

การวิเคราะห์โพลดิโพลว์และการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ 3 เฟส
ภายใต้สภาวะไม่สมดุล



นาย แสงเพชร โล่ห่อร่วมทวีทอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-231-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF POWER FLOW AND HARMONIC CURRENT FLOW IN 3-PHASE
POWER SYSTEMS UNDER UNBALANCED CONDITIONS



Mr. Sangpetch Loharamthaweethong

สภามหาวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2000

ISBN 974-346-231-7

แสงเพชร โล่ห์อร่ามทวีทอง : การวิเคราะห์ไหลคโพล์และการไหลของกระแสฮาร์โมนิกในระบบ 3 เฟสภายใต้สภาวะไม่สมดุล (ANALYSIS OF POWER FLOW AND HARMONIC CURRENT FLOW IN 3-PHASE POWER SYSTEMS UNDER UNBALANCED CONDITIONS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ไชยะ แซ่มซ้อย, 174 หน้า. ISBN 974-346-231-7

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีคอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่ภายใต้สภาวะไม่สมดุล การวิเคราะห์ระบบจะใช้หลักการของนิวตัน-ราฟสัน หลักการขององค์ประกอบสมมาตร หลักการของการคำนวณไหลคโพล์แบบ AC-DC ที่ทำการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับระบบที่มีคอนเวอร์เตอร์ และหลักการของการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์จะใช้หลักการตัดขีดกระแส

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา สามารถใช้วิเคราะห์ไหลคโพล์และฮาร์โมนิกส์โพล์ของระบบได้โดยคำนึงถึงเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อระบบไฟฟ้า เช่น ความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของพารามิเตอร์ของระบบหรือความไม่สมดุลของโหลด ผลของการเลื่อนเฟสของหม้อแปลงเมื่อมีการต่อชุดขดลวดของหม้อแปลงแบบวาย-เดลตา ผลของการเกิดการเหนี่ยวนำระหว่างเฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

นอกจากนี้ โปรแกรมสามารถวิเคราะห์หาผลของแรงดันบัล การไหลของกำลังไฟฟ้า และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ การไหลของกระแสฮาร์โมนิกส์ และค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกส์รวมของแรงดัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____
สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา _____ 2543 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4170613421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: HARMONICS / 3-PHASE POWER FLOW / UNBALANCED
CONDITIONS / CONVERTER
SANGPETCH LOHARAMTHAWEETHONG: ANALYSIS OF POWER
FLOW AND HARMONIC CURRENT FLOW IN 3-PHASE POWER
SYSTEMS UNDER UNBALANCED CONDITIONS. THESIS ADVISOR:
CHAIYA CHAMCHOY, 174 pp.
ISBN 974-346-231-7

This thesis emphasized on analyzing power system which contains converters under unbalanced conditions. In analyzing such that systems, is used Newton-Raphson method coupled with symmetrical component concept under the method which is developed for load flow study and using current injection method.

The significant capability of the program is able to studying load flow and harmonic flow under some constrains such as unbalanced of power systems, due to unbalanced system's parameters or unbalanced load, phase-shifting while connecting the transformer in delta-wye connection or mutual coupling between transmission lines.

In addition, this program can determine bus voltages, power flow, effect of converter, harmonic current flow and total harmonic distortion.



Department Electrical engineering Student's signature _____
Field of study Electrical engineering Advisor's signature _____
Academic year 2543 Co-advisor's signature _____

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	2
2 แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	4
2.1 แบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน.....	4
2.1.1 สายส่งกำลังไฟฟ้า.....	4
2.1.2 คาปาซิเตอร์เบงค์.....	12
2.1.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์.....	13
2.1.4 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	15
2.1.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	20
2.2 แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์.....	21
2.2.1 สายส่งกำลังไฟฟ้า.....	21
2.2.2 เครื่องจักรไฟฟ้าซิงค์โครนัส.....	24
2.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	24
2.2.4 คาปาซิเตอร์และตัวกรองฮาร์มอนิกส์.....	26
2.2.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	26

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2.6 โหลด.....	27
3 หลักการและทฤษฎี.....	29
3.1 การแปลงระบบพิกัด.....	29
3.1.1 เมตริกซ์การแปลง.....	29
3.1.2 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบ.....	30
3.2 การแก้ปัญหาโหลดโพลาร์ 3 เฟส.....	31
3.2.1 หลักการของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า 3 เฟส.....	31
3.2.2 ผลลัพธ์ของสมการที่ (3.12): การไหลของกำลังไฟฟ้าในวงจรลำดับบวก.....	33
3.2.3 การหาผลลัพธ์ของสมการที่ (3.10) และ (3.8).....	35
3.2.4 ค่าเริ่มต้นและการสิ้นสุดของ Iteration.....	36
3.2.5 กระบวนการทำ Iteration.....	36
3.3 การวิเคราะห์การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	37
3.3.1 ข้อสมมติพื้นฐานในการคำนวณ.....	38
3.3.2 ข้อสมมติของหลักการคำนวณที่พัฒนาขึ้น.....	38
3.3.3 ระบบเปอร์ยูนิต.....	38
3.3.4 ตัวแปรของคอนเวอร์เตอร์.....	39
3.3.5 ผลของคอมมิวเตชัน.....	39
3.3.6 สมการของระบบไฟฟ้ากำลังกระแสตรง.....	41
3.3.7 สมการผลต่าง.....	42
3.3.8 สมการปรับปรุงค่า.....	43
3.4 การแก้ปัญหาโหลดโพลาร์กระแสสลับ-กระแสตรง.....	44
3.4.1 หลักการของโหลดโพลาร์กระแสสลับ-กระแสตรง.....	44
3.4.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	45
3.5 การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส.....	48
3.5.1 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์.....	48
3.5.2 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์โพลาร์.....	48

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5.3 อิมพีแดนซ์สแกน.....	50
4 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	52
4.1 โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	52
4.2 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม.....	55
4.3 การป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม.....	56
4.3.1 การสร้างแผนภาพเส้นเดียว.....	56
4.3.2 การแสดงผลการวิเคราะห์โหลดโพลาร์.....	66
4.3.3 การแสดงผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โพลาร์.....	71
5 ตัวอย่าง ผลการคำนวณ และการวิเคราะห์.....	80
5.1 ระบบ 5 บัส.....	80
5.1.1 ระบบ 5 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐานสภาวะโหลดไม่สมดุล).....	80
5.1.2 ระบบ 5 บัส กรณีที่ 2 (กรณีพื้นฐานสภาวะโหลดสมดุล).....	85
5.1.3 ระบบ 5 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่ระบบมีคอนเวอร์เตอร์ต่อที่บัส 3).....	86
5.2 ระบบ 13 บัส.....	92
5.2.1 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐานระบบสมดุล).....	102
5.2.2 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 2 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุด ในระบบภายใต้สภาวะสมดุล).....	99
5.2.3 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุด ในระบบภายใต้สภาวะไม่สมดุล).....	105
5.2.4 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 4 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุด ในระบบภายใต้สภาวะสมดุล).....	112
5.3 ระบบ 14 บัส.....	117
5.3.1 ระบบ 14 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐาน).....	119
5.3.2 ระบบ 14 บัส กรณีที่ 2 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบ ภายใต้สภาวะสมดุล).....	128
5.3.3 ระบบ 14 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบ	

ภายใต้สภาวะไม่สมดุล).....	138
6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	151
รายการอ้างอิง.....	153
ภาคผนวก.....	154
ประวัติผู้วิจัย.....	174



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชุดของเมตริกซ์ย่อยที่ใช้ในการสร้างแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลง.....	19
4.1 สัญลักษณ์แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบไฟฟ้า.....	55
5.1 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	81
5.2 ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	81
5.3 เมตริกซ์อิมพีแดนซ์อนุกรมและเมตริกซ์แอดมิตแดนซ์ขนานของสาย L 1-2/2-3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	81
5.4 เมตริกซ์อิมพีแดนซ์อนุกรมของสายคู่ควบ L 1-3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	81
5.5 เมตริกซ์แอดมิตแดนซ์ขนานของสายคู่ควบ L 1-3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	81
5.6 ข้อมูลของคาปาซิเตอร์ที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	81
5.7 ข้อมูลของโหลดที่บัส ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	82
5.8 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	82
5.9 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1.....	82
5.10 ข้อมูลของโหลดที่บัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 2.....	85
5.11 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 2.....	85
5.12 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 2.....	85
5.13 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	86
5.14 ข้อมูลของโหลดที่บัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	87
5.15 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	88
5.16 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	88
5.17 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	88
5.18 ฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	89
5.19 เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนรวม(THDv)ของแรงดันที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	90
5.20 แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	90
5.21 แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 ที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.22 ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและเคเบิลหน่วยเปอร์ยูนิต ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	94
5.23 ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	94
5.24 ข้อมูลของโหลดที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	94
5.25 ข้อมูลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีกำลังไฟฟ้า 1150 kW 290 kVAr ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	95
5.26 ข้อมูลแรงดันบัสและกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	95
5.27 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	96
5.28 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	96
5.29 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสขนาด 3.45 MW ของ ระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	100
5.30 ข้อมูลของโหลดที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	100
5.31 ข้อมูลของแรงดันบัสและกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	100
5.32 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	101
5.33 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	101
5.34 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	101
5.35 ฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	102
5.36 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	105
5.37 ข้อมูลกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	106
5.38 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	106
5.39 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	107
5.40 ฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	108
5.41 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	108
5.42 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	109
5.43 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	109
5.44 ข้อมูลของแรงดันบัสและกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4.....	113
5.45 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4.....	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.46 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุดของ ระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4.....	114
5.47 ฮาร์มอนิกส์เปิดตรีမ်ของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4.....	114
5.48 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4.....	115
5.49 ข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1.....	118
5.50 ข้อมูลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1.....	119
5.51 ข้อมูลโหลด, และแรงดันบัสของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1.....	120
5.52 ข้อมูลกำลังการผลิตของระบบทดสอบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1.....	120
5.53 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1.....	120
5.54 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆของ ระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1.....	121
5.55 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1.....	122
5.56 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดที่บัส 3 ขนาด 178.515 MW ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2.....	129
5.57 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 8 ขนาด 1.5 MW ของ ระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2.....	129
5.58 ข้อมูลโหลด, และแรงดันบัสของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2.....	129
5.59 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2.....	130
5.60 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ชุดของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2.....	131
5.61 ฮาร์มอนิกส์เปิดตรีမ်ของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2.....	131
5.62 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2.....	132
5.63 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3.....	138
5.64 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3.....	139
5.65 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3.....	141
5.66 ฮาร์มอนิกส์เปิดตรีမ်ของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 3 ของ ระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3.....	142
5.67 ฮาร์มอนิกส์เปิดตรีမ်ของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 8 ของ	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ระบบทดสอบ 14 บั๊ต กรณีที่ 3.....	143
5.68 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 14 บั๊ต กรณีที่ 3.....	143
5.69 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ต กรณีที่ 3.....	144
5.70 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ต กรณีที่ 3.....	144
5.71 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 11 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ต กรณีที่ 3.....	144



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์แบบกระจายของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	4
2.2 แบบจำลองของแอดมิตแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	5
2.3 แบบจำลองสมมูล PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะยาว.....	6
2.4 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส.....	7
2.5 แบบจำลอง PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะสั้น.....	11
2.6 แบบจำลองขององค์ประกอบขนาน.....	12
2.7 แบบจำลองของคาปาซิเตอร์เบงค์.....	13
2.8 แบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกส์.....	14
2.9 แบบจำลองไดอะแกรมของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด.....	15
2.10 วงจรปฐมภูมิ.....	16
2.11 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-สตาร์.....	17
2.12 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-เดลตา.....	17
2.13 แบบจำลองหม้อแปลง 3 เฟสแบบ 2 ขดลวด.....	19
2.14 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	21
2.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของแบบจำลองสมมูล PI และแบบจำลองปกติ PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ช่วงความถี่ 5 Hz.....	24
2.16 แบบจำลองของหม้อแปลงที่ขึ้นกับความถี่.....	25
2.17 แบบจำลอง (CIGRE) ของหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์.....	25
2.18 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์.....	27
2.19 แบบจำลองของโหลดในการศึกษาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์.....	28
3.1 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์.....	37
3.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของคอนเวอร์เตอร์ไม่สมดุล.....	37
3.3 วงจรของการเกิดคอมมิวเตชัน.....	40
3.4 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง.....	44
3.5 แผนภูมิแสดงหลักการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในกรณี ที่มีคอนเวอร์เตอร์อยู่ในระบบ.....	45
3.6 แบบจำลองแบบ PI ของสายส่งแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	46

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	46
3.8 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	47
3.9 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	47
3.10 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าขององค์ประกอบขนาน.....	48
3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับศูนย์ วงจรลำดับบวก และวงจรลำดับลบของระบบกับจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน.....	50
4.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม.....	53
4.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม (ส่วนวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์).....	54
4.3 หน้าจอหลัก(Main program) ให้ผู้ใช้เลือกสร้างไดอะแกรมของระบบที่ต้องการ.....	57
4.4 เมนูจัดการกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในแผนภาพเส้นเดียว.....	57
4.5 ทูลบาร์การสร้างบัสและสายส่ง(รูปซ้าย) และทูลบาร์การสร้าง อุปกรณ์ไฟฟ้า(รูปขวา).....	58
4.6 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	59
4.7 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	60
4.8 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	61
4.9 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของคาปาซิเตอร์เบงค์.....	61
4.10 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของโหลดบัส.....	62
4.11 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	63
4.12 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ความถี่เดียว.....	63
4.13 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบผ่านสูง.....	64
4.14 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์.....	65
4.15 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของฮาร์มอนิกส์โหลด.....	66
4.16 ผลการคำนวณโหลดโพล์แสดงแรงดันที่บัสต่างๆ.....	67
4.17 ผลการคำนวณโหลดโพล์แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลง.....	68
4.18 ผลการคำนวณโหลดโพล์แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง.....	68
4.19 ตารางแสดงผลของแรงดันบัสทั้ง 3 เฟส.....	69
4.20 ตารางแสดงผลการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส.....	70

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ตารางแสดงผลการทำงานของคนเวอร์เตอร์ กรณีี่ระบบมีการต่อคนเวอร์เตอร์.....	70
4.22 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ทั้ง 3 เฟส.....	71
4.23 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลแรงดันผิดเพี้ยนรวมทั้ง 3 เฟส.....	72
4.24 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 จากคนเวอร์เตอร์.....	72
4.25 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	73
4.26 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า.....	73
4.27 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ไปยังโหลดบัล.....	74
4.28 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ไปยังคาปาซิเตอร์แบงค์.....	74
4.29 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ในสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	75
4.30 ตารางแสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกส์ของแต่ละบัลในลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เลือกไว้.....	76
4.31 ตารางแสดงผลค่าแรงดันผิดเพี้ยน(THDv)ทั้ง 3 เฟสของแต่ละบัล.....	76
4.32 ตารางแสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในส่วนต่างๆของระบบ ในลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เลือกไว้.....	77
4.33 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของกระแสจากคนเวอร์เตอร์.....	77
4.34 กราฟแสดงฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของแรงดันที่บัล.....	78
4.35 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาจากบัลที่สนใจ.....	79
5.1 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 5 บัล กรณีที่ 1.....	80
5.2 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 5 บัล กรณีที่ 3.....	87
5.3 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัล 3 ของ ระบบทดสอบ 5 บัล กรณีที่ 3.....	90

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	91
5.5 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3.....	91
5.6 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	94
5.7 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	97
5.8 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	97
5.9 อิมพีแดนซ์สแกนเมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1.....	98
5.10 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	99
5.11 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	102
5.12 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	103
5.13 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2.....	103
5.14 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	105
5.15 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	109
5.16 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	110
5.17 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3.....	110
5.18 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4.....	113
5.19 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1	

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ของระบบทดสอบ 13 บั๊ส กรณีที่ 4.....	115
5.20 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 13 เมื่อพิจารณาที่บั๊ส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บั๊ส กรณีที่ 4.....	116
5.21 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 1.....	118
5.22 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 1.....	118
5.23 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บั๊สที่ 3 และบั๊สที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 1.....	123
5.24 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บั๊สที่ 3 และบั๊สที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 1.....	124
5.25 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บั๊สที่ 3 และบั๊สที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 1.....	125
5.26 กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บั๊ส 3 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 1.....	126
5.27 กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บั๊ส 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 1.....	127
5.28 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 2.....	129
5.29 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บั๊สที่ 3 และบั๊สที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 2.....	133
5.30 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บั๊สที่ 3 และบั๊สที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 2.....	134
5.31 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บั๊สที่ 3 และบั๊สที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 2.....	135
5.32 กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บั๊ส 3 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 2.....	136
5.33 กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บั๊ส 8 ของระบบทดสอบ 14 บั๊ส กรณีที่ 2.....	137
5.34 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 14 บั๊สกรณีที่ 3.....	138

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.35 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัลที่ 3 และบัลที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัล กรณีที่ 3.....	146
5.36 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัลที่ 3 และบัลที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัล กรณีที่ 3.....	147
5.37 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บัลที่ 3 และบัลที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัล กรณีที่ 3.....	148
5.38 กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัล 3 ของระบบทดสอบ 14 บัล กรณีที่ 3.....	149
5.39 กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัล 8 ของระบบทดสอบ 14 บัล กรณีที่ 3.....	150

