที่ต่อเชื่อมระหว่างบัสกับบัส (network element) และอุปกรณ์ที่ต่อขนานกับระบบ (shunt element)

อุปกรณ์ที่เชื่อมระหว่างบัสกับบัส จะประกอบไปด้วย สายส่ง , หม้อแปลงสามเฟส

1. สายส่งใช้แบบจำลองพาย
2. หม้อแปลงสามเฟส จะใช้แบบจำลองของหม้อแปลงแบบสองขดลวดปกติ

อุปกรณ์ที่ต่อขนานกับระบบ จะประกอบไปด้วย โหลดที่ไม่รู้ค่า (unknown load) , เครื่องกำเนิดไฟฟ้า , ตัวเก็บประจุ , ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

2.1 แบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน

2.1.1 สายส่งกำลังไฟฟ้า

พารามิเตอร์โดยตรงของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ

1) อิมพีแดนซ์อนุกรม ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ที่เป็นผลมาจากอิมพีแดนซ์ของตัวคอนดักเตอร์เอง ,รูปแบบการจัดเรียงตัวของคอนดักเตอร์ และอิมพีแดนซ์ส่วนที่เป็นผลมาจากสายดิน

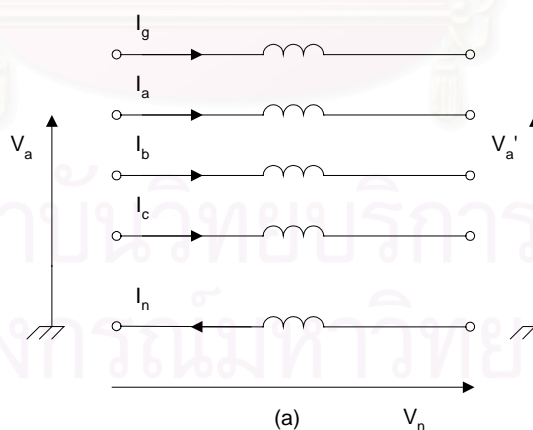
2) แอตมิตแตนซ์ขนาน เป็นค่าแอตมิตแตนซ์ที่บอกถึง กระแสอัดประจุ (charging current) ที่เกิดในสายส่ง

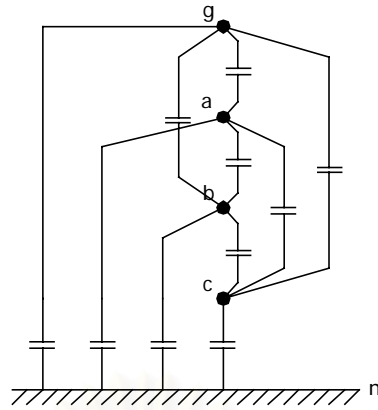
ซึ่งปริมาณทั้งสองนี้ในตอนเริ่มแรก จะถูกคำนวณเป็นค่าต่อหน่วยความยาวของสายส่งก่อน จากนั้นจึงนำไปแยกคิดตามแบบจำลองของสายส่ง

1) แบบจำลองพายปกติ (Nomial PI Model) [2]

- อิมพีแดนซ์อนุกรม

สายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งมีสายดิน (Overhead earth) แสดงดังรูปที่ 2.4(a) ซึ่งแต่ละสายมีค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ และมีการเกิดการเหนี่ยวนำระหว่างสาย (Mutually coupled)





(b)

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

(a) วงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

(b) วงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์ขนานของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

จากรูปที่ 2.1(a) สามารถแสดงสมการสำหรับเฟส a ได้คือ

$$V_a - V_a' = I_a(R_a + j\omega L_a) + I_b(j\omega L_{ab}) + I_c(j\omega L_{ac}) + j\omega L_{ag}I_g - j\omega L_{an}I_n + V_n \quad (2.1)$$

โดยที่

$$V_n = I_n(R_n + j\omega L_n) - I_a(j\omega L_{na}) - I_b(j\omega L_{nb}) - I_c(j\omega L_{nc}) - I_g(j\omega L_{ng}) \quad (2.2)$$

และแทนค่า

$$I_n = I_a + I_b + I_c + I_g \quad (2.3)$$

จะได้

$$V_a - V_a' = I_a(R_a + j\omega L_a) + I_b(j\omega L_{ab}) + I_c(j\omega L_{ac}) + j\omega L_{ag}I_g - j\omega L_{an}(I_a + I_b + I_c + I_g) + V_n \quad (2.4)$$

จัดรูปใหม่และแทนค่า V_n จะได้

$$\begin{aligned} \Delta V_a &= V_a - V_a' \\ &= I_a(R_a + j\omega L_a - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{na}) \\ &\quad + I_b(j\omega L_{ab} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{nb}) \\ &\quad + I_c(j\omega L_{ac} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{nc}) \\ &\quad + I_g(j\omega L_{ag} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{ng}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_a &= I_a(R_a + j\omega L_a - 2j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \\ &\quad + I_b(j\omega L_{ab} - j\omega L_{bn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \\ &\quad + I_c(j\omega L_{ac} - j\omega L_{cn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \\ &\quad + I_g(j\omega L_{ag} - j\omega L_{gn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \end{aligned} \quad (2.6)$$

หรือ

$$\Delta V_a = Z_{aa-n} I_a + Z_{ab-n} I_b + Z_{ac-n} I_c + Z_{ag-n} I_g \quad (2.7)$$

และสมการทั้ง 3 เฟสและสายดิน สามารถแสดงในรูปเมตริกซ์คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \dots \\ \Delta V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} & \vdots & Z_{ag-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} & \vdots & Z_{bg-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{cb-n} & Z_{cc-n} & \vdots & Z_{cg-n} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ Z_{ga-n} & Z_{gb-n} & Z_{gc-n} & \vdots & Z_{gg-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \dots \\ I_g \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยปกติ จะสนใจลักษณะของสายเฟสเท่านั้น และสามารถหาสมการสมมูล 3 เฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยแบ่งสมการเมตริกซ์ออกเป็นรูปแบบดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{abc} \\ \dots \\ \Delta V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & \vdots & Z_B \\ \dots & \vdots & \dots \\ Z_C & \vdots & Z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ \dots \\ I_g \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

และสมมติให้สายดินเป็นจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$[\Delta V_{abc}] = [Z_{abc}] [I_{abc}] \quad (2.10)$$

$$[Z_{abc}] = [Z_A] - [Z_B] [Z_D^{-1}] [Z_C] = \begin{bmatrix} Z'_{aa-n} & \vdots & Z'_{ab-n} & \vdots & Z'_{ac-n} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ Z'_{ba-n} & \vdots & Z'_{bb-n} & \vdots & Z'_{bc-n} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ Z'_{ca-n} & \vdots & Z'_{cb-n} & \vdots & Z'_{cc-n} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

- แอดมิตแตนซ์ขนาน

จากรูปที่ 2.4(b) ศักย์ไฟฟ้าของสายตัวนำสัมพันธ์กับประจุไฟฟ้าในตัวนำตามสมการในรูปเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \dots \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & \vdots & P_{ag} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & \vdots & P_{bg} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & \vdots & P_{cg} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ P_{ga} & P_{gb} & P_{gc} & \vdots & P_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ \dots \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

พิจารณาเช่นเดียวกับกรณีเมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์อนุกรมจะได้

$$[V_{abc}] = [P'_{abc}] [Q_{abc}] \quad (2.13)$$

โดยที่

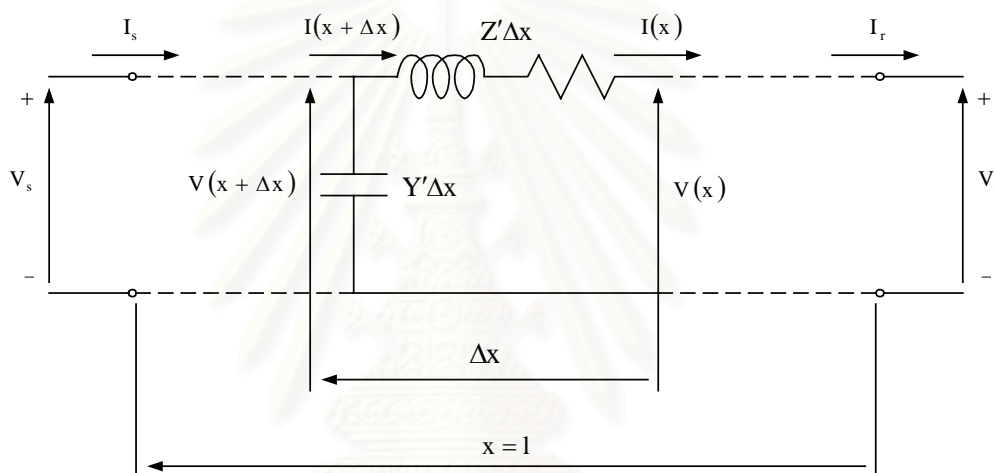
P'_{abc} คือ เมตริกซ์ 3×3 ซึ่งคิดผลของสายดิน

และคาปาซิแตนซ์เมตริกซ์ (Capacitance matrix) ของสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.1 หาได้จาก

$$[C'_{abc}] = [P'_{abc}]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{aa} & \vdots & -C_{ab} & \vdots & -C_{ac} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ -C_{ba} & \vdots & C_{bb} & \vdots & -C_{bc} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ -C_{ca} & \vdots & -C_{cb} & \vdots & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2) แบบจำลองพายแบบกระจาย (Distributed Pi Model) [2]

ในขั้นแรกจะพิจารณาแบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าเฟสเดียว [2] โดยคำนึงถึงผลของคลื่นนิ่ง (Standing wave effects) แล้วจึงขยายเป็นแบบจำลองสายส่ง 3 เฟส



รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์แบบกระจายของสายส่งกำลังไฟฟ้า: แรงดัน; กระแส; Z' อิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาว; Y' แอดมิตแตนซ์ขนานต่อหน่วยความยาว; L ความยาวของสายส่ง

รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์แบบกระจาย (Distributed inductance and capacitance) ซึ่งแทนผลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสถิตของสาย ค่าความต้านทานและคอนดักแตนซ์ (Conductance) จะแทนกำลังสูญเสียของสาย (Line losses)

ภายใต้สภาวะสมดุลโดยสมบรูณ์สายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟสสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองของวงจรลำดับบวกเฟสเดียวและวงจร PI ปกติ (Nominal PI) สำหรับการที่จะรวมค่าแอดมิตแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าเข้าไปในแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์จำเป็นต้องใช้ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัสบาร์และจากบัสบาร์กับดินตามรูปที่ 2.2

สำหรับสายส่งระยะยาว จำนวนของแบบจำลอง PI ที่ใช้ต่อกันเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของแรงดันและกระแสซึ่งถูกระทบจากผลของคลื่นนิ่งจะขึ้นกับความยาวของสายส่งและความถี่ของแรงดันและกระแส ตัวอย่างเช่น ต้องใช้แบบจำลอง PI จำนวน 3 ส่วนสำหรับสายส่งที่มี

ความยาว 1 ใน 4 ของความยาวคลื่นเพื่อให้ได้ความถูกต้องในช่วง 1.2%(1 ใน 4 ของความยาวคลื่นเทียบได้กับระยะทาง 1500 กม. ที่ความถี่ 50)

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จำนวนของแบบจำลอง PI ปกติที่จะใช้เพื่อรักษาให้ได้ความถูกต้องจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน เช่น สายส่งความยาว 300 กม. ต้องใช้แบบจำลอง PI ถึง 30 ส่วนเพื่อรักษาความถูกต้องในระดับ 1.2% สำหรับฮาร์มอนิกลำดับที่ 50 หรือความถี่ 2500 Hz แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าใกล้จุดเรโซแนนซ์(Resonance) ค่าความถูกต้องก็จะเกินช่วงที่ยอมรับได้ออกไปมาก ดังนั้นแบบจำลองของสายส่งที่ความถี่ฮาร์มอนิก จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่คิดผลของคลื่นนิ่งเข้าไปด้วย อันได้แก่แบบจำลองพายแบบกระจาย

แบบจำลองพายแบบกระจาย (Distributed PI model) เป็นแบบจำลองที่คิดมาจากการเคลื่อนที่ของคลื่นไปตามสายส่งซึ่งคิดค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับสองแบบเชิงเส้น (Second order linear differential equations) โดยอ้างอิงจากรูปที่ 2.2

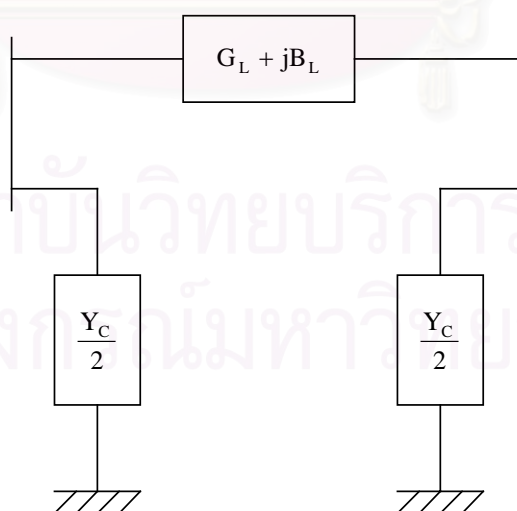
$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = Z'Y'V(x), \quad (2.15)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = Z'Y'I(x) \quad (2.16)$$

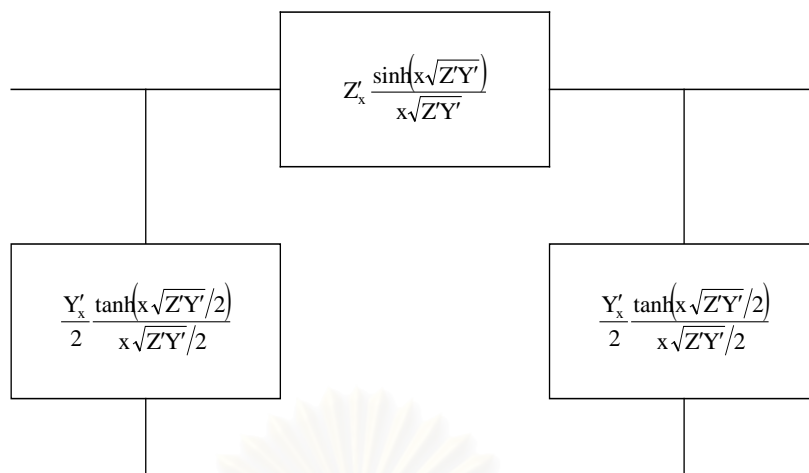
โดยที่

$Z' = r + j2\pi fL$ คือ อิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหนึ่งหน่วยความยาว

$Y' = g + j2\pi fC$ คือ แอดมิตแตนซ์ขนานต่อหนึ่งหน่วยความยาว



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของแอดมิตแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 แบบจำลองสมมูล PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะยาว

แบบจำลองสมมูล PI ตามรูปที่ 2.4 ได้จากแบบจำลอง PI ปกติ โดยการใช้ค่าตัวประกอบปรับแก้(Correction factors) เข้าไปในอิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนาน ดังนี้คือ

$$\frac{\sinh(x\sqrt{Z'Y'})}{x\sqrt{Z'Y'}} \quad \text{สำหรับอิมพีแดนซ์อนุกรม} \quad (2.17)$$

$$\frac{\tanh(x\sqrt{Z'Y'}/2)}{x\sqrt{Z'Y'}/2} \quad \text{สำหรับแอดมิตแตนซ์ขนาน} \quad (2.18)$$

ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากลักษณะโครงสร้างของสาย ค่าพารามิเตอร์จะแสดงออกมาเป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรม และค่าแอดมิตแตนซ์ขนานต่อหนึ่งหน่วย ความยาวของสาย โดยผลของกระแสกราวนด์ (Ground current) และสายดิน (Earth wires) ได้ถูกรวมเข้าไปด้วย

สำหรับแบบจำลองสามเฟส สามารถคำนวณได้จากสมมติฐานที่ว่า อิมพีแดนซ์อนุกรม (Z') และแอดมิตแตนซ์ขนานของสายส่ง (Y') ต่อหน่วยความยาวของสายส่ง สามารถแปลงเป็นวงจรลำดับ ศูนย์ หนึ่ง สอง โดยเทอมของค่าความเหนี่ยวนำเกี่ยวคัล้อง (mutual coupling) หายไป จากนั้นแยกคิดทีละวงจรลำดับเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์สมมูลย์ของสายส่งต่อไป

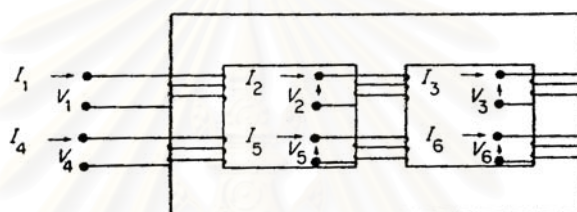
2.1.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (3-phase transformers) [2]

1) แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

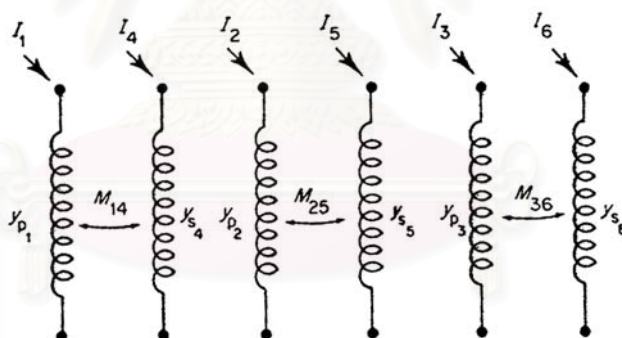
วงจรปฐมภูมิ(Primitive network)ของหม้อแปลงแทนได้โดยแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ปฐมภูมิ (Primitive admittance matrix)ซึ่งอยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

องค์ประกอบของเมตริกซ์ $[Y]$ สามารถหาได้จากการวัดโดยตรง นั่นคือ การจ่ายพลังงาน (Energized) แก่ขดลวด i ที่ความถี่ที่เหมาะสมและทำการลัดวงจรขดลวดอื่นทั้งหมด ก็จะสามารถหาค่าองค์ประกอบในคอลัมน์ที่ i ของ $[Y]$ ได้จาก $y_{ki} = \frac{I_k}{V_i}$

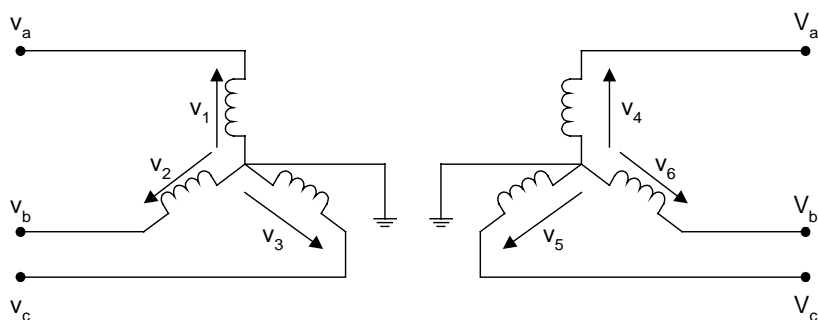


รูปที่ 2.5 แบบจำลองไดอะแกรมของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด

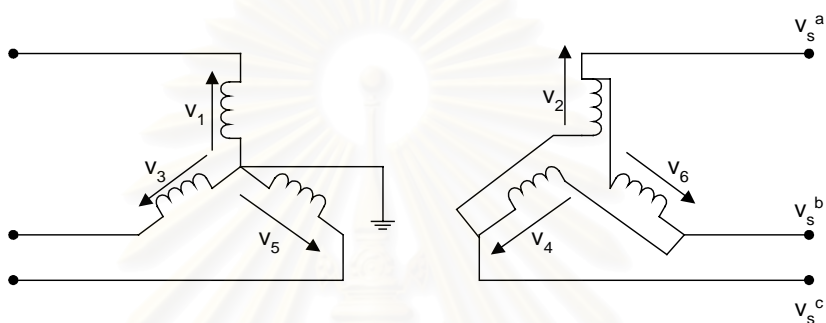


รูปที่ 2.6 วงจรปฐมภูมิ โดยที่ $y_p = \frac{y}{\alpha_i^2}$, $y_{s_j} = \frac{y}{\beta_j^2}$ และ $M_{ij} = \frac{y}{\alpha_i \beta_j}$ เมื่อ $i = 1, 2$ หรือ 3 และ $j = 4, 5$ หรือ 6

โดยการสมมติว่าทางเดินของฟลักซ์กระจายไประหว่างขดลวดทั้งหมดอย่างสมมาตร สมการที่ 2.19 สามารถแสดงเป็นชุดสมการได้อย่างง่ายคือ



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-สตาร์



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-เดลตา

แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของโหนด $[Y]_{\text{NODE}}$ หาได้จาก

$$[Y]_{\text{NODE}} = [C]^t [Y]_{\text{PRIM}} [C] \quad (2.23)$$

เมื่อแทนค่า $[C]$ จะได้ว่า

$$[Y]_{\text{NODE}} = [Y]_{\text{PRIM}} \quad (2.24)$$

เมื่อพิจารณาถึงการต่อแบบ Wye G - Delta ตามรูปที่ 2.8 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกึ่งและแรงดันโหนดเป็นดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \\ V_s^a \\ V_s^b \\ V_s^c \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

หรือ

$$[V]_{\text{branch}} = [C][V]_{\text{node}} \quad (2.26)$$

หรือสามารถเขียนได้ว่า

$$[Y]_{\text{NODE}} = [C]^t [Y]_{\text{PRIM}} [C] \quad (2.27)$$

และจาก $[Y]_{\text{PRIM}}$ จากสมการที่ 2.21

$$[Y]_{\text{NODE}} = \begin{bmatrix} y_p & y'_m & y'_m & -(y_m + y''_m) & (y_m + y''_m) & 0 \\ y'_m & y_p & y'_m & 0 & -(y_m + y''_m) & (y_m + y''_m) \\ y'_m & y'_m & y_p & (y_m + y''_m) & 0 & -(y_m + y''_m) \\ -(y_m + y''_m) & 0 & (y_m + y''_m) & 2(y_s - y''_m) & -(y_s - y''_m) & -(y_s - y''_m) \\ (y_m + y''_m) & -(y_m + y''_m) & & -(y_s - y''_m) & 2(y_s - y''_m) & -(y_s - y''_m) \\ 0 & (y_m + y''_m) & -(y_m + y''_m) & -(y_s - y''_m) & -(y_s - y''_m) & 2(y_s - y''_m) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

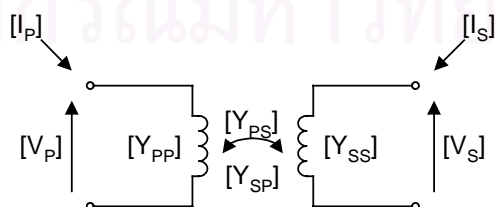
ยิ่งไปกว่านั้นถ้าค่าแอดมิตแตนซ์ปรัสมภูมิมีค่าเป็นเปอร์ยูนิต ซึ่งทั้งแรงดันด้านปรัสมภูมิและ
 ทดียมภูมิมีค่าเป็น 1 pu แบบจำลองหม้อแปลงแบบวาย-เดลตาจะต้องรวมผลของอัตราส่วนของ
 หม้อแปลง(Effective turn ratio) ด้วยค่า $\sqrt{3}$ เมตริกซ์ในควอดแดรนต์บนขวากับล่างซ้ายต้องการ
 ด้วย $\sqrt{3}$ และเมตริกซ์ในควอดแดรนต์ล่างขวาทหารด้วย 3

ในกรณีเฉพาะของหม้อแปลงเฟสเดียว 3 ตัวที่ต่อกันแบบวายกราวน์-เดลตา(Wye G -
 Delta) ทั้งค่าของ y' และ y'' จะหายไป โดยการละเลยแทปไม่ปกติ(Off-nominal tap) จะได้ว่าสม
 การแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของโหนดซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกระแสโหนดและแรงดันโหนดดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} I_p^a \\ I_p^b \\ I_p^c \\ I_s^A \\ I_s^B \\ I_s^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & & & -y/\sqrt{3} & y/\sqrt{3} & \\ & y & & -y/\sqrt{3} & y/\sqrt{3} & \\ & & y & y/\sqrt{3} & -y/\sqrt{3} & \\ -y/\sqrt{3} & & y/\sqrt{3} & \frac{2}{3}y & -\frac{1}{3}y & -\frac{1}{3}y \\ y/\sqrt{3} & -y/\sqrt{3} & & -\frac{1}{3}y & \frac{2}{3}y & -\frac{1}{3}y \\ & y/\sqrt{3} & -y/\sqrt{3} & -\frac{1}{3}y & -\frac{1}{3}y & \frac{2}{3}y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \\ V_s^A \\ V_s^B \\ V_s^C \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

โดยที่ y คือ ค่าลี้คเกจแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง(Transformer leakage admittance)
 ในหน่วยเปอร์ยูนิต

โดยทั่วไปหม้อแปลง 3 เฟสแบบ 2 ขดลวดอาจจะแทนได้ด้วยขดลวดเหนียวนำ 2 ขด
 เมตริกซ์ของวงจรแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับแบบจำลองนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองหม้อแปลง 3 เฟสแบบ 2 ขดลวด

$$\text{จากแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์นำมาเขียนสมการได้เป็น } \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = C^t * y_{pri} * C * \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

ทำการแปลงสมการให้เป็นระบบเปอร์ยูนิท (ละเลยผลของหม้อแปลงแท็บไม่ปกติ)

$$\begin{bmatrix} I_p' \\ I_s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{base, trf, p}} & \\ & \frac{1}{I_{base, trf, p}} \end{bmatrix} C^t * y_{pri} * C * \begin{bmatrix} V_{base, trf, p} & \\ & V_{base, trf, s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p' \\ V_s' \end{bmatrix}$$

โดยปกติ ค่าแอดมิตแตนซ์ของขดลวดในระบบเปอร์ยูนิทของตัวเอง จะมีค่าเท่ากันทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ จะแปลงเทอมของแอดมิตแตนซ์ให้อยู่บนเบสของตัวเอง

$$\begin{bmatrix} I_p' \\ I_s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r1 & \\ & r2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{base, coil, p}} & \\ & \frac{1}{I_{base, coil, p}} \end{bmatrix} C^t * y_{pri} * C * \begin{bmatrix} V_{base, coil, p} & \\ & V_{base, coil, s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r1 & \\ & r2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p' \\ V_s' \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

เทอมในวงเล็บปีกกาสามารถยุบให้อยู่ในรูป $\begin{bmatrix} y_{pp} & y_{ps} \\ y_{sp} & y_{ss} \end{bmatrix}$ และมีค่าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ชุดของเมตริกซ์ย่อยที่ใช้ในการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลง

Transformer connection		Self admittance		Mutual admittance
Bus P	Bus S	Y_{pp}	Y_{ss}	Y_{ps}, Y_{sp}
Wye-G	Wye-G	Y_I	Y_I	$-Y_I$
Wye-G	Wye	$Y_{II/3}$	$Y_{II/3}$	$-Y_{II/3}$
Wye-G	Delta	Y_I	Y_{II}	Y_{III}
Wye	Wye	$Y_{II/3}$	$Y_{II/3}$	$-Y_{II/3}$
Wye	Delta	$Y_{II/3}$	Y_{II}	Y_{III}
Delta	Delta	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$

โดยที่

$$[Y_{sp}] = [Y_{ps}]^T$$

เมตริกซ์ย่อย $[Y_{pp}]$, $[Y_{ps}]$, และอื่นๆ ได้ให้ค่าไว้ตามตารางที่ 2.1 สำหรับการต่อทั่วไปในเทอมของเมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$Y_I = \begin{bmatrix} y_t & & \\ & y_t & \\ & & y_t \end{bmatrix}, Y_{II} = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix}, Y_{III} = \begin{bmatrix} -y_t & y_t & \\ & -y_t & y_t \\ y_t & & -y_t \end{bmatrix}$$

สุดท้ายนี้เมตริกซ์ย่อยได้ถูกดัดแปลงเพื่อให้ใช้ได้กับหม้อแปลงแบบแทปไม่ปกติ (Off-nominal tap ratio)

(1) หาค่าแอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำตัวเองทางด้านปฐมภูมิด้วย α^2

(2) หาค่าแอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำตัวเองทางด้านทุติยภูมิด้วย β^2

(3) หาค่าแอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ด้านด้วย $\alpha\beta$

ซึ่ง α และ β คือ อัตราส่วนแทปของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิตาม

$$\text{ลำดับ} \quad \frac{V_{\text{base, trf, p}}}{V_{\text{base, sys, p}}} = \alpha \quad \frac{V_{\text{base, trf, s}}}{V_{\text{base, sys, s}}} = \beta$$

ตัวอย่าง การสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลง Delta-Wye G

หม้อแปลง 225/115 kV ต่อแบบ Delta-Wye G ค่าฐานเปอร์เซ็นต์ของแรงดันของระบบคือ 230/115 kV หม้อแปลงมีแอดมิตแตนซ์ 1 p.u. (บนค่าฐานของตัวเอง) ไม่คิดผลของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

จากตารางที่ 2.1 สามารถเขียนสมการ 2.31 ได้ใหม่ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_p' \\ I_s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r1 & \\ & r2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{III}^t \\ Y_{III} & Y_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r1 & \\ & r2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p' \\ V_s' \end{bmatrix}$$

ด้าน primary ต่อแบบ Delta ดังนั้นค่าฐานของแรงดันของขดลวดจะมากกว่า ค่าฐานของแรงดันของระบบ (เฟส-นิวทรอล) ด้วยสัดส่วน $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ดังนั้น $r1 = \frac{1}{\sqrt{3}}$

ด้าน secondary ต่อแบบ Wye ดังนั้นค่าฐานของขดลวดมีค่าเท่ากับค่าฐานของแรงดันของระบบ (เฟส-นิวทรอล) เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} I_p' \\ I_s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{II} / 3 & Y_{III}^t / \sqrt{3} \\ Y_{III} / \sqrt{3} & Y_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p' \\ V_s' \end{bmatrix}$$

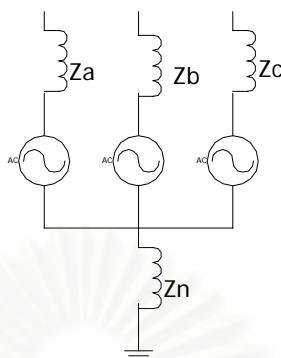
ค่าแรงดันและกระแสในสมการข้างบน เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ ที่อ้างอิงจากค่าฐานของหม้อแปลง

พิจารณาผลของหม้อแปลงที่แทปไม่ปกติ $\alpha = 0.9783$ และ $\beta = 1$

$$\begin{bmatrix} I_p' \\ I_s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{II} / 2.9349 & Y_{III}^t / 1.6945 \\ Y_{III} / 1.6945 & Y_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p' \\ V_s' \end{bmatrix}$$

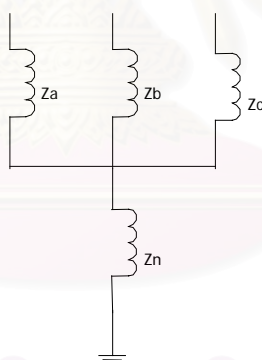
ค่าแรงดันและกระแสในสมการข้างบน เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ ที่อ้างอิงจากค่าฐานของระบบ

2.1.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า [3]



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเป็นดังรูป 2.10 และสำหรับแบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน จะมองเฉพาะแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจึงไม่คิดผลของขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ \$Z_n\$ จะมีผลเฉพาะในวงจรอันดับศูนย์ ซึ่งในสภาวะการทำงานปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะไม่มีแรงดันและกระแสอันดับศูนย์



รูปที่ 2.11 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก จะเป็นดังรูป 2.11 และสามารถเขียนออกมาเป็นแอมิติตแดนซ์เมตริกซ์ ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_x \\ V_x \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & Z_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & Z_c \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

ทำการคูณเมตริกซ์การแปลง \$A^{-1}\$ เข้าไป เพื่อแปลงจากวงจรเฟส abc เป็นวงจรอันดับศูนย์ หนึ่ง สอง

$$A^{-1} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_x \\ V_x \\ V_x \end{bmatrix} = A^{-1} * \begin{bmatrix} Z_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & Z_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & Z_c \end{bmatrix} * A * A^{-1} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

โดยปกติแล้ว อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวงจรอันดับศูนย์ หนึ่ง สอง จะไม่มีเทอมของค่าความเหนี่ยวนำระหว่างอันดับ

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ V^1 \\ V^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I^0 \\ I^1 \\ I^2 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

จากวงจรจะได้ว่า $V_x = (I_a + I_b + I_c) * z_n = 3I^0 Z_n$ ดังนั้นสมการ 2.33 กลายเป็น

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ V^1 \\ V^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I^0 \\ I^1 \\ I^2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

ทำการแปลงสมการ 2.34 ให้กลับมาอยู่ในวงจรเฟส จะได้บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ที่รวมทั้งผลขดลวดของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดิน

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} Z_{Bus,new} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

จากสมการ 2.35 สามารถหาแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Y_{Bus}) ได้โดยการอินเวอร์สเมตริกซ์ตามปกติ

** การแปลงวงจรเฟส เป็นวงจรอันดับ ศูนย์ หนึ่ง สอง

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad V_{012} = A^{-1} * V_{abc}, \quad I_{012} = A^{-1} * I_{abc}$$

2.1.4 โหลดที่ไม่ทราบค่า [1]

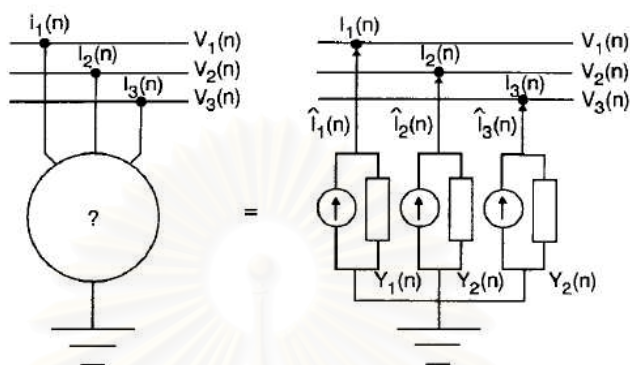
โดยปกติแล้ว สำหรับโหลดที่ไม่รู้ค่าแน่นอนในระบบ โหลดตัวนั้นอาจเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก หรือ เป็นอิมพีแดนซ์ปกติ ที่กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆ ไหลผ่านได้

การวิเคราะห์จะเริ่มต้นจาก หากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในโหลดที่ไม่ทราบค่า โดยค่าแรงดันที่บัส จะรู้ได้จากการประมาณค่าตัวแปรสเตรตฮาร์มอนิกแล้ว

$$I_{unknown,load,i} = \sum_{j=1}^{nBus} Y_{ij} * V_j \quad (2.36)$$

ทำการคำนวณหาทิศทางการไหลของกำลังโดย

$$S_a = V_a^* I_a \quad (2.37)$$

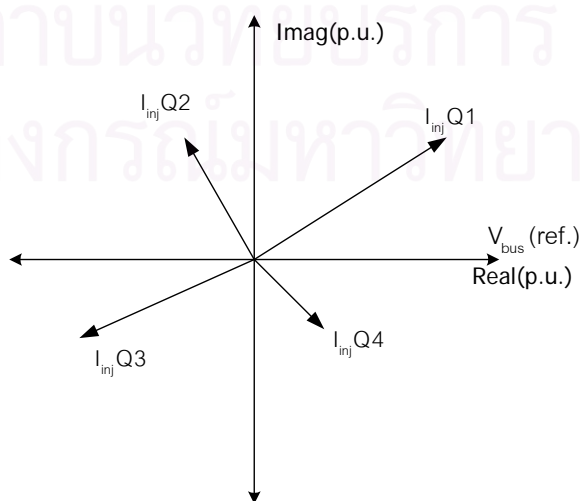


รูปที่ 2.12 แบบจำลองของ โหลดที่ไม่ทราบค่า

ถ้า unknown load มีพฤติกรรมเป็นแหล่งจ่ายกำลัง จะสรุปได้ว่า โหลดที่ไม่ทราบค่า เป็นแหล่งกำเนิดกระแสในกรณีที่ที่เราพิจารณาอยู่ แต่ถ้าโหลดที่ไม่ทราบค่า มีพฤติกรรมเป็นโหลดปกติ เราจะสรุปได้ว่าโหลดที่ไม่ทราบค่า เป็นอิมพีแดนซ์ปกติ ในช่วงเวลาที่พิจารณา สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ อนุกรม ได้จากการคำนวณเฟสเซอร์แบบปกติ

$$Z_{i,a} = \frac{V_{i,a}}{I_{i,a}} \quad (2.38)$$

การพิจารณาต้องพิจารณาแบบแยกเฟสเสมอ เพราะในระบบสามเฟสสี่สายที่มีโหลด 1 เฟส ต่ออยู่จำนวนมาก อาจเกิดเหตุการณ์ที่โหลดที่ไม่ทราบค่าเฟส A มีพฤติกรรมเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก แต่ที่เฟส B,C มีพฤติกรรมเป็นอิมพีแดนซ์ปกติ



รูปที่ 2.13 ลักษณะของกระแสที่จ่ายออกจากโหลดที่ไม่ทราบค่า เมื่อเทียบกับแรงดัน ทั้ง 4 ควอดแดนต์

ควอดแดนซ์ที่ 1 โหลดที่ไม่ทราบค่าในลักษณะนี้จะจ่ายกำลังจริงเข้าสู่ระบบ และดึงเอา กำลังรีแอกทีฟออกจากระบบ สรุปได้ว่า โหลดที่ไม่ทราบค่าตัวนี้มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดที่ ความถี่ที่พิจารณา

ควอดแดนซ์ที่ 2 โหลดที่ไม่ทราบค่าในลักษณะนี้จะดึงเอากำลังออกจากระบบ และดึงเอา กำลังรีแอกทีฟออกจากระบบ ดังนั้นโหลดที่ไม่ทราบค่าตัวนี้มีลักษณะเป็นโหลด ที่ประกอบด้วยตัว ด้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ที่พิจารณา

ควอดแดนซ์ที่ 3 โหลดที่ไม่ทราบค่าในลักษณะนี้จะดึงเอากำลังจริงออกจากระบบ และ จ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ ดังนั้นโหลดที่ไม่ทราบค่าตัวนี้อาจมีลักษณะเป็นได้ทั้งแหล่งจ่ายหรือ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แต่โดยปกติระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นตัวต้านทานและ ตัวเหนี่ยวนำมากกว่าตัวเก็บประจุ และยิ่งที่ความถี่สูงๆ ค่าความเหนี่ยวนำจะยิ่งเพิ่มขึ้น ดังนั้นพอ จะสรุปได้ว่า โหลดที่ไม่ทราบค่าตัวนี้อาจมีลักษณะเป็นโหลดหรือแหล่งจ่าย ที่ความถี่มูลฐาน แต่มี ลักษณะเป็นแหล่งจ่ายที่ความถี่ฮาร์โมนิก

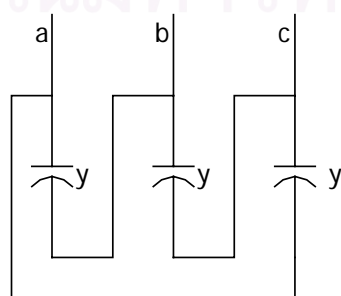
ควอดแดนซ์ที่ 4 โหลดที่ไม่ทราบค่าในลักษณะนี้ จะจ่ายทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเข้า สู่อุปกรณ์ ดังนั้น โหลดที่ไม่ทราบค่าตัวนี้มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายที่ความถี่ที่พิจารณา

2.1.5 ตัวเก็บประจุ

โดยปกติในระบบไฟฟ้า จะมีตัวเก็บประจุถูกต่ออยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อใช้ในการแก้ไขค่า Power Factor ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังเสมือน (MVAR) เข้าสู่ระบบ และมีรูป แบบการต่อ 2 รูปแบบคือ Delta และ Wye G การต่อแบบ Delta ชุดตัวเก็บประจุจะสามารถจ่าย MVAR ให้แก่ระบบได้มากกว่าการต่อแบบ Wye G 3 เท่า แต่ว่าตัวเก็บประจุแต่ละตัว จะต้องทน แรงดันที่ตกคร่อมตัวมันมากกว่า การต่อแบบ Wye G อยู่ $\sqrt{3}$ เท่า

สำหรับเทคโนโลยีการสร้างตัวเก็บประจุนั้น การจะสร้างตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันสูงๆ ได้จะ มีราคาสูง ทำให้ในระบบแรงดันต่ำเรานิยมต่อตัวเก็บประจุแบบ Delta และในระบบแรงดันสูง นิยมต่อตัวเก็บประจุแบบ Wye G

- การต่อแบบ Delta



รูปที่ 2.14 การต่อตัวเก็บประจุแบบ Delta

สามารถเขียนแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ได้ดังนี้

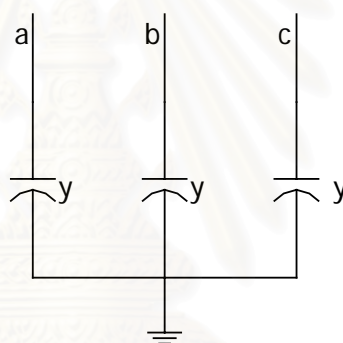
$$Y_{sh} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \\ & 1 & -1 \\ -1 & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y & & \\ & y & \\ & & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & \\ & 1 & -1 \\ -1 & & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{sh} = \begin{bmatrix} 2y & -y & -y \\ -y & 2y & -y \\ -y & -y & 2y \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

โดยปกติแล้ว สำหรับชุดตัวเก็บประจุ เราสามารถละเลยผลของการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟสได้ จึงไม่มีเทอมของการเหนี่ยวนำร่วมในแอดมิตแตนซ์พื้นฐาน (primitive admittance)

สำหรับการต่อแบบ Delta ชุดตัวเก็บประจุจะไม่ยอมให้กระแสลำดับศูนย์ไหลได้ จึงสามารถหลีกเลี่ยงการขยายกระแสของฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ได้

- การต่อแบบ Wye G



รูปที่ 2.15 การต่อตัวเก็บประจุแบบ Wye G

สามารถเขียนแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$Y_{sh} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y & & \\ & y & \\ & & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{sh} = \begin{bmatrix} y & & \\ & y & \\ & & y \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

2.1.6 ตัวกรองฮาร์มอนิก

การนำตัวกรองฮาร์มอนิกเข้ามาใช้ในระบบ ก็ต่อเมื่อ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่ามีปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิก และลำดับใดที่ทำให้เกิดปัญหา โดยเฉพาะปัญหาการเกิดเรโซแนนซ์ เมื่อนำตัวกรองฮาร์มอนิกเข้ามาใช้จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ การสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกนั้นทำได้โดยการใช้

ตัวเหนี่ยวนำหรือรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์โดยตั้งความถี่เรโซแนนซ์ให้ตรงหรือใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองซึ่งเป็นแบบพาสซีฟ โดยทั่วไปตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีหน้าที่ 2 ประการคือ

- ให้กำลังงานรีแอคตีฟที่ความถี่หลักมูลสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
- การลดกระแสฮาร์มอนิก

ตัวกรองฮาร์มอนิกจะแบ่งเป็น 2 แบบ ตามความถี่ที่ปรับคลื่น(Tuned frequency) คือ

- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูน (Detuned filter) จะปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ต่ำกว่าลำดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่มีอยู่ในระบบ เช่น ถ้าในระบบมีฮาร์มอนิกต่ำสุดคือลำดับที่ 5 จะปรับความถี่ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3.78 หรือ 4.08 เป็นต้น

- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูน (Tuned filter) จะปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับลำดับฮาร์มอนิกที่ต้องการกรอง เช่น ถ้าต้องการกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ต้องปรับความถี่ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 4.7 - 4.8 เป็นต้น

การปรับให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ลำดับฮาร์มอนิกที่ h หมายถึง ค่าอินดักตีฟรีแอคแตนซ์ของตัวรีแอคเตอร์(X_L) เท่ากับค่าคาปาซิตีฟรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์(X_C) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \text{หรือ} \quad X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (2.41)$$

สำหรับตัวอย่างการตั้งค่ารีแอคแตนซ์ของตัวกรองแบบจูนที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆมีดังนี้

$$\text{ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5} \quad X_L = X_C/4.8^2 = 0.0434X_C = 4.34\%X_C$$

$$\text{ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7} \quad X_L = X_C/6.8^2 = 0.0216X_C = 2.16\%X_C$$

นอกจากค่า X_C และ X_L แล้วจะมีค่าความต้านทานของขดลวด ซึ่งหามาจากความสัมพันธ์ของ Q-factor มีค่าตามสมการที่ 2.42 ซึ่งเป็นค่าที่จุดเรโซแนนซ์ของวงจรอนุกรม R-L-C

$$Q_f = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r CR} \quad \text{หรือ} \quad Q_f = \frac{hX_L}{R} = \frac{X_C}{hR} \quad (2.42)$$

เมื่อ

X_L คือ ค่าอินดักตีฟรีแอคแตนซ์ของรีแอคเตอร์ที่ความถี่หลักมูล

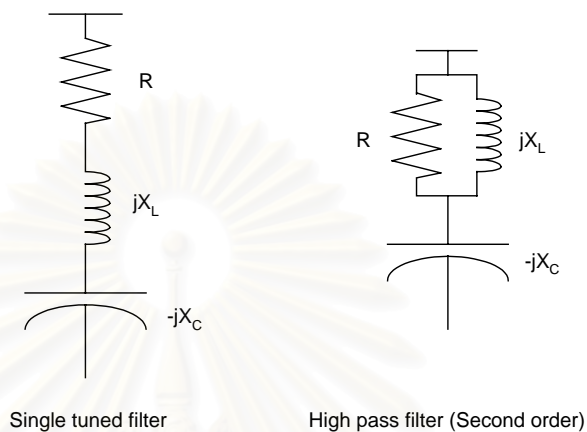
X_C คือ ค่าคาปาซิตีฟรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ความถี่หลักมูล

h คือ จุดเรโซแนนซ์ของตัวกรองที่ปรับความถี่ได้

Q_f คือ ตัวประกอบคุณภาพ

R คือ ค่าความต้านทานของวงจรอนุกรม R-L-C

ดังนั้นแบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกจะประกอบด้วย ความต้านทาน คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ และอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ซึ่งถ้าเป็นตัวกรองแบบปรับความถี่เดียว(Single tuned) องค์ประกอบทั้ง 3 นี้จะต่ออนุกรมกัน แต่ถ้าเป็นตัวกรองแบบผ่านสูง(High pass) ความต้านทานกับอินดักทีฟรีแอกแตนซ์จะต่อขนานกัน จากนั้นจะต่ออนุกรมกับคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ แบบจำลองของตัวกรองทั้งสอง แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.16 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

สำหรับค่า R ของตัวกรองแบบปรับความถี่เดียวมีค่าดังสมการที่ 2.43

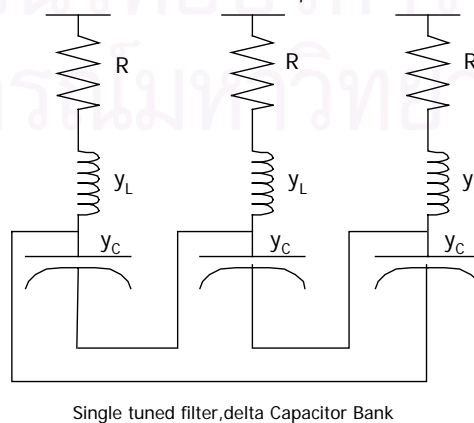
$$R_{\text{(For single tuned)}} = \frac{hX_L}{Q_{\text{Factor}}} \quad (2.43)$$

สำหรับค่า R ของตัวกรองแบบผ่านสูงจะเป็นส่วนกลับกันนั่นคือ

$$R_{\text{(For high pass)}} = \frac{Q_{\text{Factor}}}{hX_L} \quad (2.44)$$

สำหรับในส่วนของตัวเก็บประจุที่แสดงในรูปนั้น สามารถจะต่อได้ทั้งแบบ Delta หรือว่าแบบ Wye G ซึ่งแต่ละแบบก็จะทำการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ต่างกันไป ดังต่อไปนี้

(1) ตัวกรองแบบปรับความถี่เดียว ต่อตัวเก็บประจุแบบ Delta

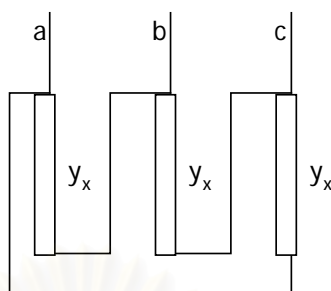


Single tuned filter, delta Capacitor Bank

รูปที่ 2.17 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับความถี่เดียว (1)

จากความสัมพันธ์ $y_\Delta = \frac{y_Y}{3}$ แปลงวงจรในรูป 2.17 ให้อยู่ในรูปของแอดมิตแตนซ์ที่ต่อ

Delta กับระบบ



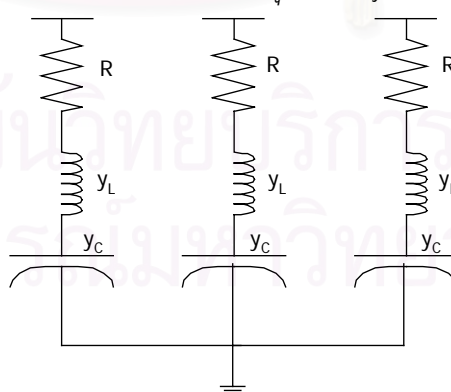
$$\text{เมื่อ } y_x = \frac{\left(\frac{1}{R} // y_L // 3y_c\right)}{3} \quad (2.45)$$

ทำการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ได้แบบเดียวกับตัวเก็บประจุที่ต่อแบบ Delta

$$Y_{\text{filter}} = \begin{bmatrix} 2y_x & -y_x & -y_x \\ -y_x & 2y_x & -y_x \\ -y_x & -y_x & 2y_x \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

และเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุที่ต่อแบบ Delta ชุดตัวกรองจะไม่ยอมให้กระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านตัวมัน เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถใช้กรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ได้ โดยปกติกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ซึ่งเริ่มต้นที่ ลำดับ 3 จะปรากฏมากในโหลด 1 เฟส ที่ต่ออยู่กับระบบ และจะไม่ปรากฏเลย ในระบบ 3 เฟส 3 สาย รวมไปถึงโหลด 3 เฟส ส่วนใหญ่

(2) ตัวกรองแบบปรับความถี่เดียว ต่อตัวเก็บประจุแบบ Wye G



Single tuned filter, Wye Capacitor Bank

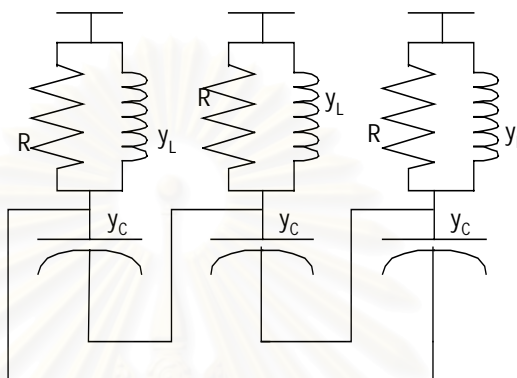
รูปที่ 2.18 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับความถี่เดียว (2)

ทำการสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบได้โดยง่าย เพราะตัวกรองฮาร์มอนิกถูกต่อลงกราวด์ เขียนแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ได้เป็น

$$\mathbf{Y}_{\text{filter}} = \begin{bmatrix} y_x & & \\ & y_x & \\ & & y_x \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$y_x = \frac{1}{R} // y_L // y_c \quad (2.48)$$

(3) ตัวกรองแบบผ่านสูง ต่อตัวเก็บประจุแบบ Delta



high pass filter, Delta Capacitor Bank

รูปที่ 2.19 ตัวกรองแบบผ่านสูง (1)

สำหรับตัวกรองแบบปรับความถี่สูงผ่าน เราจะทำการต่อตัวต้านทานให้ขนานกับตัวรีแอคเตอร์ไว้ เพื่อว่าที่ช่วงความถี่สูงๆ อิมพีแดนซ์รวมของตัวกรองจะได้ลดลง และดึงให้กระแสฮาร์มอนิกมาไหลผ่านตัวกรอง

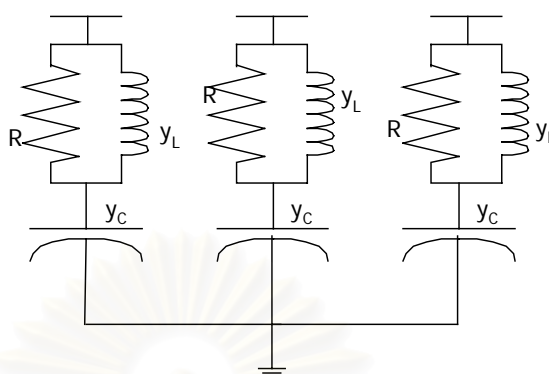
และเช่นเดียวกับการต่อแบบ Delta ในอุปกรณ์อื่นๆ ตัวกรองชุดนี้จะไม่สามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นลำดับคู่เลยได้

แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของตัวกรองจะเป็น

$$\mathbf{Y}_{\text{filter}} = \begin{bmatrix} 2y_x & -y_x & -y_x \\ -y_x & 2y_x & -y_x \\ -y_x & -y_x & 2y_x \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$y_x = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{R} + y_L // 3y_c \right) \quad (2.50)$$

(4) ตัวกรองแบบผ่านสูง ต่อตัวเก็บประจุแบบ Wye G



high pass filter, Wye Capacitor Bank

รูปที่ 2.20 ตัวกรองแบบผ่านสูง (2)

แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เมตริกซ์ของตัวกรองจะเป็น

$$Y_{\text{filter}} = \begin{bmatrix} y_x & & \\ & y_x & \\ & & y_x \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$y_x = \left(\frac{1}{R} + y_L \right) // y_c \quad (2.52)$$

แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิก

แบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในช่วงแรกๆ แต่ละแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยจุดประสงค์การใช้ต่างๆ กันไปเช่นใช้สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage networks) ของ CIGRE Working Group 36-05 [10], ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกระหว่างระบบเอซีของ BPA กับสถานีไฟฟ้าย่อย Celilo HVDC Substation [11], ใช้ในการศึกษาการแพร่กระจายของฮาร์มอนิกจากระบบ HVDC เข้าสู่ระบบเอซีของประเทศนิวซีแลนด์ [12], แบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง CIGRE Joint Task Force 36.05.02/14.03.03 นำเสนอ [13]

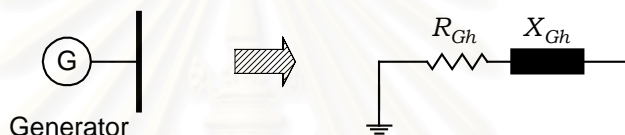
ต่อมาทาง CIGRE Working Group CC02 (CIGRE 36.05/CIREN 2) ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆขึ้นมาใหม่ [14]

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้แบบจำลองของ CIGRE WG CC02 (CIGRE 36.05/CIRED 2 [14]) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, สายส่งกำลังไฟฟ้า, และ คาปาซิเตอร์ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้แบบจำลองของ CIGRE Joint Task Force 36.05.02/14.03.03 [13]

เนื่องมาจากแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองเมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นในการคำนวณจึงคำนวณค่าต่างๆ เป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่อลำดับก่อน จากนั้นจึงเปลี่ยนมาเป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟส เพื่อใช้ในระเบียบวิธี HSE ต่อไป

1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า [14]

สำหรับแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) จะประกอบไปด้วยตัวต้านทาน R ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แบบจำลองฮาร์มอนิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะพิจารณาอยู่ในรูปของ Subtransient reactance X''_d และตัวต้านทานต่ออนุกรมกัน จะได้สมการดังนี้

$$R_l = 0.1 X''_d \quad (2.53)$$

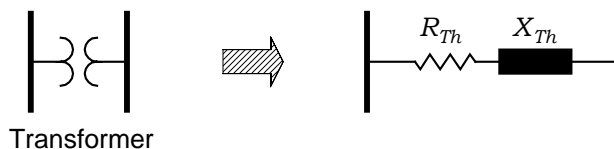
$$X_{Gh} = h X''_d \quad (2.54)$$

และคำนึงถึงค่า Skin effect จะได้สมการเป็น

$$R_{Gh} = \sqrt{h} R_l \quad (2.55)$$

2 หม้อแปลงไฟฟ้า [13]

สำหรับแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) จะประกอบไปด้วยตัวต้านทาน R ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L ดังแสดงในรูปที่ 2.22



Transformer

รูปที่ 2.22 แบบจำลองฮาร์โมนิกของหม้อแปลงไฟฟ้า

จะได้สมการดังนี้

$$R_{Th} = R_t (a_0 + a_1 h^b + a_2 h^2) \quad (2.56)$$

$$X_{Th} = h X_t \quad (2.57)$$

เมื่อ

R_t คือ Transformer's short-circuit resistance

X_t คือ Transformer's short-circuit reactance

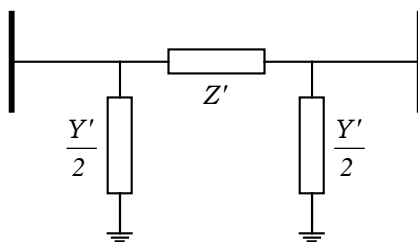
ค่าคงที่ในสมการที่ (2.56) แสดงในตารางที่ 2.1 โดยที่ $(a_0 + a_1 + a_2) = 1.00$

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของแฟกเตอร์ในสมการที่ (2.56)

Small system transformers	Large system transformers
$a_0 = 0.85 - 0.90$	$a_0 = 0.75 - 0.80$
$a_1 = 0.05 - 0.08$	$a_1 = 0.10 - 0.13$
$a_2 = 0.05 - 0.08$	$a_2 = 0.10 - 0.13$
$b = 0.9 - 1.4$	$b = 0.9 - 1.4$

3 สายส่งกำลังไฟฟ้า [14]

สำหรับแบบจำลองฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Line or cable) เมื่อความถี่สูงขึ้นๆ ทำให้ความถูกต้องของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของสายส่งที่ใช้แบบจำลองพายปกติลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้รูปแบบของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลที่อยู่ในรูปวงจรมุมลแบบพายแบบกระจายดังแสดงในรูปที่ 2.23



Transmission Line
(Distributed parameter line model)

รูปที่ 2.23 แบบจำลองฮาร์โมนิกของสายส่งกำลังไฟฟ้า

โดยที่

$$Z = R_h + j h X_l \quad (2.58)$$

$$Y = j h \omega C \quad (2.59)$$

จะได้ว่า

$$Z' = \frac{Z \sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \quad (2.60)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y \tanh \frac{\sqrt{YZ}}{2}}{\sqrt{YZ}} \quad (2.61)$$

เมื่อ

R_h คือ ค่าความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า

X คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

C คือ ค่าเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า

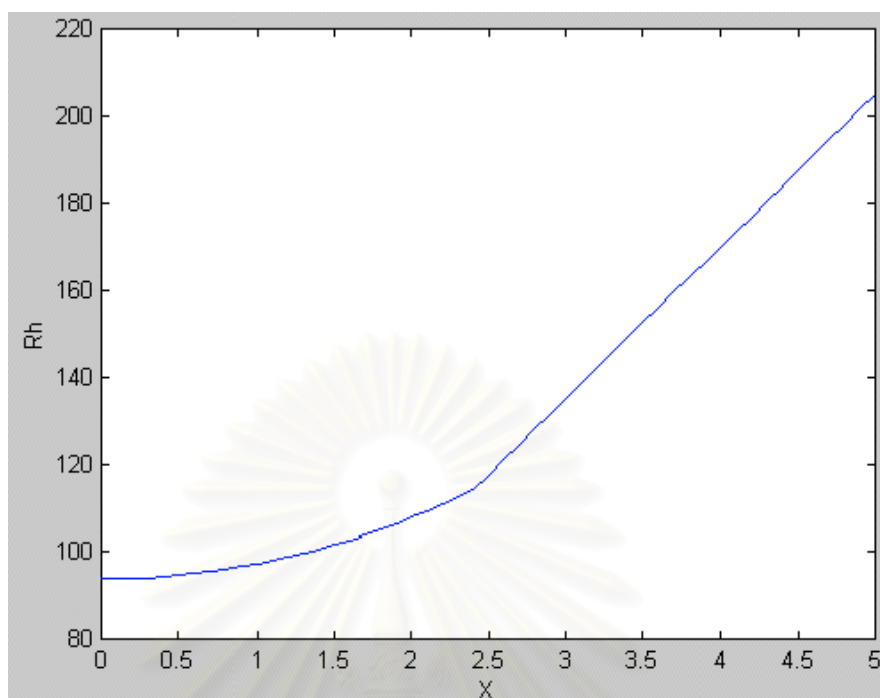
ค่าความต้านทานที่เกิดจากผลของ Skin effect, ความยาวของสาย l (km) ได้จาก $X_l \approx 0.4 \Omega / km$ สำหรับสายที่เป็น overhead line , หรือจาก $X_l \approx 0.1 \Omega / km$ สำหรับสายที่เป็น cable line และจะได้ค่าความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้าคือ

$$R_{dc} = \frac{R_l - 0.004398 l}{0.938} \quad (2.62)$$

$$x = 0.3545 \cdot \sqrt{\frac{h}{R_{dc} / l}} \quad (2.63)$$

$$\text{สำหรับ } x \leq 2.4 : R_h = R_{dc} (0.035 x^2 + 0.938) \quad (2.64)$$

$$\text{สำหรับ } x > 2.4 : R_h = R_{dc} (0.35 x + 0.3) \quad (2.65)$$



รูปที่ 2.24 ค่าของ R_h เมื่อ $R_{dc}=100$ โอห์ม

สำหรับแบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย (Distribution Lines and Cable) จะใช้ตามแบบจำลองของ [11] โดยมีสมการดังนี้

$$\text{สำหรับ overhead line : } R_h = R \left(1 + \frac{0.646 h^2}{192 + 0.518 h^2} \right) \quad (2.66)$$

$$\text{สำหรับ cable line : } R_h = R (0.187 + 0.532 \sqrt{h}) \quad (2.67)$$

ผลของแบบจำลองพายแบบกระจาย [2]

การใช้แบบจำลองพายแบบกระจาย จะทำให้พารามิเตอร์ของสายส่งเปลี่ยนแปลงไปมาก โดยเฉพาะที่ความถี่สูงๆ ตั้งแต่ ความถี่หนึ่งในสี่ความยาวคลื่น (quarter wave length frequency) ซึ่งจะเป็นความถี่ที่ทำให้ความยาวของสายส่งมีค่าเป็น หนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นพอดี

กำหนดสายส่ง L_1 ยาว 230 km มีพารามิเตอร์ที่ความถี่มูลฐาน ดังนี้

$$Z_{\text{serie}} = 0.01937 + 0.05916j$$

$$Y_{\text{shunt}} = 0.05279j$$

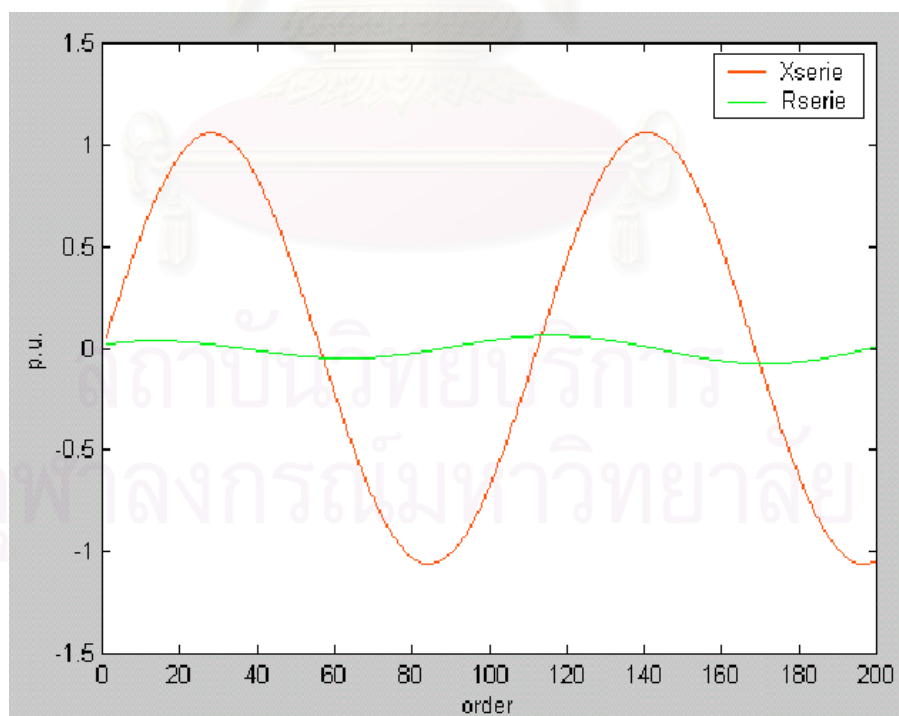
ซึ่งพารามิเตอร์ที่บอกมาเป็นพารามิเตอร์ของทั้งสายส่งที่ความถี่มูลฐาน โดยคิดจากแบบจำลองพายปกติ

$$\text{ที่ } h = 1 \quad \text{ความยาวคลื่น} = 25587 \text{ km [3]}$$

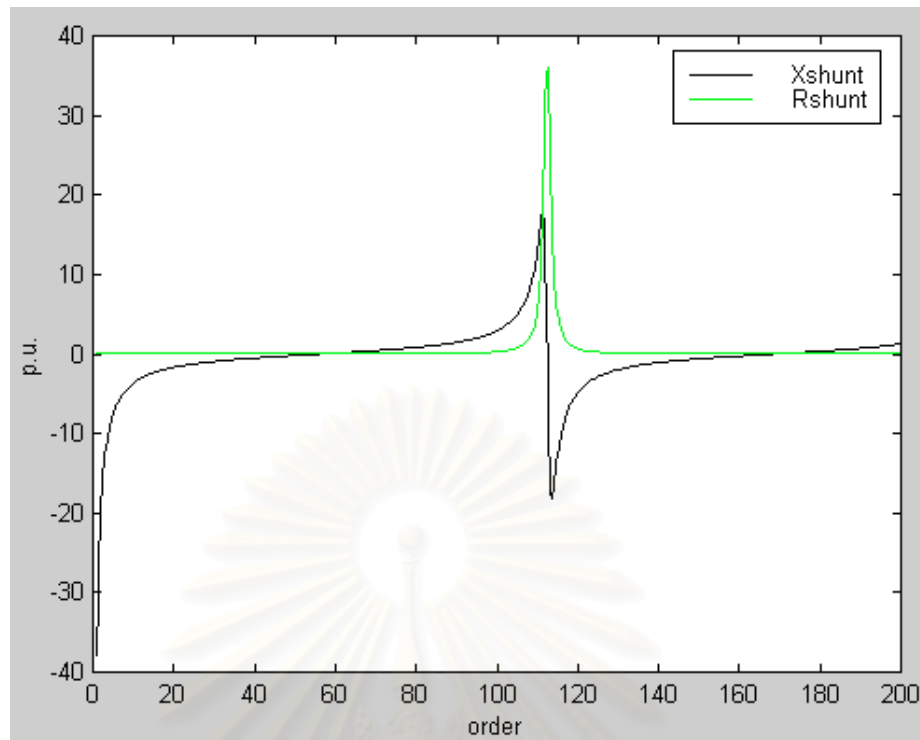
$$\text{ที่ } h = 27 \quad \text{ความยาวคลื่น} = 957 \text{ km เป็นความถี่ที่ quarter wave length}$$

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของสายส่งเมื่อเลือกใช้แบบจำลองต่างๆ

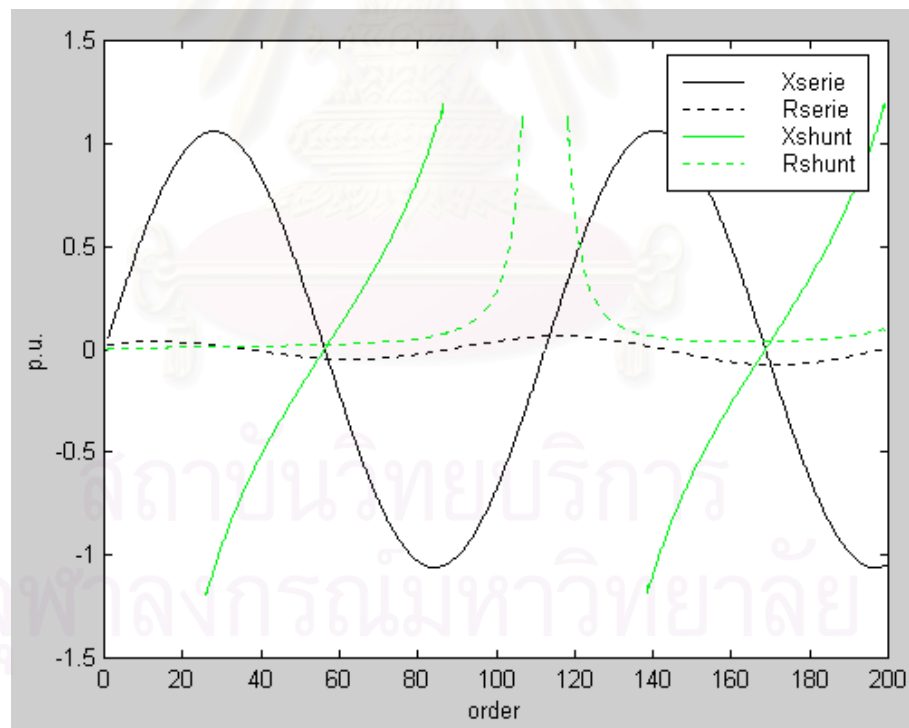
H5			
Lumped PI		Distributed PI	
Real	imag	Real	imag
0.030541	0.295800	0.029751	0.291981
	0.131975	0.000055	0.132840
H17			
Lumped PI		Distributed PI	
Real	imag	Real	Imag
0.0516027	1.00572	0.037098	0.861461414
	0.448715	0.002092903	0.48580609
H29			
Lumped PI		Distributed PI	
Real	imag	Real	Imag
0.065689	1.71564	0.018600249	1.058018788
	0.765455	0.011833788	0.992769517



รูปที่ 2.25 ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำอนุกรมในสายส่ง



รูปที่ 2.26 ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำขนานในสายส่ง



รูปที่ 2.27 ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำในสายส่ง

4 ตัวเก็บประจุและตัวกรองฮาร์มอนิก [14]

โดยปกติตัวเก็บประจุและตัวกรองฮาร์มอนิก จะเกิดจาก ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และอินดักเตอร์ต่อวงจรกันในรูปแบบต่างๆ และแบบจำลองของแต่ละอุปกรณ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกจะเป็นดังต่อไปนี้

แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกของตัวเก็บประจุ

$$X_{c,h} = \frac{X_{c,1}}{h} \quad y_{c,h} = h * y_{c,1} \quad (2.68)$$

เมื่อ $y_{c,1} = 1 / X_{c,1}$

แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกของอินดักเตอร์คือ

$$X_{L,h} = h * X_{L,1} \quad y_{L,h} = \frac{y_{L,1}}{h} \quad (2.69)$$

เมื่อ $y_{L,1} = 1 / X_{L,1}$

แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกของตัวต้านทาน จะไม่คิดผลของ skin effect

$$R_h = R \quad (2.70)$$

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

ระเบียบวิธีการประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Harmonic State Estimation, HSE) จะมีกระบวนการคิดที่ตรงกันข้ามกับการคิดฮาร์โมนิกโพลาร์ หรือ โหลดโพลาร์ กล่าวคือ ฮาร์โมนิกโพลาร์ ใช้ข้อมูลจาก พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ และแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกมาทำการคำนวณหาค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิก ซึ่งก็คือแรงดันทั้งขนาด และมุม ของทุกๆ บัส ก่อนที่จะนำไปคำนวณหากระแส, กำลังจริง, กำลังปรากฏ, กำลังสูญเสียในแต่ละอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าต่อไป

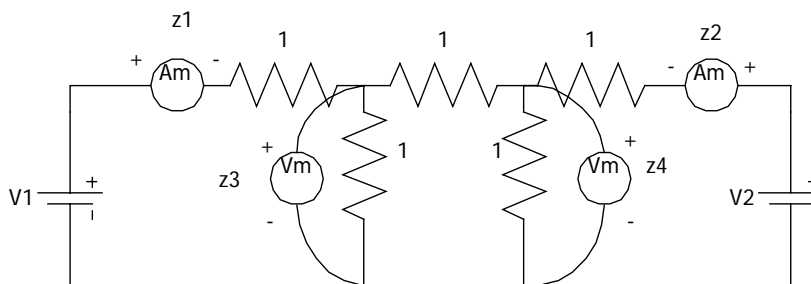
สำหรับ HSE ข้อมูลที่จะต้องทำการป้อนให้แก่โปรแกรม คือข้อมูลที่มาจากรีโอด ซึ่งสามารถมีได้หลายแบบ ทั้งแรงดันที่บัสต่างๆ กระแสที่ฉีดเข้าบัส และหรือ กระแสที่ไหลในแต่ละอุปกรณ์ จากนั้นจึงใช้ข้อมูลที่มีอยู่จากรีโอด ทำการคำนวณหาตัวแปรสเททฮาร์โมนิก

เนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการประมาณค่าตัวแปรสเทททั่วไป อันได้แก่ ระเบียบวิธีประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด (Least Square Estimator; LSE) และ ระเบียบวิธีวิเคราะห์ระบบสมการในขั้นต้น (Observability Analysis; OA) ส่วนที่สองคือทฤษฎีของ ระเบียบวิธีประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Harmonic State Estimation; HSE) อันได้แก่ รูปแบบของตัวแปรที่ทำการวัดมา รูปแบบของสมการที่เกิดขึ้น การเพิ่มจุดวัดเสมือนในระบบสมการ และการไหลของกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์ต่างๆ

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการประมาณค่าตัวแปรสเทท

3.1.1 ระเบียบวิธีประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด (Least Square Estimator; LSE) [1,3]

ในการประมาณค่าตัวแปรสเททในรูปแบบใดก็ตาม สามารถเกิดเหตุการณ์ที่ไม่มีชุดตัวแปรสเททใดเลยที่สามารถทำให้สมการการวัดที่ได้มา เป็นจริงพร้อมกันทุกๆ สมการ ซึ่งสามารถจะแสดงให้เห็นได้โดยง่ายจากวงจรดังต่อไปนี้ [3]



รูปที่ 3.1 วงจรไฟฟ้าอย่างง่าย

จากการใช้ซูเปอร์โพสิชัน สามารถเขียนสมการให้อยู่ดังรูปดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} z1 \\ z2 \\ z3 \\ z4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5/8 & -1/8 \\ -1/8 & 5/8 \\ 3/8 & 1/8 \\ 1/8 & 3/8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ซึ่ง V1 และ V2 จะเป็นตัวแปรสเตทที่ต้องการหา แต่จากเมตริกซ์สมการจะเห็นได้ง่ายๆ ว่า ถ้าทำการวัด z1 ได้ 2 A, z2 ได้ -1.9 A และ z3 ได้ -4.95 V จะไม่มีค่า V1 และ V2 ที่ทำให้สมการ (3.1) เป็นจริงได้ ดังนั้นจึงทำการบวกค่าผิดพลาดของเครื่องมือวัดลงไปในทุกสมการการวัด

$$\begin{bmatrix} z1 \\ z2 \\ z3 \\ z4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5/8 & -1/8 \\ -1/8 & 5/8 \\ 3/8 & 1/8 \\ 1/8 & 3/8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \\ e4 \end{bmatrix} = [z] = [H][x] + [e] \quad (3.2)$$

โดยปกติตัวแปรสเตทจะถูกแทนด้วยตัว x และตัวแปรที่ทำการวัดจะถูกแทนด้วยตัว z เสมอ ทำการสร้างฟังก์ชันเป้าหมาย เพื่อที่จะทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุดต่อไป

$$f = \sum e^2 = e1^2 + e2^2 + e3^2 + e4^2 \quad (3.3)$$

ทำการหาค่าต่ำสุดโดยการดิฟเฟอเรนเชียลแล้วให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{\partial f}{\partial x1} = 2 \left(e1 \frac{\partial e1}{\partial x1} + e2 \frac{\partial e2}{\partial x1} + e3 \frac{\partial e3}{\partial x1} + e4 \frac{\partial e4}{\partial x1} \right) = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial x2} = 2 \left(e1 \frac{\partial e1}{\partial x2} + e2 \frac{\partial e2}{\partial x2} + e3 \frac{\partial e3}{\partial x2} + e4 \frac{\partial e4}{\partial x2} \right) = 0$$

ทำการจัดรูปแบบสมการใหม่

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial e1}{\partial x1} & \frac{\partial e2}{\partial x1} & \frac{\partial e3}{\partial x1} & \frac{\partial e4}{\partial x1} \\ \frac{\partial e1}{\partial x2} & \frac{\partial e2}{\partial x2} & \frac{\partial e3}{\partial x2} & \frac{\partial e4}{\partial x2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \\ e4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\text{จาก } \begin{bmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \\ e4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z1 \\ z2 \\ z3 \\ z4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h11 & h12 \\ h21 & h22 \\ h31 & h32 \\ h41 & h42 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix}$$