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กส่วนใหญ่มีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ อาทิเช่น เตาหลอมโลหะ คอนเวอเตอร์กำลังสถิต วงจรเรียงกระแส เป็นต้น นอกจากนั้นอาคารสำนักงาน รวมถึงบ้านอยู่อาศัยก็เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์เช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อุปกรณ์ในสำนักงาน เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องถ่ายเอกสาร หลอดฟลูออเรสเซนต์ เครื่องปรับอากาศ รวมถึงเครื่องอำนวยความสะดวกภายในบ้าน เช่น โทรทัศน์ เตาไมโครเวฟ เครื่องซักผ้า เป็นต้น ล้วนแล้วแต่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของกระแสฮาร์มอนิกส์ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น การเกิดการระเบิดของคาปาซิเตอร์เบงค์เนื่องจากเกิดเรโซแนนซ์ การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน การรบกวนระบบสื่อสาร เป็นต้น

การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ โดยเฉพาะในระบบไฟฟ้าจริงๆจะมีสถานะไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า จากความไม่สมดุลของโหลด จากการที่สายส่งเกิดมีสายที่เฟสใดเฟสหนึ่งขาดไป ซึ่งผลของความไม่สมดุลของระบบจะนำไปสู่ความเสียหายมากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะของระบบ และความรุนแรงมากน้อยของความไม่สมดุล

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาความเป็นมาของการเกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) เพื่อพัฒนาระบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ 3 เฟสในกรณีที่ระบบมีการต่อคอนเวอเตอร์ และไม่มีการต่อคอนเวอเตอร์ ภายใต้สภาวะสมดุล และสภาวะไม่สมดุล
- 3) การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะสมดุล และสภาวะไม่สมดุล

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ คิดเป็นแบบจำลองแบบเชิงเส้น(Linear Model)

- 2) พิจารณาผลของการต่อขดลวดของหม้อแปลงด้วยว่าเป็นวาย-วาย(Y-Y) เดลตา-วาย (D-Y)
- 3) เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงๆ ในที่นี้ยังถือว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ไม่ประพฤติตัวเป็นคลื่น (Traveling wave)
- 4) การคำนวณโหลดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูลจะไม่คิดผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่บิด
- 5) การคำนวณฮาร์มอนิกส์โพลาร์จะพิจารณาว่าคอนเวอร์เตอร์และฮาร์มอนิกส์โหลดเป็นแหล่งกำเนิดกระแสอุดมคติ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการคำนวณโหลดโพลาร์ในระบบ 3 เฟสไม่สมดุล และแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) ศึกษาการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ และแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์
- 3) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณโหลดโพลาร์ 3 เฟส และการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่จำลองขึ้น
- 4) ทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น และปรับปรุงแก้ไข
- 5) ประเมินผลการวิจัยและสรุปผลที่ได้จากการวิจัย
- 6) เรียบเรียง จัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไข

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการวิจัยจะได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกส์โพลาร์ในระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะสมดุลและไม่สมดุลได้ ทำให้สามารถใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและหาแนวทางการปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดจากสภาวะไม่สมดุลและฮาร์มอนิกส์ได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสม เนื่องจากการทำงานของโปรแกรมใช้เวลาในการคำนวณน้อย

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์แต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งแบบจำลองที่ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกส์

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ 3 เฟสกรณีที่ไม่สมดุล การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีคอนเวอร์เตอร์อยู่ในระบบ และหลักการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในสภาวะไม่สมดุล

บทที่ 4 กล่าวถึงโครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยแยกออกเป็น ส่วน
ป้อนข้อมูลเข้า และส่วนแสดงผล

บทที่ 5 กล่าวถึงตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ระบบทดสอบของ
IEEE 5 บัต์ IEEE 13 บัต์ และ IEEE 14 บัต์ โดยนำมาวิเคราะห์ในกรณีพื้นฐาน และกรณีที่เป็น
การจำลองเหตุการณ์ขึ้นเองโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อทดสอบผลการ
ทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

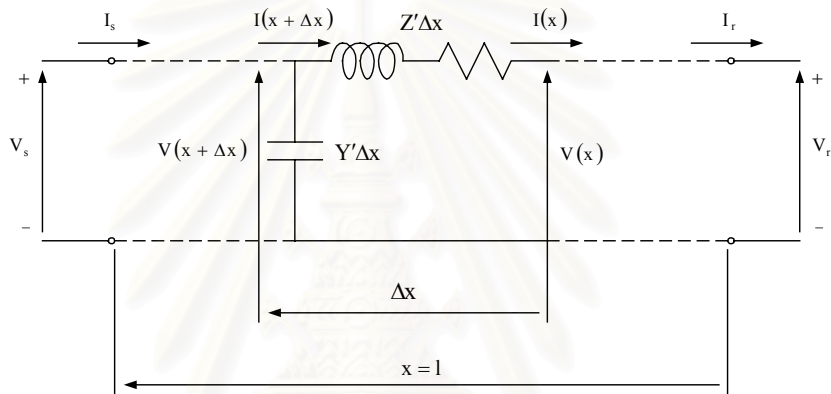
บทที่ 2

แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 แบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน

2.1.1 สายส่งกำลังไฟฟ้า

ในขั้นแรกจะพิจารณาแบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวโดยคำนึงถึงผลของคลื่นนิ่ง(Standing wave effects) แล้วจึงขยายเป็นแบบจำลองสายส่ง 3 เฟส



รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์แบบกระจายของสายส่งกำลังไฟฟ้า: V แรงดัน; I กระแส; Z' อิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาว; Y' แอดมิตแตนซ์ขนานต่อหน่วยความยาว; l ความยาวของสายส่ง

รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์แบบกระจาย(Distributed inductance and capacitance) ซึ่งแทนผลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสถิตของสาย ค่าความต้านทานและคอนดักแตนซ์(Conductance)จะแทนกำลังสูญเสียของสาย(Line losses)

ภายใต้สถานะสมดุลโดยสมมุติว่าสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟสสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองของวงจรลำดับบวกเฟสเดียวและวงจร PI ปกติ(Nominal PI) สำหรับการที่จจะรวมค่าแอดมิตแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าเข้าไปในแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์จำเป็นต้องใช้ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัสบาร์และจากบัสบาร์กับดินตามรูปที่ 2.2

สำหรับสายส่งระยะยาว จำนวนของแบบจำลอง PI ที่ใช้ต่ออนุกรมกันเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของแรงดันและกระแสซึ่งถูกระทบจากผลของคลื่นนิ่งจะขึ้นกับความยาวของสายส่งและความถี่ของแรงดันและกระแส 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% สำหรับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 50 หรือความถี่ 2500 Hz แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าใกล้จุดเรโซแนนซ์(Resonance) ค่าความถูกต้องก็จะเกินช่วงที่ยอมรับได้ออกไปมาก

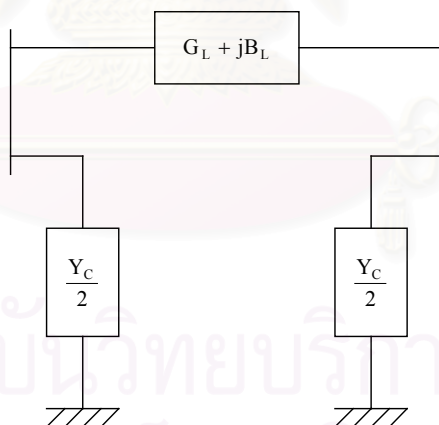
เพื่อปรับปรุงความถูกต้องให้ดีขึ้นจะต้องใช้แบบจำลองสมมูล PI(Equivalent PI model) ซึ่งหาได้จากการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับสองแบบเชิงเส้น(Second order linear differential equations) ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามสายส่ง โดยอ้างอิงจากรูปที่ 2.1

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = Z'Y'V(x), \quad \frac{d^2I(x)}{dx^2} = Z'Y'I(x) \quad (2.1)$$

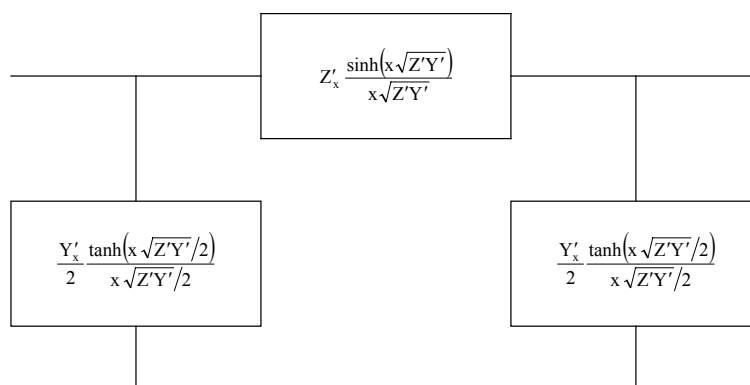
โดยที่

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

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



รูปที่ 2.2 แบบจำลองของแอดมิตแตนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 แบบจำลองสมมูล PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะยาว

แบบจำลองสมมูล PI ตามรูปที่ 2.3 ได้จากแบบจำลอง PI ปกติ โดยการใช้ค่าตัวประกอบปรับแก้(Correction factors) เข้าไปในอิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนาน ดังนี้คือ

$$\frac{\sinh(x\sqrt{Z'Y'})}{x\sqrt{Z'Y'}} \quad \text{สำหรับอิมพีแดนซ์อนุกรม} \quad (2.2)$$

$$\frac{\tanh(x\sqrt{Z'Y'}/2)}{x\sqrt{Z'Y'}/2} \quad \text{สำหรับแอดมิตแตนซ์ขนาน} \quad (2.3)$$

ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากลักษณะโครงสร้างของสาย ค่าพารามิเตอร์จะแสดงออกมาเป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรม และค่าแอดมิตแตนซ์ขนานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสาย โดยผลของกระแสกราวนด์ (Ground current) และสายดิน (Earth wires) ได้ถูกรวมเข้าไปในการคำนวณด้วย

(1) อิมพีแดนซ์อนุกรม

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

ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมรวมทั้งหมดของวงจรเฟสเดียวคือ

$$L = L_1 + L_2 - 2M \quad (2.4)$$

ซึ่ง

$$L_1 = L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{\text{GMR}} \quad (2.5)$$

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{d} \quad (2.6)$$

โดยที่

L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของสายตัวนำที่ 1

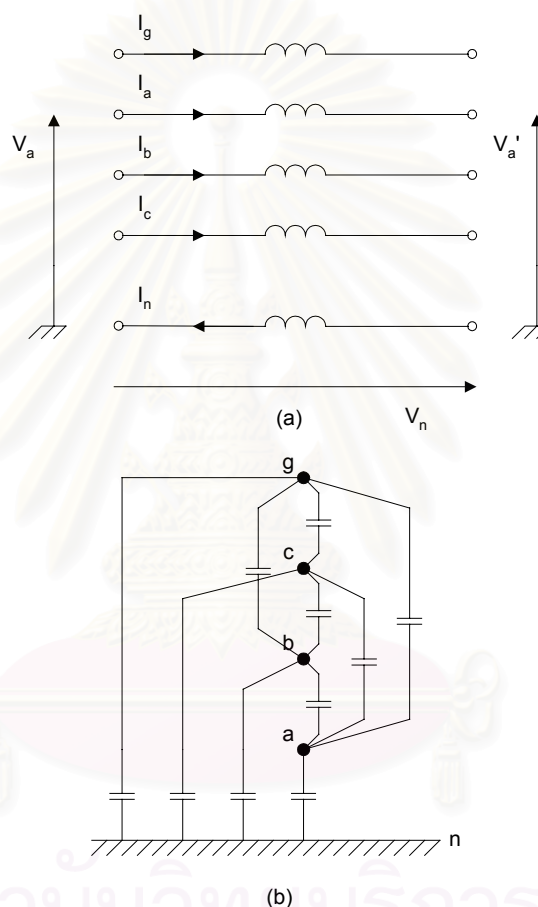
L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของสายตัวนำที่ 2

M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสายตัวนำที่ 1 และ 2

d คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสายตัวนำ

μ_0 คือ ค่า Permeability ของ Free space

GMR คือ Effective geometric mean distance หรือรัศมีของสายตัวนำที่มีความยาวเป็นอนันต์ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองทั้งสองค่ามีค่าอินตักแตนซ์เท่ากัน



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

(a) วงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

(b) วงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์ขนานของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองต่อกิโลเมตรของสายตัวนำที่มีสายดิน (Earth return, Z_{aa}) และค่าอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual impedance) ต่อกิโลเมตรระหว่างสายตัวนำ a และ b (Z_{ab}) แสดงได้ดังนี้คือ

$$Z_{aa} = R_a + R_g + j(X_{aa} + X_g) \quad (2.7)$$

$$Z_{ab} = R_g + j(X_{ab} + X_g) \quad (2.8)$$

โดยที่

- R_a คือ ค่าความต้านทาน a.c. ของสายตัวนำ a
 X_{aa} คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของสายตัวนำ a
 X_{ab} คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสายตัวนำ a และ b
 R_g, X_g คือ ตัวปรับแก้ค่าของสายดิน(Carson's earth return correction)

ผลของค่าความต้านทานของดิน(ρ)ต่อความเหนี่ยวนำตัวเอง X_{aa} ที่ความถี่(f) 50 Hz สามารถคำนวณได้จากสมการโดยประมาณคือ

$$X_{aa} = 0.00289f \log\left(\frac{660\sqrt{\rho/f}}{\text{GMR}}\right) \quad (2.9)$$

จากรูปที่ 2.4(a) สามารถแสดงสมการสำหรับเฟส a ได้คือ

$$V_a - V_a' = I_a(R_a + j\omega L_a) + I_b(j\omega L_{ab}) + I_c(j\omega L_{ac}) + j\omega L_{ag}I_g - j\omega L_{an}I_n + V_n \quad (2.10)$$

โดยที่

$$V_n = I_n(R_n + j\omega L_n) - I_a(j\omega L_{na}) - I_b(j\omega L_{nb}) - I_c(j\omega L_{nc}) - I_g(j\omega L_{ng}) \quad (2.11)$$

และแทนค่า

$$I_n = I_a + I_b + I_c + I_g \quad (2.12)$$

จะได้

$$V_a - V_a' = I_a(R_a + j\omega L_a) + I_b(j\omega L_{ab}) + I_c(j\omega L_{ac}) + j\omega L_{ag}I_g - j\omega L_{an}(I_a + I_b + I_c + I_g) + V_n \quad (2.13)$$

จัดรูปใหม่และแทนค่า V_n จะได้

$$\begin{aligned} \Delta V_a &= V_a - V_a' \\ &= I_a(R_a + j\omega L_a - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{na}) \\ &\quad + I_b(j\omega L_{ab} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{nb}) \\ &\quad + I_c(j\omega L_{ac} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{nc}) \\ &\quad + I_g(j\omega L_{ag} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{ng}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_a &= I_a(R_a + j\omega L_a - 2j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \\ &\quad + I_b(j\omega L_{ab} - j\omega L_{bn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \\ &\quad + I_c(j\omega L_{ac} - j\omega L_{cn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \\ &\quad + I_g(j\omega L_{ag} - j\omega L_{gn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \end{aligned} \quad (2.15)$$

หรือ

$$\Delta V_a = Z_{aa-n} I_a + Z_{ab-n} I_b + Z_{ac-n} I_c + Z_{ag-n} I_g \quad (2.16)$$

และสมการทั้ง 3 เฟสและสายดิน สามารถแสดงในรูปเมตริกซ์คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \dots \\ \Delta V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} & \vdots & Z_{ag-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} & \vdots & Z_{bg-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{cb-n} & Z_{cc-n} & \vdots & Z_{cg-n} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ Z_{ga-n} & Z_{gb-n} & Z_{gc-n} & \vdots & Z_{gg-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \dots \\ I_g \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

โดยปกติเราสนใจลักษณะของสายเฟสเท่านั้น และสามารถหาสมการสมมูล 3 เฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยแบ่งสมการเมตริกซ์ออกเป็นรูปแบบดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{abc} \\ \dots \\ \Delta V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & \vdots & Z_B \\ \dots & \vdots & \dots \\ Z_C & \vdots & Z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ \dots \\ I_g \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

และสมมติให้สายดินเป็นจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$[\Delta V_{abc}] = [Z_{abc}] [I_{abc}] \quad (2.19)$$

$$[Z_{abc}] = [Z_A] - [Z_B] [Z_D^{-1}] [Z_C] = \begin{bmatrix} Z'_{aa-n} & \vdots & Z'_{ab-n} & \vdots & Z'_{ac-n} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ Z'_{ba-n} & \vdots & Z'_{bb-n} & \vdots & Z'_{bc-n} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ Z'_{ca-n} & \vdots & Z'_{cb-n} & \vdots & Z'_{cc-n} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

(2) แอดมิตแตนซ์ขนาน

จากรูปที่ 2.4(b) ศักย์ไฟฟ้าของสายตัวนำสัมพันธ์กับประจุไฟฟ้าในตัวนำตามสมการในรูปเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \dots \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & \vdots & P_{ag} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & \vdots & P_{bg} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & \vdots & P_{cg} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ P_{ga} & P_{gb} & P_{gc} & \vdots & P_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ \dots \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

จากความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ของศักย์ไฟฟ้าคือ

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2H}{R}\right) \quad (2.22)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ab}}{d_{ab}}\right) \quad (2.23)$$