จะสามารถเขียนตัวแปรสแตทในรูปของตัวแปรที่ถูกวัดได้ดังต่อไปนี้

$$[H^t] * ([z] - [H] * [x]) = 0 \quad (3.5)$$

$$[x] = \{[H^t] * [H]\}^{-1} * [H^t] * [z] \quad (3.6)$$

และสำหรับระบบการวัดที่มีเครื่องมือวัดอยู่หลายแบบมีความทันสมัย เก่า ใหม่ ไม่เท่ากัน กล่าวคือ เครื่องมือวัดบางตัว มีความถูกต้อง แม่นยำ สูงกว่าตัวอื่นๆ ก็สามารถเพิ่มเมตริกซ์ W เข้าไปถ่วงน้ำหนักในระบบสมการ สมการเป้าหมายจะเปลี่ยนเป็น

$$f = \sum e^2 = w1 * e1^2 + w2 * e2^2 + w3 * e3^2 + w4 * e4^2 \quad (3.7)$$

และสมการ (3.6) เมื่อเพิ่มผลของการถ่วงน้ำหนักเครื่องมือวัดเข้าไปจะเป็น

$$[x] = \{[H^t] * [w] * [H]\}^{-1} * [H^t] * [w][z] \quad (3.8)$$

โดย

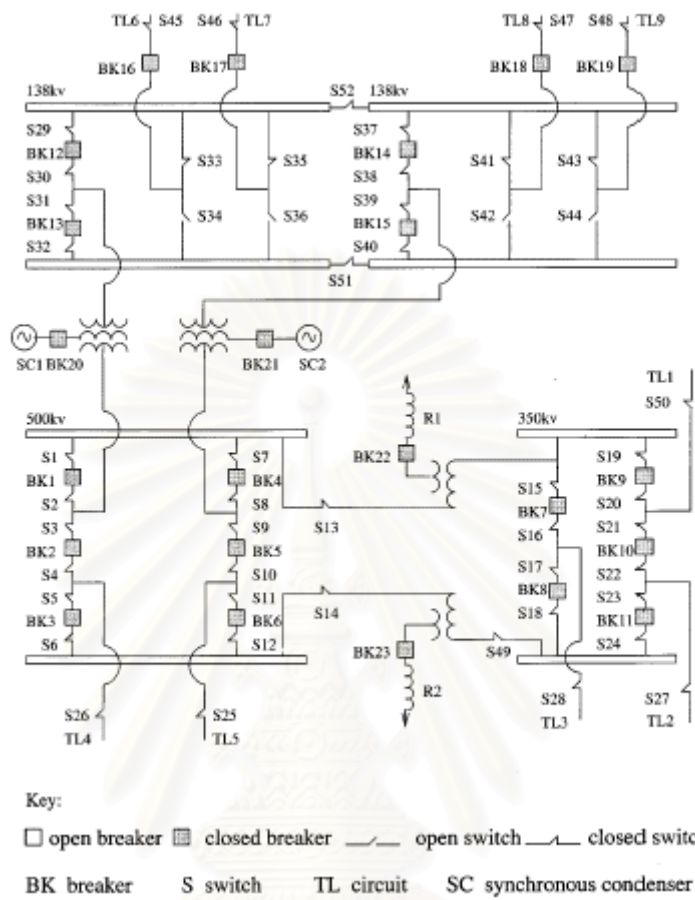
$$[w] = \begin{bmatrix} w1 & & & \\ & w2 & & \\ & & w3 & \\ & & & w4 \end{bmatrix}$$

3.1.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์ระบบในขั้นต้น (Observability Analysis; OA) [1]

โดยปกติแล้ว ก่อนที่จะเริ่มการคำนวณการประมาณค่าตัวแปรสแตท จะมีการวิเคราะห์ระบบในขั้นต้นก่อนเสมอ ซึ่งการวิเคราะห์ระบบในขั้นต้น มีหลายแบบด้วยกัน สามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

- 1) การตรวจสอบหาข้อมูลการวัดที่ผิดพลาด (Bad data detection) มาจากแนวความคิดที่ว่า ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดอาจเกิดความผิดพลาดได้ และต้องการที่จะตัดข้อมูลจากเครื่องวัดตัวนั้นออกไปจากระบบการคำนวณ HSE โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลจากเครื่องวัดแบบอนาล็อก ความผิดพลาดในการอ่านค่าบวกเป็นค่าลบ อาจเกิดได้โดยง่าย
- 2) การตรวจสอบแบบจำลองของระบบไฟฟ้า มาจากแนวความคิดที่ว่า สถานะของสวิตช์และเบรกเกอร์ในระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ยากต่อการกำหนดเจาะจง ว่าในขณะเวลาที่สนใจ สวิตช์ตัวใดปิดหรือเปิดวงจรอยู่ จึงมีการ

พัฒนาอัลกอริทึม เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของสวิตช์และเบรกเกอร์แต่ละตัว โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องวัดขึ้น



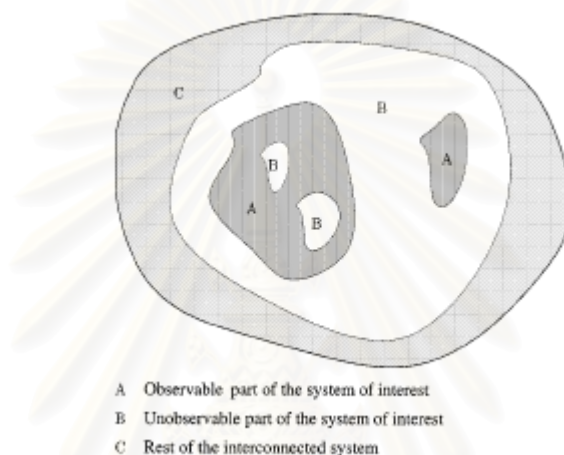
รูปที่ 3.2 ระบบไฟฟ้าที่มีสวิตช์และเบรกเกอร์

3) เป็นระเบียบวิธีในการวิเคราะห์ระบบสมการเชิงเส้นว่าสามารถหาคำตอบได้หรือไม่ และถ้าระบบสมการหาคำตอบไม่ได้ ก็จะสามารถหากลุ่มย่อยของสมการที่สามารถหาคำตอบได้ออกมา โดยปกติแล้วระบบสมการเชิงเส้นบางระบบจะไม่สามารถหาคำตอบได้ ซึ่งเรียกว่าเกิดความไม่พอเพียง ถึงแม้ว่าระบบสมการนั้นจะมีจำนวนสมการมากกว่าหรือเท่ากับตัวแปรก็ตาม

สำหรับในงานวิจัยฉบับนี้ จะวิเคราะห์เฉพาะในกรณีที่ 3 การวิเคราะห์ OA จะเริ่มต้นจากแทนพจน์เมตริกซ์ H ที่มีค่าด้วยเลข 1 โดยยังไม่สนใจว่าค่าจริงๆ จะเป็นอะไร เพื่อนำเมตริกซ์ H มาวิเคราะห์ความพอเพียงของระบบสมการเสียก่อน

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

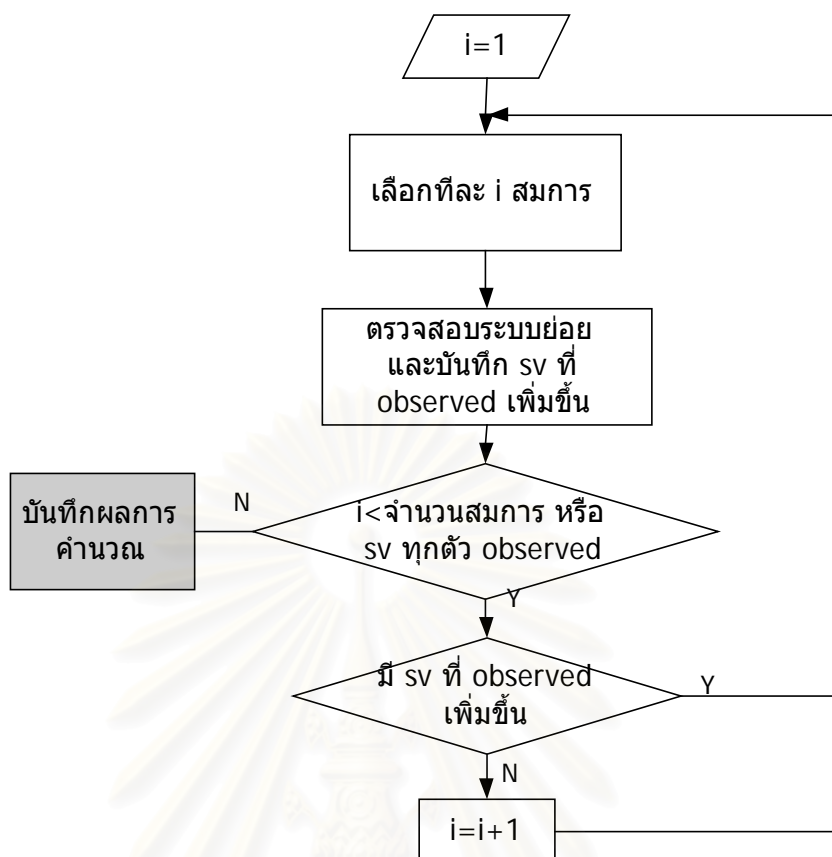
จากระบบสมการข้างต้น สามารถสังเกตได้ว่า ระบบสมการนี้ถ้าทำการหาค่าตามวิธีปกติ จะหาคำตอบไม่ได้แน่นอน เพราะระบบสมการไม่มีความพอเพียง แต่ถ้าเลือกเฉพาะสมการของ I_1 , I_2 และ I_3 ออกมาจะสามารถหาคำตอบได้ ซึ่งเป็นที่มาของ ระเบียบวิธีประมาณค่าตัวแปรสเตทฮาร์มอนิกบางส่วน (Partial Harmonic State Estimation, Partial HSE)



รูปที่ 3.3 สถานะของระบบไฟฟ้าในระเบียบวิธี HSE

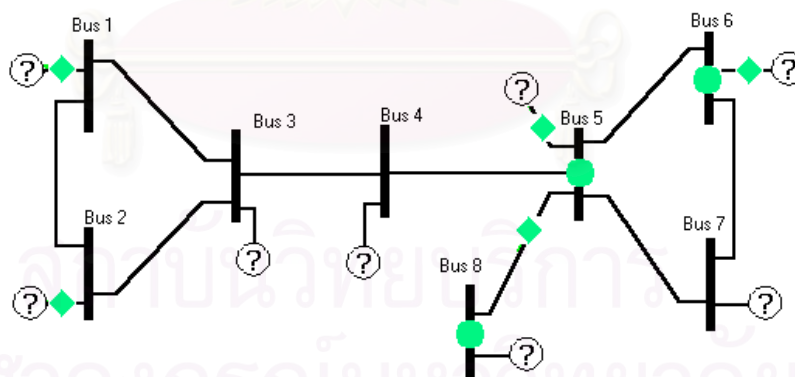
โดยปกติแล้ว ถ้าตัวแปรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระบบสมการ ก็จะไม่เกิดความไม่พอเพียงในระบบสมการ แต่เนื่องจากหลักการการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ต้องการจะประหยัดจำนวนเครื่องมือวัด โดยการติดตั้งตัวเครื่องให้น้อยและใช้ช่องสัญญาณของเครื่องมือให้มากทำให้ระบบสมการสามารถเกิดความไม่พอเพียงได้ง่าย

หลักการของการวิเคราะห์ OA คือการแบ่งระบบสมการออกเป็นกลุ่มๆ โดยทำการกระจายสมการแบบรากต้นไม้ เพื่อวิเคราะห์ว่ากลุ่มย่อยใด ทำให้เกิดตัวแปรสเตท (state variable, sv) ที่หาคำตอบได้ (observed variable) ขึ้นมา โดยการเปรียบเทียบจำนวนสมการกับจำนวนตัวแปรที่ยังหาคำตอบไม่ได้ (unobserved variable) และดูการกระจายของพจน์ในเมตริกซ์การวัดว่าครอบคลุมคุณระบบสมการทั้งหมดหรือไม่



รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานของการวิเคราะห์ระบบในขั้นตอน

ตัวอย่างระเบียบวิธี OA



รูปที่ 3.5 ระบบไฟฟ้าเพื่อการวิเคราะห์ระบบในขั้นตอน

ทำการกระจายสมการการวัดออกมาในรูปของตัวแปรสเตที่ได้เป็น

ตัวแปรสเต 1 2 3 4 5 6 7 8

$$[h] = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ระบบสมการนี้มีทั้งหมด 5 สมการ ดังนั้นสามารถกระจายออกมาได้เป็น

เลือกทีละ 1 สมการ 1 ,2 ,3 ,4 ,5 ,

เลือกทีละ 2 สมการ 1 2 ,1 3 ,1 4 ,1 5 ,

2 3 ,2 4 ,2 5 ,

3 4 ,3 5 ,

4 5 ,

เลือกทีละ 3 สมการ 1 2 3 ,1 2 4 ,1 2 5 ,

1 3 4 ,1 3 5 ,

1 4 5 ,

2 3 4 ,2 3 5 ,

2 4 5 ,

3 4 5 ,

เลือกทีละ 4 สมการ 1 2 3 4 ,1 2 3 5 ,

1 2 4 5 ,

1 3 4 5 ,

2 3 4 5 ,

เลือกทีละ 5 สมการ 1 2 3 4 5 ,

ผลการวิเคราะห์ระบบข้างต้น คือ

- subsystem 1 contain z4

this subsystem makes sv 7 become observed

- subsystem 2 contain z3

this subsystem makes sv 4 become observed

Redundancy equa {but can include} -> z5

observed SV is x4 x5 x6 x7 x8

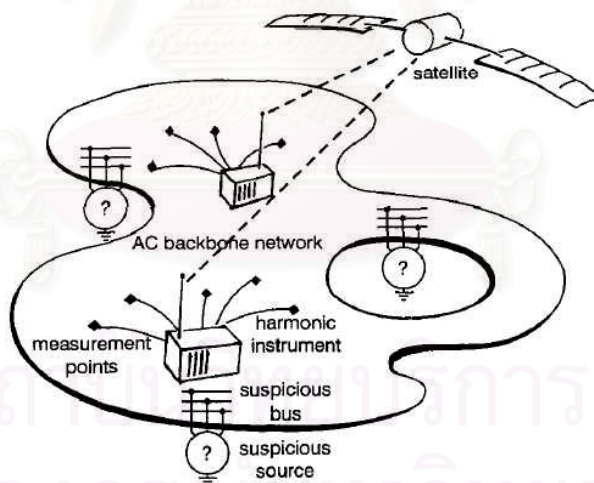
observed equa is z3 z4 z5

3.2 ทฤษฎีการประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

3.2.1 ระบบการวัดของ HSE

สำหรับ HSE นี้เครื่องมือวัดทุกตัวจำเป็นจะต้องมีจุดเทียบทางเวลาเดียวกัน เพราะที่ความถี่ฮาร์โมนิก ระบบไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงของทิศทางการไหลของพาวเวอร์เร็วและมีทิศทางที่ไม่แน่นอน ซึ่งทำให้ระบบการวัดที่ไม่มีจุดเทียบทางเวลาเดียวกัน วัดค่าออกมาได้ผิดพลาดเกินขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงมีการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า GPS (Global position system) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเป็นตัวเทียบทางเวลาให้ข้อมูลเฟสเซอร์จากเครื่องวัดเครื่องต่างๆ ที่กระจายอยู่ในระบบไฟฟ้าสามารถเปรียบเทียบมุมเฟสกันได้

หลักการทำงานของ GPS จะเป็นการรับสัญญาณเวลาจากตัวส่งสัญญาณ ซึ่งอาจจะเป็นดาวเทียมสื่อสารที่มีอยู่ทั่วไป หรืออาจจะเป็นเครื่องส่งสัญญาณแบบอื่นและนำสัญญาณเวลาที่รับมาจากตัวส่งสัญญาณ เป็นตัวเปรียบเทียบมุมเฟส ซึ่งในการคำนวณฮาร์โมนิกที่ 19 หนึ่งคาบของสัญญาณจะประมาณ 1 msec ดังนั้นสัญญาณเวลาจากตัวส่งสัญญาณควรมีความละเอียดสูงราวๆ 0.1 msec สำหรับค่าคลาดเคลื่อนของมุมเฟสน้อยกว่า 10 เฟอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.6 ระบบการวัด

รูปแบบของข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด แบ่งเป็น 3 ชนิด ด้วยกันคือ

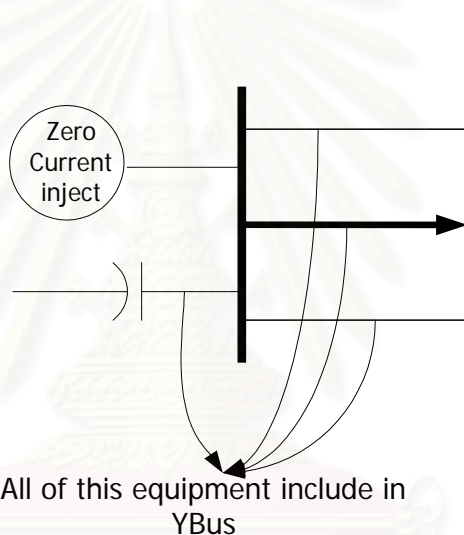
1. แรงดันทั้งขนาดและมุมที่บัส ที่ทำการวัด
2. กระแสที่ฉีดเข้าบัส
3. กระแสที่ไหลในสายส่ง หรือ หม้อแปลง

3.2.2 จุดวัดเสมือน

โดยปกติ ที่บางบัสสามารถจะสร้างจุดวัดเสมือนได้ เช่น บัสที่ไม่มี unknown load ต่ออยู่เลย ก็สามารถสรุปได้ว่า บัสนั้นมี $I_{inj,i} = 0$ และเพิ่มจุดวัดเสมือนเข้าไปในสมการการวัดได้ ซึ่งบัสที่มีลักษณะดังกล่าวนี้ได้แก่ บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิก และบัสของสถานี สวิตซ์ชิง หรือบัสที่รู้ค่าของโหลดแล้ว

และสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$[I_{inj,i} = 0] = [Y_{i1} \quad Y_{i2} \quad \dots \quad Y_{in}] * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.7 จุดวัดเสมือน

3.2.3 รูปแบบสมการและการคำนวณ

จากตัวแปรที่ทำการวัดมา ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 แบบด้วยกัน ได้แก่ แรงดันที่บัส กระแสที่ฉีดเข้าบัส และ กระแสที่ไหลในอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัสต่างๆ ทำการเขียนสมการของตัวแปรที่ทำการวัดมาในรูปของตัวแปรสเตรทฮาร์โมนิกได้ดังต่อไปนี้

1. แรงดันที่บัส ซึ่งก็สามารถแทนค่าเข้าไปในเมตริกซ์สมการได้โดยอัตโนมัติอยู่แล้ว เพราะเป็นการวัดค่าตัวแปรสเตรทฮาร์โมนิกมาโดยตรง
2. กระแสที่ฉีดเข้าสู่บัส โดยปกติในแอดมิตแตนซ์บัสเมตริกซ์ของระบบจะรวมผลของทุกอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ยกเว้นที่ unknown load อยู่แล้ว จากความสัมพันธ์ของ Y_{bus}

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^{abc} & Y_{12}^{abc} & \cdots & Y_{1N}^{abc} \\ Y_{21}^{abc} & Y_{22}^{abc} & \cdots & Y_{2N}^{abc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1}^{abc} & Y_{N2}^{abc} & \cdots & Y_{NN}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{abc} \\ V_2^{abc} \\ \vdots \\ V_N^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{abc} \\ I_2^{abc} \\ \vdots \\ I_N^{abc} \end{bmatrix}$$

โดยที่

Y_{ii}^{abc} คือ เมตริกซ์ย่อยของ Self-admittance ของบัสที่ i

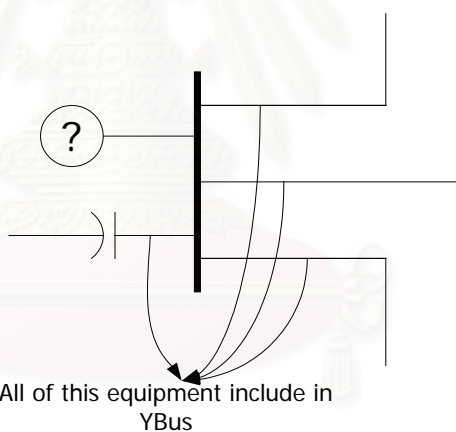
Y_{ij}^{abc} คือ เมตริกซ์ย่อยของ Mutual-admittance ระหว่างบัสที่ i กับบัสที่ j

$V_i^{abc} = [\dot{V}_i^a \ \dot{V}_i^b \ \dot{V}_i^c]^t$ คือ เวกเตอร์แรงดันบัสย่อยของบัสที่ i

$I_i^{abc} = [i_i^a \ i_i^b \ i_i^c]^t$ คือ เวกเตอร์กระแสบัสย่อยของบัสที่ i

ดังนั้น เขียนตัวแปรที่วัดในรูปของตัวแปรสเกล ได้ว่า

$$I_{inj,i} = [Y_{i1} \ Y_{i2} \ \cdots \ Y_{in}] * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.8 แสดงแบบจำลองของบัสและอุปกรณ์ที่ต่ออยู่

แต่ละพจน์ในสมการที่ (3.10) กล่าวแทนถึงกระแสทั้งสามเฟส ซึ่งต้องนำมาแยกคิดเป็นกระแสแต่ละเฟสต่อไป และกระแสแต่ละเฟสก็ต้องแยกออกเป็น ค่าจริง และ ค่าจินตภาพ เพราะถ้าโดยปกติแล้ว ต้องการจะจัดระบบสมการให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ของจำนวนจริง เนื่องจากระบบสมการที่อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน จะมีความยุ่งยากในการแก้สมการมากกว่า และกินเวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มากกว่า

จากสมการที่ (3.10). นำมาเขียนเป็นสมการกระแสเฟส A ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_{inj,i,a,R} \\ I_{inj,i,a,I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii,aa,R} & -Y_{ii,aa,I} & Y_{ii,ab,R} & -Y_{ii,ab,I} & Y_{ii,ac,R} & -Y_{ii,ac,I} & \cdots & Y_{in} \\ Y_{ii,aa,I} & Y_{ii,aa,R} & Y_{ii,ab,I} & Y_{ii,ab,R} & Y_{ii,ac,I} & Y_{ii,ac,R} & \cdots & Y_{in} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{i,a,R} \\ V_{i,a,I} \\ V_{i,b,R} \\ V_{i,b,I} \\ V_{i,c,R} \\ V_{i,c,I} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3. กระแสที่ไหลในอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างบัส

โดยปกติอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัสอันได้แก่ สายส่ง และหม้อแปลง สามารถจัดให้อยู่

ในสมการดังรูปแบบต่อไปนี้
$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ถ้ากระแสที่ทำการวัดมาคือ I_S สามารถเขียนสมการกระแสของเฟส A ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_{S,a,R} \\ I_{S,a,I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa,R} & -A_{aa,I} & A_{ab,R} & -A_{ab,I} & A_{ac,R} & -A_{ac,I} & B_{aa,R} & -B_{aa,I} & B_{ab,R} & -B_{ab,I} & B_{ac,R} & -B_{ac,I} \\ A_{aa,I} & A_{aa,R} & A_{ab,I} & A_{ab,R} & A_{ac,I} & A_{ac,R} & B_{aa,I} & B_{aa,R} & B_{ab,I} & B_{ab,R} & B_{ac,I} & B_{ac,R} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{S,a,R} & V_{S,a,I} & V_{S,b,R} & V_{S,b,I} & V_{S,c,R} & V_{S,c,I} & V_{R,a,R} & V_{R,a,I} & V_{R,b,R} & V_{R,b,I} & V_{R,c,R} & V_{R,c,I} \end{bmatrix}^t \quad (3.13)$$

จากรูปแบบของสมการที่ผ่านข้างต้นคือการเขียนตัวแปรที่ทำการวัดมาในรูปแบบของตัวแปรสเตตฮาร์โมนิก สำหรับการคำนวณสเตตเอสติเมชันนั้น จะเริ่มจากทำการตั้งเมตริกซ์สมการโดยใช้ข้อสมมติฐานที่ว่า แรงดันที่ทำการวัดมานั้นมีค่าถูกต้อง ไม่จำเป็นต้องไปทำการเฉลี่ยความผิดพลาดของเครื่องมือวัดกับสมการกระแสอีก ซึ่งจะเป็นการลดจำนวนพจน์ของเมตริกซ์ในระบบสมการ และทำให้โปรแกรมมีความเร็วในการคำนวณเพิ่มขึ้นด้วย

การจัดระบบสมการสำหรับการคำนวณ HSE เริ่มต้นจากการแบ่งกลุ่มของแรงดันที่บัสต่างๆ ในระบบออกเป็นสองส่วนคือส่วน ที่ทำการวัดมา และส่วนที่ไม่ได้ทำการวัดมา จากนั้นทำการสร้างเมตริกซ์ H โดยการแทนค่าลงไปตามพจน์ต่างๆ ตามที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในเรื่องของการเขียนสมการกระแสในรูปแบบของตัวแปรสเตตฮาร์โมนิก

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = [H_1 \quad H_2] * \begin{bmatrix} V_{\text{unknown}} \\ V_{\text{measure}} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

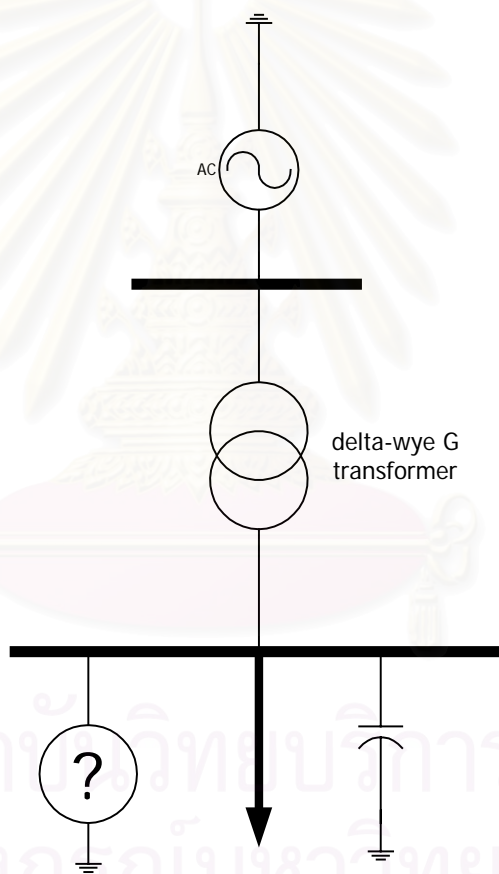
จากนั้นทำการปรับระบบสมการใหม่ให้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} - H_2 * V_{\text{measure}} = H_1 * V_{\text{unknown}} == [Z] = [H_1] * [V_{\text{unknown}}] \quad (3.15)$$

จากทฤษฎีของการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด เมื่อไม่คิดผลการถ่วงน้ำหนักของเครื่องมือวัดแต่ละเครื่อง

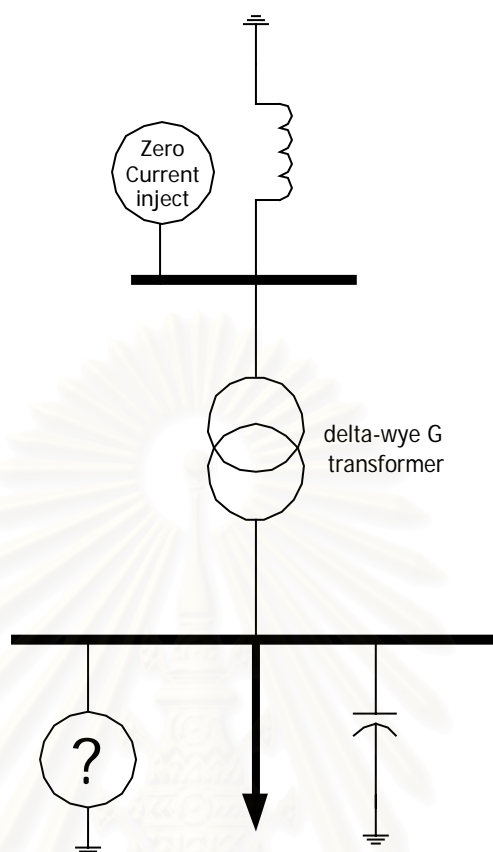
$$[V_{\text{unknown}}] = (H^t * H)^{-1} * H^t * [Z] \quad (3.16)$$

ตัวอย่างการจัดรูปสมการ โดยปกติในแบบจำลองของระบบที่ความถี่ฮาร์โมนิกจะตัดส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกไป กลายเป็นอิมพีแดนซ์ต่อลงกราวด์ ทำให้สามารถเพิ่มจุดวัดเสมือนที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังเช่นระบบไฟฟ้าต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 (a) ระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (แบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน)

และเมื่อมองที่ความถี่ฮาร์โมนิกส ระบบไฟฟ้าข้างต้นจะถูกจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 (b) ระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์โมนิก)

จะเห็นได้ว่า เฉพาะที่ความถี่ฮาร์โมนิก ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะถูกแทนด้วยอิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดิน ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มจุดวัดเสมือนที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟ ในระบบดังรูปที่ 3.9(b) ทำการวัดเพียงแรงดันที่บัสใดบัสหนึ่ง ก็สามารถหาระบบสมการที่มีความพอเพียงได้แล้ว ดังตัวอย่างต่อไปนี้ เมื่อเลือกทำการวัดแรงดันที่บัส 2 จะได้ว่า

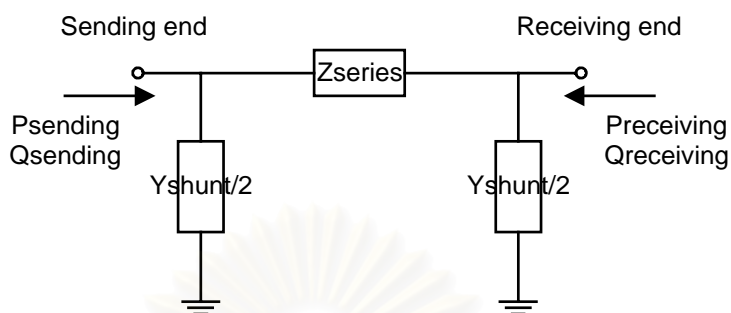
$$[o] = [H_1 \quad H_2] * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \text{ และจะสามารถหา } V_1 \text{ ที่ยังไม่รู้ได้จากสมการ}$$

$$[V_1] = H_1^{-1} * \{ [o] - H_2 * V_{\text{measure}} \} \quad (3.17)$$

เพราะว่าในกรณีนี้ระบบสมการมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปรพอดี จึงไม่ต้องทำการเฉลี่ยความผิดพลาดของเครื่องมือวัด กล่าวคือ $(H_1^t * H_1)^{-1} * H_1^t = H_1^{-1}$

3.2.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

(1) การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกำลัง (Line power flow)



รูปที่ 3.10 แบบจำลองแบบ PI ของสายส่งแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้า

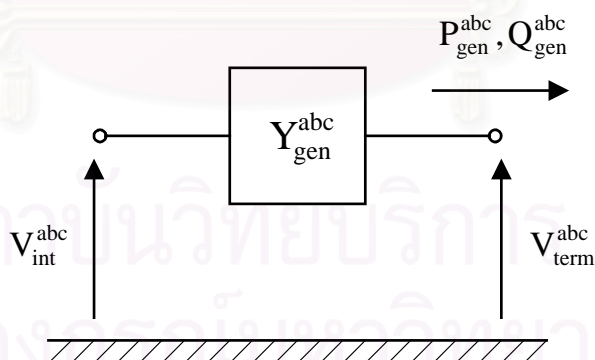
สมการของกำลังไฟฟ้าของสายส่งกำลังที่ปลายส่ง (Sending end)

$$P_{\text{sending}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{sending}}^{\text{abc}} = V_{\text{sending}}^{\text{abc}} \left[\frac{Y_{\text{shunt}}^{\text{abc}}}{2} V_{\text{sending}}^{\text{abc}} + (Z_{\text{series}}^{\text{abc}})^{-1} (V_{\text{sending}}^{\text{abc}} - V_{\text{receiving}}^{\text{abc}}) \right]^* \quad (3.18)$$

สมการของกำลังไฟฟ้าของสายส่งกำลังที่ปลายรับ (Receiving end)

$$P_{\text{receiving}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{receiving}}^{\text{abc}} = V_{\text{receiving}}^{\text{abc}} \left[\frac{Y_{\text{shunt}}^{\text{abc}}}{2} V_{\text{receiving}}^{\text{abc}} - (Z_{\text{series}}^{\text{abc}})^{-1} (V_{\text{sending}}^{\text{abc}} - V_{\text{receiving}}^{\text{abc}}) \right]^* \quad (3.19)$$

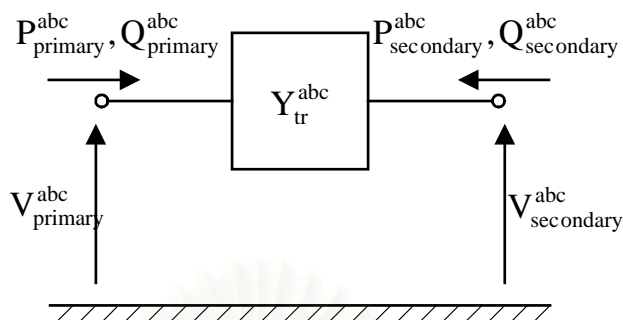
(2) การไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator power)



รูปที่ 3.11 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{\text{gen}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{gen}}^{\text{abc}} = V_{\text{term}}^{\text{abc}} \left[Y_{\text{gen}}^{\text{abc}} (V_{\text{int}}^{\text{abc}} - V_{\text{term}}^{\text{abc}}) \right]^* \quad (3.20)$$

(3) การไหลของกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer power)



รูปที่ 3.12 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า

สมการกำลังไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิหม้อแปลง

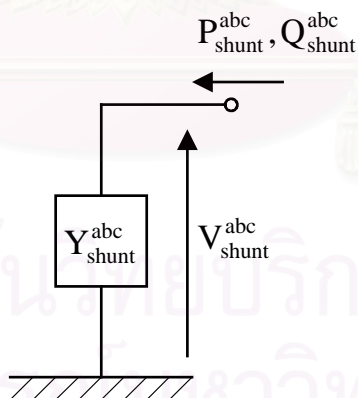
$$P_{\text{primary}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{primary}}^{\text{abc}} = V_{\text{primary}}^{\text{abc}} \left[Y_{\text{tr,pp}}^{\text{abc}} V_{\text{primary}}^{\text{abc}} + Y_{\text{tr,ps}}^{\text{abc}} V_{\text{secondary}}^{\text{abc}} \right]^* \quad (3.21)$$

สมการกำลังไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิหม้อแปลง

$$P_{\text{secondary}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{secondary}}^{\text{abc}} = V_{\text{secondary}}^{\text{abc}} \left[Y_{\text{tr,sp}}^{\text{abc}} V_{\text{primary}}^{\text{abc}} + Y_{\text{tr,ss}}^{\text{abc}} V_{\text{secondary}}^{\text{abc}} \right]^* \quad (3.22)$$

(4) การไหลของกำลังไฟฟ้าขององค์ประกอบขนาน (Shunt element power)

องค์ประกอบขนาน(Shunt elements) หมายถึง อุปกรณ์ที่ต่อขนานเข้ากับบัสโดยในที่นี่ ได้แก่ คาปาซิเตอร์แบงก์(Capacitor banks), ตัวกรองฮาร์มอนิกส์(Harmonic filters)



รูปที่ 3.13 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าขององค์ประกอบขนาน

$$P_{\text{shunt}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{shunt}}^{\text{abc}} = V_{\text{shunt}}^{\text{abc}} \left[Y_{\text{shunt}}^{\text{abc}} V_{\text{shunt}}^{\text{abc}} \right]^* \quad (3.23)$$

บทที่ 4

การพัฒนาโปรแกรม

จากหลักการวิเคราะห์การประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Harmonic State Estimation ,HSE) ของวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าทั้งที่อยู่ภายใต้สถานะสมดุลและสถานะไม่สมดุล โดยโปรแกรมจะมีอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้ากำลังไว้เพื่อให้ผู้ใช้เลือกสร้างแผนภาพเส้นเดียวตามต้องการ โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมบอร์แลนด์เดลไฟล์ เวอร์ชันที่ 5 ซึ่งในเวอร์ชันนี้ได้มีการปรับปรุงความสามารถเพิ่มขึ้นจากเวอร์ชันเก่ามากขึ้น ทำให้ง่ายและสะดวกในการใช้งาน ทั้งยังมีความรวดเร็วในการคำนวณ และการใช้คลาส Mcomplex และ MMatrix ที่รวบรวมฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับจำนวนเชิงซ้อนและเมตริกซ์ไว้ทำให้การคำนวณรวดเร็วและสะดวกยิ่งขึ้น

โครงสร้างของโปรแกรมแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ

- ส่วนป้อนข้อมูล เป็นส่วนที่ผู้ใช้สร้างระบบและป้อนข้อมูลที่ต้องการ
- ส่วนแสดงผล เป็นส่วนแสดงผลการคำนวณ ในรูปของรูปภาพ ตาราง และกราฟ