โดยที่

P_{aa} คือ สัมประสิทธิ์ของศักย์ไฟฟ้าของตัวนำ a

P_{ab} คือ สัมประสิทธิ์ของศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำ a และ b

H คือ ค่าความสูงเฉลี่ยของตัวนำจากพื้น (หน่วย เมตร)

R คือ รัศมีของตัวนำ

d_{ab} คือ ระยะระหว่างตัวนำ a และ b (หน่วย เมตร)

ϵ_0 คือ ค่า Permittivity ของ Free space

พิจารณาเช่นเดียวกับกรณีเมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์อนุกรมจะได้

$$[V_{abc}] = [P'_{abc}] [Q_{abc}] \quad (2.24)$$

โดยที่

P'_{abc} คือ เมตริกซ์ 3x3 ซึ่งคิดผลของสายดิน

และคาปาซิแตนซ์เมตริกซ์ (Capacitance matrix) ของสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 หาได้จาก

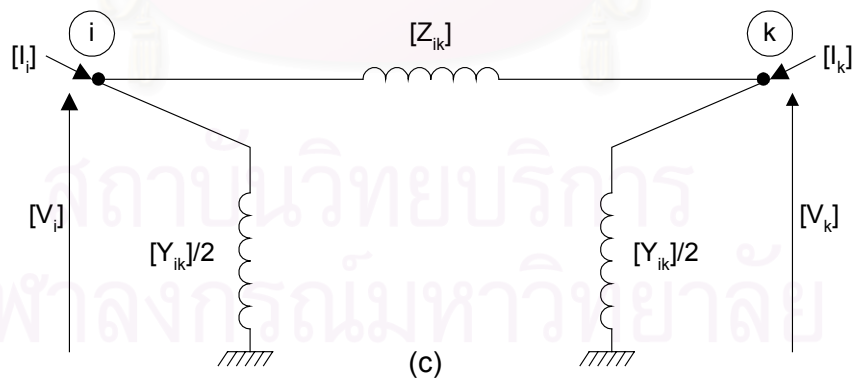
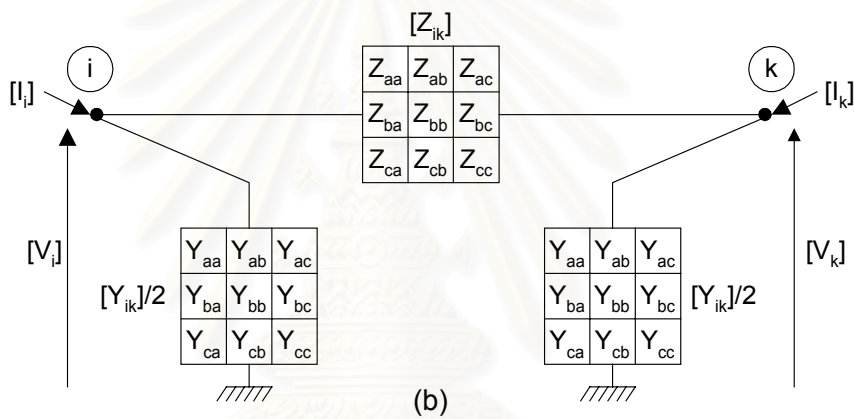
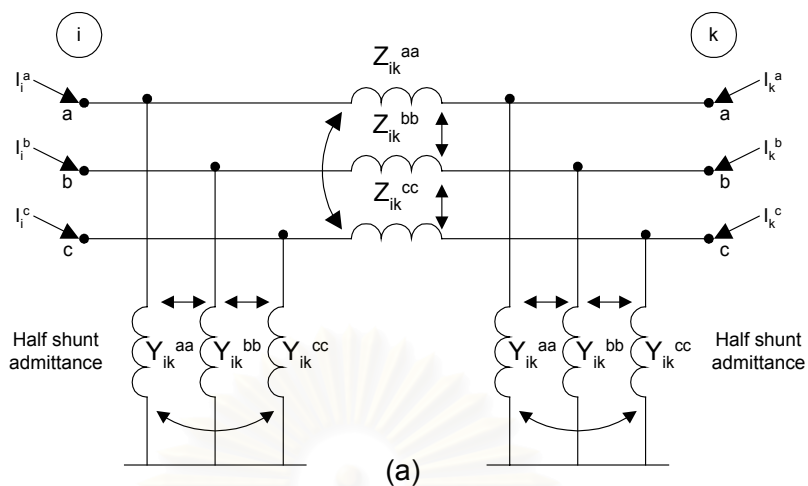
$$[C'_{abc}] = [P'_{abc}]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{aa} & \vdots & -C_{ab} & \vdots & -C_{ac} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ -C_{ba} & \vdots & C_{bb} & \vdots & -C_{bc} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ -C_{ca} & \vdots & -C_{cb} & \vdots & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

(3) แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนานในแบบจำลอง PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 2.5 (a) และเมตริกซ์สมมูลแสดงในรูปที่ 2.5 (b) และทั้งสองเมตริกซ์นี้แสดงในรูปของคอมปาว์นแอดมิตแตนซ์ (Compound admittances) ดังรูปที่ 2.5 (c)

กระแสที่พุ่งเข้าโหนด (Nodal injected currents) ของรูปที่ 2.5 (c) มีความสัมพันธ์กับแรงดันโหนด (Nodal voltages) ตามสมการ

$$\begin{bmatrix} [I_i] \\ \dots \\ [I_k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]^{-1} + [Y]/2 & \vdots & -[Z]^{-1} \\ \dots & \vdots & \dots \\ -[Z]^{-1} & \vdots & [Z]^{-1} + [Y]/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_i] \\ \dots \\ [V_k] \end{bmatrix} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.5 แบบจำลอง PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะสั้น

(a) แบบจำลองวงจรแบบสมบูรณ์ (Full circuit representation)

(b) วงจรสมมูลในรูปเมตริกซ์ (Matrix equivalent)

(c) แบบจำลองโดยใช้แอดมิแตนซ์ประกอบ (Compound admittances)

ในรูปแบบนี้ค่าในแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใช้สำหรับกรณีสายส่งระยะสั้นเชื่อมระหว่างบัสบาร์ i และ k ในเทอมของเมตริกซ์ขนาด 3×3

ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้ไม่มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับกรณีสายส่งระยะยาว โดยที่ความยาวของสายส่งจะมีผลต่อความยาวคลื่น ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความถี่ฮาร์มอนิกส์ ความยาวของสายส่งอาจจะสั้นเกินไป จึงต้องใช้วิธีพิจารณาสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave propagation) ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่า

2.1.2 คาปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor bank)

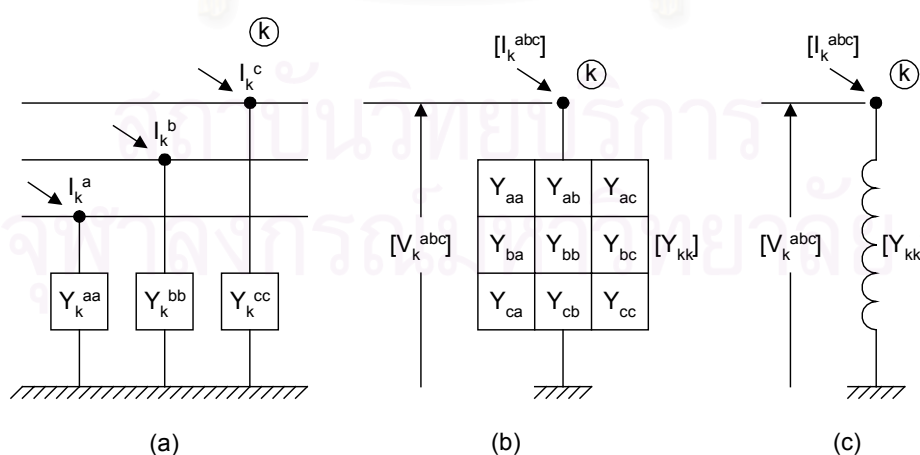
รีแอกเตอร์แบบขนานและคาปาซิเตอร์ที่ใช้อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ ข้อมูลที่ใช้จะอยู่ในเทอมของพิกัด MVA_r และพิกัดแรงดัน สามารถนำมาคำนวณหาค่าแอดมิตแตนซ์สมมูลต่อเฟสในหน่วยเปอร์ยูนิต (Per unit) ได้

ค่าแอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำเทียบกับดิน (Coupled admittances to ground) ที่บัส k จะถูกสร้างเป็นแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ขนาด 3×3 ดังแสดงในรูปที่ 2.6

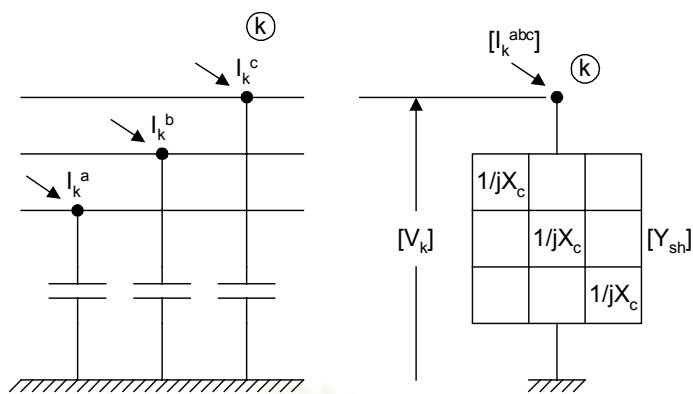
ค่าองค์ประกอบของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์จะอยู่ในแนวทแยงมุม และเป็นสัดส่วนกับความถี่ ค่า MVA_r พิกัดที่ความถี่มูลฐาน (Q) และแรงดันปกติ (Nominal voltage, V) ใช้คำนวณหาค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive reactance) จาก

$$x_c = \frac{V^2}{Q} \quad (2.27)$$

โดยละเลยผลของอินดักแตนซ์อนุกรม (Series inductance) ในคาปาซิเตอร์แบงก์



รูปที่ 2.6 แบบจำลองขององค์ประกอบขนาน (a) แอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำ (b) แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (c) คอมพิวเตอร์แอดมิตแตนซ์



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของคาปาซิเตอร์แบงค์

2.1.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (Harmonic filter)

การนำตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้ามาใช้ในระบบ ก็ต่อเมื่อ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่ามีปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ และลำดับใดที่ทำให้เกิดปัญหา โดยเฉพาะปัญหาการเกิดเรโซแนนซ์ เมื่อนำตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้ามาใช้จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ การสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์นั้นทำได้โดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์โดยตั้งความถี่เรโซแนนซ์ให้ตรงหรือใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการกรองซึ่งเป็นแบบพาสซีฟ โดยทั่วไปตัวกรองฮาร์มอนิกส์จะมีหน้าที่ 2 ประการ คือ

- ให้กำลังงานรีแอคทีฟที่ความถี่หลักมูลสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
- การลดกระแสฮาร์มอนิกส์

ตัวกรองฮาร์มอนิกส์จะแบ่งเป็น 2 แบบ ตามความถี่ที่ปรับคลื่น(Tuned frequency) คือ

- ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบดีจูน(Detuned filter) จะปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ต่ำกว่าลำดับฮาร์มอนิกส์ต่ำสุดที่มีอยู่ในระบบ เช่น ถ้าในระบบมีฮาร์มอนิกส์ต่ำสุดคือลำดับที่ 5 จะปรับความถี่ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3.78 หรือ 4.08 เป็นต้น
- ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบจูน(Tuned filter) จะปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับลำดับฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการกรอง เช่น ถ้าต้องการกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ต้องปรับความถี่ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 4.7 - 4.8 เป็นต้น

การปรับให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่ h หมายถึง ค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของตัวรีแอคเตอร์(X_L) เท่ากับค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์(X_C) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \text{หรือ} \quad X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (2.28)$$

สำหรับตัวอย่างการตั้งค่ารีแอคแตนซ์ของตัวกรองแบบจูนที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆมีดังนี้

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

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

$$\text{ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 11} \quad X_L = X_C/10.8^2 = 0.0086X_C = 0.86\%X_C$$

โดยที่ค่า X_C ที่ความถี่หลักมูลมีค่าตามสมการที่ 2.27 นอกจากค่ารีแอคแตนซ์แล้วจะมีค่าความต้านทานของขดลวด ซึ่งหามาจากความสัมพันธ์ของ Q-factor มีค่าตามสมการที่ 2.29 ซึ่งเป็นค่าที่จุดเรโซแนนซ์ของวงจรอนุกรม R-L-C

$$Q_f = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r C R} \quad \text{หรือ} \quad Q_f = \frac{h X_L}{R} = \frac{X_C}{h R} \quad (2.29)$$

เมื่อ

X_L คือ ค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของรีแอคเตอร์ที่ความถี่หลักมูล

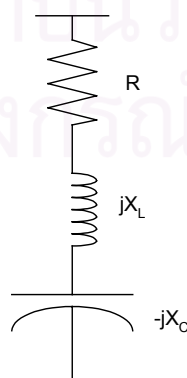
X_C คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ความถี่หลักมูล

h คือ จุดเรโซแนนซ์ของตัวกรองที่ปรับความถี่ไว้

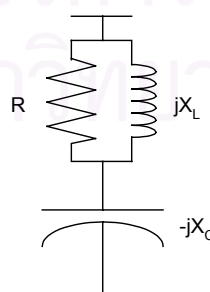
Q_f คือ ตัวประกอบคุณภาพ

R คือ ค่าความต้านทานของวงจรอนุกรม R-L-C

ดังนั้นแบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกส์จะประกอบด้วย ความต้านทาน คาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ และอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ ซึ่งถ้าเป็นตัวกรองแบบปรับความถี่เดียว(Single tuned) องค์ประกอบทั้ง 3 นี้จะต่ออนุกรมกัน แต่ถ้าเป็นตัวกรองแบบผ่านสูง(High pass) ความต้านทานกับอินดักทีฟรีแอคแตนซ์จะต่อขนานกัน จากนั้นจะต่ออนุกรมกับคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ แบบจำลองของตัวกรองทั้ง 2 แสดงดังรูปที่ 2.8



Single tuned filter



High pass filter (Second order)

รูปที่ 2.8 แบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกส์

สำหรับค่า R ของตัวกรองแบบปรับความถี่เดียวมีค่าดังสมการที่ 2.30

$$R_{\text{(For single tuned)}} = \frac{hX_L}{Q_{\text{Factor}}} \quad (2.30)$$

สำหรับค่า R ของตัวกรองแบบผ่านสูงจะเป็นส่วนกลับกันนั่นคือ

$$R_{\text{(For high pass)}} = \frac{Q_{\text{Factor}}}{hX_L} \quad (2.31)$$

ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ คือ ค่าพิคต์ของคาปาซิเตอร์(โวลต์-วาร์) เพื่อหาค่า X_C ที่ความถี่หลักมูล ตามสมการที่ 2.27 ความถี่ที่ต้องการกรองเพื่อคำนวณหาค่าของ X_L ตามสมการที่ 2.28 และค่า Q-factor เพื่อคำนวณหาค่า R ตามสมการที่ 2.30 สำหรับตัวกรองแบบปรับความถี่เดียวและสมการที่ 2.31 สำหรับตัวกรองแบบผ่านสูง

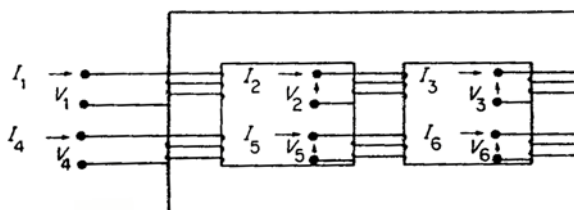
2.1.4 หม้อแปลงไฟฟ้า (3-phase transformers)

(1) แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

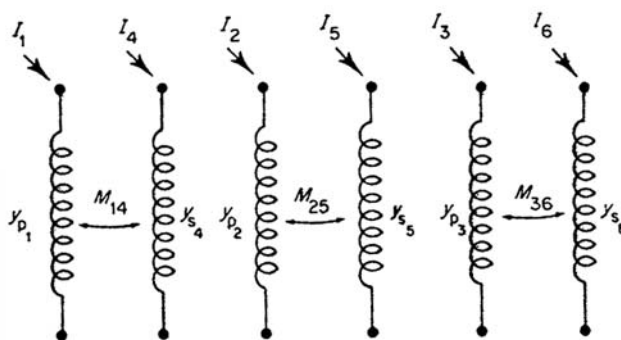
วงจรปฐมภูมิ(Primitive network)ของหม้อแปลงแทนได้โดยแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ปฐมภูมิ (Primitive admittance matrix)ซึ่งอยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

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



รูปที่ 2.9 แบบจำลองไดอะแกรมของหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด



รูปที่ 2.10 วงจรปฐุมภูมิ 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 2.32 สามารถแสดงเป็นชุดสมการได้อย่างง่ายคือ

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_p & y'_m & y'_m & -y_m & y''_m & y''_m \\ y'_m & y_p & y'_m & y''_m & -y_m & y''_m \\ y'_m & y'_m & y_p & y''_m & y''_m & -y_m \\ -y_m & y''_m & y''_m & y_s & y'''_m & y'''_m \\ y''_m & -y_m & y''_m & y''_m & y_s & y''_m \\ y''_m & y''_m & -y_m & y''_m & y''_m & y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