4.1 โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

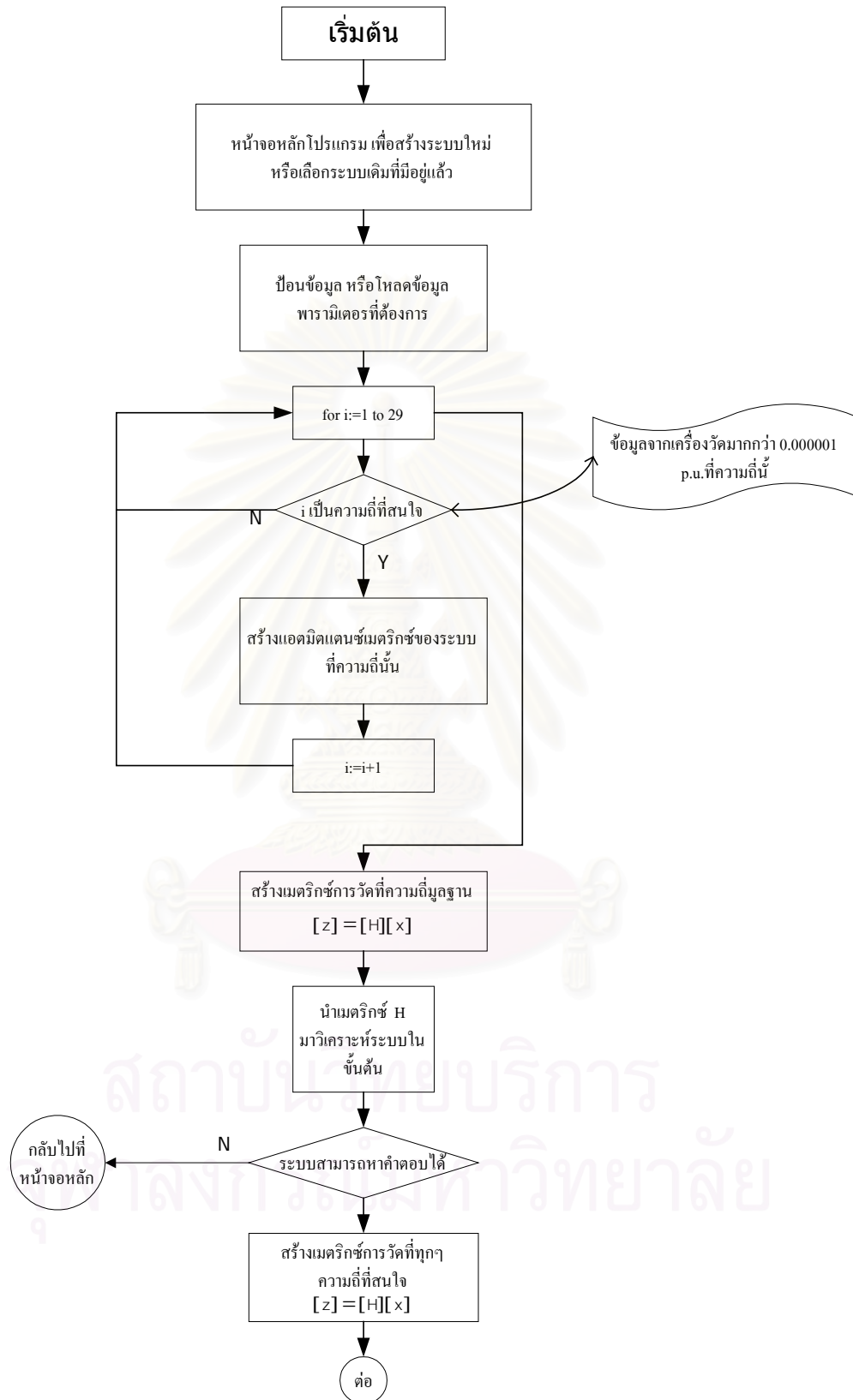
สำหรับการคำนวณฮาร์โมนิกสเททเอสตีเมชัน การคำนวณโดยตรงจะเป็นเรื่องยุ่งยากเพราะว่าขนาดของระบบสมการที่ใหญ่ และความยุ่งยากในการคำนวณเมตริกซ์ ดังนั้นจึงมีการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมา เพื่อความสะดวกและความถูกต้องในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

โครงสร้างของการคำนวณแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

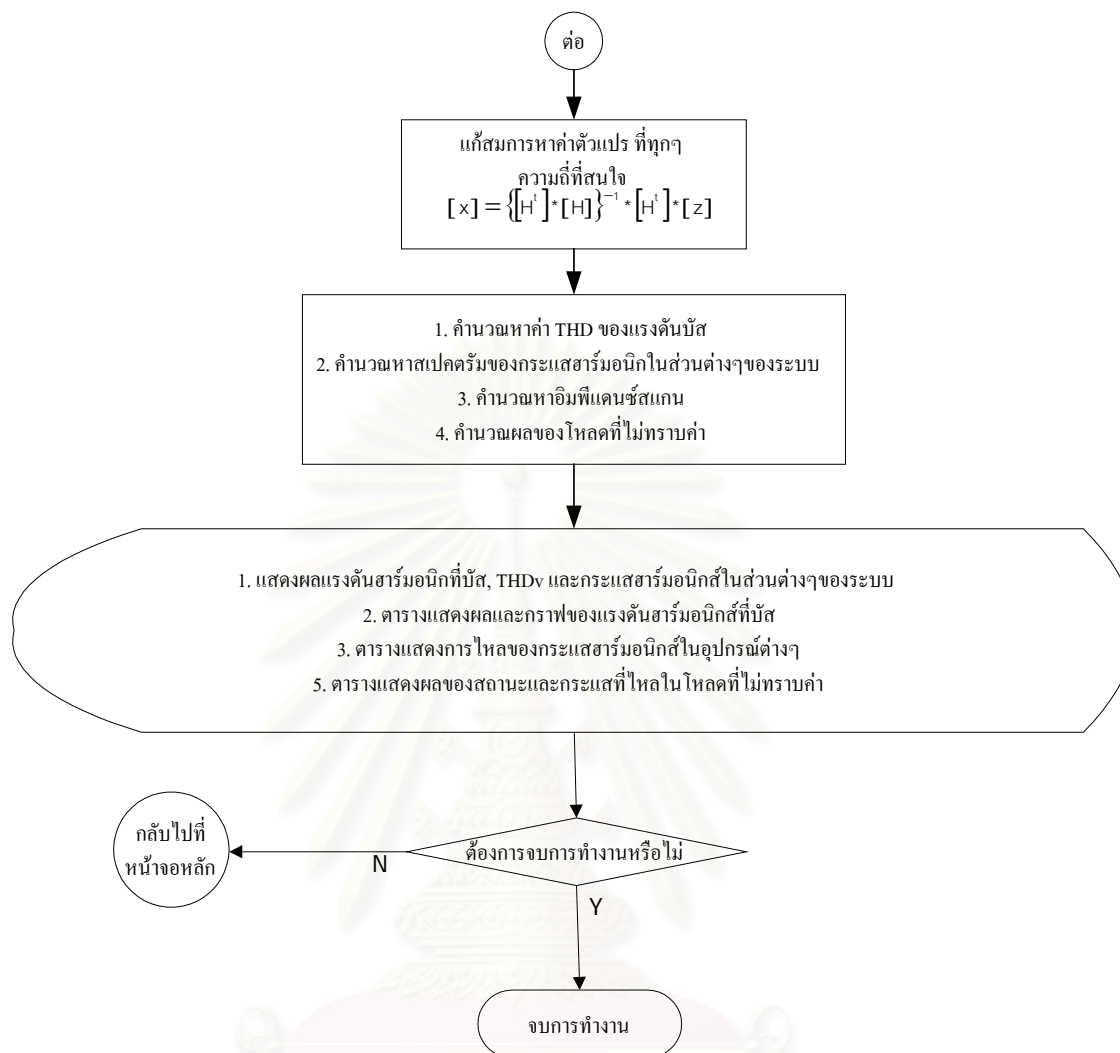
- การคำนวณการวิเคราะห์ระบบในขั้นต้น (Observability Analysis; OA) เป็นการคำนวณเพื่อตรวจสอบว่าในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีความพอเพียงหรือไม่ และสามารถใช้อข้อมูลจากเครื่องมือวัดตัวใดได้บ้าง
- การคำนวณการประมาณตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันและกระแส ในความถี่ต่างๆ ที่สนใจ ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณเพื่อหาค่าของโหลดที่ไม่รู้ค่า (unknown load) ต่อไป

โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยสรุปสามารถแสดงเป็นแผนผังการทำงานได้ตามรูปที่

4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 4.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม (ต่อ)

4.2 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม


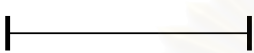

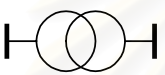
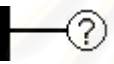

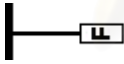


โปรแกรมได้จัดเตรียมอุปกรณ์พื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลังไว้ รวมทั้งอุปกรณ์ในส่วนที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ HSE สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรมแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1

อุปกรณ์ที่เตรียมไว้ในโปรแกรม คือ

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator)
- หม้อแปลงไฟฟ้า(Transformer)
- สายส่งกำลังไฟฟ้า(Transmission line)
- คาปาซิเตอร์แบงก์(Capacitor bank)
- ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบต่างๆ (Harmonic filter)

- เครื่องมือวัด (Measurement equipment)

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบไฟฟ้า

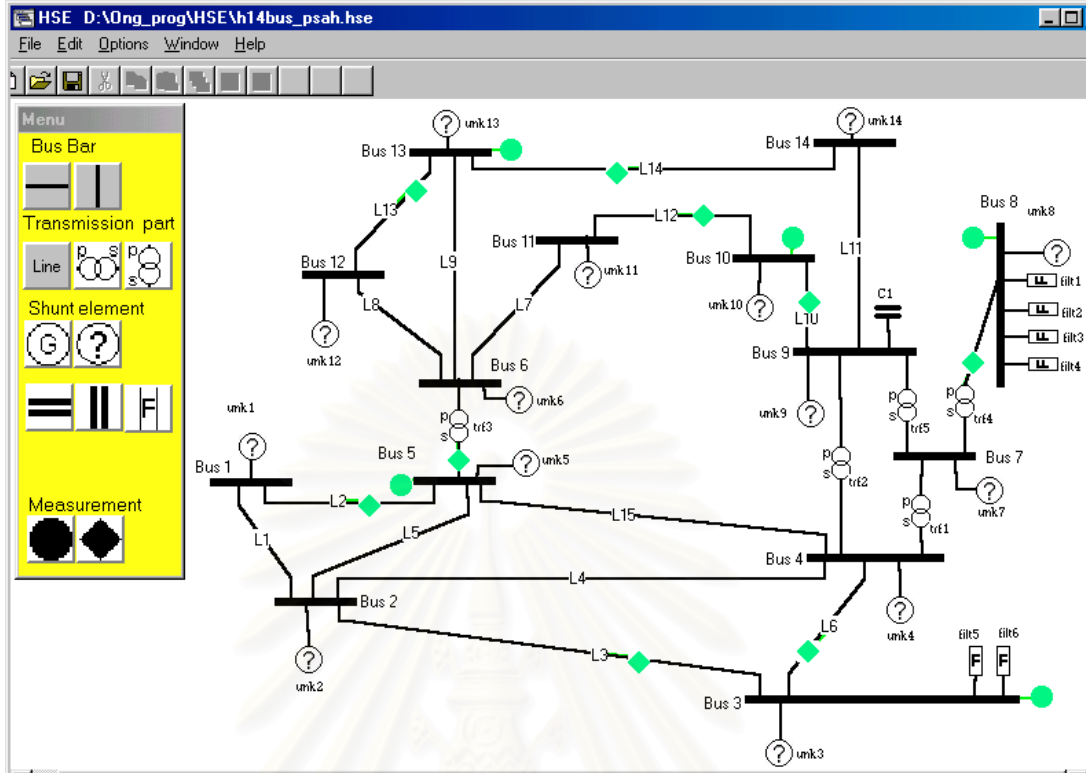
สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ในระบบ	ความหมายของสัญลักษณ์
	บัสบาร์
	สายส่งกำลังไฟฟ้า
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	หม้อแปลงไฟฟ้า
	โหลดที่ไม่รู้ค่า
	คาปาซิเตอร์แบงก์
	ตัวกรองฮาร์มอนิกส์
	โวลต์มิเตอร์
	แอมป์มิเตอร์

4.3 การป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม

วิธีการป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมเริ่มจากการสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยว(Single line diagram) ก่อน จากนั้นจึงป้อนข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัว

4.3.1 การสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยว

การสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยวขั้นตอนแรก คือ การสร้างหรือวางบัส ซึ่งเลือกเอาจากทูลบาร์ทางซ้ายมือดังในรูปที่ 4.3 จากนั้นจึงทำการเลือกอุปกรณ์ต่อเข้ากับบัสที่ได้สร้างไว้ และทำการป้อนข้อมูลที่จำเป็นในแต่ละอุปกรณ์

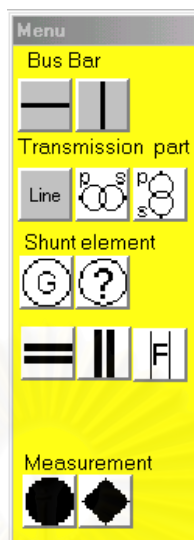


รูปที่ 4.3 หน้าจอหลัก(Main program) ให้ผู้ใช้เลือกสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบที่ต้องการ

อุปกรณ์ที่ได้สร้างไว้แล้วในแผนภาพเส้นเดี่ยวสามารถจะจัดการได้โดยมีเมนูลอยดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งคำสั่งที่สำคัญคือ การแก้ไข เปลี่ยนแปลงข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้า , การลบอุปกรณ์ออกจากระบบ , การดูผลการคำนวณของอุปกรณ์นั้นๆ , การขยายความยาวบัส และการหมุนอุปกรณ์ที่ต่อขนาน อาทิ ตัวเก็บประจุและตัวกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.4 เมนูลอย



รูปที่ 4.5 เมนูอุปกรณ์

การป้อนข้อมูลสำหรับแต่ละอุปกรณ์จำเป็นต้องทราบข้อมูลที่ต้องการก่อน ซึ่งข้อมูลที่ต้องการจะสอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณโดยได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 สิ่งสำคัญที่ต้องทราบก่อนการป้อนข้อมูลคือ ข้อมูลที่เป็นค่าอิมพีแดนซ์ ,แอดมิตแตนซ์ รีแอกแตนซ์ หรือซัสเซปแตนซ์ซึ่งในโปรแกรม โดยส่วนใหญ่จะระบุไว้ให้ป้อนค่าที่เป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะอ้างอิงกับค่ากำลังไฟฟ้าเบสที่เลือกไว้

อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะใช้ค่ากำลังไฟฟ้าเบส ตามค่ากำลังไฟฟ้าเบสของระบบ และใช้ค่าแรงดันเบสตามค่าแรงดันเบสของบัสที่อุปกรณ์นั้นๆ ต่ออยู่

4.3.2 บัส

ข้อมูลที่สามารถแก้ไข เปลี่ยนแปลงได้คือ ค่าแรงดันเบสของบัสนั้นๆ และค่ากำลังไฟฟ้าเบสของระบบ ซึ่งการแก้ไขค่ากำลังไฟฟ้าเบสของระบบ จะส่งผลต่อทุกๆ บัสในระบบเดียวกัน

รูปที่ 4.6 ข้อมูลบัส

4.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สำหรับ HSE แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน จะเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งค่าของกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกมา จะทำการคำนวณจากข้อมูลของเครื่องมือวัดที่ติดอยู่ในระบบ (ในการคำนวณจะคิดที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นจะไม่คิดผลของอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน) และถูกจำลองเป็นอิมพีแดนซ์ที่ต่อขนานกับระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิก ซึ่งข้อมูลที่ต้องการคือ

- 1) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับบวก
- 2) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับลบ
- 3) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับศูนย์

Bus		1		
Z 012		0.001+0.02j	0	0
		0	0.001+0.02j	0
		0	0	0.002+0.03j

รูปที่ 4.7 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.3.4 สายส่งกำลังไฟฟ้า

โดยปกติ สายส่งกำลังไฟฟ้า จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ 2 ส่วน คือ

- อิมพีแดนซ์อนุกรม ซึ่งต้องคำนวณมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเอง ,ผลของการจัดเรียงตัวของตัวนำ และผลของสายกราวนด์

- แอตมิตแตนซ์ขนาน เป็นค่าของตัวเองที่ประจุเสมือนที่เกิดขึ้นเองในสายส่ง

แบบจำลองของสายส่งที่ถูกใช้ในโปรแกรมมี 2 แบบ คือ

- แบบจำลองพายปกติ (nomial PI) ซึ่งเหมาะจะใช้กับระบบทดสอบที่คำนวณค่าพารามิเตอร์โดยใช้แบบจำลองพายแบบกระจายมาเรียบร้อยแล้ว (ซึ่งโดยปกติระบบทดสอบต่างๆ จะคำนวณมาให้แล้ว)
- แบบจำลองพายแบบกระจาย (distributed PI)

โดยในโปรแกรมนี้ ข้อมูลป้อนเข้าคือ ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรม และ ค่าแอตมิตแตนซ์ขนาน

nomial PI Distributed PI

From Bus To Bus

Z series

$0.010080+0.050400j$	0	0
0	$0.010080+0.050400j$	0
0	0	$0.010080+0.050400j$

p.u.

Y shunt/2

$0.051250j$	0	0
0	$0.051250j$	0
0	0	$0.051250j$

p.u.

รูปที่ 4.8(a) ข้อมูลสายส่งแบบพายปกติ

nomial PI Distributed PI

From Bus To Bus Length km

Z series

$0.0045+0.04j$	0	0
0	$0.0045+0.04j$	0
0	0	$0.0045+0.04j$

p.u./km

Y shunt/2

$4e-7j$	0	0
0	$4e-7j$	0
0	0	$4e-7j$

p.u./km

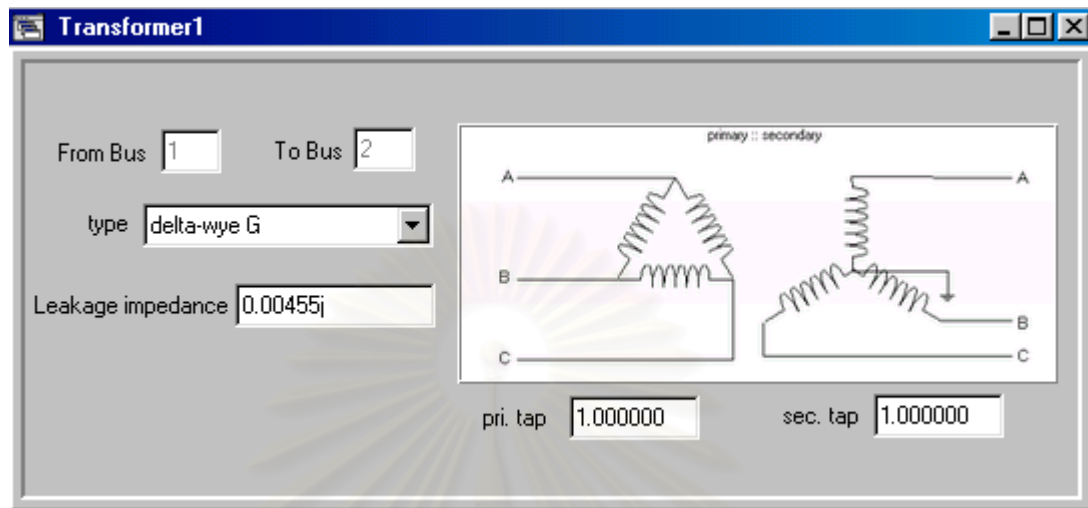
รูปที่ 4.8(b) ข้อมูลสายส่งแบบพายแบบกระจาย

4.3.5 หม้อแปลงไฟฟ้า

แบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมนี้คือ หม้อแปลงแบบสองขดลวด ที่มีรูปแบบการต่อต่างๆ กันไป ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) ชนิดของการต่อหม้อแปลง
- 2) แทปของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

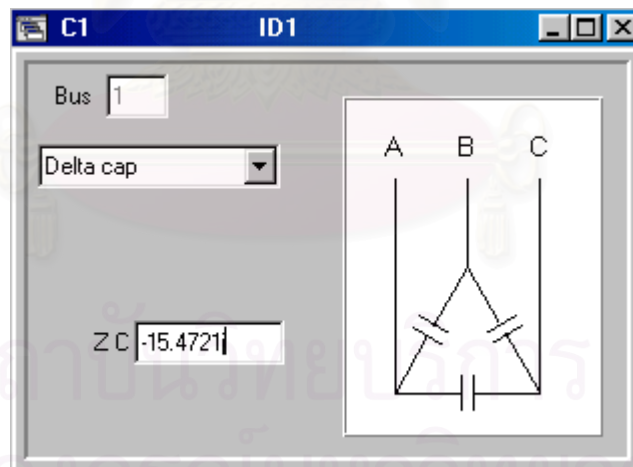
3) ลีคเกจอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง



รูปที่ 4.9 ข้อมูลหม้อแปลง

4.3.6 ตัวเก็บประจุ

มีรูปแบบการต่อ 2 รูปแบบ คือ แบบ delta และ wye G ข้อมูลที่ต้องการคือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุโดยคิดว่ามีค่าเท่ากันทั้งสามเฟส (ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าเป็นลบ)

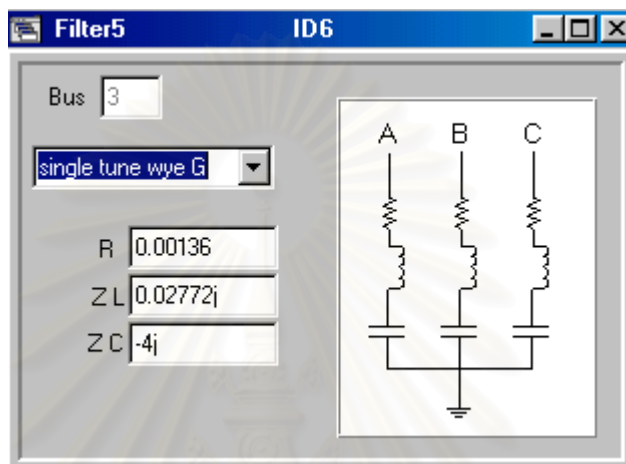


รูปที่ 4.10 ข้อมูลตัวเก็บประจุ

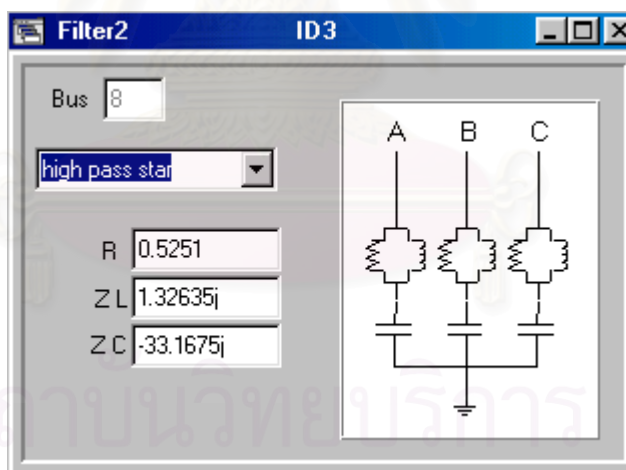
4.3.7 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์

ข้อมูลที่ต้องการคือ

- 1) ค่าความต้านทานของแต่ละเฟส
- 2) ค่ารีแอคแตนซ์ของแต่ละเฟส
- 3) ค่าซัสเซปแตนซ์ของแต่ละเฟส



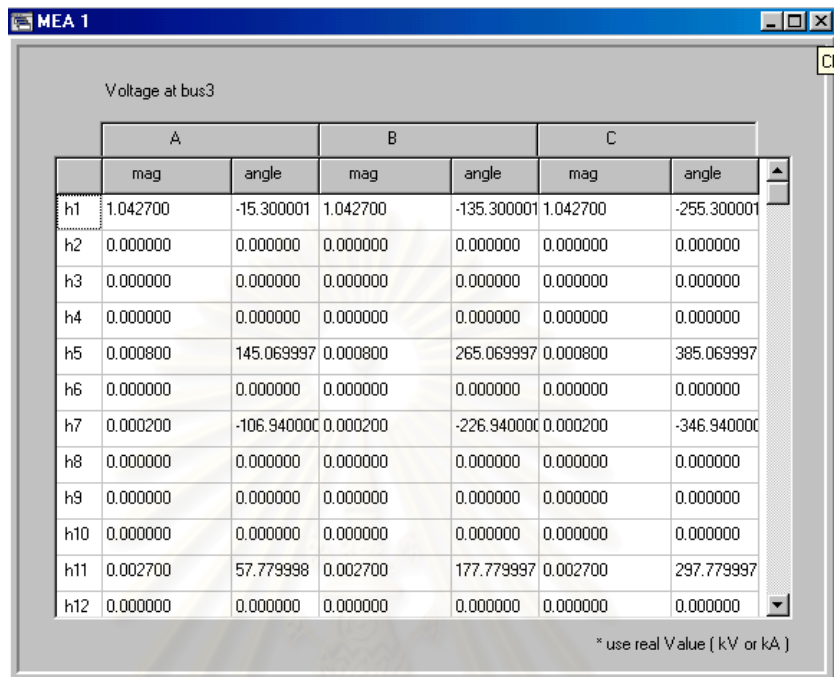
รูปที่ 4.11(a) ข้อมูลตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (1)



รูปที่ 4.11(b) ข้อมูลตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (2)

4.3.8 เครื่องมือวัด

ข้อมูลที่ได้คือ กระแสหรือแรงดันสามเฟส ทั้งขนาดและมุม



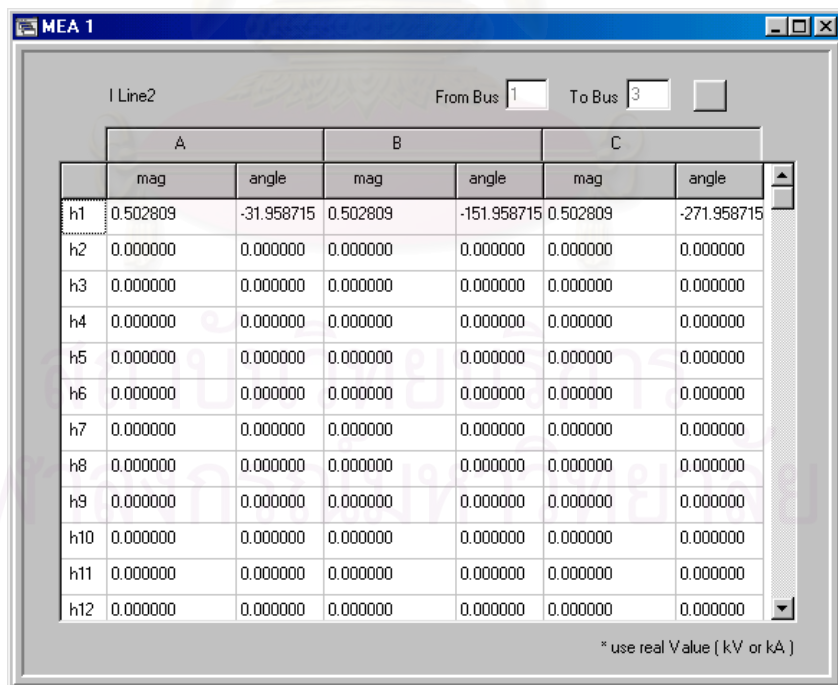
MEA 1

Voltage at bus3

	A		B		C	
	mag	angle	mag	angle	mag	angle
h1	1.042700	-15.300001	1.042700	-135.300001	1.042700	-255.300001
h2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h5	0.000800	145.069997	0.000800	265.069997	0.000800	385.069997
h6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h7	0.000200	-106.940000	0.000200	-226.940000	0.000200	-346.940000
h8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h11	0.002700	57.779998	0.002700	177.779997	0.002700	297.779997
h12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

* use real Value (kV or kA)

รูปที่ 4.12 ข้อมูลโวลต์มิเตอร์



MEA 1

I Line2 From Bus 1 To Bus 3

	A		B		C	
	mag	angle	mag	angle	mag	angle
h1	0.502809	-31.958715	0.502809	-151.958715	0.502809	-271.958715
h2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
h12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

* use real Value (kV or kA)

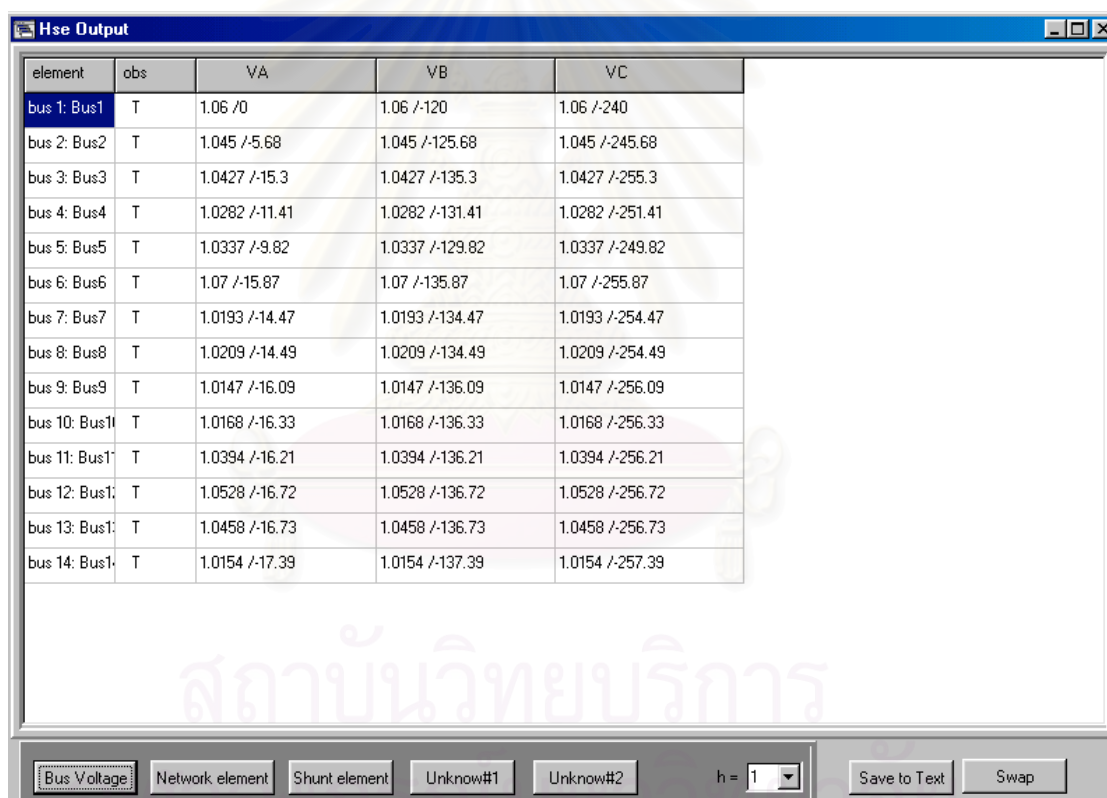
รูปที่ 4.13 ข้อมูลแอมป์มิเตอร์

4.4 การคำนวณและการแสดงผล

การคำนวณจะใช้ตามระเบียบวิธี HSE ในบทที่ 3 และผลการคำนวณอันได้แก่ แรงดันที่บัส กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในอุปกรณ์ต่างๆ จะแบ่งออกเป็น การแสดงผลรวม และการแสดงผลของแต่ละอุปกรณ์

4.4.1 หน้าจอแสดงผลรวม

จะประกอบไปด้วย ตารางของแรงดันที่บัส , กระแสและกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส , กระแสและกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์ที่ต่อขนานกับบัส และคุณลักษณะต่างๆ ของโหลดที่ไม่ทราบค่า



element	obs	VA	VB	VC
bus 1: Bus1	T	1.06 /0	1.06 /-120	1.06 /-240
bus 2: Bus2	T	1.045 /-5.68	1.045 /-125.68	1.045 /-245.68
bus 3: Bus3	T	1.0427 /-15.3	1.0427 /-135.3	1.0427 /-255.3
bus 4: Bus4	T	1.0282 /-11.41	1.0282 /-131.41	1.0282 /-251.41
bus 5: Bus5	T	1.0337 /-9.82	1.0337 /-129.82	1.0337 /-249.82
bus 6: Bus6	T	1.07 /-15.87	1.07 /-135.87	1.07 /-255.87
bus 7: Bus7	T	1.0193 /-14.47	1.0193 /-134.47	1.0193 /-254.47
bus 8: Bus8	T	1.0209 /-14.49	1.0209 /-134.49	1.0209 /-254.49
bus 9: Bus9	T	1.0147 /-16.09	1.0147 /-136.09	1.0147 /-256.09
bus 10: Bus10	T	1.0168 /-16.33	1.0168 /-136.33	1.0168 /-256.33
bus 11: Bus11	T	1.0394 /-16.21	1.0394 /-136.21	1.0394 /-256.21
bus 12: Bus12	T	1.0528 /-16.72	1.0528 /-136.72	1.0528 /-256.72
bus 13: Bus13	T	1.0458 /-16.73	1.0458 /-136.73	1.0458 /-256.73
bus 14: Bus14	T	1.0154 /-17.39	1.0154 /-137.39	1.0154 /-257.39

รูปที่ 4.14 ตารางแสดงผลแรงดันที่บัส

element	f bus	t bus	obs	ph	Iflow	Iback	Pflow	Qflow	Pback	Qback	Ploss	Qloss
line2	1	5	T	a	78.9783 /2.27777	78.507 /178.559	83.6509	-3.32725	-80.2865	11.8255	3.36437	8.49829
				b	78.9776 /-117.72	78.5061 /58.5614	83.65	-3.33079	-80.2851	11.8288	3.3658	8.50154
				c	78.9776 /122.28	78.5061 /-61.4386	83.65	-3.33079	-80.2851	11.8288	3.3658	8.50154
line3	2	3	T	a	86.3974 /3.61282	85.4021 /-179.353	89.1004	-14.5793	-85.6218	24.4659	3.47855	9.88666
				b	86.3974 /-116.387	85.4021 /60.647	89.1004	-14.5793	-85.6218	24.4659	3.47855	9.88666
				c	86.3974 /123.613	85.4021 /-59.353	89.1004	-14.5793	-85.6218	24.4659	3.47855	9.88666
line4	2	4	T	a	56.8005 /2.45921	56.1917 /178.58	58.7587	-8.40362	-56.9002	10.0232	1.85844	1.61961
				b	56.8005 /-117.541	56.1917 /58.5804	58.7587	-8.40362	-56.9002	10.0232	1.85844	1.61961
				c	56.8005 /122.459	56.1917 /-61.4196	58.7587	-8.40362	-56.9002	10.0232	1.85844	1.61961
line5	2	5	T	a	41.7759 /4.23596	41.1901 /179.445	43.0037	-7.51769	-42.0228	6.85495	0.980848	-0.662737
				b	41.7759 /-115.764	41.1901 /59.4447	43.0037	-7.51769	-42.0228	6.85495	0.980848	-0.662737
				c	41.7759 /124.236	41.1901 /-60.5553	43.0037	-7.51769	-42.0228	6.85495	0.980848	-0.662737
line6	3	4	T	a	38.0631 /-162.535	40.0166 /21.8716	-33.3738	21.4793	34.3966	-22.5786	1.02282	-1.09929
				b	38.0631 /77.4652	40.0166 /-98.1284	-33.3738	21.4793	34.3966	-22.5786	1.02282	-1.09929
				c	38.0631 /-42.5348	40.0166 /141.872	-33.3738	21.4793	34.3966	-22.5786	1.02282	-1.09929
line7	6	11	T	a	14.1729 /-68.9585	14.1729 /111.041	9.10779	12.1254	-8.91706	-11.7259	0.190726	0.399471
				b	14.1729 /171.041	14.1729 /-8.95852	9.10779	12.1254	-8.91706	-11.7259	0.190726	0.399471
				c	14.1729 /51.0415	14.1729 /110.959	9.10779	12.1254	-8.91706	-11.7259	0.190726	0.399471

รูปที่ 4.15 ตารางแสดงผลของอุปกรณ์เชื่อมต่อบัล

element	bus	obs	ph	Iinj	Pinj	Qinj
filt1	8	T	a	4.10648 /-105.7	-0.0885485	4.19137
			b	4.10648 /134.3	-0.0885485	4.19137
			c	4.10648 /14.2997	-0.0885485	4.19137
filt2	8	T	a	3.20579 /-105.435	-0.0539651	3.27235
			b	3.20579 /134.565	-0.0539651	3.27235
			c	3.20579 /14.5652	-0.0539651	3.27235
filt3	8	T	a	3.14136 /-105.416	-0.0518176	3.20659
			b	3.14136 /134.584	-0.0518176	3.20659
			c	3.14136 /14.5842	-0.0518176	3.20659
filt4	8	T	a	3.10337 /-105.405	-0.0505717	3.16782
			b	3.10337 /134.595	-0.0505717	3.16782
			c	3.10337 /14.5954	-0.0505717	3.16782
filt5	3	T	a	26.2494 /-105.32	-0.00937083	27.3703
			b	26.2494 /134.68	-0.00937083	27.3703
			c	26.2494 /14.6804	-0.00937083	27.3703
filt6	3	T	a	26.2494 /-105.32	-0.00937083	27.3703
			b	26.2494 /134.68	-0.00937083	27.3703
			c	26.2494 /14.6804	-0.00937083	27.3703

รูปที่ 4.16 ตารางแสดงผลของอุปกรณ์ที่ต่อขนานกับบัล

element	bus	obs	ph	linj	Pinj	Qinj	type	impedance
unknow1	1	T	a	248.337 /6.219	261.689	-28.5163	Gen	
			b	248.337 /-113.78	261.688	-28.5198	Gen	
			c	248.337 /126.22	261.688	-28.5198	Gen	
unknow2	2	T	a	18.4355 /-23.1693	18.3746	5.78969	Gen	
			b	18.4355 /-143.169	18.3746	5.78969	Gen	
			c	18.4355 /96.8307	18.3746	5.78969	Gen	
unknow3	3	T	a	114.416 /160.472	-118.977	-8.7953	Load	0.0091+0.0007j
			b	114.416 /40.4721	-118.977	-8.7953	Load	0.0091+0.0007j
			c	114.416 /-79.5279	-118.977	-8.7953	Load	0.0091+0.0007j
unknow4	4	T	a	46.5272 /173.207	-47.684	3.8507	Load	0.0220-0.0018j
			b	46.5272 /53.2069	-47.684	3.8507	Load	0.0220-0.0018j
			c	46.5272 /-66.7931	-47.684	3.8507	Load	0.0220-0.0018j
unknow5	5	T	a	7.77518 /158.883	-7.88148	-1.57444	Load	0.1304+0.0260j
			b	7.7732 /38.9038	-7.88005	-1.57119	Load	0.1304+0.0260j
			c	7.7732 /-81.0962	-7.88005	-1.57119	Load	0.1304+0.0260j
unknow6	6	T	a	42.5077 /-119.905	-11.0306	44.1254	Gen	
			b	42.5077 /120.095	-11.0306	44.1254	Gen	
			c	42.5077 /0.0946383	-11.0306	44.1254	Gen	

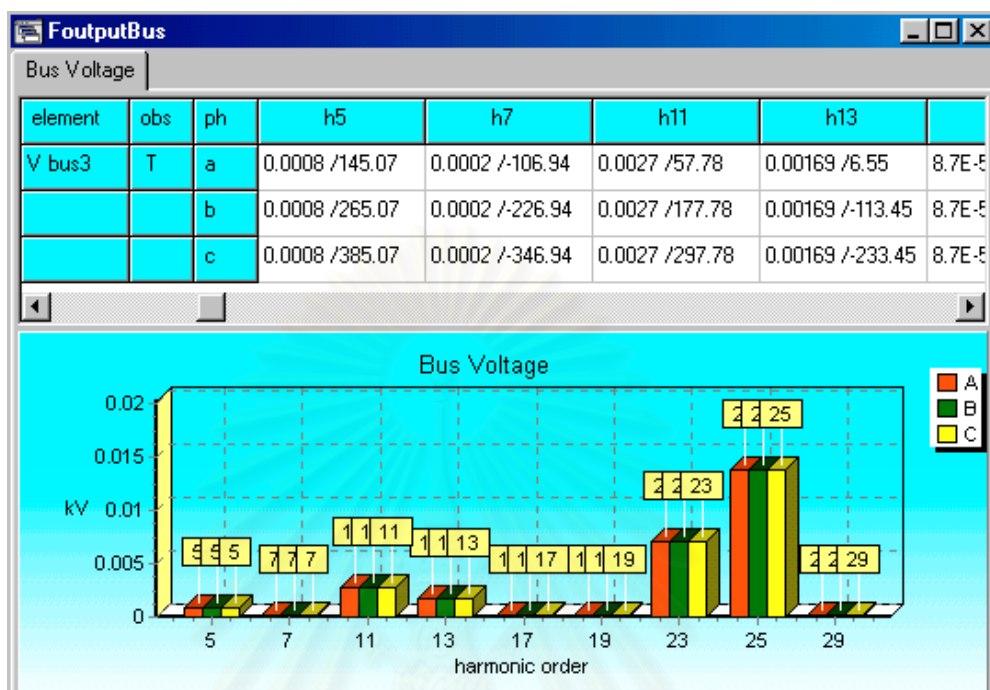
รูปที่ 4.17(a) ตารางแสดงผลของโหลดที่ไม่ทราบค่า(1)

element	bus	obs	ph	H1	H5	H7	H11	H13	H17	H19	H23	H25		
unknow1	1	T	a	Gen	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Gen		
			b	Gen	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Gen	
			c	Gen	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Gen	
unknow2	2	T	a	Gen	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Gen	Load	
			b	Gen	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Gen	Load
			c	Gen	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Gen
unknow3	3	T	a	Load	Gen	Load	Load	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	
			b	Load	Gen	Load	Load	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
			c	Load	Gen	Load	Load	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
unknow4	4	T	a	Load	Gen	Gen	Load	Gen	Load	Gen	Gen	Gen	Gen	
			b	Load	Gen	Gen	Load	Gen	Load	Gen	Gen	Gen	Gen	
			c	Load	Gen	Gen	Load	Gen	Load	Gen	Gen	Gen	Gen	
unknow5	5	T	a	Load	Load	Load	Gen	Load	Gen	Gen	Gen	Gen		
			b	Load	Load	Load	Gen	Load	Gen	Gen	Gen	Gen		
			c	Load	Load	Load	Gen	Load	Gen	Gen	Gen	Gen		
unknow6	6	T	a	Gen	Load	Load	Load	Gen	Load	Load	Load	Load		
			b	Gen	Load	Load	Load	Gen	Load	Load	Load	Load		
			c	Gen	Load	Load	Load	Gen	Load	Load	Load	Load		

รูปที่ 4.17 (b) ตารางแสดงผลของโหลดที่ไม่ทราบค่า(2)

4.4.2 หน้าจอแสดงผลของแต่ละอุปกรณ์

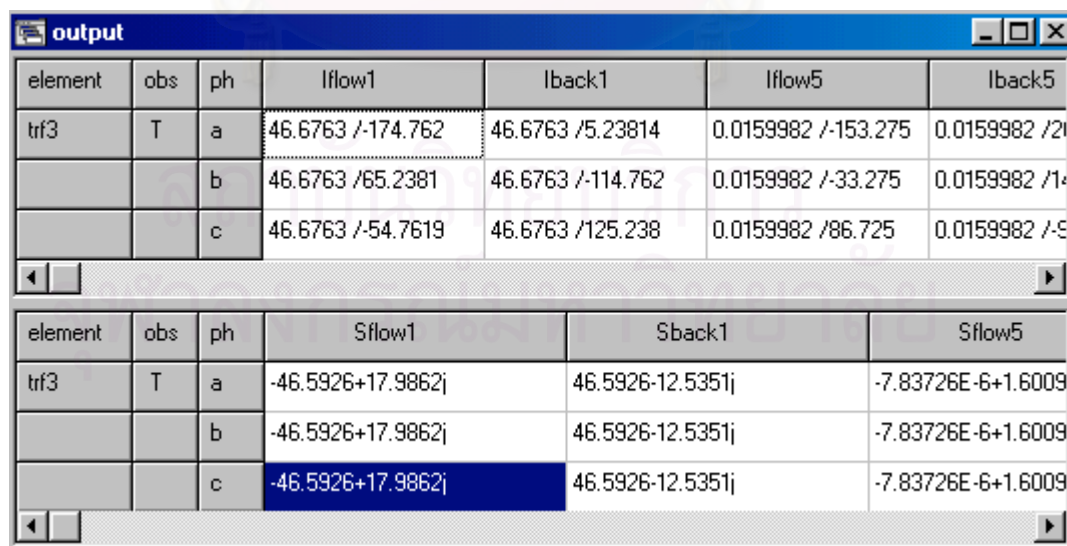
1) บัสบาร์ จะมีข้อมูลของแรงดันที่ทุกความถี่ที่สนใจ และกราฟของแรงดันฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.18 หน้าจอแสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส

2) อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างบัส อันได้แก่ สายส่งกำลังไฟฟ้า และ หม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการคำนวณจะประกอบไปด้วยข้อมูลของกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลตามทิศทางการต่ออุปกรณ์ (I_{flow}, S_{flow}) และ กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลทวนทิศทางการต่อ (I_{back}, S_{back})



รูปที่ 4.19 หน้าจอแสดงผลอุปกรณ์เชื่อมต่อบัส

3) อุปกรณ์ที่ต่อขนานกับบัส อันได้แก่ ตัวเก็บประจุ และตัวกรองฮาร์มอนิก

ผลการคำนวณจะประกอบไปด้วยข้อมูลของกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส (linj, Sinj)

element	obs	ph	linj1	linj5	linj7	linj11
Filt5	T	a	26.1605 /-105.32	0.120463 /54.8076	0.052724 /162.517	4.49153 /-36.1
		b	26.1605 /134.68	0.120463 /174.808	0.052724 /42.5165	4.49153 /83.4
		c	26.1605 /14.6804	0.120463 /-65.1924	0.052724 /-77.4835	4.49153 /-156

element	obs	ph	Sinj1	Sinj5	Sinj7
Filt5	T	a	-0.00930746+27.2776j	-4.41294E-7+9.6369E-5j	-1.00024E-7+1.0544
		b	-0.00930746+27.2776j	-4.41294E-7+9.6369E-5j	-1.00024E-7+1.0544
		c	-0.00930746+27.2776j	-4.41294E-7+9.6369E-5j	-1.00024E-7+1.0544

รูปที่ 4.20 หน้าจอแสดงผลอุปกรณ์ที่ต่อขนานกับบัส

3) โหลดที่ไม่ทราบค่า (unknown load) โหลดตัวนี้จะถูกต่อขนานกับบัส ดังนั้นผลการคำนวณจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่ต่อขนานกับบัส และส่วนที่เพิ่มขึ้นมาคือ สถานะของโหลดตัวนั้นที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ เป็นแหล่งกำเนิด หรือเป็นโหลดปกติ

element	obs	ph	linj23	linj25	linj29
unk3	T	a	2.65099 /-121.674	3.87235 /3.0802	0.0838327 /5.2527
		b	2.65099 /-1.67415	3.87235 /-116.92	0.0838327 /125.253
		c	2.65099 /118.326	3.87235 /123.08	0.0838327 /-114.747

element	obs	ph	Sinj25	Sinj29
unk3	T	a	0.00252057+0.0532471j	9.32678E-7+2.05178E-5j
		b	0.00252057+0.0532471j	9.32678E-7+2.05178E-5j
		c	0.00252057+0.0532471j	9.32678E-7+2.05178E-5j

element	obs	ph	h17	h19	h23	h25	h29
unk3	T	a	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
		b	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
		c	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen

รูปที่ 4.21 หน้าจอแสดงผลโหลดที่ไม่ทราบค่า

4.5 การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมที่ได้จัดทำขึ้นมา นอกจากจะสามารถทำการคำนวณและแสดงผลสุดท้ายของการคำนวณได้แล้ว ยังมีส่วนเสริมที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบค่าตัวแปรต่างๆ ในการคำนวณ อาทิ ค่าพารามิเตอร์ในแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ค่าแอดมิตแตนซ์ขององค์ประกอบต่างๆ และรวมไปถึงค่าต่างๆ ที่อยู่ในสมการ $[z] = [H][x]$

การเข้าสู่โหมดการทำงานในระบบนี้ สามารถเข้าถึงได้จาก เลือกเมนู Option จากเมนูบาร์ และเลือกไปที่แท็บ Step Run จากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่โหมดการทำงานนี้ และสามารถเลือกดูค่าที่ต้องการจะตรวจสอบได้ตามต้องการ

3.815629-19.026894j	0	0	-3.815629+19.07814j	0
0	3.815629-19.026894j	0	0	-3.815629+19.07814j
0	0	3.815629-19.026894j	0	0
-3.815629+19.07814j	0	0	3.815629-19.026894j	0
0	-3.815629+19.07814j	0	0	3.815629-19.026894j
0	0	-3.815629+19.07814j	0	3.815629-19.026894j

รูปที่ 4.22 หน้าจอแสดงผลแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

Form2

Equation | Model Ybus | Line flow

mag	phase	type	element	bus	ft
0.386915	a	I Real	line 1	0	12
-0.222984	a	I Imag	line 1	0	12
-0.386567	b	I Real	line 1	0	12
-0.223586	b	I Imag	line 1	0	12
-0.000347	c	I Real	line 1	0	12
0.446570	c	I Imag	line 1	0	12
0.981176	a	I Real	line 2	0	13
-0.612124	a	I Imag	line 2	0	13
-1.020703	b	I Real	line 2	0	13
-0.543661	b	I Imag	line 2	0	13
0.039527	c	I Real	line 2	0	13
1.155785	c	I Imag	line 2	0	13
-1.711901	a	linj R	linj 2	2	00
1.101674	a	linj I	linj 2	2	00
1.810028	b	linj R	linj 2	2	00
0.931713	b	linj I	linj 2	2	00

= *

รูปที่ 4.23 หน้าจอแสดงการตั้งเมตริกซ์สมการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ระบบทดสอบและการวิเคราะห์

บทนี้จะเสนอตัวอย่างของระบบที่ใช้วิเคราะห์ HSE ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สภาวะสมดุลและไม่สมดุล ระบบทดสอบตัวอย่างที่เสนอประกอบด้วยระบบตัวอย่างของ IEEE 14 บัส (1) ซึ่งเป็นระบบพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์โหลดโพลาร์ , ระบบ IEEE 14 บัส (2) จาก [8] ซึ่งเป็นระบบที่ดัดแปลงมาจาก IEEE 14 บัส (1) โดยเพิ่มฮาร์มอนิกโหลดที่บัส 3 และบัส 8 การวิเคราะห์ HSE จะเริ่มต้นจากการใช้โปรแกรมฮาร์มอนิกโพลาร์ หรือโปรแกรมโหลดโพลาร์ทำการคำนวณระบบทดสอบก่อน เพื่อให้ได้ข้อมูลมาป้อนค่าให้แก่เครื่องมือวัด จากนั้นจึงป้อนข้อมูลแรงดัน หรือ กระแส ในจุดที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดไว้ มาป้อนค่าเข้าโปรแกรม HSE และตรวจสอบผลการคำนวณ HSE ต่อไป

ระบบทดสอบจะประกอบไปด้วย 2 ระบบ ดังต่อไปนี้

- ระบบ 14 บัส (1) ใช้วิเคราะห์ผลที่ความถี่มูลฐานเท่านั้น
- ระบบ 14 บัส (2) ใช้วิเคราะห์ผลทางด้านฮาร์มอนิก

5.1 ระบบ 14 บัส (1)

เป็นระบบทดสอบพื้นฐาน IEEE 14 บัส โดยนำมาวิเคราะห์ใน 3 กรณี คือ

- กรณีที่ 1 : กรณีปกติ
- กรณีที่ 2 : กรณีที่มีการใช้จุดวัดเสมือนที่บัส 7
- กรณีที่ 3 : กรณีประมาณค่าตัวแปรสหสัมพันธ์บางส่วนในระบบไฟฟ้ากำลัง (partial HSE)

กรณีนี้เดิมระบบเป็นระบบเฟสเดียว ดังนั้นทำการปรับปรุงระบบให้เป็นระบบสามเฟสที่แยกจากกัน (decouple circuit) โดยให้ข้อมูลเดิมของระบบมีค่าเป็นข้อมูลที่เฟส A ข้อมูลของระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

1. ข้อมูลของระบบใช้แบบจำลองพายปกติ
2. ทำการคำนวณเฉพาะที่ความถี่มูลฐาน
3. ข้อมูลที่ป้อนเข้าเครื่องมือวัด ใช้โปรแกรมโหลดโพลาร์ตาม [9] คำนวณ

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลของระบบ 14 บัส(1)

type	Left bus	right bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	tap
Line	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	0
Line	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	0
Line	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	0
Line	2	4	0.05811	0.17632	0.0374	0
Line	2	5	0.05695	0.17388	0.034	0
Line	3	4	0.06701	0.17103	0.0346	0
transformer	4	7	0	0.20912	0	0.978
transformer	4	9	0	0.55618	0	0.969
transformer	5	6	0	0.25202	0	0.932
Line	6	11	0.09498	0.1989	0	0
Line	6	12	0.12291	0.25581	0	0
Line	6	13	0.06615	0.13027	0	0
Line	7	8	0	0.17615	0	0
Line	7	9	0	0.11001	0	0
Line	9	10	0.03181	0.0845	0	0
Line	9	14	0.12711	0.27038	0	0
Line	10	11	0.08205	0.19207	0	0
Line	12	13	0.22092	0.19988	0	0
Line	13	14	0.17093	0.34802	0	0
Line	5	4	0.01335	0.04211	0.0128	0
Cap	9	0	0	0	0.019	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 1

Element	Va		Vb		Vc	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
Voltage bus 2	1.045	-4.98	1.045	-124.98	1.045	115.02
current (2-1)	1.4835	185.3	1.4835	65.3	1.4835	305.3
current (2-3)	0.7012	-7.77	0.7012	-127.77	0.7012	112.23
current (2-4)	0.5377	-2.65	0.5377	-122.65	0.5377	117.35
current (2-5)	0.3973	-6.03	0.3973	-126.03	0.3973	113.97
Voltage bus 6	1.07	-14.22	1.07	-134.22	1.07	105.78
current (6-11)	0.0759	-39.536	0.0759	-159.536	0.0759	80.464
current (6-12)	0.0764	-31.98	0.0764	-151.98	0.0764	88.02
current (6-13)	0.1788	-36.23	0.1788	-156.23	0.1788	83.77
Voltage bus 9	1.056	-14.95	1.056	-134.95	1.056	105.05
Current (9-7)	0.27	154.97	0.27	34.97	0.27	274.97
Current (9-10)	0.065	-54.36	0.065	-174.36	0.065	65.64
Current (9-14)	0.0958	-36.17	0.0958	-156.17	0.0958	83.83
Voltage bus 8	1.09	-13.37	1.09	-133.37	1.09	106.63

ผลการคำนวณระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 1

ผลการคำนวณแรงดันบัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ และสถานะของโหลดไม่ทราบค่าแต่ละตัว ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากเอกสารอ้างอิงมาก แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 1

Element	obs	Va		Vb		Vc		V [9]	
		mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	Angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
bus 1	T	1.06	0	1.06	-120	1.06	120	1.06	0
bus 2	T	1.045	-4.981	1.045	-124.981	1.045	-244.981	1.045	-4.981
bus 3	T	1.01	-12.718	1.01	-132.718	1.01	107.282	1.01	-12.72
bus 4	T	1.01862	-10.324	1.01862	-130.324	1.01862	109.676	1.01862	-10.32
bus 5	T	1.02026	-8.7826	1.02026	-128.783	1.02026	111.217	1.02026	-8.783

Element	obs	Va		Vb		Vc		V [9]	
		mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	Angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
bus 6	T	1.07	-14.223	1.07	-134.223	1.07	-254.223	1.07	-14.22
Bus 7	T	1.06195	-13.368	1.06195	-133.368	1.06195	106.632	1.06195	-13.37
Bus 8	T	1.09	-13.368	1.09	-133.368	1.09	-253.368	1.09	-13.37
bus 9	T	1.05635	-14.947	1.05635	-134.947	1.05635	-254.947	1.05635	-14.95
bus 10	T	1.05133	-15.169	1.05133	-135.169	1.05133	104.831	1.05133	-15.17
bus 11	T	1.05708	-14.795	1.05708	-134.795	1.05708	105.205	1.05708	-14.80
bus 12	T	1.05522	-15.077	1.05522	-135.077	1.05522	104.923	1.05522	-15.08
bus 13	T	1.05044	-15.159	1.05044	-135.159	1.05044	104.841	1.05044	-15.16
bus 14	T	1.03579	-16.039	1.03579	-136.039	1.03579	103.961	1.03579	-16.04

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 1

element	f bus	t bus	ph	Pflow (MW)	Qflow (MVAR)	Pback (MW)	Qback (MVAR)	Ploss (MW)	Qloss (MVAR)
line1	1	2	a	156.833	-20.3927	-152.538	27.6563	4.29485	7.26355
			b	156.833	-20.3927	-152.538	27.6563	4.29485	7.26355
			c	156.833	-20.3927	-152.538	27.6563	4.29485	7.26355
line2	1	5	a	75.5526	3.50381	-72.7889	2.58046	2.76376	6.08427
			b	75.5526	3.50381	-72.7889	2.58046	2.76376	6.08427
			c	75.5526	3.50381	-72.7889	2.58046	2.76376	6.08427
line3	2	3	a	73.1881	3.56506	-70.8679	1.58434	2.32018	5.14941
			b	73.1881	3.56506	-70.8679	1.58434	2.32018	5.14941
			c	73.1881	3.56506	-70.8679	1.58434	2.32018	5.14941
line4	2	4	a	56.1381	-2.2876	-54.4611	3.39375	1.67704	1.10615
			b	56.1381	-2.2876	-54.4611	3.39375	1.67704	1.10615
			c	56.1381	-2.2876	-54.4611	3.39375	1.67704	1.10615
line5	2	5	a	41.5122	0.762723	-40.6099	-1.63393	0.902274	-0.87121
			b	41.5122	0.762723	-40.6099	-1.63393	0.902274	-0.87121
			c	41.5122	0.762723	-40.6099	-1.63393	0.902274	-0.87121
line6	3	4	a	-23.3321	2.80923	23.7034	-5.42124	0.371348	-2.61202
			b	-23.3321	2.80923	23.7034	-5.42124	0.371348	-2.61202
			c	-23.3321	2.80923	23.7034	-5.42124	0.371348	-2.61202

element	f bus	t bus	ph	Pflow (MW)	Qflow (MVAR)	Pback (MW)	Qback (MVAR)	Ploss (MW)	Qloss (MVAR)
line7	6	11	a	7.3412	3.47222	-7.28649	-3.35764	0.054711	0.114572
			b	7.3412	3.47222	-7.28649	-3.35764	0.054711	0.114572
			c	7.3412	3.47222	-7.28649	-3.35764	0.054711	0.114572
line8	6	12	a	7.78191	2.49223	-7.71023	-2.34304	0.07168	0.149186
			b	7.78191	2.49223	-7.71023	-2.34304	0.07168	0.149186
			c	7.78191	2.49223	-7.71023	-2.34304	0.07168	0.149186
line9	6	13	a	17.74	7.1709	-17.5284	-6.75431	0.211542	0.416592
			b	17.74	7.1709	-17.5284	-6.75431	0.211542	0.416592
			c	17.74	7.1709	-17.5284	-6.75431	0.211542	0.416592
line10	7	8	a	-0.000029	-16.91	2.95E-05	17.3566	0	0.446641
			b	-0.000029	-16.91	2.95E-05	17.3566	0	0.446641
			c	-0.000029	-16.91	2.95E-05	17.3566	0	0.446641
line11	7	9	a	28.087	5.7973	-28.087	-4.99497	0	0.802329
			b	28.087	5.7973	-28.087	-4.99497	0	0.802329
			c	28.087	5.7973	-28.087	-4.99497	0	0.802329
line12	9	10	a	5.23893	4.306	-5.22582	-4.27117	0.01311	0.034825
			b	5.23893	4.306	-5.22582	-4.27117	0.01311	0.034825
			c	5.23893	4.306	-5.22582	-4.27117	0.01311	0.034825
line13	9	14	a	9.43791	3.66577	-9.32114	-3.41738	0.116773	0.248392
			b	9.43791	3.66577	-9.32114	-3.41738	0.116773	0.248392
			c	9.43791	3.66577	-9.32114	-3.41738	0.116773	0.248392
line14	10	11	a	-3.7742	-1.52882	3.78651	1.55763	0.012309	0.028815
			b	-3.7742	-1.52882	3.78651	1.55763	0.012309	0.028815
			c	-3.7742	-1.52882	3.78651	1.55763	0.012309	0.028815
line15	12	13	a	1.61023	0.743041	-1.60399	-0.737395	0.00624	0.005645
			b	1.61023	0.743041	-1.60399	-0.737395	0.00624	0.005645
			c	1.61023	0.743041	-1.60399	-0.737395	0.00624	0.005645
line16	13	14	a	5.63237	1.69125	-5.57879	-1.58217	0.053583	0.109077
			b	5.63237	1.69125	-5.57879	-1.58217	0.053583	0.109077
			c	5.63237	1.69125	-5.57879	-1.58217	0.053583	0.109077
line17	5	4	a	61.7357	-15.3705	-61.2192	15.6695	0.516527	0.299025
			b	61.7357	-15.3705	-61.2192	15.6695	0.516527	0.299025

element	f bus	t bus	ph	Pflow (MW)	Qflow (MVAR)	Pback (MW)	Qback (MVAR)	Ploss (MW)	Qloss (MVAR)
			c	61.7357	-15.3705	-61.2192	15.6695	0.516527	0.299025
trf1	7	4	a	-28.087	11.1127	28.087	-9.42083	3.55E-15	1.69183
			b	-28.087	11.1127	28.087	-9.42083	-2.81E-13	1.69183
			c	-28.087	11.1127	28.087	-9.42083	1.42E-13	1.69183
trf2	9	4	a	-16.0899	1.62467	16.0899	-0.321169	0	1.30351
			b	-16.0899	1.62467	16.0899	-0.321169	-9.95E-14	1.30351
			c	-16.0899	1.62467	16.0899	-0.321169	4.26E-14	1.30351
trf3	6	5	a	-44.0631	-8.39499	44.0631	12.8239	7.11E-15	4.42896
			b	-44.0631	-8.39499	44.0631	12.8239	-1.35E-13	4.42896
			c	-44.0631	-8.39499	44.0631	12.8239	-4.26E-14	4.42896
Cap1	9		a		21.2				
			b		21.2				
			c		21.2				

ตารางที่ 5.5 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 1

element	bus	Pinj (MW)	Qinj (MVAR)	type	เอกสารอ้างอิง [9]				
					type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
unknown1	1	232.386	-16.8889	Gen	slack			232.4	-16.9
unknown2	2	18.3	29.6964	Gen	PV	21.70	12.70	40	42.4
unknown3	3	-94.2	4.39357	Load	PV	94.20	19.00		23.4
unknown4	4	-47.8	3.90001	Load	Load	47.80	-3.90		
unknown5	5	-7.60003	-1.6	Load	Load	7.60	1.60		
unknown6	6	-11.2	4.74036	Load	PV	11.20	7.50		12.2
unknown7	7	0	0.000003	Load					
unknown8	8	0.000029	17.3566	Gen	PV				17.4
unknown9	9	-29.5	-16.6	Load	Load	29.50	16.60		
unknown10	10	-9.00002	-5.79999	Load	Load	9.00	5.80		
unknown11	11	-3.49998	-1.80001	Load	Load	3.50	1.80		
unknown12	12	-6.1	-1.6	Load	Load	6.10	1.60		
unknown13	13	-13.5001	-5.80045	Load	Load	13.50	5.80		
unknown14	14	-14.8999	-4.99955	Load	Load	14.90	5.00		

Element	Va		Vb		Vc	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
current (2-5)	0.3973	-6.03	0.3973	-126.03	0.3973	113.97
Voltage bus 6	1.07	-14.22	1.07	-134.22	1.07	105.78
current (6-11)	0.0759	-39.536	0.0759	-159.536	0.0759	80.464
current (6-12)	0.0764	-31.98	0.0764	-151.98	0.0764	88.02
current (6-13)	0.1788	-36.23	0.1788	-156.23	0.1788	83.77
Voltage bus 9	1.056	-14.95	1.056	-134.95	1.056	105.05
Current (9-7)	0.27	154.97	0.27	34.97	0.27	274.97
Current (9-10)	0.065	-54.36	0.065	-174.36	0.065	65.64
Current (9-14)	0.0958	-36.17	0.0958	-156.17	0.0958	83.83

ผลการคำนวณระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 2

ผลการคำนวณของแรงดันที่บัส และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง มีค่าเท่ากับผลการคำนวณระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 1 แต่ผลการคำนวณสถานะของโหลดไม่ทราบค่า จะต่างออกไป คือ ขณะนี้โหลดไม่ทราบค่าในระบบลดลง 1 ตัว เหลือเพียง 13 ตัว

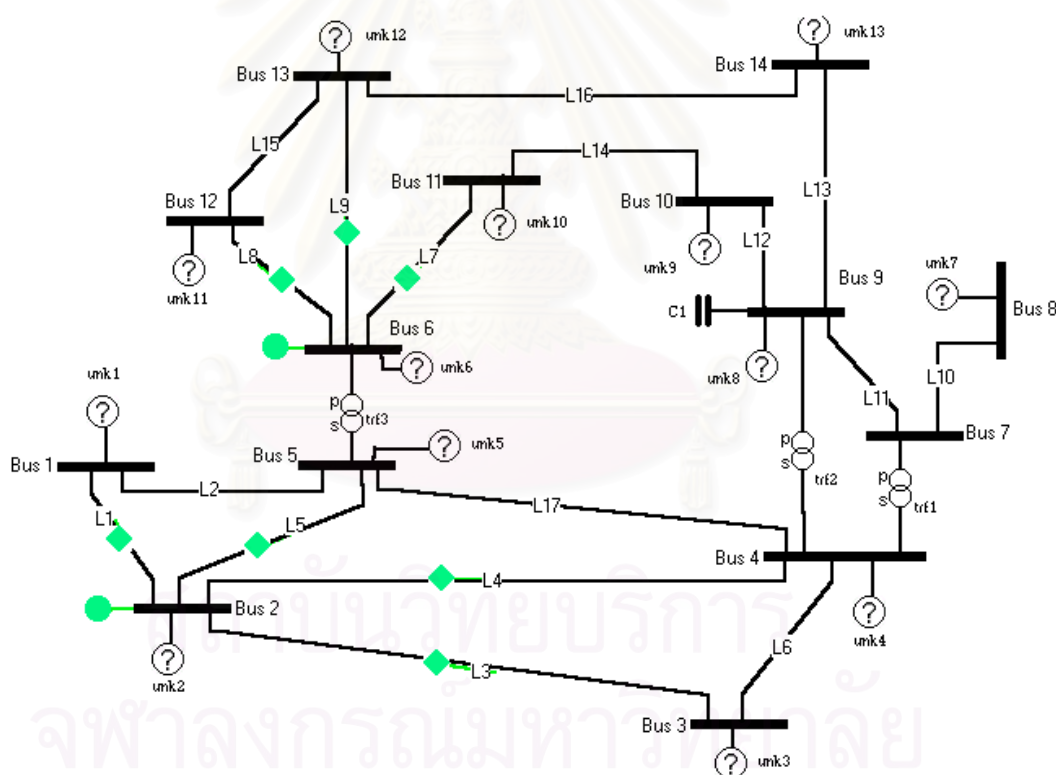
ตารางที่ 5.7 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 2

element	bus	Pinj (MW)	Qinj (MVAR)	type	เอกสารอ้างอิง [9]				
					type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
unknown1	1	232.386	-16.8889	Gen	slack			232.4	-16.9
unknown2	2	18.3	29.6964	Gen	PV	21.70	12.70	40	42.4
unknown3	3	-94.2	4.39357	Load	PV	94.20	19.00		23.4
unknown4	4	-47.8	3.90001	Load	Load	47.80	-3.90		
unknown5	5	-7.60003	-1.6	Load	Load	7.60	1.60		
unknown6	6	-11.2	4.74036	Load	PV	11.20	7.50		12.2
unknown7	8	0.000029	17.3566	Gen	PV				17.4
unknown8	9	-29.5	-16.6	Load	Load	29.50	16.60		
unknown9	10	-9.00002	-5.79999	Load	Load	9.00	5.80		
unknown10	11	-3.49998	-1.80001	Load	Load	3.50	1.80		

element	bus	Pinj (MW)	Qinj) (MVAR	type	เอกสารอ้างอิง [9]				
					type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
unknown11	12	-6.1	-1.6	Load	Load	6.10	1.60		
unknown12	13	-13.5001	-5.80045	Load	Load	13.50	5.80		
unknown13	14	-14.8999	-4.99955	Load	Load	14.90	5.00		

5.1.3 กรณีที่ 3 กรณีประมาณค่าตัวแปรสเทซาร์มอนิกบางส่วนในระบบไฟฟ้ากำลัง (partial HSE)

ทำการเลือกติดตั้งเครื่องมือวัดดังรูปข้างล่าง สำหรับกรณีนี้ HSE จะไม่สามารถให้ผลการคำนวณทั้งระบบได้ เพราะระบบสมการจะมีความไม่พอเพียง แต่ว่า HSE ยังคงสามารถให้ผลการคำนวณในบางส่วนของระบบได้



รูปที่ 5.4 ระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 3

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบบัส (1) กรณีที่ 3

element	A		B		C	
	mag	angle	mag	angle	mag	angle
Voltage bus 2	1.045	-4.98	1.045	-124.98	1.045	115.02
current (2-1)	1.4835	185.3	1.4835	65.3	1.4835	305.3
current (2-3)	0.7012	-7.77	0.7012	-127.77	0.7012	112.23
current (2-4)	0.5377	-2.65	0.5377	-122.65	0.5377	117.35
current (2-5)	0.3973	-6.03	0.3973	-126.03	0.3973	113.97
Voltage bus 6	1.07	-14.22	1.07	-134.22	1.07	105.78
current (6-11)	0.0759	-39.536	0.0759	-159.536	0.0759	80.464
current (6-12)	0.0764	-31.98	0.0764	-151.98	0.0764	88.02
current (6-13)	0.1788	-36.23	0.1788	-156.23	0.1788	83.77

ผลการคำนวณระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 3

HSE จะทำการคำนวณเฉพาะระบบในส่วนที่หาค่าได้ออกมา เนื่องจากความไม่พอเพียงในระบบสมการ อันเกิดจากเครื่องมือวัดไม่กระจายอย่างทั่วถึงในระบบ

ตารางที่ 5.9 ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 3

element	obs	Va		Vb		Vc		V [9]	
		mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
Bus 1	T	1.06	0.00	1.06	-120.00	1.06	120.00	1.06	0.00
Bus 2	T	1.05	-4.98	1.05	-124.98	1.05	-244.98	1.05	-4.98
Bus 3	T	1.01	-12.72	1.01	-132.72	1.01	107.28	1.01	-12.72
Bus 4	T	1.02	-10.32	1.02	-130.32	1.02	109.68	1.02	-10.32
Bus 5	T	1.02	-8.78	1.02	-128.78	1.02	111.22	1.02	-8.78
Bus 6	T	1.07	-14.22	1.07	-134.22	1.07	-254.22	1.07	-14.22
Bus 7	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06	-13.37
Bus 8	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09	-13.37
Bus 9	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06	-14.95
Bus 10	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	-15.17

element	obs	Va		Vb		Vc		V [9]	
		mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
Bus 11	T	1.06	-14.80	1.06	-134.80	1.06	105.21	1.06	-14.80
Bus 12	T	1.06	-15.08	1.06	-135.08	1.06	104.92	1.06	-15.08
Bus 13	T	1.05	-15.16	1.05	-135.16	1.05	104.84	1.05	-15.16
Bus 14	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	-16.04

ตารางที่ 5.10 ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 3

element	f bus	t bus	obs	ph	Pflow (MW)	Qflow (MVAR)	Pback (MW)	Qback (MVAR)	Ploss (MW)	Qloss (MVAR)
line1	1	2	T	a	156.833	-20.393	-152.54	27.6563	4.29485	7.26355
				b	156.833	-20.393	-152.54	27.6563	4.29485	7.26355
				c	156.833	-20.393	-152.54	27.6563	4.29485	7.26355
line2	1	5	T	a	75.5526	3.50381	-72.789	2.58046	2.76376	6.08427
				b	75.5526	3.50381	-72.789	2.58046	2.76376	6.08427
				c	75.5526	3.50381	-72.789	2.58046	2.76376	6.08427
line3	2	3	T	a	73.1881	3.56506	-70.868	1.58434	2.32018	5.14941
				b	73.1881	3.56506	-70.868	1.58434	2.32018	5.14941
				c	73.1881	3.56506	-70.868	1.58434	2.32018	5.14941
line4	2	4	T	a	56.1381	-2.2876	-54.461	3.39375	1.67704	1.10615
				b	56.1381	-2.2876	-54.461	3.39375	1.67704	1.10615
				c	56.1381	-2.2876	-54.461	3.39375	1.67704	1.10615
line5	2	5	T	a	41.5122	0.76272	-40.61	-1.6339	0.90227	-0.8712
				b	41.5122	0.76272	-40.61	-1.6339	0.90227	-0.8712
				c	41.5122	0.76272	-40.61	-1.6339	0.90227	-0.8712
line6	3	4	T	a	-23.332	2.80923	23.7034	-5.4212	0.37135	-2.612
				b	-23.332	2.80923	23.7034	-5.4212	0.37135	-2.612
				c	-23.332	2.80923	23.7034	-5.4212	0.37135	-2.612
line7	6	11	T	a	7.3412	3.47222	-7.2865	-3.3576	0.05471	0.11457
				b	7.3412	3.47222	-7.2865	-3.3576	0.05471	0.11457
				c	7.3412	3.47222	-7.2865	-3.3576	0.05471	0.11457
line8	6	12	T	a	7.78191	2.49223	-7.7102	-2.343	0.07168	0.14919

element	f bus	t bus	obs	ph	Pflow (MW)	Qflow (MVAR)	Pback (MW)	Qback (MVAR)	Ploss (MW)	Qloss (MVAR)
				b	7.78191	2.49223	-7.7102	-2.343	0.07168	0.14919
				c	7.78191	2.49223	-7.7102	-2.343	0.07168	0.14919
line9	6	13	T	a	17.74	7.1709	-17.528	-6.7543	0.21154	0.41659
				b	17.74	7.1709	-17.528	-6.7543	0.21154	0.41659
				c	17.74	7.1709	-17.528	-6.7543	0.21154	0.41659
line10	7	8	F	a						
line11	7	9	F	a						
line12	9	10	F	a						
line13	9	14	F	a						
line14	10	11	F	a						
line15	12	13	T	a	1.61023	0.74304	-1.604	-0.7374	0.00624	0.00565
				b	1.61023	0.74304	-1.604	-0.7374	0.00624	0.00565
				c	1.61023	0.74304	-1.604	-0.7374	0.00624	0.00565
line16	13	14	F	a						
line17	5	4	T	a	61.7357	-15.371	-61.219	15.6695	0.51653	0.29903
				b	61.7357	-15.371	-61.219	15.6695	0.51653	0.29903
				c	61.7357	-15.371	-61.219	15.6695	0.51653	0.29903
trf1	7	4	F	a						
trf2	9	4	F	a						
trf3	6	5	T	a	-44.063	-8.395	44.0631	12.8239	0.00	4.42896
				b	-44.063	-8.395	44.0631	12.8239	0.00	4.42896
				c	-44.063	-8.395	44.0631	12.8239	0.00	4.42896

ตารางที่ 5.11 สถานะโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส (1) กรณีที่ 3

element	bus	obs	Pinj (MW)	Qinj (MVAR)	type	เอกสารอ้างอิง [9]				
						type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
unknown1	1	T	232.39	-16.889	Gen	slack			232.4	-16.9
unknown2	2	T	18.3	29.696	Gen	PV	21.70	12.70	40	42.4
unknown3	3	T	-94.2	4.3936	Load	PV	94.20	19.00		23.4
unknown4	4	F				Load	47.80	-3.90		

element	bus	obs	Pinj (MW)	Qinj (MVAR)	type	เอกสารอ้างอิง [9]				
						type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
unknown5	5	T	-7.6	-1.6	Load	Load	7.60	1.60		
unknown6	6	T	-11.2	4.7404	Load	PV	11.20	7.50		12.2
unknown7	8	F				PV				17.4
unknown8	9	F				Load	29.50	16.60		
unknown9	10	F				Load	9.00	5.80		
unknown10	11	F				Load	3.50	1.80		
unknown11	12	T	-6.1	-1.6	Load	Load	6.10	1.60		
unknown12	13	F				Load	13.50	5.80		
unknown13	14	F				Load	14.90	5.00		

ตารางที่ 5.12 สถานะของระบบเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดที่บัสต่างๆกัน

บัสที่ติดตั้งเครื่องมือวัด	บัสที่มีจุดวัดเสมือน	จำนวนบัสที่ติดตั้งเครื่องมือวัด	โหนดที่ไม่ทราบค่าที่ไม่สามารถระบุสถานะได้	แรงดันที่บัสที่ไม่สามารถระบุได้
2(5*3) , 6(4*3) , 8(1*3) , 9(4*3)		4	ไม่มี	ไม่มี
2(5*3) , 6(4*3) , 9(4*3)	7(1*3)	3	ไม่มี	ไม่มี
2(5*3) , 6(4*3)		2	4 , 8 , 9 , 10 , 11 , 13 , 14	7 , 8 , 9 , 10 , 14
5(5*3) , 9(4*3)	7(1*3)	2	2 , 3 , 4 , 6 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14	3 , 11 , 12 , 13
4(5*3) , 5(5*3)	7(1*3)	2	6 , 7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14	9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14
4(5*3) , 5(5*3) , 13(3*3)	7(1*3)	3	6 , 10 , 8 , 9	10 , 11
5(4*3) , 9(4*3) , 6(4*3)	7(1*3)	3	1 , 2 , 3 , 4 , 5	1 , 2 , 3

*หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ จำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ ซึ่งการวัดสัญญาณจะวัดพร้อมกันทั้งสามเฟส ดังนั้น 4(1*3) หมายถึง ติดตั้งเครื่องมือวัดไว้ที่บัส 4 และวัดข้อมูลทางไฟฟ้าออกมา 1 ชุด อาจเป็นทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดันทั้งสามเฟส หรือทั้งขนาดและมุมเฟสของกระแสทั้งสามเฟส

5.2 ระบบ 14 บัส (2)

เป็นระบบทดสอบ IEEE 14 บัส ตาม [8] โดยนำมาวิเคราะห์ 2 กรณี คือ

- กรณีที่ 1 : กรณีปกติ
- กรณีที่ 2 : กรณีประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์มอนิกบางส่วนในระบบไฟฟ้ากำลัง (partial HSE)