โดยที่

y'_m คือ แอตมิตแตนซ์เหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐุมภูมิ

y''_m คือ แอตมิตแตนซ์เหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐุมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่อยู่บนแกนเหล็กต่างกัน

y'''_m คือ แอตมิตแตนซ์เหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทุติยภูมิ

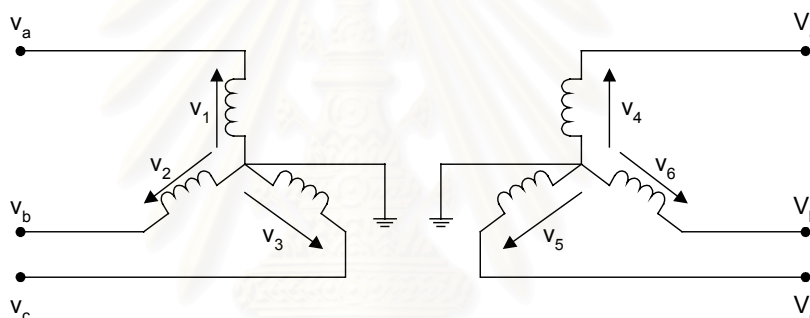
แต่สำหรับในกรณีที่หม้อแปลงเป็นหม้อแปลงแบบเฟสเดียว 3 ลูก จะได้ว่าแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์ปฐุมภูมิใหม่คือ

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{p1} & & & & & \\ & y_{p2} & & & & \\ & & y_{p3} & & & \\ M_{41} & & & y_{s4} & & \\ & M_{52} & & & y_{s5} & \\ & & M_{63} & & & y_{s6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

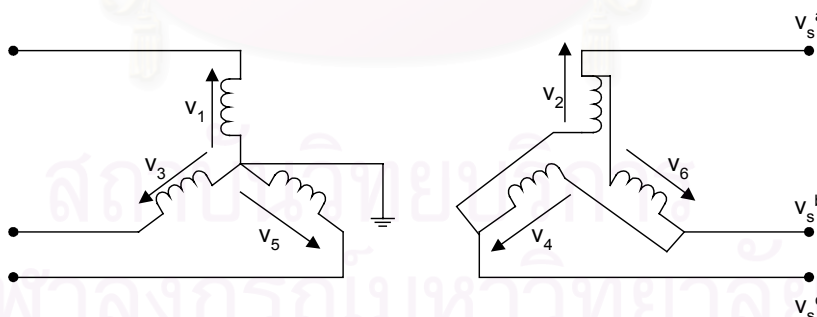
(2) แบบจำลองสำหรับการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

เมตริกซ์ของการต่อ(Connection matrix)หาได้จากการพิจารณาถึงการวงจรการต่อจริง สำหรับหม้อแปลงแบบ Star-Star ดังในรูปที่ 2.11 เมตริกซ์ของการต่อ(Connection matrix) ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันกิ่ง(Branch voltages)และแรงดันโหนด(Node voltages)เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์(Identity matrix)ขนาด 6x6 ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \\ V_s^a \\ V_s^b \\ V_s^c \end{bmatrix} \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-สตาร์



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบสตาร์-เดลตา

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

$$[Y]_{\text{NODE}} = [C]^t [Y]_{\text{PRIM}} [C] \quad (2.36)$$

เมื่อแทนค่า $[C]$ จะได้ว่า

$$[Y]_{\text{NODE}} = [Y]_{\text{PRIM}} \quad (2.37)$$

เมื่อพิจารณาถึงการต่อแบบ Wye G – Delta ตามรูปที่ 2.12 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกึ่งและแรงดันโหนดเป็นดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \\ V_s^a \\ V_s^b \\ V_s^c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

หรือ

$$[V]_{\text{branch}} = [C][V]_{\text{node}} \quad (2.39)$$

หรือสามารถเขียนได้ว่า

$$[Y]_{\text{NODE}} = [C]^t [Y]_{\text{PRIM}} [C] \quad (2.40)$$

และจาก $[Y]_{\text{PRIM}}$ จากสมการที่ 2.33

$$[Y]_{\text{NODE}} = \begin{bmatrix} y_p & y'_m & y'_m & -(y_m + y''_m) & (y_m + y''_m) & 0 \\ y'_m & y_p & y'_m & 0 & -(y_m + y''_m) & (y_m + y''_m) \\ y'_m & y'_m & y_p & (y_m + y''_m) & 0 & -(y_m + y''_m) \\ -(y_m + y''_m) & 0 & (y_m + y''_m) & 2(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) \\ (y_m + y''_m) & -(y_m + y''_m) & & -(y_s - y'''_m) & 2(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) \\ 0 & (y_m + y''_m) & -(y_m + y''_m) & -(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) & 2(y_s - y'''_m) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

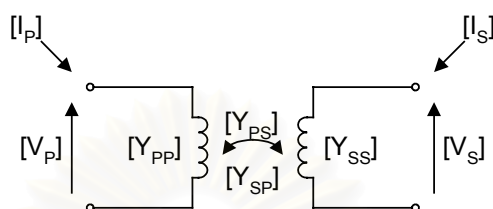
ยิ่งไปกว่านั้นถ้าค่าแอดมิตแตนซ์ปรัสมภูมิมีค่าเป็นเปอร์ยูนิต ซึ่งทั้งแรงดันด้านปรัสมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเป็น 1 pu แบบจำลองหม้อแปลงแบบวาย-เดลตาจะต้องรวมผลของอัตราส่วนของหม้อแปลง(Effective turn ratio) ด้วยค่า $\sqrt{3}$ เมตริกซ์ในควอดแดรนต์บนขวาที่ล่างซ้ายต้องการด้วย $\sqrt{3}$ และเมตริกซ์ในควอดแดรนต์ล่างขวาหารด้วย 3

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

$$\begin{bmatrix} I_p^a \\ I_p^b \\ I_p^c \\ I_s^A \\ I_s^B \\ I_s^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & & & & & \\ & y & & & & \\ & & y & & & \\ -y/\sqrt{3} & & y/\sqrt{3} & & & \\ & y/\sqrt{3} & & \frac{2}{3}y & & \\ y/\sqrt{3} & -y/\sqrt{3} & & -\frac{1}{3}y & & \\ & & y/\sqrt{3} & & \frac{2}{3}y & \\ & & & -\frac{1}{3}y & & -\frac{1}{3}y \\ & & & & -\frac{1}{3}y & \frac{2}{3}y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \\ V_s^A \\ V_s^B \\ V_s^C \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

โดยที่ y คือ ค่าลี้คเกจแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง (Transformer leakage admittance) ในหน่วยเปอร์ยูนิต

โดยทั่วไปหม้อแปลง 3 เฟสแบบ 2 ขดลวดอาจจะแทนได้ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ 2 ชุด เมตริกซ์ของวงจรและแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับแบบจำลองนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แบบจำลองหม้อแปลง 3 เฟสแบบ 2 ขดลวด

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

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

สุดท้ายนี้เมตริกซ์ย่อยได้ถูกดัดแปลงเพื่อให้ใช้ได้กับหม้อแปลงแบบแทปไม่ปกติ (Off-nominal tap ratio)

- (1) หาค่าแอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำตัวเองทางด้านปฐมภูมิด้วย α^2
- (2) หาค่าแอดมิตแตนซ์เหนี่ยวนำตัวเองทางด้านทุติยภูมิด้วย β^2

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

ซึ่ง α และ β คือ อัตราส่วนแท้ปของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิตามลำดับ

2.1.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor)

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้จะยึดวงจรสมมูลของวงจรลำดับบวก(Positive sequence) และวงจรลำดับลบ(Negative sequence) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะพิจารณาถึงสเตเตอร์(Stator) ที่ต่อแบบนิวทรัลไม่ลงดิน(Ungrounded neutral) หรือเดลตา(Delta) เท่านั้น นั่นคือในกรณีนี้จะไม่มีการเสถลำดับศูนย์ แต่จะวงจรสมมูลจะแสดงในรูปของแอดมิตแตนซ์สมมูลซึ่งขึ้นกับค่าสลิป (Slip) โดยใช้ Fortesque transformation เพื่อแปลงมาเป็นองค์ประกอบทางเฟส จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.14 จะได้สมการของกระแสโดยใช้หลักการองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical component) คือ

$$I_p = Y_p V_p \quad (2.43)$$

$$I_n = Y_n V_n \quad (2.44)$$

หรือในรูปของเมตริกซ์คือ

$$I_{pn} = [Y_{pn}] V_{pn} \quad (2.45)$$

โดยที่

V_p คือ แรงดันลำดับบวกทางด้านขาเข้าของมอเตอร์

I_p คือ กระแสลำดับบวกทางด้านขาเข้าของมอเตอร์

Y_p คือ แอดมิตแตนซ์สมมูลลำดับบวกทางด้านขาเข้าของมอเตอร์

R_{sp} คือ ค่าความต้านทานลำดับบวกของวงจรสเตเตอร์ของมอเตอร์

X_{sp} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกของวงจรสเตเตอร์ของมอเตอร์

R_{rp} คือ ค่าความต้านทานลำดับบวกของวงจรโรเตอร์ของมอเตอร์

X_{rp} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกของวงจรโรเตอร์ของมอเตอร์

X_{mp} คือ ค่าแมกนีไทซิ่งรีแอกแตนซ์ลำดับบวกของมอเตอร์

V_n คือ แรงดันลำดับลบทางด้านขาเข้าของมอเตอร์

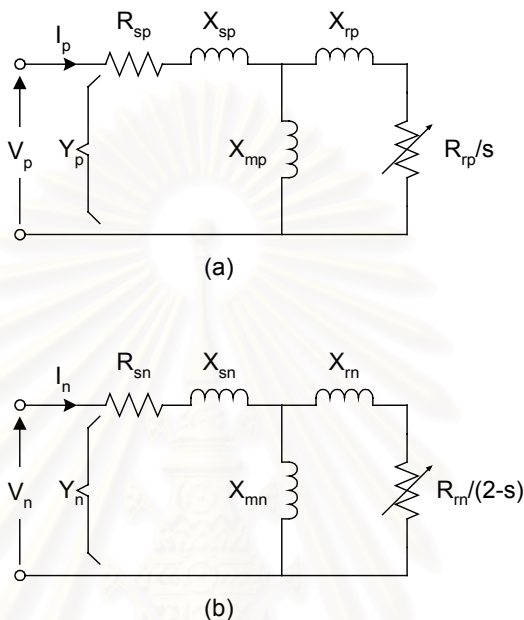
I_n คือ กระแสลำดับลบทางด้านขาเข้าของมอเตอร์

Y_n คือ แอดมิตแตนซ์สมมูลลำดับลบทางด้านขาเข้าของมอเตอร์

R_{sn} คือ ค่าความต้านทานลำดับลบของวงจรสเตเตอร์ของมอเตอร์

X_{sn} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับลบของวงจรสเตเตอร์ของมอเตอร์

- R_m คือ ค่าความต้านทานลําดับลบของวงจรวอเตอร์ของมอเตอร์
- X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลําดับลบของวงจรวอเตอร์ของมอเตอร์
- X_{mn} คือ ค่าแมกเน็ไทซิงรีแอกแตนซ์ลําดับลบของมอเตอร์
- s คือ ค่าสลิป (Slip) ของมอเตอร์



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(a) วงจรลําดับบวก

(b) วงจรลําดับลบ

2.2 แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

2.2.1 สายส่งกำลังไฟฟ้า

ในกรณีของสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบหลายตัวนำ แบบจำลอง PI ของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ขนานต่อหนึ่งหน่วยความยาวคือ $[Z']$ และ $[Y']$ ตามลําดับ เป็นเมตริกซ์จัตุรัสที่มีขนาดตามจำนวนของตัวนำที่มีการเหนี่ยวนำ (Mutually coupled)

Derivation ของแบบจำลองสมมูลแบบ PI สำหรับ Harmonic penetration ศึกษาจากเมตริกซ์แบบ PI ปกติเช่นเดียวกับกรณีของสายส่งเฟสเดียว ยกเว้นที่เกี่ยวข้องกับการประเมินฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก(Hyperbolic function) ของค่าคงที่ของการ Propagation ซึ่งจะได้เมตริกซ์ใหม่คือ

$$[y] = ([Z'] [Y'])^{\frac{1}{2}} \tag{2.46}$$

ไม่มีวิธีที่สามารถคำนวณหาค่า Sinh หรือ Tanh ของเมตริกซ์ได้โดยตรง ดังนั้นวิธีที่ใช้ค่าเจาะจง(Eigenvalues)และเวกเตอร์เจาะจง(Eigenvectors) ที่เรียกว่า การวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal analysis) จึงได้ถูกนำมาใช้

พิจารณาสมการดิฟเฟอเรนเชียลเชิงเส้นอันดับสอง(Second order differential equation) สำหรับสายส่งหลายเส้นในรูปของสมการที่ 2.1 โดยที่เมตริกซ์เป็นเมตริกซ์อันดับ m ซึ่งเท่ากับจำนวนของเฟส

$$\left[\frac{d^2 \mathbf{V}}{dx^2} \right] = [\mathbf{Z}'][\mathbf{Y}'][\mathbf{V}] \quad (2.47)$$

$$\left[\frac{d^2 \mathbf{I}}{dx^2} \right] = [\mathbf{Y}'][\mathbf{Z}'][\mathbf{I}] \quad (2.48)$$

เนื่องจากสมการดังกล่าวข้างต้นมีความยากในการแก้หาผลตอบเพราะว่าทุกเฟสล้วนมีการเหนี่ยวนำระหว่างกัน อย่างไรก็ตามสมการ 3 เฟสที่เป็นเมตริกซ์สมมาตรสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของสมการเฟสเดียวที่ไม่มีมีการเหนี่ยวนำระหว่างกันได้โดยใช้วิธีการขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical component) นั่นก็คือสามารถแปลงสมการที่ 2.47 และ 2.48 ให้เป็นสมการที่ไม่มีมีการเหนี่ยวนำได้เช่นเดียวกัน โดยการแปลงแรงดันเฟสไปเป็นแรงดันเชิงโหมด (Modal voltages)

$$[\mathbf{V}] = [\mathbf{T}_v][\mathbf{V}_{mode}] \quad \text{และ} \quad [\mathbf{V}_{mode}] = [\mathbf{T}_v]^{-1}[\mathbf{V}] \quad (2.49)$$

และโดยการเลือกเมตริกซ์การแปลง(Transformation matrix, $[\mathbf{T}_v]$) ที่เหมาะสม สมการที่ 2.47 สามารถเปลี่ยนได้เป็น

$$\left[\frac{d^2 \mathbf{V}_{mode}}{dx^2} \right] = [\mathbf{\Lambda}][\mathbf{V}_{mode}] \quad (2.50)$$

โดยที่ $[\mathbf{\Lambda}]$ คือ เมตริกซ์แนวทแยงมุม องค์ประกอบของ $[\mathbf{\Lambda}]$ คือ ค่าเจาะจง(Eigenvalue) ของผลคูณของเมตริกซ์ $[\mathbf{Z}'][\mathbf{Y}']$ และเมตริกซ์การแปลง $[\mathbf{T}_v]$ คือ เมตริกซ์ของเวกเตอร์ค่าเจาะจง (Eigenvector) ของเมตริกซ์ผลคูณนั้น สมการที่ 2.48 สามารถจัดให้อยู่ในแนวทแยงมุมได้เช่นกัน ด้วยเมตริกซ์ทแยงมุมเดียวกัน $[\mathbf{\Lambda}]$ นั่นคือ

$$\left[\frac{d^2 \mathbf{I}_{mode}}{dx^2} \right] = [\mathbf{\Lambda}][\mathbf{I}_{mode}] \quad (2.51)$$

แต่เมตริกซ์การแปลงสำหรับกระแสแตกต่างกับของแรงดัน

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{T}_i][\mathbf{I}_{mode}] \quad \text{และ} \quad [\mathbf{I}_{mode}] = [\mathbf{T}_i]^{-1}[\mathbf{I}] \quad (2.52)$$

แต่ทั้งสองก็มีความสัมพันธ์คือ

$$[\mathbf{T}_i]^t = [\mathbf{T}_v]^{-1} \quad (2.53)$$

จากสมการที่ถูกจัดในรูปแนวทแยงมุม สมการที่ 2.50 และ 2.51 ตอนนี้อยู่ในรูป m เฟสในการศึกษาจะพิจารณาว่าประกอบด้วยสายส่งเฟสเดียว m สายเช่นคล้ายคลึงกับหลักการขององค์

ประกอบสมมาตร(Symmetrical component) ยกเว้นว่า วงจรลำดับศูนย์, วงจรลำดับบวก และวงจรลำดับลบ จะกลายเป็นวงจรโหมด1(Mode-1), วงจรโหมด2(Mode-2) และวงจรโหมด3(Mode-3) ในแต่ละโหมดจะใช้อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนานตามแบบจำลองสายส่งระยะยาวเฟสเดียวดังรูปที่ 2.3 ค่าคงที่ของการ Propagation ของแต่ละโหมดคือ

$$\lambda_{\text{mode-}i} = \sqrt{\lambda_i} \quad (2.54)$$

โดยที่

λ_i คือ ค่าเจาะจงตัวที่ i หรือองค์ประกอบตัวที่ i ใน $[\Lambda]$

อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนานของโหมดไม่สามารถหาได้โดยตรง แต่ต้องคำนวณจาก

$$[Z'_{\text{mode}}] = [T_v]^{-1} [Z'] [T_i] \quad \text{และ} \quad [Y'_{\text{mode}}] = [T_i]^{-1} [Y'] [T_v] \quad (2.55)$$

ซึ่งเมตริกซ์ของโหมดทั้งสองจะเป็นเมตริกซ์ในแนวทแยงมุม $[Y'_{\text{mode}}]$ จะไม่ได้เป็นจำนวนจินตภาพอย่างเดียวอีกต่อไปทั้งๆที่เป็นแบบจำลองของคาปาซิเตอร์ขนานเท่านั้น ซึ่งเนื่องจากมันขึ้นกับว่าเมตริกซ์การแปลงได้ถูกทำการนอร์มอลไลซ์(Normalized) อย่างไร สำหรับการวิเคราะห์ในสภาวะคงตัว(Steady state) ที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง จะไม่เกิดปัญหาแต่อย่างใด

อิมพีแดนซ์อนุกรมและแอดมิตแตนซ์ขนานของแบบจำลองสมมูล PI หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$[Z]_{\text{EPM}} = I [Z'] [M] \left[\frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \right] [M]^{-1} \quad (2.56)$$

โดยที่

I คือ ความยาวของสายส่งกำลังไฟฟ้า

$[Z]_{\text{EPM}}$ คือ เมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์อนุกรมของแบบจำลองสมมูล PI

$[M]$ คือ เมตริกซ์ของเวกเตอร์ค่าเจาะจงที่ถูกลนอร์มอลไลซ์

γ_j คือ ค่าเจาะจงตัวที่ j สำหรับวงจรที่มีการเหนี่ยวนำ $j/3$ วงจร

$$\left[\frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\sinh \gamma_1 l}{\gamma_1 l} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\sinh \gamma_2 l}{\gamma_2 l} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\sinh \gamma_j l}{\gamma_j l} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

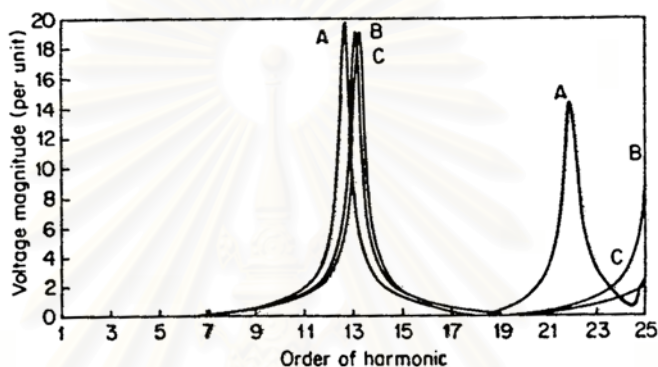
เช่นเดียวกัน

$$[Y]_{EPM} = I[M] \left[\frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\gamma l}{2}} \right] [M]^{-1}[Y'] \quad (2.58)$$

โดยที่

$[Y]_{EPM}$ คือ เมตริกซ์ของแอดมิตแตนซ์ขนานของแบบจำลองสมมูล PI

ภาพแสดงความถูกต้องเปรียบเทียบกันของแบบจำลองสมมูล PI และแบบจำลอง PI ปกติ แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของแบบจำลองสมมูล PI และแบบจำลองปกติ PI ของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ช่วงความถี่ 5 Hz: กราฟ A, 3 ส่วน; กราฟ B, 6 ส่วน; กราฟ C, วงจรสมมูล PI

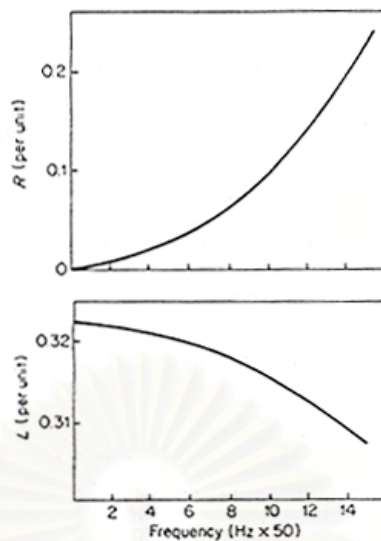
2.2.2 เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous machine)

โดยทั่วไปจะสมมติว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสไม่ก่อให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ ดังนั้นจึงสามารถจำลองได้โดยใช้อิมพีแดนซ์ขนาน (Shunt impedance) ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รีแอกแตนซ์แบบเชิงเส้นได้จากชับทรานเซียนต์อินดัคแตนซ์ (Subtransient inductance) หรือค่าอินดัคแตนซ์ของวงจรลัดดับล ซึ่งทั้งสองมีค่าเหมือนกัน

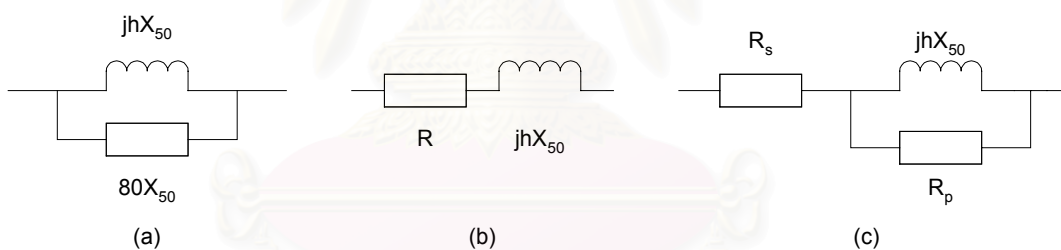
2.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า

ความต้านทานขึ้นกับความถี่เพราะกำลังสูญเสียในเส้นลวดตัวนำจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของกระแสไหลที่ผิว (Skin effect) ตามรูปที่ 2.16 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำกับความถี่ของหม้อแปลงที่ใช้งานในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.16 แบบจำลองของหม้อแปลงที่ขึ้นกับความถี่
 (a) ค่าความต้านทานในหน่วยเปอร์เซ็นต์กับความถี่
 (b) ค่าความเหนี่ยวนำในหน่วยเปอร์เซ็นต์กับความถี่

โดยสมมติว่าหม้อแปลงจะไม่ทำงานอยู่ในย่านอิมิตัว แบบจำลองที่แนะนำให้ใช้แทน Leakage inductance แสดงดังรูปที่ 2.17 (a) - (c)



รูปที่ 2.17 แบบจำลอง (CIGRE) ของหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์

ในรูปที่ 2.17 (a) X_{50} คือ Leakage reactance ที่ 50 Hz

ในรูปที่ 2.17 (b)

$$R = 0.1026kX_{50}(J + h)$$

โดยที่ J คือ อัตราส่วนของ Hysteresis ต่อ Eddy current losses สำหรับ Silicon steel มีค่าเท่ากับ 3 และ $k = 1/(J + 1)$

ในรูปที่ 2.17 (c)

$$90 < V^2/SR_s < 110, \quad 13 < SR_p/V^2 < 30$$

โดยที่ S เป็นพิกัดกำลังของหม้อแปลง ในทางปฏิบัติค่าของ R_s และ R_p ในหน่วย p.u. จะเป็น 0.04 และ 60 สำหรับพิกัด 30 MVA และมีค่าเป็น 0.01 และ 20 pu ในกรณีของหม้อแปลงขนาด 100 MVA

2.2.4 คาปาซิเตอร์และตัวกรองฮาร์มอนิกส์

แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ใช้เหมือนกับแบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน แต่ค่าคาปาซิเตอร์ที่พีแอกแตนซ์จะมีค่าเป็น $X_{Ch} = \frac{X_{C1}}{h}$ และค่าอินดักทีฟที่พีแอกแตนซ์มีค่าเป็น $X_{Lh} = hX_{L1}$ โดยในที่นี้จะไม่คิดถึงผลของ Skin effect ที่มีต่อค่าความต้านทาน

เมื่อ

X_{C1} คือ ค่าคาปาซิเตอร์ที่พีแอกแตนซ์ที่ความถี่มูลฐาน

X_{L1} คือ อินดักทีฟที่พีแอกแตนซ์ที่ความถี่มูลฐาน

X_{Ch} คือ ค่าคาปาซิเตอร์ที่พีแอกแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

X_{Lh} คือ อินดักทีฟที่พีแอกแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

2.2.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h แสดงดังในรูปที่ 2.18 ซึ่ง

$$s_h = \frac{h \pm (1 - s_1)}{h} \quad (2.59)$$

โดยที่

V_{ph} คือ แรงดันลำดับบวกทางด้านขาเข้าของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

I_{ph} คือ กระแสลำดับบวกทางด้านขาเข้าของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

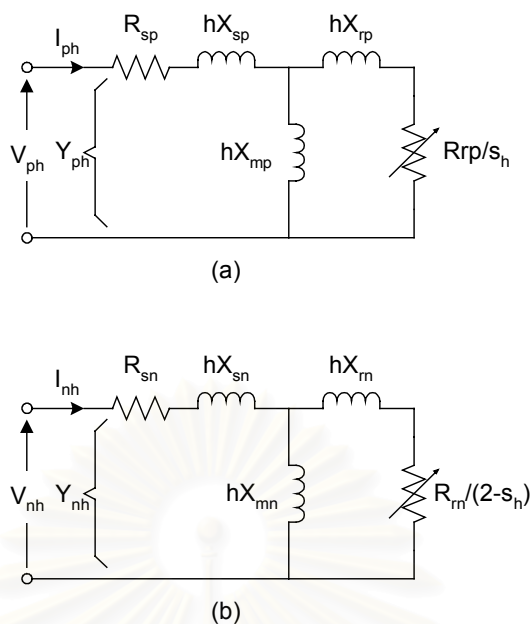
Y_{ph} คือ แอตมิตแตนซ์สมมูลลำดับบวกทางด้านขาเข้าของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

V_{nh} คือ แรงดันลำดับลบทางด้านขาเข้าของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

I_{nh} คือ กระแสลำดับลบทางด้านขาเข้าของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

Y_{nh} คือ แอตมิตแตนซ์สมมูลลำดับลบทางด้านขาเข้าของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h

s_h คือ ค่าสลิป (Slip) ของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์

(a) วงจรลำดับบวก

(b) วงจรลำดับลบ

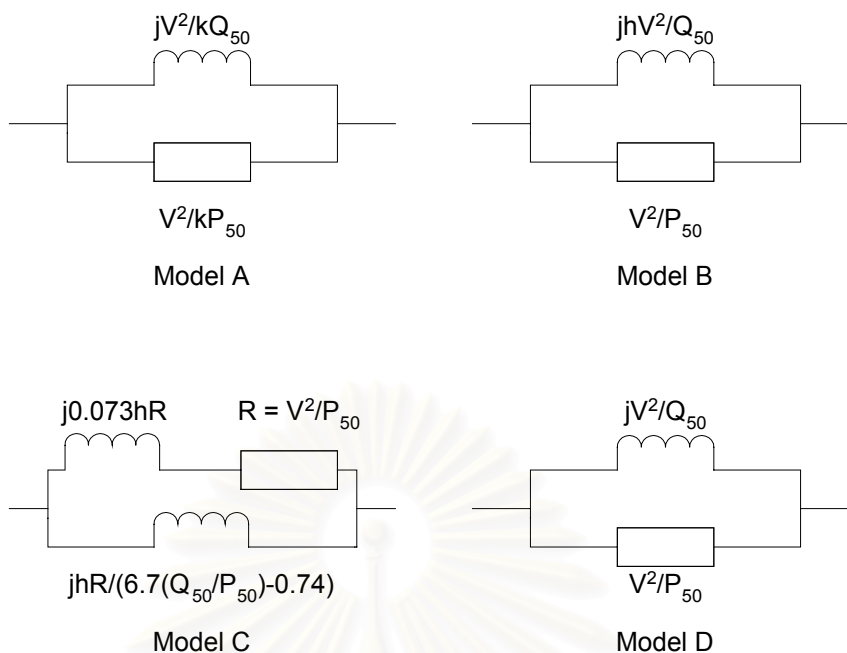
2.2.6 โหลด

เมื่อศึกษาถึงฮาร์มอนิกส์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า(Transmission systems) แบบจำลองของโหลดเป็นเรื่องที่สำคัญ ที่บางจุดของระบบก็ยากที่จะหาวงจรมูล

วิธีการหาอิมพีแดนซ์สมมูลที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์(Equivalent harmonic impedance) ของระบบการไฟฟ้า(Supply authority networks) สามารถดังนี้คือ

- (i) การวัดโดยตรง ซึ่งจำนวนของความถี่ต้องเพียงพอที่จะทำ Interpolation ให้ได้ดี ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ใช้เวลามากและยาก
- (ii) การหา Derivation ของคุณลักษณะอุปกรณ์(Component characteristic) เช่น มอเตอร์ โรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ค่อนข้างจะยากเพราะต้องพิจารณาถึงการศึกษาทางด้านเสถียรภาพของระบบด้วย(System stability)
- (iii) การใช้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่ทราบค่าแล้วของความถี่มูลฐาน ณ จุดจ่ายกำลัง(Point of supply)

แบบจำลองที่ใช้แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แบบจำลองของโหลดในการศึกษาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์

แบบจำลอง A ที่เสนอโดย Pesonen et al. โดยที่ h คือ Harmonic order , V คือ ระดับแรงดันปกติ และ $k = 0.1h + 0.9$

แบบจำลอง B สอดคล้องให้ Reactance ขึ้นกับความถี่ขณะที่ความต้านทานที่ต่อขนานคงที่

แบบจำลอง C ได้จากการทำการวัดโหลดที่ Medium voltage โดยใช้ Audio frequency ripple control generators

แบบจำลอง D Impedance ของโหลดที่คำนวณที่ 50 Hz ถือว่าคงที่ตลอดทุกความถี่

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

3.1 การแปลงระบบพิกัด (Transformation of Coordinates)

3.1.1 เมตริกซ์การแปลง (Transformation matrix)

สมการไหลดไฟลว์กระแสลับ 3 เฟสปกติจะอยู่ในรูปแบบของระบบเฟส(Phase frame) ซึ่งแสดงได้ดังสมการของแรงดันบัลคือ

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^{abc} & Y_{12}^{abc} & \dots & Y_{1N}^{abc} \\ Y_{21}^{abc} & Y_{22}^{abc} & \dots & Y_{2N}^{abc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1}^{abc} & Y_{N2}^{abc} & \dots & Y_{NN}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{abc} \\ V_2^{abc} \\ \vdots \\ V_N^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{abc} \\ I_2^{abc} \\ \vdots \\ I_N^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

โดยที่

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

Y_{ij}^{abc} คือ เมตริกซ์ย่อยของ Mutual-admittance ระหว่างบัลที่ i กับบัลที่ j

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

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

อย่างไรก็ตาม ในการจำแนกผลลัพท์เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์ต้องเลือกใช้ระบบพิกัด (Coordinate frame) ใหม่ พบว่าระบบวงจรลำดับ(Sequence component frame) เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดโดยใช้พื้นฐานความรู้ขององค์ประกอบสมมาตร(Symmetrical component) ซึ่งมีเหตุผล 2 ประการดังนี้คือ

(i) โดยการใช้เมตริกซ์การแปลงสู่องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical component transformation matrix)

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^a \\ T^b \\ T^c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดยที่ $a = 1 \angle 120^\circ$

หรือส่วนกลับคือ

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

จะได้ชุดตัวแปรใหม่ ตัวอย่างเช่น

$$[\dot{V}_i^0 \quad \dot{V}_i^+ \quad \dot{V}_i^-] = T^{-1}V_i^{abc} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.4)$$

โดยที่ \dot{V}_i^k ($k = 0, +, -$) คือ เวกเตอร์ของแรงดันของบัสที่ i ซึ่ง k แสดงถึงองค์ประกอบของวงจรมวลลำดับศูนย์(0), วงจรมวลลำดับบวก(+) และวงจรมวลลำดับลบ(-) ตามลำดับ

ในความจริงแล้วขนาดของ \dot{V}_i^+ มีค่ามากกว่าขนาดของ \dot{V}_i^- หรือ \dot{V}_i^0 ภายใต้สภาวะไม่สมดุลสามารถพิจารณา \dot{V}_i^+ , \dot{V}_i^- และ \dot{V}_i^0 แยกจากกันได้

(ii) แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{ij}^{0+-}

$$Y_{ij}^{0+-} = T^{-1}Y_{ij}^{abc}T \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (3.5)$$

เนื่องจากองค์ประกอบในแนวทแยงมุมมีค่ามากกว่าองค์ประกอบในแนวที่ไม่ใช่แนวทแยงมุมมาก ตามความเป็นจริงในข้อนี้ทำให้หลักการของ Decomposed solution หรือกระบวนการหาผลลัพธ์โดยการแยกวิเคราะห์มีเสถียรภาพในการคำนวณมากกว่า

3.1.2 การสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบ (Formation of system admittance matrix)

แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบในรูปของระบบวงจรมวลลำดับได้จากการแปลงเมตริกซ์ย่อย Y_{ij}^{abc} ทั้งหมดตามสมการที่ (3.5) เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของวงจรมวลลำดับขององค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังบางตัวสามารถหาได้โดยง่าย แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบสามารถสร้างได้ใน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกสร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ย่อยของวงจรมวลลำดับ(Sequence admittance submatrix) ของแต่ละองค์ประกอบของระบบ และจากนั้นรวมเมตริกซ์ย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกัน

สุดท้ายทำการแบ่งกลุ่มตามกลุ่มของวงจรมวลลำดับจะได้ว่า Y_{ij}^{0+-} คือ

$$Y^{0+-} = \begin{bmatrix} Y^{00} & Y^{0+} & Y^{0-} \\ Y^{+0} & Y^{++} & Y^{+-} \\ Y^{-0} & Y^{-+} & Y^{--} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