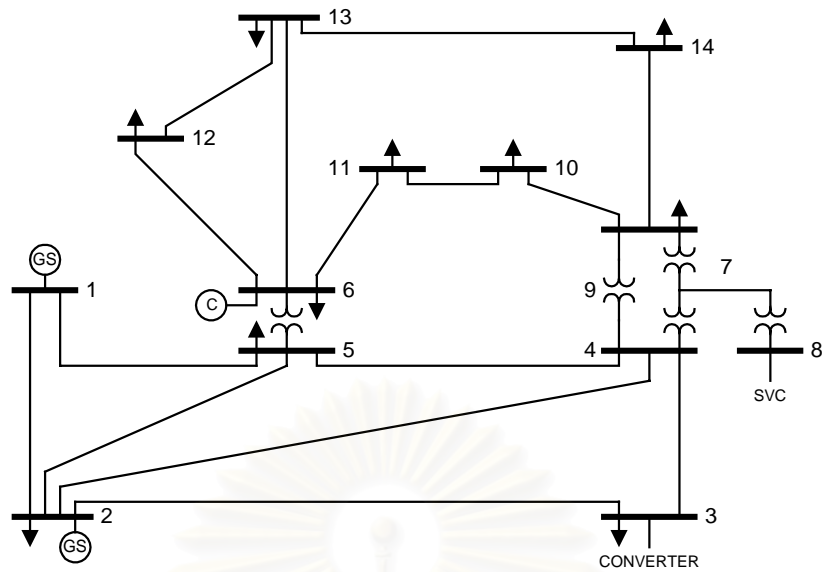
กรณีนี้เดิมระบบเป็นระบบเฟสเดียว ดังนั้นทำการปรับปรุงระบบให้เป็นระบบสามเฟสที่แยกจากกัน (decouple circuit) โดยให้ข้อมูลเดิมของระบบมีค่าเป็นข้อมูลที่เฟส A ข้อมูลของระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และยูนิต 301 และ 302 ออกจากระบบโดยพิจารณาเป็น HVDC ขนาด 12 พัลส์แทน

ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ HSE

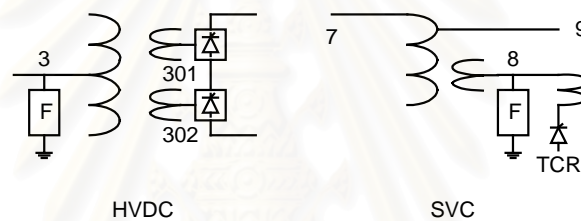
1. ข้อมูลของสายส่งที่ความถี่มูลฐานใช้แบบจำลองพายปกติ
2. ข้อมูลที่ป้อนเข้าเครื่องวัด ใช้โปรแกรมโหลดโพลาร์-ฮาร์มอนิกโพลาร์ ตาม [7] คำนวณ
3. แบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าและหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์มอนิกใช้แบบจำลองตามบทที่ 2 ซึ่งอ้างอิงมาจาก [13] และ [14]

ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์โหลดโพลาร์-ฮาร์มอนิกโพลาร์

1. ในกรณีการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่มูลฐาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกจำลองเป็น Slack bus หรือ PV bus สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์จะถูกจำลองเป็น Subtransient reactances ซึ่งมีค่าเป็น 0.25 pu ทุกๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจำลองโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ Short-circuit และค่าแทปของหม้อแปลงทุกตัวตั้งไว้ที่ 1.0 p.u.
3. ในกรณีการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่มูลฐาน โหลดบัสถูกแทนด้วยกำลังไฟฟ้าคงที่ และในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์จะจำลองด้วยแบบจำลองของโหลดตามแบบจำลองที่ 3 ของ [10]
4. ตัวกรองฮาร์มอนิกจำลองเป็นฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ขนาน โดยตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมดเป็นชนิดตัวกรองแบบความถี่เดียว (Single-tuned type)
5. HVDC แบบ 12 พัลส์ที่บัส 3 จำนวน 2 ชุด ในกรณีการวิเคราะห์โหลดโพลาร์จะถูกแทนด้วยโหลดบัสคงที่ขนาด 119.010 MW 8.559 MVAR และในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์จะพิจารณาเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ซึ่งขนาดและมุมเฟสจะต้องทำการปรับสเกลและเลื่อนมุมเฟสไปโดยเทียบจากผลของโหลดโพลาร์
6. SVC ในกรณีนี้จะจำลองในลักษณะเดียวกับ HVDC



รูปที่ 5.5 แผนภาพเส้นเดี่ยวระบบ 14 บัส (2)



รูปที่ 5.6 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบทดสอบ 14 บัส (2)

ตารางที่ 5.13 ข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆของระบบ 14 บัส(2) (ค่าเบส: 100 MVA)

Branch Type	Left Bus #	Right Bus #	R1 (pu)	X1 (pu)	B1(pu)
Xfmr (Y-Y)	4	7	0.00000	0.20900	
Xfmr (Y-Y)	4	9	0.00000	0.55618	
Xfmr (Y-Y)	5	6	0.00000	0.25020	
Line	6	11	0.09495	0.19887	
Line	6	12	0.12285	0.25575	
Line	6	13	0.06613	0.13024	
Xfmr (Y-Y)	7	8	0.00000	0.17615	
Xfmr (Y-Y)	7	9	0.00000	0.11000	
Line	9	10	0.03181	0.08448	
Line	9	14	0.01270	0.27033	
Line	10	11	0.08203	0.19202	
Line	12	13	0.22087	0.19985	
Line	13	14	0.17089	0.34795	

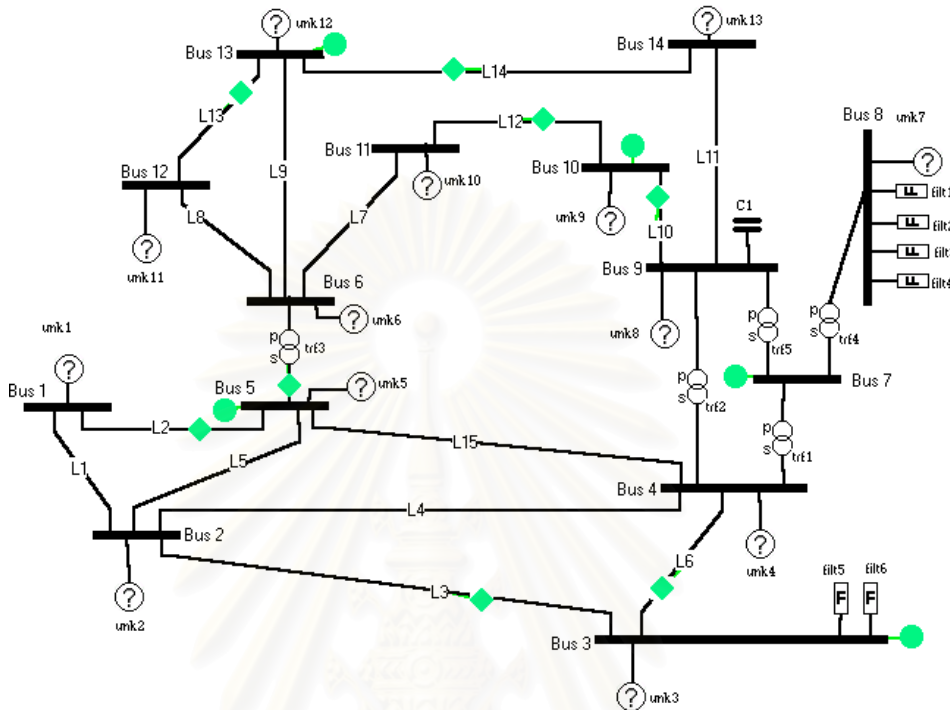
Branch Type	Left Bus #	Right Bus #	R1 (pu)	X1 (pu)	B1(pu)
Capacitor	9	0	0.00000	0.00000	0.06330
Line	1	2	0.01937	0.05916	0.05279
Line	1	5	0.05402	0.22300	0.04920
Line	2	3	0.04697	0.19794	0.04380
Line	2	4	0.05810	0.17628	0.03740
Line	2	5	0.05693	0.17384	0.03386
Line	3	4	0.06700	0.17099	0.03460
Line	4	5	0.01335	0.04209	0.01280
Filter 2 nd	8	0	0.52510	8.31233	0.03015
Filter 5 th	8	0	0.52510	1.32635	0.03015
Filter 7 th	8	0	0.52510	0.67307	0.03015
Filter 11 th	8	0	0.52510	0.27515	0.03015
Filter 11 th	3	0	0.00136	0.02772	0.24916
Filter 11 th	3	0	0.00136	0.02772	0.24916

ตารางที่ 5.14 ข้อมูลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกของระบบ 14 บัส (2)

H-order	twelve-Pulse HVDC		Delta Connected TCR	
	Mag (pu)	Angle (deg)	Mag (pu)	Angle (deg)
1	1	-49.56	1.0000	46.92
5	0	0	0.0702	-124.40
7	0	0	0.0250	-29.87
11	0.0758	-7.13	0.0136	-23.75
13	0.0586	68.57	0.0075	71.50
17	0	0	0.0062	77.12
19	0	0	0.0032	173.43
23	0.0226	87.47	0.0043	178.02
25	0.0241	159.32	0.0013	-83.45
29	0	0	0.0040	-80.45

5.2.1 กรณีที่ 1

ทำการเลือกติดตั้งเครื่องมือวัดดังรูป ข้อมูลของเครื่องมือวัดแต่ละตัวแสดงดังตารางที่ 5.15 ซึ่งค่าทั้งหมดอยู่ในหน่วยเปอร์ยูนิต และมีการใช้จุดวัดเสมือนที่บัส 7



รูปที่ 5.7 ระบบ 14 บัส (2) กรณีปกติ

ตารางที่ 5.15 ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส (2)

Element	h1		h5		h7		h11		h13	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus3	1.0427469	-15.30	0.0006091	12.56	0.0000889	153.44	0.0027183	-120.80	0.0016858	-171.57
I (3-4)	0.3809700	-162.52	0.0011638	-77.07	0.0002942	64.10	0.0032761	-166.70	0.0009280	109.83
I (3-2)	0.8541200	-179.34	0.0006709	-78.40	0.0001747	61.78	0.0033783	-154.27	0.0009608	127.20
V bus5	1.0337270	-9.82	0.0003472	-179.50	0.0002408	-31.51	0.0052809	118.85	0.0012989	32.89
I (5-1)	0.7848476	178.57	0.0001536	99.60	0.0000111	-106.96	0.0020207	-142.34	0.0007214	135.04
I (5-6)	0.4672900	5.20	0.0001029	-89.94	0.0000128	-78.58	0.0011104	44.60	0.0002903	-31.81
V bus13	1.0457600	-16.73	0.0005541	177.12	0.0002468	-39.27	0.0023154	90.04	0.0005952	-24.68
I (13-12)	0.0235968	123.38	0.0000437	97.31	0.0000113	-119.85	0.0000397	-64.67	0.0000212	-165.73
I (13-14)	0.0840051	-59.74	0.0002220	-82.71	0.0000596	61.68	0.0001956	132.16	0.0001037	21.76
V bus10	1.0168000	-16.33	0.0011669	-174.64	0.0004931	-29.42	0.0035770	83.19	0.0013375	-40.92
I (10-11)	0.1086960	102.26	0.0003674	105.43	0.0001041	-108.74	0.0003367	-26.99	0.0001801	-146.00
I (10-9)	0.0529800	-149.86	0.0004918	-66.41	0.0001514	81.21	0.0005740	-179.49	0.0002645	52.20
V bus 7	1.0192870	-14.47	0.0019871	-162.97	0.0007602	-13.97	0.0031082	94.80	0.0011289	-28.22

Element	h17		h19		h23		h25		h29	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus3	0.0000008	137.44	0.0000003	-118.89	0.0069902	149.89	0.0137136	-86.36	0.0000098	122.83
I (3-4)	0.0000123	76.54	0.0000034	-82.18	0.0016928	-130.37	0.0051104	11.56	0.0000271	-144.78
I (3-2)	0.0000190	-114.09	0.0000027	60.42	0.0026683	-120.64	0.0198827	-11.03	0.0000027	-170.55
V bus5	0.0000100	-48.09	0.0000043	126.84	0.0009762	-12.96	0.0136543	66.74	0.0000673	121.60
I (5-1)	0.0000243	-111.66	0.0000034	80.21	0.0038101	56.33	0.0264585	169.55	0.0000031	36.64
I (5-6)	0.0000228	35.70	0.0000075	175.51	0.0001100	-94.44	0.0015170	-22.60	0.0000041	39.28
V bus13	0.0001267	-57.65	0.0000458	85.58	0.0002964	-36.93	0.0030198	62.59	0.0000348	111.55
I (13-12)	0.0000044	-140.80	0.0000014	0.92	0.0000031	119.20	0.0000530	148.78	0.0000002	19.61
I (13-14)	0.0000233	41.32	0.0000076	-176.90	0.0000126	-45.07	0.0002148	-33.58	0.0000014	-155.50
V bus10	0.0003819	-47.19	0.0001406	95.00	0.0003882	-55.62	0.0010107	97.09	0.0000709	117.09
I (10-11)	0.0000441	-131.51	0.0000146	9.96	0.0000195	157.54	0.0003249	144.72	0.0000033	31.96
I (10-9)	0.0000694	57.38	0.0000233	-161.50	0.0000317	20.63	0.0003057	-44.40	0.0000066	-140.64
V bus 7	0.0001431	48.68	0.0000985	-113.03	0.0003820	95.67	0.0013217	-84.06	0.0003385	-64.12

ผลการคำนวณระบบ 14 บัส (2) กรณีปกติ

แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

- ผลการคำนวณที่ความถี่มูลฐาน

ที่ความถี่มูลฐาน ทำการแสดงค่าผลการคำนวณแรงดันบัส กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ และสถานะของโหลดไม่ทราบค่าแต่ละตัว รวมไปถึงค่า THD_v ที่แต่ละบัส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากเอกสารอ้างอิงค่อนข้างมาก

ตารางที่ 5.16 แสดงผลการคำนวณแรงดันที่บัสเมื่อเทียบกับเอกสารอ้างอิง [7] และ [8] โดยทำการรันโปรแกรมตามเอกสารอ้างอิง [7] และบันทึกผลการคำนวณ และนำไปเปรียบเทียบกับค่าในเอกสารอ้างอิง [8] (IEEE bust test) ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.16 ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส (2)

element	Va		% THDv	V[7]		% THDv [7]	V[8]		% THDv [8]
	mag (p.u.)	angle (deg.)		mag (p.u.)	angle (deg.)		mag (p.u.)	angle (deg.)	
Bus 1	1.06000	0.002	1.7616	1.06000	0.000	1.7624	1.06	0.000	1.767
Bus 2	1.04500	-5.680	2.1463	1.04500	-5.680	2.1463	1.045	-5.680	2.177
Bus 3	1.04275	-15.301	1.5088	1.04275	-15.301	1.5088	1.0427	-15.300	1.516
Bus 4	1.02823	-11.409	0.7617	1.02823	-11.409	0.7619	1.0282	-11.410	0.755
Bus 5	1.03373	-9.816	1.4255	1.03373	-9.816	1.4255	1.0337	-9.820	1.462
Bus 6	1.07000	-15.874	0.4608	1.07000	-15.874	0.4608	1.07	-15.870	0.468
Bus 7	1.01929	-14.470	0.4104	1.01929	-14.470	0.4104	1.0193	-14.470	0.423
Bus 8	1.02094	-14.494	0.5157	1.02091	-14.493	0.5158	1.0209	-14.490	0.522
Bus 9	1.01473	-16.086	0.4711	1.01475	-16.086	0.4711	1.0147	-16.090	0.482
Bus 10	1.01680	-16.329	0.4118	1.01682	-16.329	0.4118	1.0168	-16.330	0.421
Bus 11	1.03940	-16.210	0.3868	1.03942	-16.210	0.3868	1.0394	-16.210	0.394
Bus 12	1.05278	-16.715	0.3888	1.05279	-16.715	0.3888	1.0528	-16.720	0.391
Bus 13	1.04576	-16.730	0.3742	1.04576	-16.730	0.3742	1.0458	-16.730	0.376
Bus 14	1.01539	-17.384	0.3372	1.01540	-17.384	0.3372	1.0154	-17.390	0.343

ตารางที่ 5.17 ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าในระบบ 14 บัส (2)

element	f bus	t bus	Pflow (MW)	Qflow (MVAR)	Pback (MW)	Qback (MVAR)	Ploss (MW)	Qloss (MVAR)
line1	1	2	178.2	-25.1845	-172.646	36.3066	5.55415	11.1221
line2	1	5	83.6274	-3.33844	-80.2649	11.8288	3.36249	8.49039
line3	2	3	89.108	-14.6044	-85.6286	24.4945	3.4794	9.89006
line4	2	4	58.7424	-8.41635	-56.8849	10.033	1.85751	1.6167
line5	2	5	42.951	-7.52108	-41.9725	6.85111	0.97851	-0.66997
line6	3	4	-33.4	21.5071	34.4245	-22.6027	1.02446	-1.09559
line7	6	11	9.07969	12.1403	-8.88909	-11.7411	0.190603	0.399212
line8	6	12	8.08529	3.36637	-8.00298	-3.19502	0.082305	0.171344
line9	6	13	18.2872	10.7243	-18.0276	-10.2131	0.259596	0.511262
line10	9	10	3.71939	-3.88171	-3.71046	3.90542	0.008929	0.023713

element	f bus	t bus	Pflow (MW)	Qflow (MVAR)	Pback (MW)	Qback (MVAR)	Ploss (MW)	Qloss (MVAR)
line11	9	14	8.60551	-0.55654	-8.59634	0.751773	0.009172	0.195237
line12	10	11	-5.28925	-9.70439	5.38616	9.93126	0.096917	0.226868
line13	12	13	1.90565	1.59371	-1.89335	-1.58258	0.012298	0.011128
line14	13	14	6.42419	5.99204	-6.3036	-5.7465	0.120595	0.245543
line15	5	4	67.9833	-7.76266	-67.3996	8.24228	0.583656	0.479616
trf1	7	4	-26.7728	-3.64494	26.7728	5.11359	0	1.46865
trf2	9	4	-15.2955	-1.8388	15.2955	3.12078	0	1.28197
trf3	6	5	-46.655	17.9807	46.655	-12.5174	0	5.46337
trf4	8	7	-0.25088	0.95797	0.250882	-0.95631	0	0.001657
trf5	9	7	-26.522	-3.83409	26.522	4.60126	0	0.767166
Cap1	9		0	6.51779				
filt1 : 2nd	8		-0.08856	4.1917				
filt2 : 5th	8		-0.05397	3.2726				
filt3 : 7th	8		-0.05182	3.20684				
filt4 : 11th	8		-0.05058	3.16807				
filt5 : 11th	3		-0.00931	27.2801				
filt6 : 11th	3		-0.00931	27.2801				

ตารางที่ 5.18 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส (2)

Element	bus	Pinj (MW)	Qinj (MVAR)	type	เอกสารอ้างอิง [7],[8]				
					type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
Unknown1	1	261.827	-28.523	Source	slack			261.681	-16.9
Unknown2	2	18.1558	5.76478	Source	PV			40	42.4
Unknown3	3	-119.01	-8.55863	Load	Load	119.01	8.559		23.4
Unknown4	4	-47.7916	3.90703	Load	Load	47.79	-3.90		
Unknown5	5	-7.5991	-1.60011	Load	Load	7.599	1.60		
Unknown6	6	-11.2028	44.2117	Load	PV				12.2
Unknown7	8	-0.0059597	-12.8812	Load	Load		12.90		

Element	bus	Pinj (MW)	Qinj (MVAR)	type	เอกสารอ้างอิง [7],[8]				
					type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
Unknown8	9	-29.4926	-16.6289	Load	Load	29.50	16.60		
Unknown9	10	-8.99971	-5.79897	Load	Load	9.00	5.80		
Unknown10	11	-3.50292	-1.80981	Load	Load	3.50	1.80		
Unknown11	12	-6.09733	-1.60131	Load	Load	6.10	1.60		
Unknown12	13	-13.4968	-5.80361	Load	Load	13.50	5.799		
Unknown13	14	-14.8999	-4.99472	Load	Load	14.901	5.001		

- ผลการคำนวณที่ความถี่ฮาร์มอนิก

เนื่องมาจากผลการคำนวณที่ความถี่ฮาร์มอนิก มีจำนวนมาก จึงไม่สามารถแสดงออกมาได้ทั้งหมด ซึ่งในที่นี้จะแสดงค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส เปรียบเทียบกับค่าจากเอกสารอ้างอิง [7] , กราฟของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ,สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าที่บัสต่างๆ

ตารางที่ 5.19 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสของระบบ 14 บัส (2) เมื่อเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง [7]

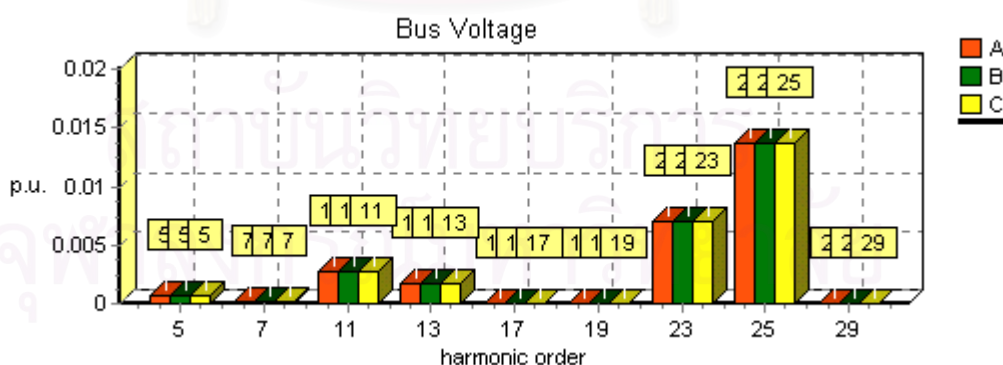
Element	h5		h7		h11		h13		h17	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus1	0.0001389	173.80	0.0001635	-32.02	0.0060707	124.51	0.0017705	43.13	0.0000524	156.96
[7]	0.0001389	173.80	0.0001635	-32.02	0.0060708	124.51	0.0017707	43.13	0.0000525	156.96
V bus2	0.0001047	168.31	0.0001550	-31.82	0.0054390	126.93	0.0014037	47.26	0.0000404	155.53
[7]	0.0001047	168.29	0.0001551	-31.82	0.0054391	126.94	0.0014037	47.27	0.0000404	155.53
V bus3	0.0006091	12.56	0.0000889	153.44	0.0027183	-120.80	0.0016858	-171.57	0.0000008	137.44
[7]	0.0006092	12.56	0.0000889	153.44	0.0027183	-120.80	0.0016859	-171.57	0.0000009	137.44
V bus4	0.0004129	-177.40	0.0002597	-29.80	0.0042722	117.69	0.0008470	27.70	0.0000262	-14.16
[7]	0.0004128	-177.40	0.0002597	-29.80	0.0042749	117.81	0.0008470	27.71	0.0000262	-14.14
V bus5	0.0003472	-179.50	0.0002408	-31.51	0.0052809	118.85	0.0012989	32.89	0.0000100	-48.09
[7]	0.0003472	-179.50	0.0002409	-31.51	0.0052810	118.85	0.0012990	32.89	0.0000101	-48.09

Element	h5		h7		h11		h13		h17	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus6	0.0004759	-179.62	0.0002249	-35.40	0.0024823	99.33	0.0006009	-9.30	0.0001069	-53.72
[7]	0.0004760	-179.62	0.0002249	-35.42	0.0024826	99.32	0.0006009	-9.30	0.0001073	-53.72
V bus7	0.0019871	-162.97	0.0007602	-13.97	0.0031082	94.80	0.0011289	-28.22	0.0001431	48.68
[7]	0.0019872	-162.97	0.0007603	-13.97	0.0031083	94.80	0.0011289	-28.22	0.0001432	48.68
V bus8	0.0043670	-157.03	0.0015263	-3.98	0.0009404	85.34	0.0009428	-30.01	0.0009453	104.96
[7]	0.0043673	-157.03	0.0015264	-3.98	0.0009430	84.81	0.0009428	-30.02	0.0009455	104.96
V bus9	0.0013700	-172.55	0.0005792	-26.75	0.0041087	83.88	0.0016280	-40.66	0.0004795	-44.45
[7]	0.0013701	-172.54	0.0005793	-26.74	0.0041088	83.89	0.0016281	-40.66	0.0004795	-44.45
V bus10	0.0011669	-174.64	0.0004931	-29.42	0.0035770	83.19	0.0013375	-40.92	0.0003819	-47.19
[7]	0.0011670	-174.64	0.0004931	-29.42	0.0035771	83.19	0.0013376	-40.92	0.0003819	-47.19
V bus11	0.0008149	-176.89	0.0003544	-32.25	0.0029316	88.50	0.0009167	-32.69	0.0002385	-49.74
[7]	0.0008150	-176.88	0.0003544	-32.25	0.0029316	88.50	0.0009167	-32.68	0.0002383	-49.75
V bus12	0.0005094	177.32	0.0002308	-39.30	0.0022876	92.11	0.0005661	-20.04	0.0001117	-58.07
[7]	0.0005094	177.32	0.0002308	-39.30	0.0022875	92.12	0.0005661	-20.04	0.0001115	-58.08
V bus13	0.0005541	177.12	0.0002468	-39.27	0.0023154	90.04	0.0005952	-24.68	0.0001267	-57.65
[7]	0.0005542	177.12	0.0002468	-39.27	0.0023154	90.04	0.0005953	-24.68	0.0001268	-57.65
V bus14	0.0009415	179.00	0.0003917	-36.70	0.0028518	78.35	0.0009822	-44.69	0.0002640	-53.84
[7]	0.0009416	178.99	0.0003917	-36.70	0.0028519	78.35	0.0009824	-44.70	0.0002645	-53.84

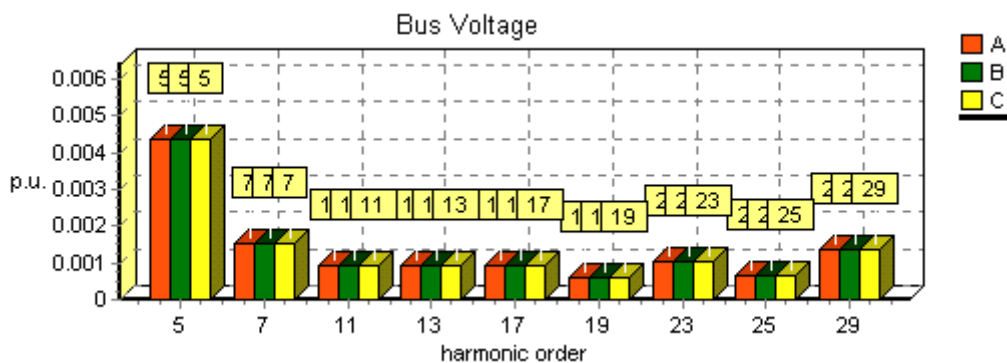
ตารางที่ 5.19 (ต่อ)

Element	h19		h23		h25		h29	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus1	0.0000079	-18.79	0.0047462	-36.1	0.0169143	90.431	0.0000676	-58.36
V [7]	0.0000081	-18.68	0.0047472	-36.1	0.0169238	90.412	0.0000677	-58.37
V bus2	0.0000056	-29.21	0.0009969	151.63	0.0216900	-106.59	0.0000067	-49.54
V [7]	0.0000058	-29.16	0.0009971	151.64	0.0216899	-106.59	0.0000067	-49.59
V bus3	0.0000003	-118.9	0.0069902	149.89	0.0137136	-86.36	0.0000098	122.83
V [7]	0.0000003	-118.9	0.0069902	149.89	0.0137136	-86.365	0.0000098	122.83
V bus4	0.0000075	-172.6	0.0023217	135.58	0.0060618	-70.665	0.0000416	126.05
V [7]	0.0000076	-172.6	0.0023219	135.59	0.0060620	-70.666	0.0000417	126.05
V bus5	0.0000043	126.84	0.0009762	-12.96	0.0136543	66.74	0.0000673	121.6
V [7]	0.0000044	126.84	0.0009763	-12.96	0.0136543	66.744	0.0000673	121.6

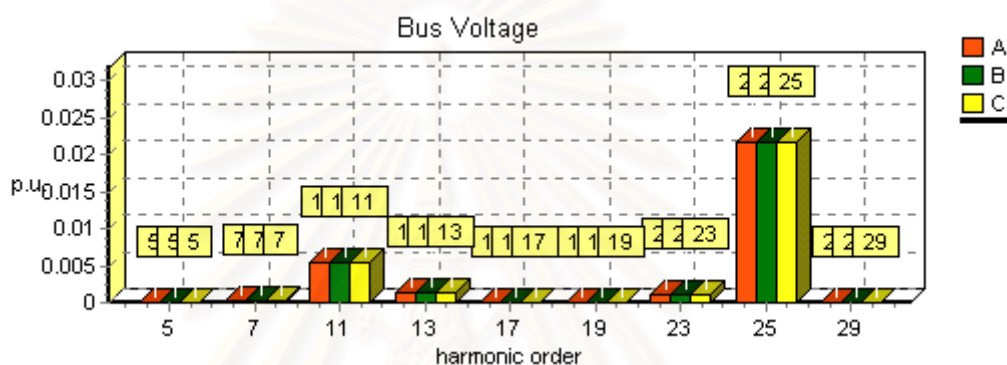
Element	h19		h23		h25		h29	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus6	0.0000390	89.687	0.0003625	-27.95	0.0041675	65.237	0.0000380	115.6
V [7]	0.0000390	89.737	0.0003621	-27.97	0.0041673	65.25	0.0000377	115.49
V bus7	0.0000985	-113	0.0003820	95.67	0.0013217	-84.06	0.0003385	-64.12
V [7]	0.0000985	-113	0.0003821	95.671	0.0013218	-84.059	0.0003385	-64.12
V bus8	0.0005995	-98.53	0.0010384	31.703	0.0006515	-116.03	0.0013392	-63.51
V [7]	0.0005998	-98.52	0.0010386	31.717	0.0006515	-116.01	0.0013396	-63.51
V bus9	0.0001773	97.585	0.0004481	-57.62	0.0008010	136.77	0.0000868	119.22
V [7]	0.0001775	97.587	0.0004482	-57.62	0.0008010	136.77	0.0000869	119.22
V bus10	0.0001406	95	0.0003882	-55.62	0.0010107	97.09	0.0000709	117.09
V [7]	0.0001406	94.997	0.0003882	-55.62	0.0010108	97.086	0.0000709	117.09
V bus11	0.0000875	92.771	0.0003501	-43.59	0.0023974	70.556	0.0000526	115.69
V [7]	0.0000874	92.757	0.0003501	-43.54	0.0023975	70.557	0.0000523	115.65
V bus12	0.0000405	85.317	0.0003031	-34.52	0.0032834	62.078	0.0000336	111.69
V [7]	0.0000403	85.301	0.0003032	-34.49	0.0032837	62.081	0.0000335	111.71
V bus13	0.0000458	85.58	0.0002964	-36.93	0.0030198	62.59	0.0000348	111.55
V [7]	0.0000458	85.579	0.0002964	-36.93	0.0030199	62.594	0.0000349	111.55
V bus14	0.0000959	88.737	0.0002971	-56.5	0.0011900	74.101	0.0000489	112.12
V [7]	0.0000964	88.751	0.0002973	-56.64	0.0011899	74.119	0.0000498	112.14



รูปที่ 5.8 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 3



รูปที่ 5.9 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 8



รูปที่ 5.10 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2

ตารางที่ 5.20 แรงดันฮาร์มอนิกสูงสุดที่แต่ละความถี่

H	Maximum Harmonic Voltage (p.u.)	bus	% (1 p.u. =100%)
H5	0.0043670	8	0.4367
H7	0.0015263	8	0.1526
H11	0.0054390	2	0.5439
H13	0.0016890	3	0.1689
H17	0.0009453	8	0.0945
H19	0.0006000	8	0.0600
H23	0.0069900	3	0.6990
H25	0.0216900	2	2.1690
H29	0.0013390	8	0.1339

ตารางที่ 5.21 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าที่ความถี่ฮาร์โมนิก

element	bus	H1	H5	H7	H11	H13	H17	H19	H23	H25	H29
unknown1	1	Source	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown2	2	Source	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown3	3	Load	Source	Source	Source	Source	Source	Source	Source	Source	Source
unknown4	4	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown5	5	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown6	6	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown7	8	Load	Source	Source	Source	Source	Source	Source	Source	Source	Source
unknown8	9	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown9	10	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown10	11	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown11	12	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown12	13	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load
unknown13	14	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load	Load

ตารางที่ 5.22 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของบัส 3 (HVDC 12 pulse)

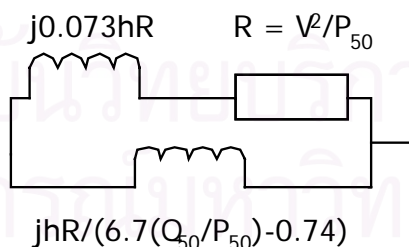
H	ค่าจากโปรแกรม		ค่าจากเอกสารอ้างอิง [7]	
	mag(p.u.)	angle (deg.)	mag(p.u.)	angle (deg.)
H5	0.0000002	-70.6884		
H7	0	66.9398		
H11	0.0867304	-35.5319	0.0867	-35.5348
H13	0.067051	100.451	0.0671	100.4552
H17	0.0000005	-132.794		
H19	0	-40.708		
H23	0.0258604	60.8092	0.0259	60.8054
H25	0.0275773	-167.047	0.0276	-167.0546
H29	0.0000001	-148.018		

ตารางที่ 5.23 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของบัส 8 (SVC 6 pulse)

H	ค่าจากโปรแกรม		ค่าจากเอกสารอ้างอิง [7]	
	mag(p.u.)	angle (deg.)	mag(p.u.)	angle (deg.)
H5	0.0088697	-161.472	0.00887036	-161.5
H7	0.00315867	-9.76377	0.00315896	-9.8
H11	0.00172914	111.234	0.00171847	110.7
H13	0.0009477	-96.8635	0.00094769	-96.9
H17	0.00078331	23.0978	0.00078342	23.1
H19	0.00040412	176.566	0.00040435	176.6
H23	0.00054326	-64.5019	0.00054334	-64.5
H25	0.00016436	91.214	0.00016427	91.2
H29	0.00050529	-151.437	0.00050543	-151.4

จากข้อมูลของระบบ ทำให้เราทราบว่า บัส 1 ,2 และ 6 มีแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมที่ HSE คำนวณออกมาได้ จึงเป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นกัน และสำหรับการคำนวณในระบบทดสอบนี้ ใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกตามบทที่ 2 จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมที่ HSE คำนวณออกมา กับค่าที่คำนวณมาจากแบบจำลอง

สำหรับบัสที่เหลืออกเว้น บัส 3 และ 8 เป็นโหลดบัส และจากข้อมูลของระบบ มีโหลดต่ออยู่เพียงอย่างเดียว สำหรับแบบจำลองของโหลดใช้แบบจำลองที่ 3 ตาม [10] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



Model C

รูปที่ 5.11 แบบจำลองของโหลด

จากข้อมูลของแบบจำลอง ทำการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมที่ HSE คำนวณออกมา กับค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณมาจากแบบจำลอง

ตาราง 5.24 ผลการคำนวณอิมพีแดนซ์อนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง [7]

H	Z gen Bus1	Z gen Bus 2	Z gen Bus 6	Z gen [7]
H5	0.0568536+1.24674j	0.0537748+1.25456j	0.0555324+1.24973j	0.0559 + 1.2500i
H7	0.0662012+1.75235j	0.0659093+1.74435j	0.062356+1.75181j	0.0661 + 1.7500i
H11	0.0817883+2.74978j	0.0778993+2.7535j	0.0791438+2.74902j	0.0829 + 2.7500i
H13	0.0882773+3.24857j	0.0939655+3.25101j	0.0895508+3.25136j	0.0901 + 3.2500i
H17	0.0982903+4.23197j	0.106644+4.28141j	0.102351+4.14424j	0.1031 + 4.2500i
H19	0.160463+4.79726j	0.0263713+4.99796j	0.131426+4.68017j	0.1090 + 4.7500i
H23	0.121001+5.7432j	0.115714+5.72148j	0.1012+5.79792j	0.1199 + 5.7500i
H25	0.12544+6.23845j	0.121792+6.23212j	0.132441+6.25341j	0.1250 + 6.2500i
H29	0.218998+7.34008j	0.328319+7.39205j	0.0608757+7.53716j	0.1346 + 7.2500i

H	Z Bus 4	Z Bus 4 [7]	Z Bus 5	Z Bus 5 [7]
H5	2.50055+0.173588j	2.4936 + 0.1829i	12.2466+6.61681j	12.5766 + 6.4997i
H7	2.59449+0.717407j	2.5882 + 0.7226i	12.4548+8.00038j	12.6762 + 8.0073i
H11	2.60268+1.55593j	2.6506 + 1.6184i	13.1516+12.7282j	12.7388 +11.5051i
H13	2.66202+2.02152j	2.6630 + 2.0262i	12.7425+13.4399j	12.7510 +13.3493i
H17	2.70193+2.79133j	2.6761 + 2.8065i	10.429+14.7788j	12.7637 +17.1172i
H19	2.38075+3.03934j	2.6798 + 3.1862i	4.44289+12.945j	12.7673 +19.0242i
H23	2.68453+3.9306j	2.6845 + 3.9337i	12.5939+22.5444j	12.7719 +22.8645i
H25	2.68455+4.29792j	2.6861 + 4.3034i	12.8879+24.6658j	12.7734 +24.7935i
H29	2.6927+5.04106j	2.6883 + 5.0373i	10.4878+28.2919j	12.7755 +28.6633i

H	Z Bus 9	Z Bus 9 [7]	Z Bus 10	Z Bus 10 [7]
H5	1.87739+1.97583j	1.8781 + 1.9753i	5.46559+6.42453j	5.4647 + 6.4249i
H7	2.07966+2.19661j	2.0794 + 2.1977i	6.19253+7.16438j	6.2045 + 7.1690i
H11	2.22536+2.80082j	2.2273 + 2.7977i	6.77174+9.06155j	6.7729 + 9.0613i
H13	2.2587+3.1432j	2.2584 + 3.1437i	6.89042+10.148j	6.8950 + 10.1492i
H17	2.2945+3.88363j	2.2918 + 3.8818i	7.00721+12.4609j	7.0276 + 12.4773i
H19	2.30843+4.26768j	2.3014 + 4.2651i	7.05581+13.7011j	7.0658 + 13.6895i
H23	2.32139+5.04333j	2.3137 + 5.0489i	7.07488+16.1991j	7.1150 + 16.1721i
H25	2.31643+5.44823j	2.3178 + 5.4466i	7.10873+17.4409j	7.1314 + 17.4337i
H29	2.39326+6.32235j	2.3236 + 6.2500i	7.07229+19.9173j	7.1548 + 19.9844i

ตารางที่ 5.24 (ต่อ)

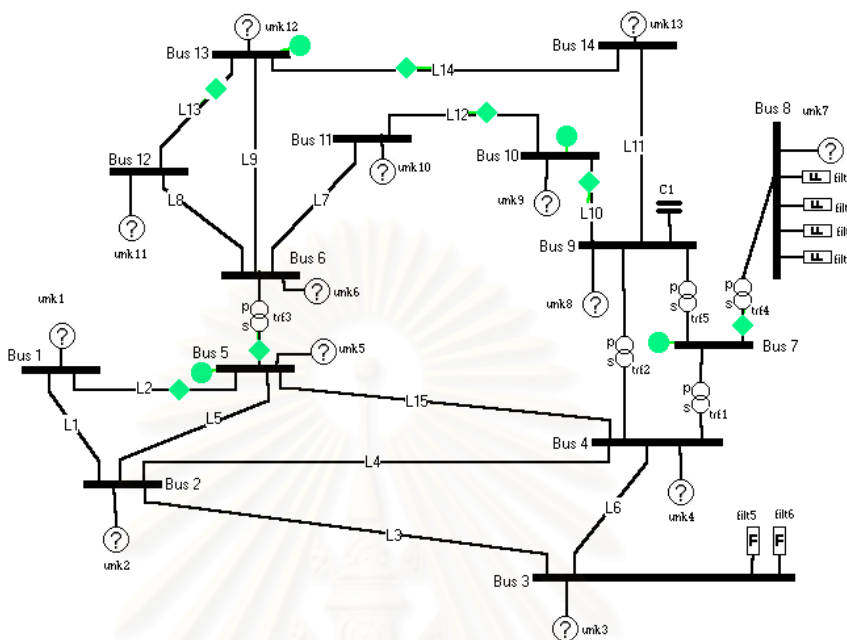
H	Z Bus 11	Z Bus 11 [7]	Z Bus 12	Z Bus 12 [7]
H5	17.9287+17.4186j	17.8740 +17.4810i	15.2389+9.03991j	15.2041 + 9.0525i
H7	19.7867+19.3601j	19.4921 +19.4587i	15.433+10.6832j	15.4661 +10.7357i
H11	20.7493+24.8475j	20.6510 +24.9346i	15.6603+14.8608j	15.6330 +14.9296i
H13	21.0077+28.0583j	20.8910 +28.0865i	15.6592+17.1776j	15.6657 +17.1950i
H17	22.8572+35.7586j	21.1483 +34.7918i	17.1896+22.5713j	15.7001 +21.8685i
H19	22.8308+39.7893j	21.2218 +38.2673i	18.2045+25.7922j	15.7097 +24.2469i
H23	21.9382+44.1539j	21.3161 +45.3630i	15.5859+28.5394j	15.7221 +29.0512i
H25	21.1084+49.0841j	21.3474 +48.9609i	15.651+31.4723j	15.7262 +31.4696i
H29	24.2814+59.5456j	21.3919 +56.2235i	16.401+36.0638j	15.7320 +36.3276i

H	Z Bus 13	Z Bus 13 [7]	Z Bus 14	Z Bus 14 [7]
H5	5.32655+4.5247j	5.3318 + 4.5298i	5.22786+3.70144j	5.2282 + 3.6960i
H7	5.64792+5.05843j	5.6658 + 5.0776i	5.40477+4.23983j	5.4105 + 4.2353i
H11	5.90201+6.60506j	5.8946 + 6.6179i	5.5288+5.68977j	5.5301 + 5.6881i
H13	5.93657+7.49282j	5.9410 + 7.4951i	5.54634+6.49636j	5.5538 + 6.4955i
H17	6.07251+9.39922j	5.9903 + 9.3477i	5.51611+8.14401j	5.5788 + 8.1808i
H19	5.97814+10.3481j	6.0044 +10.3035i	5.42959+8.9261j	5.5859 + 9.0444i
H23	5.99259+12.1385j	6.0223 +12.2494i	5.49266+10.8789j	5.5949 +10.7954i
H25	6.00851+13.2424j	6.0283 +13.2342i	5.61465+11.6761j	5.5979 +11.6791i
H29	5.94661+14.9003j	6.0367 +15.2193i	4.98676+12.6553j	5.6022 +13.4573i

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมที่คำนวณมาจาก HSE และจากแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโหลด ที่บางความถี่มีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากอันได้แก่ลำดับที่ 17 ,19 และ 29 ทั้งนี้เป็นเพราะที่ฮาร์มอนิกลำดับดังกล่าว ขนาดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าน้อยมาก และสำหรับการป้อนข้อมูลเข้าสู่ HSE จะใช้ทศนิยมจำนวน 6 หลัก แต่ค่าของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่คำนวณจากโปรแกรมโหลดโพลาร์-ฮาร์มอนิกโพลาร์ โดยทั่วไปใช้ตัวแปรแบบ double ซึ่งจะเก็บข้อมูลถึง 16 ตัวอักษร ทำให้ความผิดพลาดสูง

5.2.2 กรณีประมาณค่าตัวแปรสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial HSE)

ทำการเลือกติดตั้งเครื่องมือวัดดังรูป โดยเน้นที่ส่วนบนของระบบอันได้แก่ บัส 5 ถึง บัส 14



รูปที่ 5.12 ระบบ 14 บัส (2) กรณี partial HSE

ตารางที่ 5.25 ข้อมูลของเครื่องมือวัดของระบบ 14 บัส(2) กรณี partial HSE

Element	h1		h5		h7		h11		h13	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus5	1.033727	-9.816	0.0003472	-179.500	0.0002408	-31.510	0.0052809	118.850	0.0012989	32.890
I (5-1)	0.784848	178.568	0.0001536	99.603	0.0000111	-106.960	0.0020207	-142.340	0.0007214	135.040
I (5-6)	0.46729	5.203	0.0001029	-89.940	0.0000128	-78.580	0.0011104	44.600	0.0002903	-31.810
V bus13	1.04576	-16.730	0.0005541	177.120	0.0002468	-39.270	0.0023154	90.040	0.0005952	-24.680
I (13-12)	0.023597	123.379	0.0000437	97.310	0.0000113	-119.850	0.0000397	-64.670	0.0000212	-165.730
I (13-14)	0.084005	-59.737	0.000222	-82.710	0.0000596	61.680	0.0001956	132.160	0.0001037	21.760
V bus10	1.0168	-16.329	0.0011669	-174.640	0.0004931	-29.420	0.003577	83.190	0.0013375	-40.920
I (10-11)	0.108696	102.263	0.0003674	105.425	0.0001041	-108.740	0.0003367	-26.990	0.0001801	-146.000
I (10-9)	0.05298	-149.863	0.0004918	-66.410	0.0001514	81.210	0.000574	-179.490	0.0002645	52.200
V bus 7	1.019287	-14.470	0.0019871	-162.970	0.0007602	-13.970	0.0031082	94.800	0.0011289	-28.220
I (7-8)	0.0097	60.830	0.00027243	-62.420	0.0006396	95.650	0.0011282	8.850	0.0000825	-109.230
Zero inj 7	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000

ตารางที่ 5.25 (ต่อ)

Element	h17		h19		h23		h25		h29	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus5	0.00001	-48.090	0.0000043	126.840	0.0009762	-12.960	0.0136543	66.740	0.0000673	121.600
I (5-1)	0.0000243	-111.660	0.0000034	80.210	0.0038101	56.330	0.0264585	169.550	0.0000031	36.640
I (5-6)	0.0000228	35.700	0.0000075	175.510	0.00011	-94.440	0.001517	-22.600	0.0000041	39.280
V bus13	0.0001267	-57.650	0.0000458	85.580	0.0002964	-36.930	0.0030198	62.590	0.0000348	111.550
I (13-12)	0.0000044	-140.800	0.0000014	0.921	0.0000031	119.200	0.000053	148.780	0.0000002	19.610
I (13-14)	0.0000233	41.320	0.0000076	-176.900	0.0000126	-45.070	0.0002148	-33.580	0.0000014	-155.500
V bus10	0.0003819	-47.190	0.0001406	95.000	0.0003882	-55.620	0.0010107	97.090	0.0000709	117.090
I (10-11)	0.0000441	-131.510	0.0000146	9.960	0.0000195	157.540	0.0003249	144.720	0.0000033	31.960
I (10-9)	0.0000694	57.380	0.0000233	-161.500	0.0000317	20.630	0.0003057	-44.400	0.0000066	-140.640
V bus 7	0.0001431	48.680	0.0000985	-113.030	0.000382	95.670	0.0013217	-84.060	0.0003385	-64.120
I (7-8)	0.0002919	-157.210	0.0001508	-5.730	0.000231	100.190	0.0001914	-149.900	0.0001959	26.700
Zero inj 7	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000

ผลการคำนวณระบบ 14 บัส (2) กรณี Partial HSE

กรณีนี้ HSE จะทำการวิเคราะห์ที่ได้เฉพาะส่วนบนของระบบ แสดงผลการคำนวณในตารางต่อไปนี้ ผลการคำนวณจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

- ผลการคำนวณที่ความถี่มูลฐาน

ตารางที่ 5.26 ผลการคำนวณแรงดันที่บัสของระบบ 14 บัส(2) กรณี Partial HSE

element	obs	Va		% THDv	V [7]		% THDv [7]	V [8]		% THDv [8]
		mag (p.u.)	Angle (deg.)		mag (p.u.)	Angle (deg.)		mag (p.u.)	Angle (deg.)	
Bus 1	T	1.06	0	1.7615	1.06000	0.000	1.762	1.06	0.000	1.767
Bus 2	F	0	0	0	1.04500	-5.680	2.146	1.045	-5.680	2.177
Bus 3	F	0	0	0	1.04275	-15.301	1.508	1.0427	-15.300	1.516
Bus 4	T	1.0282	-11.41	0.7617	1.02823	-11.409	0.761	1.0282	-11.410	0.755
Bus 5	T	1.0337	-9.82	1.4255	1.03373	-9.816	1.425	1.0337	-9.820	1.462

element	obs	Va		%	V [7]		%	V [8]		%
		mag (p.u.)	Angle (deg.)		THDv	mag (p.u.)		Angle (deg.)	THDv [7]	
Bus 6	T	1.0699	-15.87	0.4608	1.07000	-15.874	0.460	1.07	-15.870	0.468
Bus 7	T	1.0192	-14.47	0.4104	1.01929	-14.470	0.410	1.0193	-14.470	0.423
Bus 8	T	1.0209	-14.49	0.5158	1.02091	-14.493	0.515	1.0209	-14.490	0.522
Bus 9	T	1.0147	-16.09	0.4711	1.01475	-16.086	0.471	1.0147	-16.090	0.482
Bus 10	T	1.0168	-16.33	0.4117	1.01682	-16.329	0.411	1.0168	-16.330	0.421
Bus 11	T	1.0393	-16.21	0.3867	1.03942	-16.210	0.386	1.0394	-16.210	0.394
Bus 12	T	1.0527	-16.71	0.3887	1.05279	-16.715	0.388	1.0528	-16.720	0.391
Bus 13	T	1.0457	-16.73	0.3741	1.04576	-16.730	0.374	1.0458	-16.730	0.376
Bus 14	T	1.0153	-17.38	0.3371	1.01540	-17.384	0.337	1.0154	-17.390	0.343

ตารางที่ 5.27 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าของระบบ 14 บัส (2) กรณี Partial HSE

element	bus	obs	Pinj (MW)	Qinj (MVAR)	type	เอกสารอ้างอิง [7],[8]				
						type	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
unknow1	1	F				slack			261.68	-16.9
unknow2	2	F				PV			40	42.4
unknow3	3	F				Load	119.01	8.56		23.4
unknow4	4	F				Load	47.79	-3.90		
unknow5	5	F				Load	7.60	1.60		
unknow6	6	T	-11.2028	44.21172	Load	PV				12.2
unknow7	8	T	-0.00597	-12.8812	Load	Load		12.90		
unknow8	9	T	-29.4926	-16.6289	Load	Load	29.50	16.60		
unknow9	10	T	-8.99971	-5.79897	Load	Load	9.00	5.80		
unknow10	11	T	-3.50292	-1.80981	Load	Load	3.50	1.80		
unknow11	12	T	-6.09733	-1.60131	Load	Load	6.10	1.60		
unknow12	13	T	-13.4968	-5.80361	Load	Load	13.50	5.799		
unknow13	14	T	-14.8999	-4.99472	Load	Load	14.901	5.001		

ผลการคำนวณที่ความถี่ฮาร์โมนิก

เนื่องจากผลการคำนวณที่ความถี่ฮาร์โมนิกมีจำนวนมาก และโดยส่วนใหญ่จะมีค่าเกือบจะเท่ากับผลการคำนวณในกรณีปกติ ดังนั้นจะเลือกแสดงออกมาเพียงบางส่วน

ตารางที่ 5.28 แรงดันฮาร์โมนิกที่บัสของระบบ 14 บัส(2) กรณี Partial HSE

เมื่อเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง [7]

Element	h5		h7		h11		h13		h17	
	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
V bus1	0.0001389	173.796	0.0001635	-32.017	0.0060707	124.509	0.0017705	43.131	0.0000524	156.959
V [7]	0.0001389	173.796	0.0001635	-32.017	0.0060708	124.505	0.0017707	43.126	0.0000525	156.955
V bus2										
V [7]										
V bus3										
V [7]										
V bus4	0.0004129	-177.401	0.0002597	-29.802	0.0042722	117.692	0.0008470	27.705	0.0000262	-14.162
V [7]	0.0004128	-177.404	0.0002597	-29.803	0.0042749	117.815	0.0008470	27.709	0.0000262	-14.145
V bus5	0.0003472	-179.500	0.0002408	-31.510	0.0052809	118.850	0.0012989	32.890	0.0000100	-48.090
V [7]	0.0003472	-179.501	0.0002409	-31.508	0.0052810	118.846	0.0012990	32.886	0.0000101	-48.088
V bus6	0.0004759	-179.619	0.0002249	-35.403	0.0024823	99.327	0.0006009	-9.296	0.0001069	-53.720
V [7]	0.0004760	-179.620	0.0002249	-35.423	0.0024826	99.317	0.0006009	-9.299	0.0001073	-53.720
V bus7	0.0019871	-162.970	0.0007602	-13.970	0.0031082	94.800	0.0011289	-28.220	0.0001431	48.680
V [7]	0.0019872	-162.965	0.0007603	-13.968	0.0031083	94.796	0.0011289	-28.222	0.0001432	48.680
V bus8	0.0043670	-157.033	0.0015263	-3.977	0.0009404	85.343	0.0009428	-30.015	0.0009453	104.964
V [7]	0.0043673	-157.027	0.0015264	-3.976	0.0009430	84.814	0.0009428	-30.022	0.0009455	104.959
V bus9	0.0013700	-172.546	0.0005792	-26.747	0.0041087	83.883	0.0016280	-40.663	0.0004795	-44.452
V [7]	0.0013701	-172.544	0.0005793	-26.743	0.0041088	83.885	0.0016281	-40.663	0.0004795	-44.449
V bus10	0.0011669	-174.640	0.0004931	-29.420	0.0035770	83.190	0.0013375	-40.920	0.0003819	-47.190
V [7]	0.0011670	-174.638	0.0004931	-29.415	0.0035771	83.193	0.0013376	-40.920	0.0003819	-47.187
V bus11	0.0008149	-176.885	0.0003544	-32.253	0.0029316	88.501	0.0009167	-32.685	0.0002385	-49.743
V [7]	0.0008150	-176.882	0.0003544	-32.251	0.0029316	88.505	0.0009167	-32.684	0.0002383	-49.748

ตารางที่ 5.30 สถานะของโหลดที่ไม่ทราบค่าที่บัส 8 (เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก)

H	ค่าจากโปรแกรม		ค่าจากเอกสารอ้างอิง [7]	
	mag(p.u.)	angle (deg.)	mag(p.u.)	angle (deg.)
H5	0.0088697	-161.472	0.00887036	0
H7	0.0031587	-9.76377	0.00315896	360
H11	0.0017291	111.234	0.00171847	1080
H13	0.0009477	-96.8635	0.00094769	1080
H17	0.0007833	23.0978	0.00078342	1800
H19	0.0004041	176.566	0.00040435	2160
H23	0.0005433	-64.5019	0.00054334	2520
H25	0.0001644	91.214	0.00016427	3240
H29	0.0005053	-151.437	0.00050543	3600

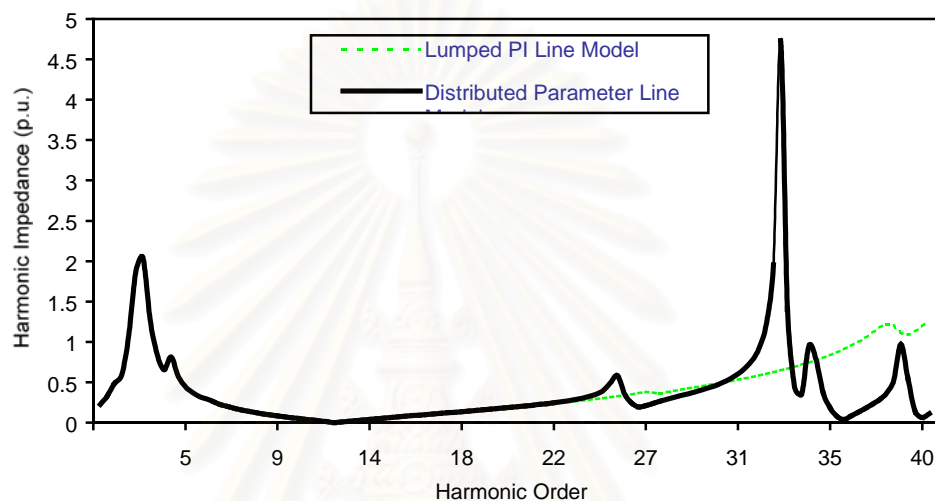
ตารางที่ 5.31 สถานะของระบบเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดที่บัสต่างๆกัน

บัสที่ติดตั้งเครื่องมือวัด	บัสที่มีจุดวัดเสมือน	จำนวนบัสที่ติดตั้งเครื่องมือวัด	โหลดที่ไม่ทราบค่าที่ไม่สามารถระบุสถานะได้	แรงดันที่บัสที่ไม่สามารถระบุได้
2(5*3) , 6(4*3) , 8(1*3) , 9(4*3)		4	ไม่มี	ไม่มี
2(5*3) , 6(4*3) , 9(4*3)	7(1*3)	3	ไม่มี	ไม่มี
3(3*3) , 5(3*3) , 10(3*3) , 13(3*3) , 7(1*3)	7(1*3)	5	ไม่มี	ไม่มี
5(3*3) , 10(3*3) , 13(3*3) , 7(2*3)	7(1*3)	4	1,2,3,4,5	2,3
2(5*3) , 6(4*3)		2	4 , 8 , 9 , 10 , 11 , 13 , 14	7 , 8 , 9 , 10 , 14
4(5*3) , 5(5*3)	7(1*3)	2	6 , 7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14	9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14
4(5*3) , 5(5*3) , 13(3*4)	7(1*3)	3	6 , 10 , 8 , 9	10 , 11
5(4*3) , 9(4*3) , 6(4*3)	7(1*3)	3	1 , 2 , 3 , 4 , 5	1 , 2 , 3

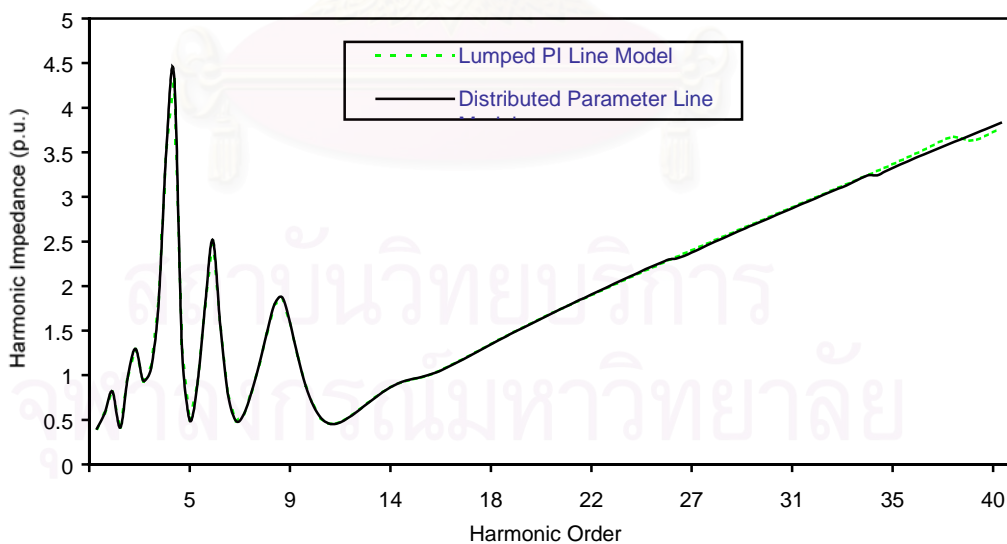
* หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ จำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ ซึ่งการวัดสัญญาณจะวัดพร้อมกันทั้งสามเฟส ดังนั้น 4(1*3) หมายถึง ติดตั้งเครื่องมือวัดไว้ที่บัส 4 และวัดข้อมูลทางไฟฟ้าออกมา 1 ชุด อาจเป็นทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดันทั้งสามเฟส หรือทั้งขนาดและมุมเฟสของกระแสทั้งสามเฟส

5.2.3 วิเคราะห์ผลการคำนวณ

ในการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก อิมพีแดนซ์แกนเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้วิเคราะห์ระบบได้อย่างรวดเร็ว และบอกถึงแนวโน้มของการไหลของกระแสฮาร์มอนิก รวมไปถึงการขยายกระแสได้เป็นอย่างดี จากเอกสารอ้างอิง [7] และ [8] แสดงอิมพีแดนซ์แกนที่บัส 3 และบัส 8 อันเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.13 อิมพีแดนซ์แกนที่บัส 3 [7]



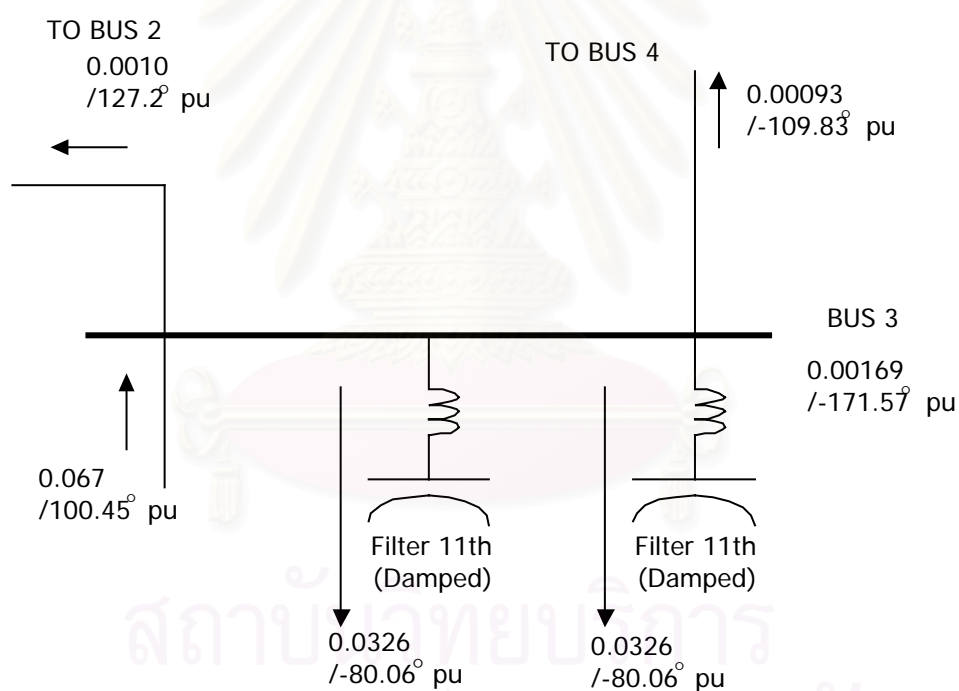
รูปที่ 5.14 อิมพีแดนซ์แกนที่บัส 8 [7]

ระบบนี้มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ที่บัส 3 จ่ายกระแสฮาร์มอนิกออกมา มากกว่าที่บัส 8 ค่อนข้างมาก สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่บัส 8 มีผลต่อระบบไม่มาก

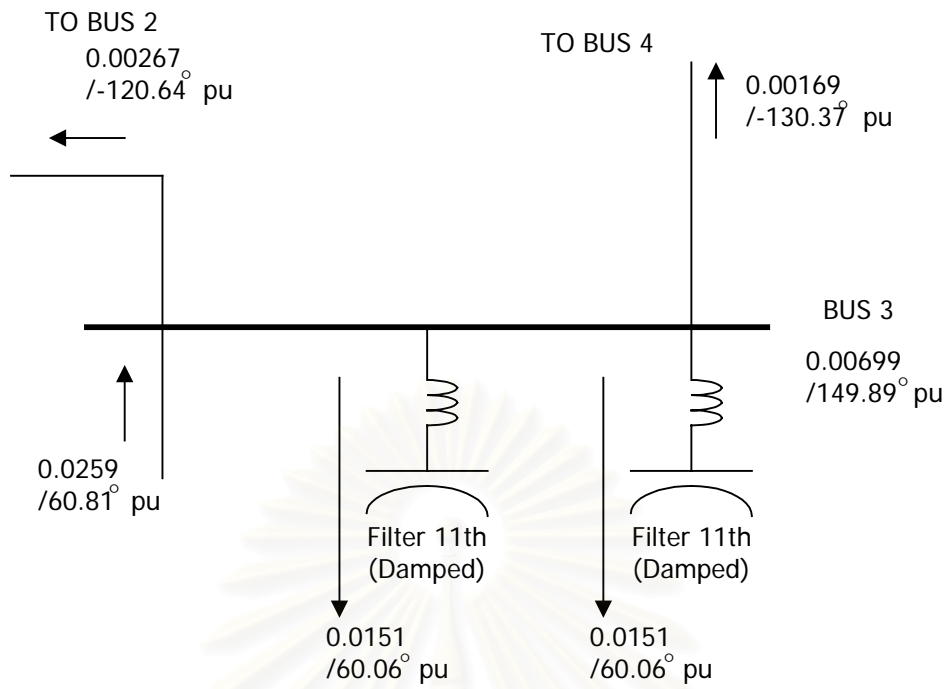
ดังนั้นจากอิมพีแดนซ์สแกน หาค่าแรงดันฮาร์โมนิกโดยประมาณที่บัส 3 เมื่อไม่คิดผลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกที่บัส 8 จะพบว่าเมื่อมีแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 13, 23 และ 25 มีค่าสูง ฮาร์โมนิกลำดับที่มีผลมากต่อระบบทดสอบ 14 บัส (2) คือ ลำดับที่ 13, 23 และ 25

ตารางที่ 5.32 แรงดันฮาร์โมนิกโดยประมาณที่บัส 3

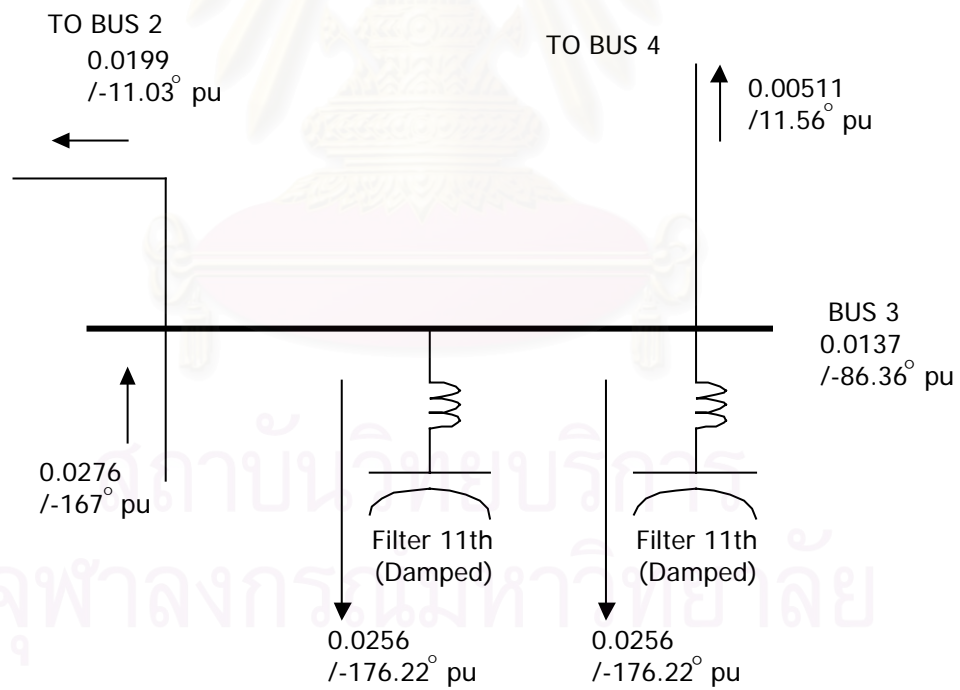
H	mag(p.u.)	Estimated Zh (From Graph)	Estimated Voltage (p.u.)
11	0.0867	0.025	0.0021675
13	0.0671	0.0251	0.0016851
23	0.0259	0.254	0.0065786
25	0.0276	0.498	0.0138000



รูปที่ 5.15 การไหลของกระแสฮาร์โมนิกที่ลำดับ 13



รูปที่ 5.16 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับ 23



รูปที่ 5.17 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับ 25

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการประมาณค่าตัวแปรสเททฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Harmonic State Estimation, HSE) ซึ่งใช้วิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด (Least Square Estimator) โดยใช้หลักการของกระแสที่ฉีดเข้าบัส จากหลักการดังกล่าวได้นำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้ใช้สามารถที่จะสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้าลงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยการเลือกรูปภาพอุปกรณ์ต่างๆที่มีอยู่ในโปรแกรมมาสร้างเป็นแผนภาพเส้นเดี่ยวได้ ซึ่งง่ายต่อความเข้าใจเนื่องจากโปรแกรมออกมาในรูปแบบรูปภาพ

ในส่วนการวิเคราะห์ โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ว่า โหลดที่ไม่ทราบค่าแต่ละตัว มีพฤติกรรมเป็นแหล่งจ่ายหรือเป็นโหลดที่แต่ละความถี่ที่สนใจ และบอกค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของโหลด ซึ่งประกอบไปด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำออกมา ซึ่งความถูกต้องของโปรแกรมขึ้นอยู่กับความถูกต้องของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในระบบ ถ้าโปรแกรม HSE ใช้แบบจำลองเหมือนกับโปรแกรมฮาร์โมนิกโพลาร์ที่ใช้เป็นฐานอ้างอิง พอจะกล่าวได้ว่าผลการคำนวณมีความถูกต้องและแม่นยำสูง

ในส่วนของการคำนวณ โปรแกรมจะคำนวณสมการทั้งหมดบนระบบเปอร์ยูนิท ซึ่งจากการคำนวณจะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำมากที่ความถี่ฮาร์โมนิก ดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดจากการป้อนข้อมูลและจำนวนหลักทศนิยมที่เลือกใช้ ก็อาจมีผลที่ฮาร์โมนิกอันดับสูงๆ ขึ้นไป

อนึ่ง การพัฒนาโปรแกรมนี้ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ บอร์แลนด์เดลไฟล์ เวอร์ชันที่ 5 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ภาษาปาสคาล ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณและแสดงผล สำหรับข้อเสนอแนะที่จะเสนอไว้ เพื่อที่ว่าหากได้รับการศึกษาและปรับปรุงให้ดีขึ้น ก็จะทำให้โปรแกรมมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นไปอีก

1. ผู้เขียนได้พัฒนาคลาสพื้นฐานและฟังก์ชันสำหรับการคำนวณเกี่ยวกับจำนวนเชิงซ้อน และการแก้สมการเชิงเส้น ซึ่งถ้ามีการพัฒนาต่อไป ทำการรวบรวมและเพิ่มฟังก์ชันที่จำเป็น จะทำให้การพัฒนาโปรแกรมบนบอร์แลนด์เดลไฟล์ทำได้สะดวกยิ่งขึ้น
2. การพัฒนาความถูกต้องและแม่นยำของโปรแกรม ซึ่งความถูกต้องของโปรแกรมขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งในแบบจำลองที่ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์ แต่เนื่องมาจากปัญหาที่ไม่สามารถนำเอาข้อมูลจากเครื่องมือวัดมาใช้ตรงๆ ได้ ต้องใช้ผลจากโปรแกรมฮาร์โมนิกโพลาร์ก่อน ทำให้ผู้เขียนต้องให้แบบจำลองที่

อิงตามแบบจำลองของโปรแกรมฮาร์โมนิกโฟลว์ที่เลือกใช้เป็นฐานอ้างอิง เนื่องด้วยไม่สามารถหาโปรแกรมฮาร์โมนิกโฟลว์สามเฟสได้ ทำให้ผู้เขียนไม่สามารถทดสอบผลของโปรแกรมกับระบบที่เป็นสามเฟสไม่สมดุลได้

3. เพิ่มเติมแบบจำลองของอุปกรณ์แบบไม่สติดิตย์ อาทิ หม้อแปลงที่มีการเลื่อนเฟสซึ่งค่าแอมิติตแดนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลง จะติดอยู่ในรูปของแท็บของหม้อแปลง และ ชุดปรับแก้ค่าตัวประกอบกำลังซึ่งค่าแอมิติตแดนซ์เมตริกซ์จะติดอยู่ในรูปของจำนวนชุดตัวเก็บประจุที่ถูกลับเข้าไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. J.Arrillaga, N R Watson Power System Quality Assessment (John Wiley & Sons 2000)
2. Jos Arrillaga, Bruce C Smith, Neville R Watson, Alan R Wood Power System Harmonic Analysis (John Wiley & Sons 1997)
3. John J.Grainger, William D.Stevenson JR Power System Analysis (McGraw-Hill, Inc. international edition 1994)
4. Z.P.Du, J.Arrillaga, N.R.Watson, S.Chen Idenification of harmonic source of power systems using state estimation IEE Proc.Gener. Transm. Distrib., Vol.146, No. 1, January 1999
5. A.P. Sakis Meliopoulos, Fan Zhang, Shalom Zelingher Power System Harmonic State Estimation IEE Transcations on Power Delivery, Vol. 9, No.3, July 1994
6. S.S.MaTair, N. R Watson, K.P. Wong Harmonic State Estimation:A Method for Remote Harmonic Assessment in A Deregulated Utility Network International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring ans Power Technologies 2000, City University, London, 4-7 April 2000
7. สืบพงศ์ สุวรรณภูมิ วิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การไหลของโหลดและฮาร์มอนิกในสถานะอยู่ตัวของระบบเอซี-ดีซี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
8. IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation. IEEE Trans. on Power Delivery, vol 14, no.2, April 1999, pp.579-587
9. พฤทธิ ประเสริฐธรรม วิทยานิพนธ์ การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีการเชื่อมโยงด้วยสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543
10. Working Group 36-05. "Harmonic, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network." ELECTRA., no. 77, July 1981. pp. 35-54.