โดยที่

Y^{kk} คือ แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เหนี่ยวนำตัวเองของวงจรมวลลำดับ k ของระบบ ซึ่ง $k = 0, +, -$

Y^{km} คือ แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์เหนี่ยวนำระหว่างวงจรมวลลำดับ k และ m ซึ่ง $k, m = 0, +, -$ แต่ $k \neq m$ เมื่อระบบสมดุล จะเป็นเมตริกซ์ศูนย์

3.2 การแก้ปัญหาโหลดโพลาร์ 3 เฟส (Decomposed three-phase power flow solution)

3.2.1 หลักการของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า 3 เฟส (Three-phase power flow equations of the algorithm)

ให้ V_i^k และ I_i^k ($k = 0, +, -$) เป็นแรงดันบั๊สและกระแสอัดฉีดที่บั๊สตามลำดับของวงจรลำดับ k ที่บั๊ส i คือ

$$V_i^k = V_i^k \angle \theta_i^k$$

$$I_i^k = I_i^k \angle \phi_i^k \quad k = 0, +, -; i = 1, 2, \dots, N_k$$

ซึ่ง N_k คือ จำนวนบั๊สของวงจรลำดับ k

เซตของสมการของแรงดันบั๊สของระบบไฟฟ้ากำลังในระบบวงจรลำดับ (Sequence component frame) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} Y^{00} & Y^{0+} & Y^{0-} \\ Y^{+0} & Y^{++} & Y^{+-} \\ Y^{-0} & Y^{-+} & Y^{--} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^0 \\ V^+ \\ V^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I^0 \\ I^+ \\ I^- \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$V^k = [V_1^k \quad V_2^k \quad V_3^k \quad \dots \quad V_{N_k}^k]^t$$

$$I^k = [I_1^k \quad I_2^k \quad I_3^k \quad \dots \quad I_{N_k}^k]^t$$

จัดเทอมของสมการ (3.7) ใหม่ได้เป็น

$$Y^{00}V^0 = I^0 - (Y^{0+}V^+ + Y^{0-}V^-) \quad (3.8)$$

$$Y^{++}V^+ = I^+ - (Y^{+0}V^0 + Y^{+-}V^-) \quad (3.9)$$

$$Y^{--}V^- = I^- - (Y^{-0}V^0 + Y^{-+}V^+) \quad (3.10)$$

สมการที่ (3.9) ซึ่งสัมพันธ์กับวงจรลำดับบวกที่เป็นส่วนหลักของการไหลของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้สมการการอัดฉีดกำลังไฟฟ้า (Bus power injections) มากกว่าสมการการอัดฉีดกระแสที่บั๊ส (Bus current injections) ตามสมการที่ (3.9) ซึ่งสัมพันธ์กับการอัดฉีดกำลังไฟฟ้า (Bus power injections) และแรงดันบั๊ส (Bus voltages) สามารถทำได้ดังนี้

เพราะว่า

$$V_i^0 I_i^0 + V_i^+ I_i^+ + V_i^- I_i^- = \frac{1}{3} (S_{gi}^{abc} - S_{li}^{abc}) \quad i = 1, 2, \dots, N_+ \quad (3.11)$$

โดยที่

$$S_{gi}^{abc} = S_{gi}^a + S_{gi}^b + S_{gi}^c = P_{gi}^{abc} + jQ_{gi}^{abc}$$

โดยที่ P_{gi}^{abc} และ Q_{gi}^{abc} คือผลรวมของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Active and Reactive powers Generation) 3 เฟส ที่บั๊ส i มีชื่อตามลำดับ

$$P_{gi}^{abc} = P_{gi}^a + P_{gi}^b + P_{gi}^c \text{ และ } Q_{gi}^{abc} = Q_{gi}^a + Q_{gi}^b + Q_{gi}^c$$

$$S_{li}^{abc} = S_{li}^a + S_{li}^b + S_{li}^c = P_{li}^{abc} + jQ_{li}^{abc}$$

โดยที่ P_{li}^{abc} และ Q_{li}^{abc} คือผลรวมของความต้องการกำลังของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพ(Active and Reactive powers Load demand) 3 เฟส ที่บัส i มีชื่อตามลำดับ

$$P_{li}^{abc} = P_{li}^a + P_{li}^b + P_{li}^c \text{ และ } Q_{li}^{abc} = Q_{li}^a + Q_{li}^b + Q_{li}^c$$

แทนค่าสมการที่ (3.9) ลงในสมการที่ (3.11) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\dot{V}_i^+ \left(\sum_{j=1}^{N_+} \dot{Y}_{ij}^{++} \dot{V}_j^+ \right) + \dot{V}_i^+ \left(\sum_{j=1}^{N_0} \dot{Y}_{ij}^{+0} \dot{V}_j^0 + \sum_{j=1}^{N_-} \dot{Y}_{ij}^{+-} \dot{V}_j^- \right) = \frac{1}{3} (S_{gi}^{abc} - S_{li}^{abc}) - \dot{V}_i^0 \dot{I}_i^0 - \dot{V}_i^- \dot{I}_i^-$$

$$i = 1, 2, \dots, N_+ \quad (3.12)$$

ซึ่ง Y_{ij}^{km} คือ องค์ประกอบที่ (i, j) ของ Y^{km} ($k = +; m = +, 0, -$)

ดังนั้นการไหลของกำลังไฟฟ้า 3 เฟส จะได้จากการแก้สมการที่ (3.12), (3.10) และ (3.8) โดยการทำ Iteration ในแต่ละ Iteration V^- และ V^0 ที่ปรับปรุงค่าแล้วแทนในสมการที่ (3.12) เพื่อหาค่า V^+ ก่อน หลังจากนั้นแก้สมการที่ (3.10) และ (3.8) หาค่า V^- และ V^0 ตามลำดับ เนื่องจากวงจรลำดับบวกเป็นส่วนหลักของกำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่ไหล ดังนั้นการลู่เข้าในการคำนวณกำลังการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเป็นที่พอใจต่อเมื่อผลลัพธ์ของสมการที่ (3.12) ได้ค่าที่เหมาะสมแล้ว

นอกจากนี้ด้วยการแทนค่าแบบเดียวกับสมการที่ (3.12) สำหรับสมการที่ (3.10) และ (3.8) จะได้สมการดังนี้คือ

$$\dot{V}_i^- \left(\sum_{j=1}^{N_-} \dot{Y}_{ij}^{--} \dot{V}_j^- \right) + \dot{V}_i^- \left(\sum_{j=1}^{N_0} \dot{Y}_{ij}^{-0} \dot{V}_j^0 + \sum_{j=1}^{N_+} \dot{Y}_{ij}^{-+} \dot{V}_j^+ \right)$$

$$= (S_{gi}^a - S_{li}^a) - \dot{V}_i^0 (\dot{I}_i^0 + \dot{I}_i^+ + \dot{I}_i^-) - \dot{V}_i^+ (\dot{I}_i^0 + \dot{I}_i^+ + \dot{I}_i^-) - \dot{V}_i^- (\dot{I}_i^0 + \dot{I}_i^+)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_- \quad (3.13)$$

$$\dot{V}_i^0 \left(\sum_{j=1}^{N_0} \dot{Y}_{ij}^{00} \dot{V}_j^0 \right) + \dot{V}_i^0 \left(\sum_{j=1}^{N_+} \dot{Y}_{ij}^{0+} \dot{V}_j^+ + \sum_{j=1}^{N_-} \dot{Y}_{ij}^{0-} \dot{V}_j^- \right)$$

$$= (S_{gi}^b - S_{li}^b) - \dot{V}_i^0 (a \dot{I}_i^+ + a^2 \dot{I}_i^-) - \dot{V}_i^+ (a^2 \dot{I}_i^0 + \dot{I}_i^+ + a \dot{I}_i^-) - \dot{V}_i^- (a \dot{I}_i^0 + a^2 \dot{I}_i^+ + \dot{I}_i^-)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_0 \quad (3.14)$$

แต่สมการข้างต้นไม่ได้นำไปใช้เนื่องจากความยุ่งยากในการเลือกบัสอ้างอิง(Slack bus) และค่าเริ่มต้น

3.2.2 ผลลัพธ์ของสมการที่ (3.12): การไหลของกำลังไฟฟ้าในวงจรลำดับบวก (Positive sequence power flow)

สมการที่ (3.12) มีความคล้ายคลึงกับสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเฟสเดียว(Single-phase power flow) ทั่วไป ซึ่งการหาผลลัพธ์สามารถทำตามกระบวนการ Iteration แบบเดียวกันกับที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวได้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาแวดล้อมบางประการอยู่ด้วย

(1) ชนิดของบัสของวงจรลำดับบวก

ในกรณีที่มีสถานะไม่สมดุล กำลังไฟฟ้าจริงทั้ง 3 เฟสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวจ่ายออกทั้งหมดยกเว้น Slack generator มีค่าที่แน่นอน เช่นเดียวกันมีการควบคุมขนาดของแรงดันซึ่งเราทราบค่าด้วยซึ่งอาจจะสัมพันธ์กับแรงดันของวงจรลำดับบวก, แรงดันของเฟสหนึ่งเฟสใด, หรือบาง Combination ของแรงดันทั้ง 3 เฟส

สำหรับผลพลอยได้ของสมการที่ (3.8) และ (3.10) ซึ่งจำเป็นต้องทราบการอัดฉีดกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสของทุกบัสของระบบ เนื่องจากแรงดันที่บัสภายใน(Internal bus) สมดุล ดังนั้น บัสภายในจึงไม่ต้องรวมอยู่ในวงจรลำดับลบและวงจรลำดับศูนย์

ดังนั้นจึงไม่เหมือนกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวทั่วไป ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในวงจรลำดับบวก บัสต่างๆได้ถูกจำแนกออกเป็น 4 ชนิดดังนี้คือ

ชนิด A: บัสที่ทราบทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพ เช่น Load buses (และบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพคงที่) บัสชนิดนี้เป็นแบบเดียวกันกับชนิด Conventional PQ จำนวนบัสชนิด A ทั้งหมดคือ N_l

ชนิด B: เป็นบัสที่คล้ายกับบัสชนิด Conventional PV แต่ต่างกันตรงมีค่ากำลังจินตภาพ (Reactive power) ที่อัดฉีดที่บัสที่ทราบค่าแน่นอน บัสที่ขั้ว(Terminal bus) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้นที่เป็นบัสชนิดนี้ จำนวนบัสชนิด B ทั้งหมดคือ N_g

ชนิด C: เป็นบัสที่ทราบค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้นบัสภายใน(Internal bus) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้นที่เป็นบัสชนิดนี้แต่ยกเว้นบัสอ้างอิงซึ่งไม่เป็นบัสชนิดนี้

ชนิด D: บัสซึ่งมุมของแรงดันที่บัสนี้เป็นบัสอ้างอิงหรือ Slack bus ของระบบ

เพื่อให้เกิดความชัดเจน จะจัดลำดับของบัสดังนี้ ให้บัสชนิด A ทั้งหมด N_l บัส จัดเป็นลำดับแรก บัสชนิด B เป็นลำดับ 2 ตั้งแต่ N_l+1 ถึง N_l+N_g และบัสชนิด C ตั้งแต่ N_l+N_g+1 ถึง

N_1+2N_g-1 ส่วนบัสอ้างอิงหรือ Slack bus เป็นลำดับสุดท้ายคือเป็นบัสที่ $(N_1+2N_g = N_+)$ th (โดยลำดับที่ N_1+i และ N_1+N_g+i มีสัมพันธ์กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวเดียวกันโดยที่ $i = 1, \dots, N_g$)

(2) นิยามของสมการผลต่าง (Mismatch equations defining)

$$\sum_{j=1}^{N_0} Y_{ij}^{+0} V_j^0 = J_{Ri}^{+0} + jJ_{Ii}^{+0}$$

$$\sum_{j=1}^{N_-} Y_{ij}^{+-} V_j^- = J_{Ri}^{+-} + jJ_{Ii}^{+-}$$

และ

$$V_i^0 I_i^0 = P_i^0 + jQ_i^0$$

$$V_i^- I_i^- = P_i^- + jQ_i^-$$

$$i = 1, 2, \dots, N_+$$

จากสมการที่ (3.12), สมการผลต่างของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพสามารถเขียนได้คือ

$$\Delta P_i = \left[\frac{1}{3} (P_{gi}^{abc} - P_{li}^{abc}) - P_i^0 - P_i^- \right] - V_i^+ \left(\sum_{j=1}^{N_+} V_j^+ (G_{ij}^{++} \cos \theta_{ij}^+ + B_{ij}^{++} \sin \theta_{ij}^+) \right. \\ \left. - V_i^+ [(J_{Ri}^{+0} + J_{Ri}^{+-}) \cos \theta_i^+ - (J_{Ii}^{+0} + J_{Ii}^{+-}) \sin \theta_i^+] \right) \\ i = 1, 2, \dots, N_1 + 2N_g - 1 \quad (3.15)$$

$$\Delta Q_i = \left[\frac{1}{3} (Q_{gi}^{abc} - Q_{li}^{abc}) - Q_i^0 - Q_i^- \right] - V_i^+ \left(\sum_{j=1}^{N_+} V_j^+ (G_{ij}^{++} \sin \theta_{ij}^+ - B_{ij}^{++} \cos \theta_{ij}^+) \right. \\ \left. - V_i^+ [(J_{Ri}^{+0} + J_{Ri}^{+-}) \sin \theta_i^+ + (J_{Ii}^{+0} + J_{Ii}^{+-}) \cos \theta_i^+] \right) \\ i = 1, 2, \dots, N_1 + N_g \quad (3.16)$$

โดยที่

$$Y_{ij}^{++} = G_{ij}^{++} + jB_{ij}^{++}$$

$$\theta_{ij}^+ = \theta_i^+ - \theta_j^+$$

(3) สมการปรับปรุงค่า (Updating equations)

ใช้รูปแบบของสมการปรับปรุงค่าด้วยวิธี Newton-Raphson Iteration scheme ซึ่งแสดง

ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \text{H} \vdots \text{N} \\ \vdots \\ \dots \dots \dots \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{J} \vdots \text{L} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_1^+ \\ \Delta\theta_2^+ \\ \vdots \\ \Delta\theta_{N_3}^+ \\ \dots \dots \dots \\ \Delta V_1^+/V_1^+ \\ \Delta V_2^+/V_2^+ \\ \vdots \\ \Delta V_{N_1}^+/V_{N_1}^+ \\ \dots \dots \dots \\ \Delta V_{N_2+1}^+/V_{N_2+1}^+ \\ \vdots \\ \Delta V_{N_+}^+/V_{N_+}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{N_3} \\ \dots \dots \dots \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_{N_2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

ซึ่ง $N_1 = N_1$, $N_2 = N_1 + N_g$, $N_3 = N_1 + 2N_g - 1$

และองค์ประกอบ H, J, N และ L มีนิยามดังนี้คือ

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j^+} \quad i, j = 1, 2, \dots, N_3$$

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j^+} \quad i = 1, 2, \dots, N_2 \text{ และ } j = 1, 2, \dots, N_3$$

$$N_{ij} = \begin{cases} \frac{\partial P_i}{\partial V_j^+} V_j^+ & i = 1, 2, \dots, N_3 \text{ และ } j = 1, 2, \dots, N_3 \text{ และ } j = N_1 + 1, \dots, N_2 \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_{(j+N_g)}^+} V_{(j+N_g)}^+ & \end{cases}$$

$$L_{ij} = \begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial V_j^+} V_j^+ & i = 1, 2, \dots, N_2 \text{ และ } j = 1, 2, \dots, N_3 \text{ และ } j = N_1 + 1, \dots, N_2 \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_{(j+N_g)}^+} V_{(j+N_g)}^+ & \end{cases}$$

หลังจากทำแต่ละ Iteration จะได้ค่า θ^+ และ V^+ ใหม่ซึ่งหาให้โดยการบวกเพิ่มค่าเดิมด้วย $\Delta\theta^+$ และ ΔV^+ ตามลำดับ และขั้นตอนการ Iteration จะดำเนินต่อไปจนกว่าคำตอบจะลู่เข้า

3.2.3 การหาผลลัพธ์ของสมการที่ (3.10) และ (3.8)

ในการแก้สมการที่ (3.10) เพื่อหาค่า V^- จำเป็นต้องศึกษาเทอมขวามือของสมการ ในระหว่างการทำ Iteration สามารถหาค่าเทอมของ $(Y^- V^0 + Y^- V^+)$ โดยการแทนค่า V^+ และ V^0 ที่ปรับปรุงค่าแล้วได้โดยตรง แต่สำหรับเทอม I_i^- ซึ่งก็คือ กระแสอัดฉีดของวงจรลำดับลบ (Negative sequence injection currents I_i^- โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$) จำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_i^- = \frac{1}{3} [1 \quad a^2 \quad a] [i_i^a \quad i_i^b \quad i_i^c]^t \quad i = 1, 2, \dots, N_i \quad (3.18)$$

โดยที่

$$I_i^a = \frac{-(P_{li}^a + jQ_{li}^a)^*}{\{T^a [\dot{V}_i^0 \quad \dot{V}_i^+ \quad \dot{V}_i^-]^t\}^*}$$

I_i^b และ I_i^c ก็อยู่ในรูปแบบที่คล้ายกับ I_i^a

การคำนวณสมการที่ (3.10) สามารถหาคำตอบได้โดยใช้หลักวิธีการแก้สมการ Linear simultaneous ที่รู้จักในชื่อของวิธี Sparisty-oriented factorisation

และด้วยขั้นตอนเดียวกันสามารถใช้กับสมการที่ (3.8) ได้โดย

$$I_i^0 = \frac{1}{3} [1 \quad 1 \quad 1] [i_i^a \quad i_i^b \quad i_i^c]^t \quad i = 1, 2, \dots, N_0 \quad (3.19)$$

3.2.4 ค่าเริ่มต้นและการสิ้นสุดของ Iteration

จากประสบการณ์ สำหรับ V_i^+ ($i = 1, 2, \dots, N_i$) จะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $1.0 \angle 0^\circ$, สำหรับ V_i^+ ($i = N_i + 1, N_i + 2, \dots, N_+$) จะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $V^{+sp} \angle 0^\circ$ และ $0.0 \angle 0^\circ$ สำหรับ V_i^- และ V_i^0 ตามลำดับ กระบวนการ Iteration จะสิ้นสุดเมื่อค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้า ΔP_i และ ΔQ_i อยู่ภายในขอบเขตค่าที่ยอมรับได้ (Convergence tolerance)

3.2.5 กระบวนการทำ Iteration (Alternative iterative procedure)

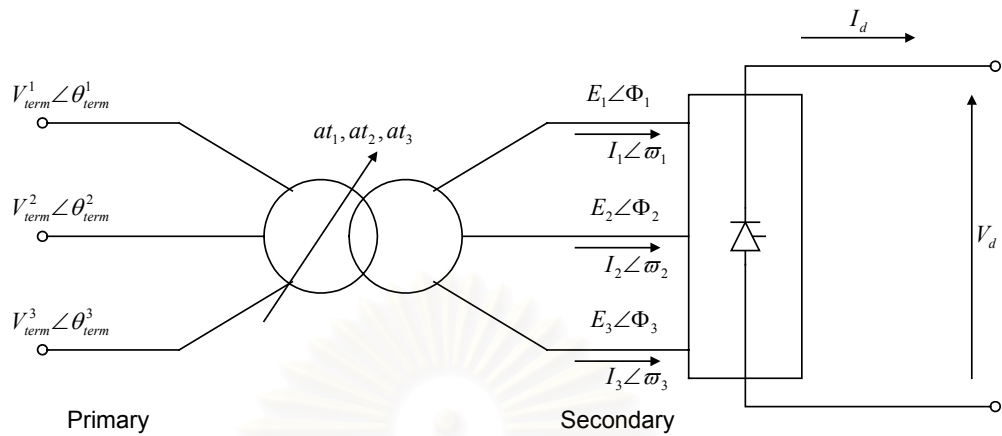
เป็นขั้นตอนที่แยกจากกระบวนการ Iteration ข้างต้น ซึ่ง Alternative iterative procedure จะมีกระบวนการ 3 ขั้นตอน โดยใช้หลังจากการทำโหลดโฟลว์เสิร์จ 1 Iteration

ขั้นตอนที่ 1: เมื่อได้ค่า $\Delta \theta^+$ และ ΔV^+ จากนั้นปรับปรุงค่า θ^+ และ V^+

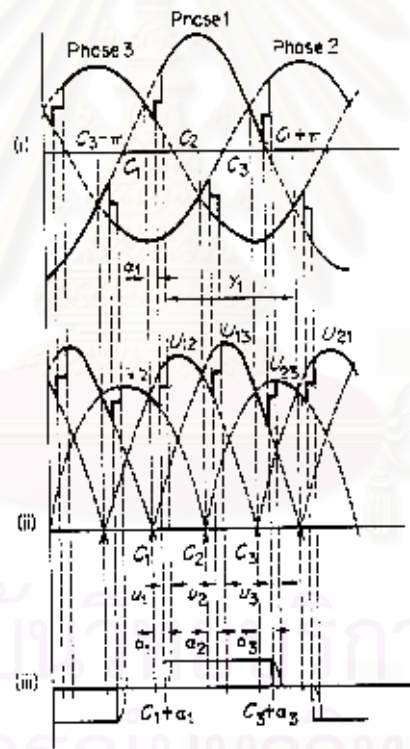
ขั้นตอนที่ 2: ใช้ค่า θ^+ และ V^+ ที่ปรับปรุงค่าแล้วมาแก้หาค่า V^-

ขั้นตอนที่ 3: ใช้ค่า θ^+ , V^+ และ V^- ที่ปรับปรุงค่าแล้วมาแก้หาค่า V^0

3.3 การวิเคราะห์การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (DC system model)



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของคอนเวอร์เตอร์ไม่สมดุล

- (i) แรงดันเฟส
- (ii) รูปคลื่นแรงดันกระแสตรง
- (iii) รูปคลื่นกระแสสมมติสำหรับเฟส A (รูปคลื่นจริงแสดงตั้งเส้นประ)

3.3.1 ข้อสมมติพื้นฐานในการคำนวณ

- (1) แรงดันทั้ง 3 เฟสที่ขั้วของบัสบาร์(Terminal busbar) เป็น Sinusoidal
- (2) แรงดันกระแสตรงและกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเรียบไม่มีการกระเพื่อม(Ripple)
- (3) หม้อแปลงที่ต่อกับคอนเวอร์เตอร์ไม่มีกำลังสูญเสียและละเลย Magnetizing admittance

ภายใต้สภาวะการทำงานที่สมดุลจะมีฮาร์มอนิกส์คุณลักษณะ(Characteristic harmonics) เท่านั้นที่เกิดขึ้น และเนื่องจากโดยปกติจะทำการกรองกระแสฮาร์มอนิกส์เหล่านี้ทำให้แรงดันฮาร์มอนิกส์มีค่าน้อย อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะไม่สมดุลอาจเกิดฮาร์มอนิกส์ที่ไม่ใช่คุณลักษณะ(Noncharacteristic harmonic) ขึ้นในระบบ ส่งผลให้แรงดันผิดเพี้ยนที่ขั้วของบัสบาร์มีค่าเพิ่มขึ้น เกิดผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ขั้วของคอนเวอร์เตอร์ต่อกำลังไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานที่เข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ซึ่งจะพิจารณาต่อไป

3.3.2 ข้อสมมติของหลักการคำนวณที่พัฒนาขึ้น

- (1) มุมจุดขนานล่าช้าของคอนเวอร์เตอร์เท่ากันทั้ง 3 เฟส
- (2) แทปของหม้อแปลงเท่ากันทั้ง 3 เฟส
- (3) ต้องทราบค่าแรงดันไฟตรงหรือกระแสไฟตรงที่จุดทำงานของคอนเวอร์เตอร์

3.3.3 ระบบเปอร์ยูนิต (Per unit system)

อย่างไรก็ตามในกรณี 3 เฟส แรงดันเฟส(Phase-neutral) ใช้เป็นพารามิเตอร์พื้นฐาน (Base parameter) ดังนี้

$$MVA_{base} = \text{Base Power per phase}$$

$$V_{base} = \text{Phase-neutral voltage base}$$

กระแสเบส(Current base) ทางด้าน AC และ DC มีค่าเท่ากัน ดังนั้นระบบ Per unit จะไม่เปลี่ยนแปลงในรูปของสมการคอนเวอร์เตอร์

3.3.4 ตัวแปรของคอนเวอร์เตอร์ (Converter variables)

ตัวแปรต่างๆ ได้ถูกนิยามโดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.1 และ 3.2 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

(i) ตัวแปรที่ทราบค่าหรือตัวแปรสมมติว่าทราบค่า

$V_{\text{term}}^i \angle \theta_{\text{term}}^i$ คือ แรงดันที่ขั้วของบัสบาร์ของคอนเวอร์เตอร์

$I_S^i \angle \omega_S^i$ คือ กระแสที่ความถี่มูลฐานของรูปคลื่นกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

V_d คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันกระแสตรง

I_d คือ กระแสตรงที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์

โดยที่ $i = 1, 2, 3$ คือ ลำดับเฟส

(ii) ตัวแปรที่ต้องการหาค่าในการคำนวณ

$U_{13} \angle C_1, U_{23} \angle C_2, U_{21} \angle C_3$ คือ แหล่งแรงดันเฟส-เฟสสำหรับคอนเวอร์เตอร์โดยอ้างอิงไปทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

C_i คือ Zero crossings เป็นมุมที่การจุดชนวนเกิดขึ้น

$E^i \angle \phi^i$ คือ แรงดันที่ความถี่มูลฐานของรูปคลื่นแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

α คือ มุมจุดชนวนล่าช้าวัดเทียบกับ Zero crossing

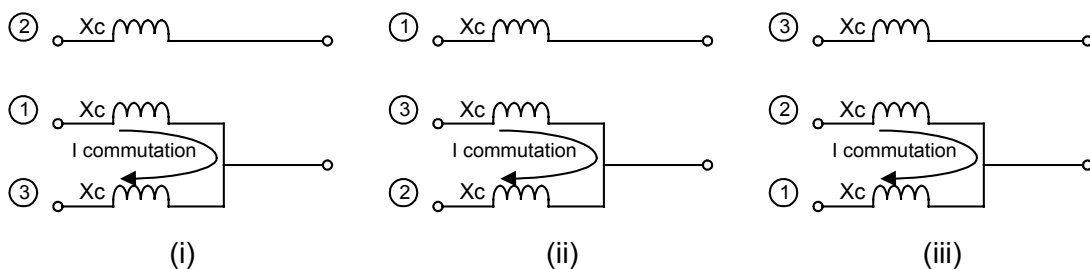
at คือ อัตราส่วนของแท็ปที่ไม่ปกติ (Off-nominal tap ratio) ของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ

3.3.5 ผลของคอมมิวเตชัน

การเกิดคอมมิวเตชันเนื่องจากการที่ไทรสเตอร์ (Tyristor) ยังนำกระแสอยู่เมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งตามลักษณะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ เป็นผลให้รูปคลื่นกระแสมีรูปผิดเพี้ยนไปดังรูปที่ 3.2 (iii) ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาถึงผลของการเกิดคอมมิวเตชันด้วย

สามารถคำนวณหา มุมคอมมิวเตชัน (μ) ของรูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 เฟสได้ ดังนี้โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.2 (iii)

(1) กระแสที่ไหลในขณะเกิดคอมมิวเตชัน



รูปที่ 3.3 วงจรของการเกิดคอมมิวเตชัน

- (i) การเกิดคอมมิวเตชันระหว่างเฟส 1 และ 3
- (ii) การเกิดคอมมิวเตชันระหว่างเฟส 3 และ 2
- (iii) การเกิดคอมมิวเตชันระหว่างเฟส 2 และ 1

จากรูปที่ 3.3 สามารถหาสมการของกระแสในระหว่างการเกิดคอมมิวเตชันได้โดยง่าย ซึ่งสมการของกระแสในกรณีที่เกิดคอมมิวเตชันทั้ง 3 กรณีเป็นดังนี้ คือ

กรณีการเกิดคอมมิวเตชันระหว่างเฟส 1 และเฟส 3

$$I_{\text{commutaion}}^{13} = \frac{\sqrt{2}U_{13}}{2X_c} \left[\cos(\alpha) - \cos\left(\omega t - C_1 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \tag{3.20}$$

กรณีการเกิดคอมมิวเตชันระหว่างเฟส 3 และเฟส 2

$$I_{\text{commutaion}}^{32} = \frac{\sqrt{2}U_{32}}{2X_c} \left[\cos(\alpha) - \cos\left(\omega t - C_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right] \tag{3.21}$$

กรณีการเกิดคอมมิวเตชันระหว่างเฟส 2 และเฟส 1

$$I_{\text{commutaion}}^{21} = \frac{\sqrt{2}U_{21}}{2X_c} \left[\cos(\alpha) - \cos\left(\omega t - C_3 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \tag{3.22}$$

โดยที่

X_{ci} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของการเกิดคอมมิวเตชันของคอนเวอร์เตอร์

(2) มุมคอมมิวเตชัน (Commutaion angle)

จากสมการทั้ง 3 สมการข้างต้น สามารถหาค่ามุมคอมมิวเตชันของทั้ง 3 เฟสได้ดังนี้ คือ

$$u_1 = \cos^{-1} \left[\cos(\alpha) - \frac{2I_d X_c}{\sqrt{2}U_{13}} \right] - (\alpha) \tag{3.23}$$

$$u_2 = \cos^{-1} \left[\cos(\alpha) - \frac{2I_d X_c}{\sqrt{2}U_{32}} \right] - (\alpha) \tag{3.24}$$

$$u_3 = \cos^{-1} \left[\cos(\alpha) - \frac{2I_d X_c}{\sqrt{2}U_{21}} \right] - (\alpha) \tag{3.25}$$

3.3.6 สมการของระบบไฟฟ้ากำลังกระแสตรง (DC power flow)

เนื่องจากในทางปฏิบัติหม้อแปลงที่ใช้ต่อกับคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบ WyeG – Wye หรือ WyeG – Delta อันเนื่องมาจากเหตุผลทางด้านฮาร์มอนิกส์ ซึ่งการต่อหม้อแปลงทั้ง 2 แบบนี้เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางด้านระบบวงจรลำดับพบว่าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไม่มีองค์ประกอบของวงจรลำดับศูนย์คือ

กรณีหม้อแปลงต่อแบบ WyeG – Wye

$$Y^{0+-} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{PP}^{++} & 0 & \vdots & 0 & y_{PS}^{++} & 0 \\ 0 & 0 & y_{PP}^{--} & \vdots & 0 & 0 & y_{PS}^{--} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{SP}^{++} & 0 & \vdots & 0 & y_{SS}^{++} & 0 \\ 0 & 0 & y_{SP}^{--} & \vdots & 0 & 0 & y_{SS}^{--} \end{bmatrix}$$

สังเกตว่าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิทั้ง Self และ Mutual admittance ไม่มีองค์ประกอบของวงจรลำดับศูนย์อยู่เลย

กรณีหม้อแปลงต่อแบบ WyeG – Delta

$$Y^{0+-} = \begin{bmatrix} y_{PP}^{00} & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{PP}^{++} & 0 & \vdots & 0 & y_{PS}^{++} & 0 \\ 0 & 0 & y_{PP}^{--} & \vdots & 0 & 0 & y_{PS}^{--} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{SP}^{++} & 0 & \vdots & 0 & y_{SS}^{++} & 0 \\ 0 & 0 & y_{SP}^{--} & \vdots & 0 & 0 & y_{SS}^{--} \end{bmatrix}$$

สังเกตว่าทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิทั้ง Self และ Mutual admittance ไม่มีองค์ประกอบของวงจรลำดับศูนย์อยู่เลยยกเว้น Self admittance ทางด้านปฐมภูมิมีองค์ประกอบในส่วนวงจรลำดับศูนย์

เนื่องจากสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์โหนดโพลาร์กระแสตรงจะใช้องค์ประกอบ Y_{SP} และ Y_{SS} จึงสามารถตัดในส่วนของวงจรลำดับศูนย์ทิ้งไปได้

โดยชุดสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาผลตอบของระบบคอนเวอร์เตอร์มีดังนี้คือ

(i) สมการความสัมพันธ์ของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

$$\begin{bmatrix} I_S^+ \angle \omega_S^+ \\ I_S^- \angle \omega_S^- \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{SP}^{++} & Y_{SP}^{+-} & : & Y_{SS}^{++} & Y_{SS}^{+-} \\ Y_{SP}^{-+} & Y_{SP}^{--} & : & Y_{SS}^{-+} & Y_{SS}^{--} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\text{term}}^+ \angle \theta_{\text{term}}^+ \\ V_{\text{term}}^- \angle \theta_{\text{term}}^- \\ \dots\dots\dots \\ E^+ \angle \Phi^+ \\ E^- \angle \Phi^- \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

โดยที่

I_S^+ คือ ขนาดขององค์ประกอบกระแสในส่วนวงจรลำดับบวกของ I_S

I_S^- คือ ขนาดขององค์ประกอบกระแสในส่วนวงจรลำดับลบของ I_S

ω_S^+ คือ มุมขององค์ประกอบกระแสในส่วนวงจรลำดับบวกของ I_S

ω_S^- คือ มุมขององค์ประกอบกระแสในส่วนวงจรลำดับลบของ I_S

แบ่งออกเป็นสมการในส่วนจริงและส่วนจินตภาพรวมทั้งสิ้น 4 สมการ

(ii) สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟส-เฟสขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์และแรงดันเฟส-นิวทรอล ในรูปของระบบวงจรอันดับ

$$U_{13} \angle C_1 = (1-a)E^+ \angle \Phi^+ + (1-a^2)E^- \angle \Phi^- \quad (3.27)$$

$$U_{23} \angle C_2 = (a^2 - a)E^+ \angle \Phi^+ + (a - a^2)E^- \angle \Phi^- \quad (3.28)$$

$$U_{21} \angle C_3 = (a^2 - 1)E^+ \angle \Phi^+ + (a - 1)E^- \angle \Phi^- \quad (3.29)$$

โดยที่ $a = 1 \angle 120^\circ$

แบ่งออกเป็นสมการในส่วนจริงและส่วนจินตภาพรวมทั้งสิ้น 6 สมการ

(iii) สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟส-เฟสขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์และแรงดันกระแสตรงขาออกของคอนเวอร์เตอร์

$$\begin{aligned} V_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \{ & U_{21} [\cos(-C_1 + \alpha_1 + C_3 + \pi) - \cos(-C_2 + \alpha_2 + C_3 + \pi)] \\ & + U_{13} [\cos(-C_2 + \alpha_2 + C_1) - \cos(-C_3 + \alpha_3 + C_1)] \\ & + U_{23} [\cos(-C_3 + \alpha_3 + C_2) - \cos(-C_1 + \alpha_1 + \pi + C_2)] - I_d (X_{c1} + X_{c2} + X_{c3}) \} \end{aligned} \quad (3.30)$$

ซึ่งเทอม $I_d (X_{c1} + X_{c2} + X_{c3})$ คือ แรงดันส่วนที่หายไปเนื่องจากผลของ Commutation reactances

3.3.7 สมการผลต่าง (Mismatch equation)

$$R(1) = I_S^+ \cos \omega_S^+ + \sum_k [Y_{SS}^{+k} E^+ \cos(\Psi^{+k} + \Phi^+) + Y_{SP}^{+k} V_{\text{term}}^+ \cos(\Psi^{+k} + \theta_{\text{term}}^+)] \quad (3.31)$$

$$R(2) = I_S^+ \sin \omega_S^+ + \sum_k \left[Y_{SS}^{+k} E^+ \sin(\Psi^{+k} + \Phi^+) + Y_{SP}^{+k} V_{\text{term}}^+ \sin(\Psi^{+k} + \theta_{\text{term}}^+) \right] \quad (3.32)$$

$$R(3) = I_S^- \cos \omega_S^- + \sum_k \left[Y_{SS}^{-k} E^- \cos(\Psi^{-k} + \Phi^-) + Y_{SP}^{-k} V_{\text{term}}^- \cos(\Psi^{-k} + \theta_{\text{term}}^-) \right] \quad (3.33)$$

$$R(4) = I_S^- \sin \omega_S^- + \sum_k \left[Y_{SS}^{-k} E^- \sin(\Psi^{-k} + \Phi^-) + Y_{SP}^{-k} V_{\text{term}}^- \sin(\Psi^{-k} + \theta_{\text{term}}^-) \right] \quad (3.34)$$

$$R(5) = U_{13} \cos C_1 - E^+ \cos \Phi^+ + E^+ \cos\left(\Phi^+ + \frac{2\pi}{3}\right) - E^- \cos \Phi^- + E^- \cos\left(\Phi^- + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.35)$$

$$R(6) = U_{23} \cos C_2 - E^+ \cos\left(\Phi^+ + \frac{4\pi}{3}\right) + E^+ \cos\left(\Phi^+ + \frac{2\pi}{3}\right) - E^- \cos\left(\Phi^- + \frac{2\pi}{3}\right) + E^- \cos\left(\Phi^- + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.36)$$

$$R(7) = U_{21} \cos C_3 - E^+ \cos\left(\Phi^+ + \frac{4\pi}{3}\right) + E^+ \cos \Phi^+ - E^- \cos\left(\Phi^- + \frac{2\pi}{3}\right) + E^- \cos \Phi^- \quad (3.37)$$

$$R(8) = U_{13} \sin C_1 - E^+ \sin \Phi^+ + E^+ \sin\left(\Phi^+ + \frac{2\pi}{3}\right) - E^- \sin \Phi^- + E^- \sin\left(\Phi^- + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.38)$$

$$R(9) = U_{23} \sin C_2 - E^+ \sin\left(\Phi^+ + \frac{4\pi}{3}\right) + E^+ \sin\left(\Phi^+ + \frac{2\pi}{3}\right) - E^- \sin\left(\Phi^- + \frac{2\pi}{3}\right) + E^- \sin\left(\Phi^- + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.39)$$

$$R(10) = U_{21} \sin C_3 - E^+ \sin\left(\Phi^+ + \frac{4\pi}{3}\right) + E^+ \sin \Phi^+ - E^- \sin\left(\Phi^- + \frac{2\pi}{3}\right) + E^- \sin \Phi^- \quad (3.40)$$

$$R(11) = V_d - \frac{\sqrt{2}}{\pi} \{ U_{21} [\cos(-C_1 + \alpha_1 + C_3 + \pi) - \cos(-C_2 + \alpha_2 + C_3 + \pi)] - U_{13} [\cos(-C_2 + \alpha_2 + C_1) - \cos(-C_3 + \alpha_3 + C_1)] - U_{23} [\cos(-C_3 + \alpha_3 + C_2) - \cos(-C_1 + \alpha_1 + \pi + C_2)] \} + I_d (X_{c1} + X_{c2} + X_{c3}) \quad (3.41)$$

ตัวแปร 11 ตัวคือ

$$x = [E^+, E^-, \Phi^+, \Phi^-, U_{13}, U_{23}, U_{21}, C_1, C_2, C_3, \text{at}]$$

3.3.8 สมการปรับปรุงค่า (Updating equations)

นิยามของจาโคเบียนกระแสตรง (DC Jacobian) คือ

$$J_{DC} = \frac{\partial R}{\partial x} \quad (3.42)$$

สามารถหาค่าปรับปรุงได้จากสมการ

$$[R(x)] = [J_{DC}] [\Delta x] \quad (3.43)$$

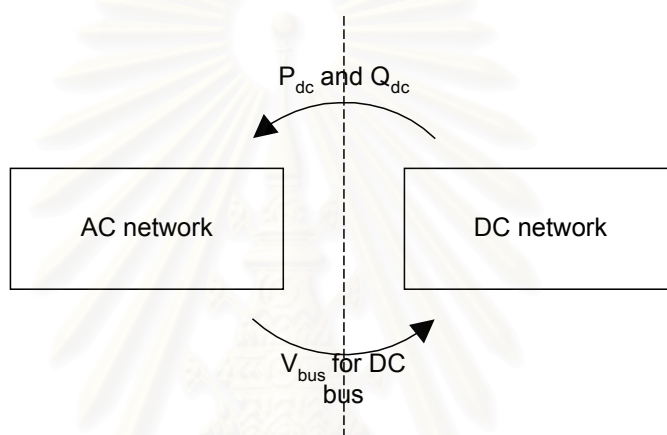
$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} - \Delta x \quad (3.44)$$

3.4 การแก้ปัญหาไหลดโพล์กระแสสลับ-กระแสตรง (AC-DC power flow)

3.4.1 หลักการของไหลดโพล์กระแสสลับ-กระแสตรง (AC-DC power flow algorithm)

การแก้ปัญหาไหลดโพล์กระแสสลับ-กระแสตรงในบทความนี้คือ การแก้ปัญหาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีคอนเวอร์เตอร์ โดยระบบของคอนเวอร์เตอร์จะใช้หลักการการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3 ข้างต้น

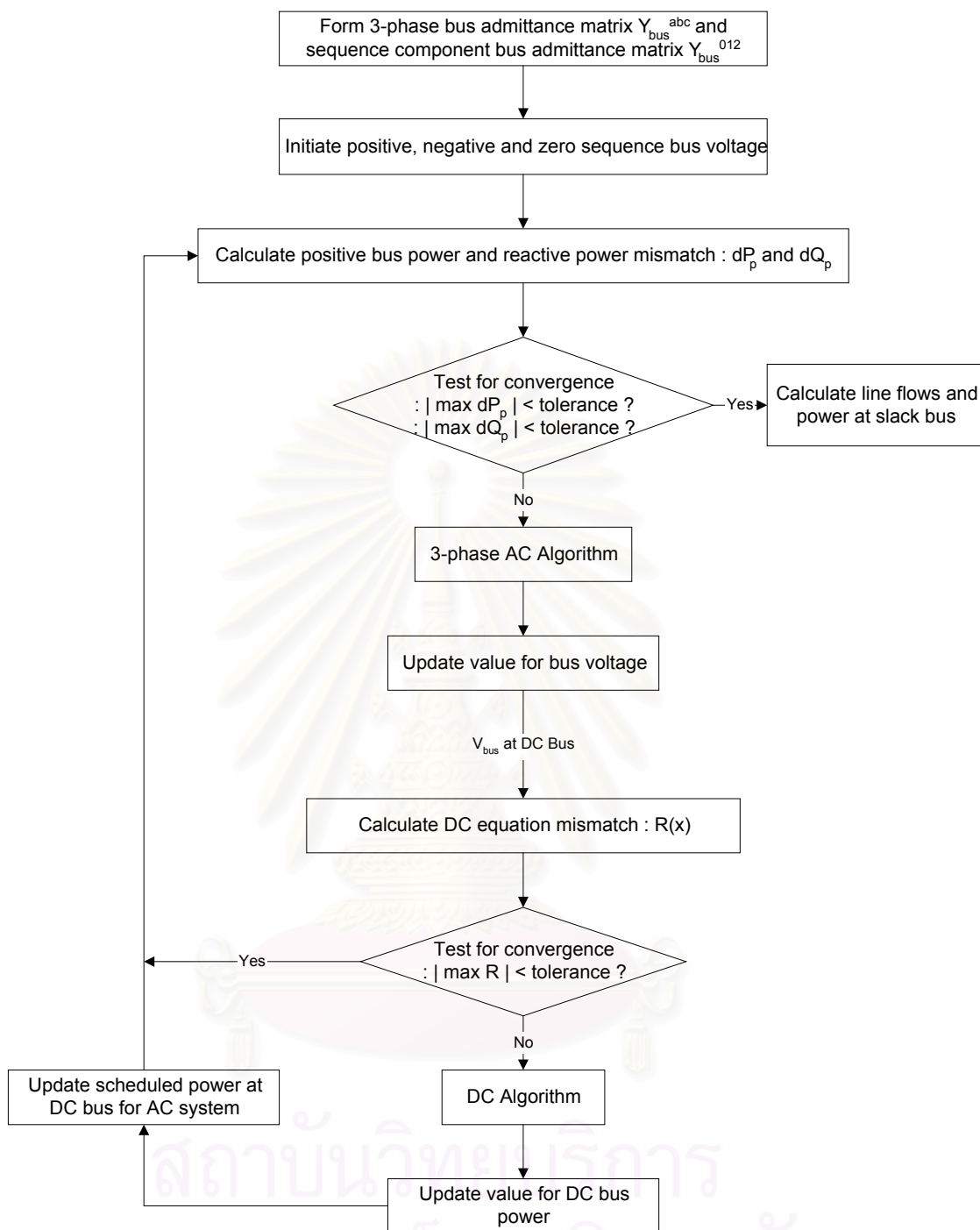
ข้อสมมติในการคำนวณ คือ ระบบไฟฟ้ากำลังกระแสสลับและระบบไฟฟ้ากำลังกระแสตรง ไม่มีการเหนี่ยวนำระหว่างกัน ทำให้ในการคำนวณสามารถแยกคิดที่ละระบบได้



รูปที่ 3.4 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง

โดยในการแก้ปัญหาไหลดโพล์กระแสสลับ-กระแสตรง จะทำการแยกวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของระบบกระแสสลับและส่วนของระบบกระแสตรงโดยที่

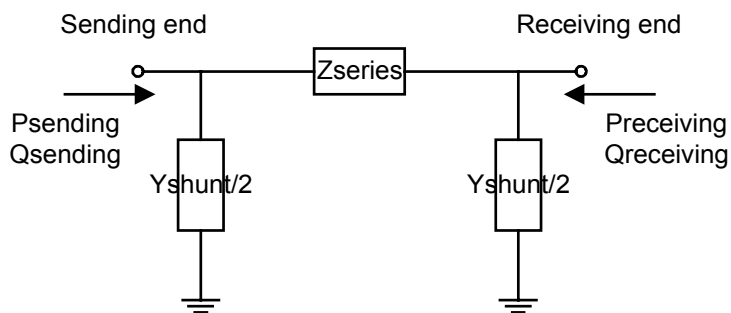
- (i) ในการวิเคราะห์ส่วนระบบกระแสสลับจะมองส่วนของระบบกระแสตรงเป็นโหลดบัส (PQ bus)
- (ii) ในการวิเคราะห์ส่วนของระบบกระแสตรงจะมองส่วนระบบกระแสสลับเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage source)



รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงหลักการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์อยู่ในระบบ

3.4.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

- (1) การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกำลัง (Line power flow)



รูปที่ 3.6 แบบจำลองแบบ PI ของสายส่งแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้า

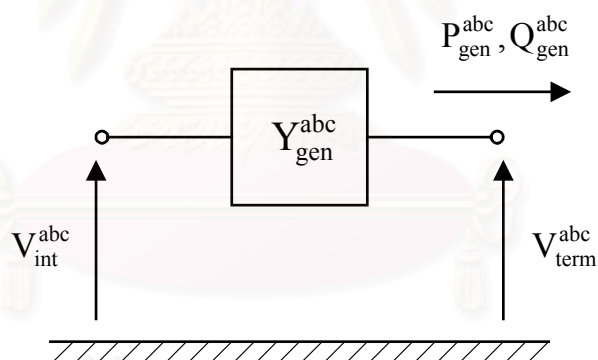
สมการของกำลังไฟฟ้าของสายส่งกำลังที่ปลายส่ง (Sending end)

$$P_{\text{sending}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{sending}}^{\text{abc}} = V_{\text{sending}}^{\text{abc}} \left[\frac{Y_{\text{shunt}}^{\text{abc}}}{2} V_{\text{sending}}^{\text{abc}} + (Z_{\text{series}}^{\text{abc}})^{-1} (V_{\text{sending}}^{\text{abc}} - V_{\text{receiving}}^{\text{abc}}) \right]^* \quad (3.45)$$

สมการของกำลังไฟฟ้าของสายส่งกำลังที่ปลายรับ (Receiving end)

$$P_{\text{receiving}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{receiving}}^{\text{abc}} = V_{\text{receiving}}^{\text{abc}} \left[\frac{Y_{\text{shunt}}^{\text{abc}}}{2} V_{\text{receiving}}^{\text{abc}} - (Z_{\text{series}}^{\text{abc}})^{-1} (V_{\text{sending}}^{\text{abc}} - V_{\text{receiving}}^{\text{abc}}) \right]^* \quad (3.46)$$

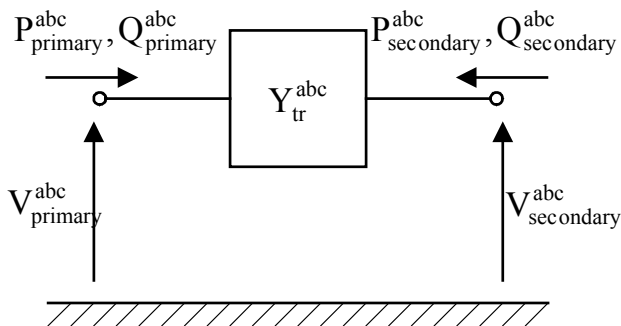
(2) การไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator power)



รูปที่ 3.7 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{\text{gen}}^{\text{abc}} + jQ_{\text{gen}}^{\text{abc}} = V_{\text{term}}^{\text{abc}} \left[Y_{\text{gen}}^{\text{abc}} (V_{\text{int}}^{\text{abc}} - V_{\text{term}}^{\text{abc}}) \right]^* \quad (3.47)$$

(3) การไหลของกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer power)



รูปที่ 3.8 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า

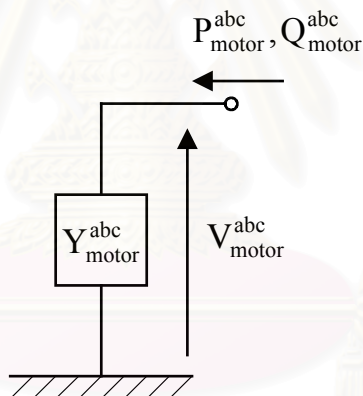
สมการกำลังไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิหม้อแปลง

$$P_{primary}^{abc} + jQ_{primary}^{abc} = V_{primary}^{abc} [Y_{tr,pp}^{abc} V_{primary}^{abc} + Y_{tr,ps}^{abc} V_{secondary}^{abc}]^* \quad (3.48)$$

สมการกำลังไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิหม้อแปลง

$$P_{secondary}^{abc} + jQ_{secondary}^{abc} = V_{secondary}^{abc} [Y_{tr,sp}^{abc} V_{primary}^{abc} + Y_{tr,ss}^{abc} V_{secondary}^{abc}]^* \quad (3.49)$$

(4) การไหลของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (Motor power)

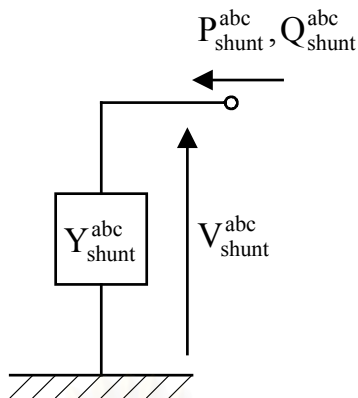


รูปที่ 3.9 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า

$$P_{motor}^{abc} + jQ_{motor}^{abc} = V_{motor}^{abc} [Y_{motor}^{abc} V_{motor}^{abc}]^* \quad (3.50)$$

(5) การไหลของกำลังไฟฟ้าขององค์ประกอบขนาน (Shunt element power)

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



รูปที่ 3.10 แบบจำลองแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าขององค์ประกอบขนาน

$$P_{shunt}^{abc} + jQ_{shunt}^{abc} = V_{shunt}^{abc} [Y_{shunt}^{abc} V_{shunt}^{abc}]^* \quad (3.51)$$

3.5 การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส

ในที่นี้เน้นการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ภายใต้สภาวะไม่สมดุล ซึ่งในสภาวะนี้