11. G. D. Breuer, J. H. Chow, G. Addis, R. H. Lasseter and J. J. Vithayathil. “HVDC-AC Harmonic Interaction, Part 1 & 2.” IEEE Trans. Power Apparatus and System., vol. PAS-101, no. 3, March 1982. pp. 701-718.
12. T. J. Densem, P. S. Bodger and J. Arrillaga. “Three Phase Transmission System Modelling for Harmonic Penetration Studies.” IEEE Trans. Power Apparatus and System., vol. PAS-103, no. 2, February 1984. pp. 310-317.
13. Joint Task Force 36.05.02 / 14.03.03. “AC System Modelling for AC Filter Design an Overview of Impedance Modelling.” ELECTRA., no. 164, February 1996. pp. 133-151.
14. Working Group CC02. “Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance.” ELECTRA., no.167, August 1996. pp. 97-131.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบ 14 บัส (2)

- ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.00010611	106.998	0.00013598	-78.8935
			b	0.00010611	-133.002	0.00013598	41.1065
			c	0.00010611	-13.0019	0.00013598	161.107
line2	1	5	a	0.00021389	-83.5449	0.00015360	99.6034
			b	0.00021389	36.4551	0.00015360	-140.397
			c	0.00021389	156.455	0.00015360	-20.3966
line3	2	3	a	0.00072812	102.052	0.00067090	-78.397
			b	0.00072812	-137.948	0.00067090	41.603
			c	0.00072812	-17.9483	0.00067090	161.603
line4	2	4	a	0.00037283	-79.5784	0.00032499	102.028
			b	0.00037283	40.4216	0.00032499	-137.972
			c	0.00037283	160.422	0.00032499	-17.9723
line5	2	5	a	0.00029768	-81.304	0.00025993	100.327
			b	0.00029768	38.696	0.00025993	-139.673
			c	0.00029768	158.696	0.00025993	-19.6728
line6	3	4	a	0.00116380	-77.072	0.00118159	103.225
			b	0.00116380	42.928	0.00118159	-136.775
			c	0.00116380	162.928	0.00118159	-16.7751
line7	6	11	a	0.00034070	-77.6039	0.00034070	102.396
			b	0.00034070	42.3961	0.00034070	-137.604
			c	0.00034070	162.396	0.00034070	-17.6039
line8	6	12	a	0.00003315	-123.829	0.00003315	56.1712
			b	0.00003315	-3.82879	0.00003315	176.171

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
			c	0.00003315	116.171	0.00003315	-63.8288
Line9	6	13	a	0.00012751	-106.007	0.00012751	73.9932
			b	0.00012751	13.9932	0.00012751	-166.007
			c	0.00012751	133.993	0.00012751	-46.0068
line10	9	10	a	0.00049180	113.59	0.00049180	-66.41
			b	0.00049180	-126.41	0.00049180	53.59
			c	0.00049180	-6.41	0.00049180	173.59
line11	9	14	a	0.00034042	115.512	0.00034042	-64.4879
			b	0.00034042	-124.488	0.00034042	55.5121
			c	0.00034042	-4.48795	0.00034042	175.512
line12	10	11	a	0.00036740	105.425	0.00036740	-74.575
			b	0.00036740	-134.575	0.00036740	45.425
			c	0.00036740	-14.575	0.00036740	165.425
line13	12	13	a	0.00004370	-82.69	0.00004370	97.31
			b	0.00004370	37.31	0.00004370	-142.69
			c	0.00004370	157.31	0.00004370	-22.69
line14	13	14	a	0.00022200	-82.71	0.00022200	97.29
			b	0.00022200	37.29	0.00022200	-142.71
			c	0.00022200	157.29	0.00022200	-22.71
line15	5	4	a	0.00032966	-73.4036	0.00030621	107.772
			b	0.00032966	46.5964	0.00030621	-132.228
			c	0.00032966	166.596	0.00030621	-12.2275
trf1	7	4	a	0.00152210	110.739	0.00152210	-69.261
			b	0.00152210	-129.261	0.00152210	50.739
			c	0.00152210	-9.26101	0.00152210	170.739
trf2	9	4	a	0.00034496	99.5419	0.00034496	-80.4581
			b	0.00034496	-140.458	0.00034496	39.5419
			c	0.00034496	-20.4581	0.00034496	159.542
trf3	6	5	a	0.00010290	90.06	0.00010290	-89.94

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
			b	0.00010290	-149.94	0.00010290	30.06
			c	0.00010290	-29.94	0.00010290	150.06
trf4	8	7	a	0.00272425	117.881	0.00272425	-62.1193
			b	0.00272425	-122.119	0.00272425	57.8807
			c	0.00272425	-2.1193	0.00272425	177.881
trf5	9	7	a	0.00122862	-53.2593	0.00122862	126.741
			b	0.00122862	66.7407	0.00122862	-113.259
			c	0.00122862	-173.259	0.00122862	6.74066
Cap1	9		a	0.00043362	97.4542		
			b	0.00043362	-142.546		
			c	0.00043362	-22.5458		
filt1	8		a	0.00012501	-66.1719		
			b	0.00012501	53.8281		
			c	0.00012501	173.828		
filt2	8		a	0.00831648	23.1577		
			b	0.00831648	143.158		
			c	0.00831648	-96.8423		
filt3	8		a	0.00131931	103.839		
			b	0.00131931	-136.161		
			c	0.00131931	-16.161		
filt4	8		a	0.00082647	107.263		
			b	0.00082647	-132.737		
			c	0.00082647	-12.7365		
filt5	3		a	0.00091718	-77.5573		
			b	0.00091718	42.4427		
			c	0.00091718	162.443		
filt6	3		a	0.00091718	-77.5573		
			b	0.00091718	42.4427		
			c	0.00091718	162.443		

- สารมณิกลำดับที่ 7

Element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.00000953	60.2199	0.00005008	57.6327
			b	0.00000953	-59.7801	0.00005008	-62.3673
			c	0.00000953	-179.78	0.00005008	177.633
line2	1	5	a	0.00008369	60.1381	0.00001110	-106.96
			b	0.00008369	-59.8619	0.00001110	133.04
			c	0.00008369	-179.862	0.00001110	13.04
line3	2	3	a	0.00016425	-117.529	0.00017470	61.784
			b	0.00016425	122.471	0.00017470	-58.216
			c	0.00016425	2.47074	0.00017470	-178.216
line4	2	4	a	0.00011042	64.2877	0.00005505	-110.729
			b	0.00011042	-55.7123	0.00005505	129.271
			c	0.00011042	-175.712	0.00005505	9.27115
line5	2	5	a	0.00009275	60.8862	0.00004479	-116.342
			b	0.00009275	-59.1138	0.00004479	123.658
			c	0.00009275	-179.114	0.00004479	3.65751
line6	3	4	a	0.00029420	64.1	0.00027309	-115.46
			b	0.00029420	-55.9	0.00027309	124.54
			c	0.00029420	-175.9	0.00027309	4.5398
line7	6	11	a	0.00009350	67.0857	0.00009350	-112.914
			b	0.00009350	-52.9143	0.00009350	127.086
			c	0.00009350	-172.914	0.00009350	7.08573
line8	6	12	a	0.00000924	-12.6206	0.00000924	167.379
			b	0.00000924	-132.621	0.00000924	47.3794
			c	0.00000924	107.379	0.00000924	-72.6206
line9	6	13	a	0.00002960	20.7863	0.00002960	-159.214
			b	0.00002960	-99.2137	0.00002960	80.7863
			c	0.00002960	140.786	0.00002960	-39.2137

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.00015140	-98.79	0.00015140	81.21
			b	0.00015140	141.21	0.00015140	-38.79
			c	0.00015140	21.21	0.00015140	-158.79
line11	9	14	a	0.00010831	-97.0732	0.00010831	82.9268
			b	0.00010831	142.927	0.00010831	-37.0732
			c	0.00010831	22.9268	0.00010831	-157.073
line12	10	11	a	0.00010410	-108.74	0.00010410	71.26
			b	0.00010410	131.26	0.00010410	-48.74
			c	0.00010410	11.26	0.00010410	-168.74
line13	12	13	a	0.00001130	60.15	0.00001130	-119.85
			b	0.00001130	-59.85	0.00001130	120.15
			c	0.00001130	-179.85	0.00001130	0.15
line14	13	14	a	0.00005960	61.68	0.00005960	-118.32
			b	0.00005960	-58.32	0.00005960	121.68
			c	0.00005960	-178.32	0.00005960	1.68
line15	5	4	a	0.00007911	80.1715	0.00005865	-92.0093
			b	0.00007911	-39.8285	0.00005865	147.991
			c	0.00007911	-159.828	0.00005865	27.9907
trf1	7	4	a	0.00035219	-96.0665	0.00035219	83.9335
			b	0.00035219	143.933	0.00035219	-36.0665
			c	0.00035219	23.9335	0.00035219	-156.067
trf2	9	4	a	0.00008224	-114.27	0.00008224	65.7297
			b	0.00008224	125.73	0.00008224	-54.2703
			c	0.00008224	5.72966	0.00008224	-174.27
trf3	6	5	a	0.00001280	101.42	0.00001280	-78.58
			b	0.00001280	-18.58	0.00001280	161.42
			c	0.00001280	-138.58	0.00001280	41.42

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.00063964	-84.3484	0.00063964	95.6516
			b	0.00063964	155.652	0.00063964	-24.3484
			c	0.00063964	35.6516	0.00063964	-144.348
trf5	9	7	a	0.00030335	109.29	0.00030335	-70.7099
			b	0.00030335	-10.7099	0.00030335	169.29
			c	0.00030335	-130.71	0.00030335	49.2901
Cap1	9		a	0.00025666	-116.747		
			b	0.00025666	123.253		
			c	0.00025666	3.25267		
filt1	8		a	0.00002855	86.586		
			b	0.00002855	-33.414		
			c	0.00002855	-153.414		
filt2	8		a	0.00033350	92.6118		
			b	0.00033350	-27.3882		
			c	0.00033350	-147.388		
filt3	8		a	0.00290286	178.937		
			b	0.00290286	58.9366		
			c	0.00290286	-61.0634		
filt4	8		a	0.00053352	-104.554		
			b	0.00053352	135.446		
			c	0.00053352	15.4464		
filt5	3		a	0.00023437	63.2366		
			b	0.00023437	-56.7634		
			c	0.00023437	-176.763		
filt6	3		a	0.00023437	63.2366		
			b	0.00023437	-56.7634		
			c	0.00023437	-176.763		

- สารมณิกลำดับที่ 11

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.00084212	-121.267	0.00269635	-151.45
			b	0.00084212	-1.2669	0.00269635	-31.4499
			c	0.00084212	118.733	0.00269635	88.5501
line2	1	5	a	0.00146477	-156.507	0.00202070	-142.34
			b	0.00146477	-36.5074	0.00202070	-22.34
			c	0.00146477	83.4926	0.00202070	97.66
line3	2	3	a	0.00251952	5.3633	0.00337830	-154.27
			b	0.00251952	125.363	0.00337830	-34.27
			c	0.00251952	-114.637	0.00337830	85.73
line4	2	4	a	0.00064816	175.775	0.00166349	-133.705
			b	0.00064816	-64.2253	0.00166349	-13.7055
			c	0.00064816	55.7747	0.00166349	106.295
line5	2	5	a	0.00106188	-167.755	0.00118507	-128.786
			b	0.00106188	-47.7555	0.00118507	-8.7855
			c	0.00106188	72.2445	0.00118507	111.214
line6	3	4	a	0.00327610	-166.7	0.00289425	1.39308
			b	0.00327610	-46.7	0.00289425	121.393
			c	0.00327610	73.3	0.00289425	-118.607
line7	6	11	a	0.00031006	137.615	0.00031006	-42.3849
			b	0.00031006	-102.385	0.00031006	77.6151
			c	0.00031006	17.6151	0.00031006	-162.385
line8	6	12	a	0.00012700	65.2988	0.00012700	-114.701
			b	0.00012700	-174.701	0.00012700	5.29877
			c	0.00012700	-54.7012	0.00012700	125.299
line9	6	13	a	0.00029463	74.1448	0.00029463	-105.855
			b	0.00029463	-165.855	0.00029463	14.1448
			c	0.00029463	-45.8552	0.00029463	134.145

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.00057400	0.51	0.00057400	-179.49
			b	0.00057400	120.51	0.00057400	-59.49
			c	0.00057400	-119.49	0.00057400	60.51
line11	9	14	a	0.00043703	6.34512	0.00043703	-173.655
			b	0.00043703	126.345	0.00043703	-53.6549
			c	0.00043703	-113.655	0.00043703	66.3451
line12	10	11	a	0.00033670	-26.99	0.00033670	153.01
			b	0.00033670	93.01	0.00033670	-86.99
			c	0.00033670	-146.99	0.00033670	33.01
line13	12	13	a	0.00003970	115.33	0.00003970	-64.67
			b	0.00003970	-124.67	0.00003970	55.33
			c	0.00003970	-4.67	0.00003970	175.33
line14	13	14	a	0.00019560	132.16	0.00019560	-47.84
			b	0.00019560	-107.84	0.00019560	72.16
			c	0.00019560	12.16	0.00019560	-167.84
line15	5	4	a	0.00184070	36.708	0.00251159	-145.542
			b	0.00184070	156.708	0.00251159	-25.542
			c	0.00184070	-83.292	0.00251159	94.458
trf1	7	4	a	0.00080752	-111.671	0.00080752	68.3293
			b	0.00080752	8.3293	0.00080752	-171.671
			c	0.00080752	128.329	0.00080752	-51.6707
trf2	9	4	a	0.00039915	-82.885	0.00039915	97.115
			b	0.00039915	37.115	0.00039915	-142.885
			c	0.00039915	157.115	0.00039915	-22.885
trf3	6	5	a	0.00111040	-135.4	0.00111040	44.6
			b	0.00111040	-15.4	0.00111040	164.6
			c	0.00111040	104.6	0.00111040	-75.4

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.00112817	-171.147	0.00112817	8.85326
			b	0.00112817	-51.1467	0.00112817	128.853
			c	0.00112817	68.8533	0.00112817	-111.147
trf5	9	7	a	0.00099972	-35.2376	0.00099972	144.762
			b	0.00099972	84.7624	0.00099972	-95.2376
			c	0.00099972	-155.238	0.00099972	24.7624
Cap1	9		a	0.00286089	-6.11744		
			b	0.00286089	113.883		
			c	0.00286089	-126.117		
filt1	8		a	0.00001064	175.684		
			b	0.00001064	-64.3164		
			c	0.00001064	55.6836		
filt2	8		a	0.00008117	177.941		
			b	0.00008117	-62.0591		
			c	0.00008117	57.9409		
filt3	8		a	0.00021278	-177.833		
			b	0.00021278	-57.8335		
			c	0.00021278	62.1665		
filt4	8		a	0.00179055	-95.9028		
			b	0.00179055	24.0972		
			c	0.00179055	144.097		
filt5	3		a	0.04533690	147.9		
			b	0.04533690	-92.0997		
			c	0.04533690	27.9003		
filt6	3		a	0.04533690	147.9		
			b	0.04533690	-92.0997		
			c	0.04533690	27.9003		

- ตารางข้อมูลที่ 13

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.00016841	-175.831	0.00103704	127.821
			b	0.00016841	64.1695	0.00103704	7.82103
			c	0.00016841	-55.8305	0.00103704	-112.179
line2	1	5	a	0.00045383	118.302	0.00072140	135.04
			b	0.00045383	-1.698	0.00072140	15.04
			c	0.00045383	-121.698	0.00072140	-104.96
line3	2	3	a	0.00104899	-71.9414	0.00096080	127.2
			b	0.00104899	168.059	0.00096080	7.2
			c	0.00104899	48.0586	0.00096080	-112.8
line4	2	4	a	0.00016841	67.9696	0.00053739	145.804
			b	0.00016841	-52.0304	0.00053739	25.8041
			c	0.00016841	-172.03	0.00053739	-94.1959
line5	2	5	a	0.00031536	104.276	0.00038638	151.144
			b	0.00031536	-15.7235	0.00038638	31.1441
			c	0.00031536	-135.724	0.00038638	-88.8559
line6	3	4	a	0.00092800	109.83	0.00113304	-75.7899
			b	0.00092800	-10.17	0.00113304	164.21
			c	0.00092800	-130.17	0.00113304	44.2101
line7	6	11	a	0.00016861	26.2693	0.00016861	-153.731
			b	0.00016861	-93.7307	0.00016861	86.2693
			c	0.00016861	146.269	0.00016861	-33.7307
line8	6	12	a	0.00003445	-30.1508	0.00003445	149.849
			b	0.00003445	-150.151	0.00003445	29.8492
			c	0.00003445	89.8492	0.00003445	-90.1508
line9	6	13	a	0.00009454	-16.7653	0.00009454	163.235
			b	0.00009454	-136.765	0.00009454	43.2347
			c	0.00009454	103.235	0.00009454	-76.7653

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.00026450	-127.8	0.00026450	52.2
			b	0.00026450	112.2	0.00026450	-67.8
			c	0.00026450	-7.8	0.00026450	172.2
line11	9	14	a	0.00018551	-124.373	0.00018551	55.6267
			b	0.00018551	115.627	0.00018551	-64.3733
			c	0.00018551	-4.37334	0.00018551	175.627
line12	10	11	a	0.00018010	-146	0.00018010	34
			b	0.00018010	94	0.00018010	-86
			c	0.00018010	-26	0.00018010	154
line13	12	13	a	0.00002120	14.27	0.00002120	-165.73
			b	0.00002120	-105.73	0.00002120	74.27
			c	0.00002120	134.27	0.00002120	-45.73
line14	13	14	a	0.00010370	21.76	0.00010370	-158.24
			b	0.00010370	-98.24	0.00010370	81.76
			c	0.00010370	141.76	0.00010370	-38.24
line15	5	4	a	0.00075003	-44.6033	0.00092509	132.597
			b	0.00075003	-164.603	0.00092509	12.5965
			c	0.00075003	75.3967	0.00092509	-107.403
trf1	7	4	a	0.00035309	-165.212	0.00035309	14.7876
			b	0.00035309	74.7876	0.00035309	-105.212
			c	0.00035309	-45.2124	0.00035309	134.788
trf2	9	4	a	0.00021207	-161.557	0.00021207	18.4431
			b	0.00021207	78.4431	0.00021207	-101.557
			c	0.00021207	-41.5569	0.00021207	138.443
trf3	6	5	a	0.00029030	148.19	0.00029030	-31.81
			b	0.00029030	28.19	0.00029030	-151.81
			c	0.00029030	-91.81	0.00029030	88.19

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.00008248	70.7749	0.00008248	-109.225
			b	0.00008248	-49.2251	0.00008248	130.775
			c	0.00008248	-169.225	0.00008248	10.7749
trf5	9	7	a	0.00040504	-155.495	0.00040504	24.505
			b	0.00040504	84.505	0.00040504	-95.495
			c	0.00040504	-35.495	0.00040504	144.505
Cap1	9		a	0.00133971	-130.663		
			b	0.00133971	109.337		
			c	0.00133971	-10.663		
filt1	8		a	0.00000894	60.2704		
			b	0.00000894	-59.7296		
			c	0.00000894	-179.73		
filt2	8		a	0.00006413	62.0323		
			b	0.00006413	-57.9677		
			c	0.00006413	-177.968		
filt3	8		a	0.00015156	64.8274		
			b	0.00015156	-55.1726		
			c	0.00015156	-175.173		
filt4	8		a	0.00081827	87.0973		
			b	0.00081827	-32.9027		
			c	0.00081827	-152.903		
filt5	3		a	0.03264000	-80.0611		
			b	0.03264000	159.939		
			c	0.03264000	39.9389		
filt6	3		a	0.03264000	-80.0611		
			b	0.03264000	159.939		
			c	0.03264000	39.9389		

- ตารางข้อมูลที่ 17

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.00001158	-120.165	0.00003361	-111.55
			b	0.00001158	-0.165446	0.00003361	8.44988
			c	0.00001158	119.835	0.00003361	128.45
line2	1	5	a	0.00000194	-50.4335	0.00002430	-111.66
			b	0.00000194	69.5665	0.00002430	8.34
			c	0.00000194	-170.434	0.00002430	128.34
line3	2	3	a	0.00000067	-143.163	0.00001900	-114.09
			b	0.00000067	-23.1627	0.00001900	5.91
			c	0.00000067	96.8373	0.00001900	125.91
line4	2	4	a	0.00001587	75.1136	0.00002121	-112.207
			b	0.00001587	-164.886	0.00002121	7.79295
			c	0.00001587	-44.8864	0.00002121	127.793
line5	2	5	a	0.00000920	56.2107	0.00001960	-114.979
			b	0.00000920	176.211	0.00001960	5.02086
			c	0.00000920	-63.7893	0.00001960	125.021
line6	3	4	a	0.00001230	76.54	0.00000350	-103.254
			b	0.00001230	-163.46	0.00000350	16.7462
			c	0.00001230	-43.46	0.00000350	136.746
line7	6	11	a	0.00003905	45.0873	0.00003905	-134.913
			b	0.00003905	165.087	0.00003905	-14.9127
			c	0.00003905	-74.9127	0.00003905	105.087
line8	6	12	a	0.00000221	-24.1299	0.00000221	155.87
			b	0.00000221	95.8701	0.00000221	-84.1299
			c	0.00000221	-144.13	0.00000221	35.8701
line9	6	13	a	0.00000963	13.9672	0.00000963	-166.033
			b	0.00000963	133.967	0.00000963	-46.0328
			c	0.00000963	-106.033	0.00000963	73.9672

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.00006940	-122.62	0.00006940	57.38
			b	0.00006940	-2.62	0.00006940	177.38
			c	0.00006940	117.38	0.00006940	-62.62
line11	9	14	a	0.00004856	-123.16	0.00004856	56.8404
			b	0.00004856	-3.15963	0.00004856	176.84
			c	0.00004856	116.84	0.00004856	-63.1596
line12	10	11	a	0.00004410	-131.51	0.00004410	48.49
			b	0.00004410	-11.51	0.00004410	168.49
			c	0.00004410	108.49	0.00004410	-71.51
line13	12	13	a	0.00000440	39.2	0.00000440	-140.8
			b	0.00000440	159.2	0.00000440	-20.8
			c	0.00000440	-80.8	0.00000440	99.2
line14	13	14	a	0.00002330	41.32	0.00002330	-138.68
			b	0.00002330	161.32	0.00002330	-18.68
			c	0.00002330	-78.68	0.00002330	101.32
line15	5	4	a	0.00002761	92.3767	0.00002420	-83.6568
			b	0.00002761	-147.623	0.00002420	36.3432
			c	0.00002761	-27.6233	0.00002420	156.343
trf1	7	4	a	0.00003749	-31.2321	0.00003749	148.768
			b	0.00003749	88.7679	0.00003749	-91.2321
			c	0.00003749	-151.232	0.00003749	28.7679
trf2	9	4	a	0.00004834	-136.111	0.00004834	43.8894
			b	0.00004834	-16.1106	0.00004834	163.889
			c	0.00004834	103.889	0.00004834	-76.1106
trf3	6	5	a	0.00002280	-144.3	0.00002280	35.7
			b	0.00002280	-24.3	0.00002280	155.7
			c	0.00002280	95.7	0.00002280	-84.3

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.00029188	22.7912	0.00029188	-157.209
			b	0.00029188	142.791	0.00029188	-37.2088
			c	0.00029188	-97.2088	0.00029188	82.7912
trf5	9	7	a	0.00027156	-150.795	0.00027156	29.2053
			b	0.00027156	-30.7947	0.00027156	149.205
			c	0.00027156	89.2053	0.00027156	-90.7947
Cap1	9		a	0.00051596	-134.452		
			b	0.00051596	-14.4524		
			c	0.00051596	105.548		
filt1	8		a	0.00000678	-164.82		
			b	0.00000678	-44.82		
			c	0.00000678	75.18		
filt2	8		a	0.00004588	-163.575		
			b	0.00004588	-43.5755		
			c	0.00004588	76.4245		
filt3	8		a	0.00009945	-161.869		
			b	0.00009945	-41.8692		
			c	0.00009945	78.1308		
filt4	8		a	0.00034046	-154.135		
			b	0.00034046	-34.1347		
			c	0.00034046	85.8653		
filt5	3		a	0.00000340	-132.229		
			b	0.00000340	-12.2286		
			c	0.00000340	107.771		
filt6	3		a	0.00000340	-132.229		
			b	0.00000340	-12.2286		
			c	0.00000340	107.771		

- ตารางอนิกที่ 19

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.000002147	38.9692	0.000005691	76.9193
			b	0.000002147	-81.0308	0.000005691	-43.0807
			c	0.000002147	158.969	0.000005691	-163.081
line2	1	5	a	0.000001211	168.829	0.000003400	80.21
			b	0.000001211	48.8286	0.000003400	-39.79
			c	0.000001211	-71.1714	0.000003400	-159.79
line3	2	3	a	0.000000561	43.0176	0.000002700	60.42
			b	0.000000561	-76.9824	0.000002700	-59.58
			c	0.000000561	163.018	0.000002700	-179.58
line4	2	4	a	0.000003549	-82.3733	0.000002646	63.3734
			b	0.000003549	157.627	0.000002646	-56.6266
			c	0.000003549	37.6267	0.000002646	-176.627
line5	2	5	a	0.000002159	-138.784	0.000002708	59.9795
			b	0.000002159	101.216	0.000002708	-60.0205
			c	0.000002159	-18.7835	0.000002708	179.98
line6	3	4	a	0.000003400	-82.18	0.000000297	86.7254
			b	0.000003400	157.82	0.000000297	-33.2746
			c	0.000003400	37.82	0.000000297	-153.275
line7	6	11	a	0.000012861	-173.315	0.000012861	6.68498
			b	0.000012861	66.685	0.000012861	-113.315
			c	0.000012861	-53.315	0.000012861	126.685
line8	6	12	a	0.000000695	115.161	0.000000695	-64.8394
			b	0.000000695	-4.83935	0.000000695	175.161
			c	0.000000695	-124.839	0.000000695	55.1606
line9	6	13	a	0.000003012	155.123	0.000003012	-24.8765
			b	0.000003012	35.1235	0.000003012	-144.877
			c	0.000003012	-84.8765	0.000003012	95.1235

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.000023300	18.5	0.000023300	-161.5
			b	0.000023300	-101.5	0.000023300	78.5
			c	0.000023300	138.5	0.000023300	-41.5
line11	9	14	a	0.000016324	17.868	0.000016324	-162.132
			b	0.000016324	-102.132	0.000016324	77.868
			c	0.000016324	137.868	0.000016324	-42.132
line12	10	11	a	0.000014600	9.96	0.000014600	-170.04
			b	0.000014600	-110.04	0.000014600	69.96
			c	0.000014600	129.96	0.000014600	-50.04
line13	12	13	a	0.000001400	-179.079	0.000001400	0.921
			b	0.000001400	60.921	0.000001400	-119.079
			c	0.000001400	-59.079	0.000001400	120.921
line14	13	14	a	0.000007600	-176.9	0.000007600	3.1
			b	0.000007600	63.1	0.000007600	-116.9
			c	0.000007600	-56.9	0.000007600	123.1
line15	5	4	a	0.000008462	-50.6325	0.000007764	136.951
			b	0.000008462	-170.633	0.000007764	16.9509
			c	0.000008462	69.3675	0.000007764	-103.049
trf1	7	4	a	0.000023902	160.895	0.000023902	-19.1054
			b	0.000023902	40.8946	0.000023902	-139.105
			c	0.000023902	-79.1054	0.000023902	100.895
trf2	9	4	a	0.000016792	5.15247	0.000016792	-174.848
			b	0.000016792	-114.848	0.000016792	65.1525
			c	0.000016792	125.152	0.000016792	-54.8475
trf3	6	5	a	0.000007500	-4.49	0.000007500	175.51
			b	0.000007500	-124.49	0.000007500	55.51
			c	0.000007500	115.51	0.000007500	-64.49

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.000150813	174.268	0.000150813	-5.73186
			b	0.000150813	54.2681	0.000150813	-125.732
			c	0.000150813	-65.7319	0.000150813	114.268
trf5	9	7	a	0.000127679	-3.25022	0.000127679	176.75
			b	0.000127679	-123.25	0.000127679	56.7498
			c	0.000127679	116.75	0.000127679	-63.2502
Cap1	9		a	0.000213266	7.58465		
			b	0.000213266	-112.415		
			c	0.000213266	127.585		
filt1	8		a	0.000003838	-8.33947		
			b	0.000003838	-128.339		
			c	0.000003838	111.661		
filt2	8		a	0.000025554	-7.2496		
			b	0.000025554	-127.25		
			c	0.000025554	112.75		
filt3	8		a	0.000054229	-5.80963		
			b	0.000054229	-125.81		
			c	0.000054229	114.19		
filt4	8		a	0.000170240	0.0432562		
			b	0.000170240	-119.957		
			c	0.000170240	120.043		
filt5	3		a	0.000000951	-28.643		
			b	0.000000951	-148.643		
			c	0.000000951	91.357		
filt6	3		a	0.000000951	-28.643		
			b	0.000000951	-148.643		
			c	0.000000951	91.357		

- ตารางข้อมูลที่ 23

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.00229451	-121.195	0.00494486	55.0021
			b	0.00229451	-1.19451	0.00494486	175.002
			c	0.00229451	118.805	0.00494486	-64.9979
line2	1	5	a	0.00311947	57.8278	0.00381010	56.33
			b	0.00311947	177.828	0.00381010	176.33
			c	0.00311947	-62.1722	0.00381010	-63.67
line3	2	3	a	0.00420838	-120.167	0.00266830	-120.64
			b	0.00420838	-0.167251	0.00266830	-0.64
			c	0.00420838	119.833	0.00266830	119.36
line4	2	4	a	0.00125520	-132.737	0.00079725	-125.699
			b	0.00125520	-12.737	0.00079725	-5.69912
			c	0.00125520	107.263	0.00079725	114.301
line5	2	5	a	0.00035832	81.8356	0.00036575	-120.799
			b	0.00035832	-158.164	0.00036575	-0.798671
			c	0.00035832	-38.1644	0.00036575	119.201
line6	3	4	a	0.00169280	-130.37	0.00340688	-120.924
			b	0.00169280	-10.37	0.00340688	-0.924161
			c	0.00169280	109.63	0.00340688	119.076
line7	6	11	a	0.00002136	-41.7934	0.00002136	138.207
			b	0.00002136	78.2066	0.00002136	-101.793
			c	0.00002136	-161.793	0.00002136	18.2066
line8	6	12	a	0.00001199	-87.3334	0.00001199	92.6666
			b	0.00001199	32.6666	0.00001199	-147.333
			c	0.00001199	152.667	0.00001199	-27.3334
line9	6	13	a	0.00002793	-83.1368	0.00002793	96.8632
			b	0.00002793	36.8632	0.00002793	-143.137
			c	0.00002793	156.863	0.00002793	-23.1368

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.00003170	-159.37	0.00003170	20.63
			b	0.00003170	-39.37	0.00003170	140.63
			c	0.00003170	80.63	0.00003170	-99.37
line11	9	14	a	0.00002430	-149.708	0.00002430	30.2923
			b	0.00002430	-29.7077	0.00002430	150.292
			c	0.00002430	90.2923	0.00002430	-89.7077
line12	10	11	a	0.00001950	157.54	0.00001950	-22.46
			b	0.00001950	-82.46	0.00001950	97.54
			c	0.00001950	37.54	0.00001950	-142.46
line13	12	13	a	0.00000310	-60.8	0.00000310	119.2
			b	0.00000310	59.2	0.00000310	-120.8
			c	0.00000310	179.2	0.00000310	-0.8
line14	13	14	a	0.00001260	-45.07	0.00001260	134.93
			b	0.00001260	74.93	0.00001260	-105.07
			c	0.00001260	-165.07	0.00001260	14.93
line15	5	4	a	0.00332600	-125.409	0.00311828	56.6324
			b	0.00332600	-5.40933	0.00311828	176.632
			c	0.00332600	114.591	0.00311828	-63.3676
trf1	7	4	a	0.00042510	-127.527	0.00042510	52.4735
			b	0.00042510	-7.52652	0.00042510	172.473
			c	0.00042510	112.473	0.00042510	-67.5265
trf2	9	4	a	0.00021574	-136.541	0.00021574	43.459
			b	0.00021574	-16.541	0.00021574	163.459
			c	0.00021574	103.459	0.00021574	-76.541
trf3	6	5	a	0.00011000	85.56	0.00011000	-94.44
			b	0.00011000	-154.44	0.00011000	25.56
			c	0.00011000	-34.44	0.00011000	145.56

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.00023102	-79.8101	0.00023102	100.19
			b	0.00023102	40.1899	0.00023102	-139.81
			c	0.00023102	160.19	0.00023102	-19.8101
trf5	9	7	a	0.00031927	-159.893	0.00031927	20.107
			b	0.00031927	-39.893	0.00031927	140.107
			c	0.00031927	80.107	0.00031927	-99.893
Cap1	9		a	0.00065233	-147.621		
			b	0.00065233	-27.6207		
			c	0.00065233	92.3793		
filt1	8		a	0.00000547	121.862		
			b	0.00000547	-118.138		
			c	0.00000547	1.8619		
filt2	8		a	0.00003572	122.738		
			b	0.00003572	-117.262		
			c	0.00003572	2.73839		
filt3	8		a	0.00007392	123.845		
			b	0.00007392	-116.155		
			c	0.00007392	3.84544		
filt4	8		a	0.00021130	127.837		
			b	0.00021130	-112.163		
			c	0.00021130	7.83691		
filt5	3		a	0.01509560	-119.942		
			b	0.01509560	0.0582761		
			c	0.01509560	120.058		
filt6	3		a	0.01509560	-119.942		
			b	0.01509560	0.0582761		
			c	0.01509560	120.058		

- สารมณิกที่ 25

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.02345650	-13.7712	0.01973160	178.372
			b	0.02345650	-133.771	0.01973160	58.3723
			c	0.02345650	106.229	0.01973160	-61.6277
line2	1	5	a	0.02608040	167.806	0.02645850	169.55
			b	0.02608040	47.8058	0.02645850	49.55
			c	0.02608040	-72.1942	0.02645850	-70.45
line3	2	3	a	0.01820650	-7.57781	0.01988270	-11.03
			b	0.01820650	-127.578	0.01988270	-131.03
			c	0.01820650	112.422	0.01988270	108.97
line4	2	4	a	0.00765061	-3.808	0.01230770	-12.9628
			b	0.00765061	-123.808	0.01230770	-132.963
			c	0.00765061	116.192	0.01230770	107.037
line5	2	5	a	0.00296609	151.392	0.00802818	-14.1316
			b	0.00296609	31.3919	0.00802818	-134.132
			c	0.00296609	-88.6081	0.00802818	105.868
line6	3	4	a	0.00511040	11.56	0.00755041	5.52831
			b	0.00511040	-108.44	0.00755041	-114.472
			c	0.00511040	131.56	0.00755041	125.528
line7	6	11	a	0.00036083	-30.7814	0.00036083	149.219
			b	0.00036083	-150.781	0.00036083	29.2186
			c	0.00036083	89.2186	0.00036083	-90.7814
line8	6	12	a	0.00014189	-12.1589	0.00014189	167.841
			b	0.00014189	-132.159	0.00014189	47.8411
			c	0.00014189	107.841	0.00014189	-72.1589
line9	6	13	a	0.00035600	-16.6866	0.00035600	163.313
			b	0.00035600	-136.687	0.00035600	43.3134
			c	0.00035600	103.313	0.00035600	-76.6866

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.00030570	135.6	0.00030570	-44.4
			b	0.00030570	15.6	0.00030570	-164.4
			c	0.00030570	-104.4	0.00030570	75.6
line11	9	14	a	0.00016090	123.343	0.00016090	-56.6575
			b	0.00016090	3.34255	0.00016090	-176.657
			c	0.00016090	-116.657	0.00016090	63.3425
line12	10	11	a	0.00032490	144.72	0.00032490	-35.28
			b	0.00032490	24.72	0.00032490	-155.28
			c	0.00032490	-95.28	0.00032490	84.72
line13	12	13	a	0.00005300	-31.22	0.00005300	148.78
			b	0.00005300	-151.22	0.00005300	28.78
			c	0.00005300	88.78	0.00005300	-91.22
line14	13	14	a	0.00021480	-33.58	0.00021480	146.42
			b	0.00021480	-153.58	0.00021480	26.42
			c	0.00021480	86.42	0.00021480	-93.58
line15	5	4	a	0.01650470	-7.98569	0.01781730	168.633
			b	0.01650470	-127.986	0.01781730	48.6333
			c	0.01650470	112.014	0.01781730	-71.3667
trf1	7	4	a	0.00091596	23.0026	0.00091596	-156.997
			b	0.00091596	-96.9974	0.00091596	83.0026
			c	0.00091596	143.003	0.00091596	-36.9974
trf2	9	4	a	0.00048781	22.4534	0.00048781	-157.547
			b	0.00048781	-97.5466	0.00048781	82.4534
			c	0.00048781	142.453	0.00048781	-37.5466
trf3	6	5	a	0.00151700	157.4	0.00151700	-22.6
			b	0.00151700	37.4	0.00151700	-142.6
			c	0.00151700	-82.6	0.00151700	97.4

element	f bus	t bus	ph	l flow		l back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.00019138	30.0979	0.00019138	-149.902
			b	0.00019138	-89.9021	0.00019138	90.0979
			c	0.00019138	150.098	0.00019138	-29.9021
trf5	9	7	a	0.00072643	21.1377	0.00072643	-158.862
			b	0.00072643	-98.8623	0.00072643	81.1377
			c	0.00072643	141.138	0.00072643	-38.8623
Cap1	9		a	0.00126759	46.7678		
			b	0.00126759	-73.2322		
			c	0.00126759	166.768		
filt1	8		a	0.00000316	-25.8806		
			b	0.00000316	-145.881		
			c	0.00000316	94.1194		
filt2	8		a	0.00002046	-25.0812		
			b	0.00002046	-145.081		
			c	0.00002046	94.9188		
filt3	8		a	0.00004201	-24.086		
			b	0.00004201	-144.086		
			c	0.00004201	95.914		
filt4	8		a	0.00011682	-20.6235		
			b	0.00011682	-140.623		
			c	0.00011682	99.3765		
filt5	3		a	0.02575510	3.78634		
			b	0.02575510	-116.214		
			c	0.02575510	123.786		
filt6	3		a	0.02575510	3.78634		
			b	0.02575510	-116.214		
			c	0.02575510	123.786		

- ตารางข้อมูลที่ 29

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line1	1	2	a	0.000009411	34.2135	0.000064267	31.9363
			b	0.000009411	154.214	0.000064267	151.936
			c	0.000009411	-85.7865	0.000064267	-88.0637
line2	1	5	a	0.000000247	-111.673	0.000003100	36.64
			b	0.000000247	8.32683	0.000003100	156.64
			c	0.000000247	128.327	0.000003100	-83.36
line3	2	3	a	0.000004306	-159.592	0.000002700	-170.55
			b	0.000004306	-39.5922	0.000002700	-50.55
			c	0.000004306	80.4078	0.000002700	69.45
line4	2	4	a	0.000024015	-144.852	0.000014810	-146.673
			b	0.000024015	-24.8521	0.000014810	-26.6728
			c	0.000024015	95.1479	0.000014810	93.3272
line5	2	5	a	0.000035195	-149.134	0.000019143	-151.456
			b	0.000035195	-29.134	0.000019143	-31.4564
			c	0.000035195	90.866	0.000019143	88.5436
line6	3	4	a	0.000027100	-144.78	0.000020101	-145.933
			b	0.000027100	-24.78	0.000020101	-25.9334
			c	0.000027100	95.22	0.000020101	94.0666
line7	6	11	a	0.000002524	-153.136	0.000002524	26.8636
			b	0.000002524	-33.1364	0.000002524	146.864
			c	0.000002524	86.8636	0.000002524	-93.1364
line8	6	12	a	0.000000676	53.7409	0.000000676	-126.259
			b	0.000000676	173.741	0.000000676	-6.25911
			c	0.000000676	-66.2591	0.000000676	113.741
line9	6	13	a	0.000001092	63.1654	0.000001092	-116.835
			b	0.000001092	-176.835	0.000001092	3.16539
			c	0.000001092	-56.8346	0.000001092	123.165

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
line10	9	10	a	0.000006600	39.36	0.000006600	-140.64
			b	0.000006600	159.36	0.000006600	-20.64
			c	0.000006600	-80.64	0.000006600	99.36
line11	9	14	a	0.000004941	38.2994	0.000004941	-141.701
			b	0.000004941	158.299	0.000004941	-21.7006
			c	0.000004941	-81.7006	0.000004941	98.2994
line12	10	11	a	0.000003300	31.96	0.000003300	-148.04
			b	0.000003300	151.96	0.000003300	-28.04
			c	0.000003300	-88.04	0.000003300	91.96
line13	12	13	a	0.000000200	-160.39	0.000000200	19.61
			b	0.000000200	-40.39	0.000000200	139.61
			c	0.000000200	79.61	0.000000200	-100.39
line14	13	14	a	0.000001400	-155.5	0.000001400	24.5
			b	0.000001400	-35.5	0.000001400	144.5
			c	0.000001400	84.5	0.000001400	-95.5
line15	5	4	a	0.000010214	16.7586	0.000030928	-152.112
			b	0.000010214	136.759	0.000030928	-32.1122
			c	0.000010214	-103.241	0.000030928	87.8878
trf1	7	4	a	0.000062619	-153.011	0.000062619	26.9894
			b	0.000062619	-33.0106	0.000062619	146.989
			c	0.000062619	86.9894	0.000062619	-93.0106
trf2	9	4	a	0.000002837	23.0086	0.000002837	-156.991
			b	0.000002837	143.009	0.000002837	-36.9914
			c	0.000002837	-96.9914	0.000002837	83.0086
trf3	6	5	a	0.000004100	-140.72	0.000004100	39.28
			b	0.000004100	-20.72	0.000004100	159.28
			c	0.000004100	99.28	0.000004100	-80.72

element	f bus	t bus	ph	I flow		I back	
				mag (p.u.)	angle (deg.)	mag (p.u.)	angle (deg.)
trf4	8	7	a	0.000195905	-153.302	0.000195905	26.6982
			b	0.000195905	-33.3018	0.000195905	146.698
			c	0.000195905	86.6982	0.000195905	-93.3018
trf5	9	7	a	0.000133288	26.5614	0.000133288	-153.439
			b	0.000133288	146.561	0.000133288	-33.4386
			c	0.000133288	-93.4386	0.000133288	86.5614
Cap1	9		a	0.000159350	29.2192		
			b	0.000159350	149.219		
			c	0.000159350	-90.7808		
filt1	8		a	0.000005582	26.6168		
			b	0.000005582	146.617		
			c	0.000005582	-93.3832		
filt2	8		a	0.000035881	27.2975		
			b	0.000035881	147.297		
			c	0.000035881	-92.7025		
filt3	8		a	0.000072852	28.1282		
			b	0.000072852	148.128		
			c	0.000072852	-91.8718		
filt4	8		a	0.000195343	30.8841		
			b	0.000195343	150.884		
			c	0.000195343	-89.1159		
filt5	3		a	0.000014726	-147.053		
			b	0.000014726	-27.0529		
			c	0.000014726	92.9471		
filt6	3		a	0.000014726	-147.053		
			b	0.000014726	-27.0529		
			c	0.000014726	92.9471		

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพฤทธิ ประเสริฐธรรม เกิดวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2522 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย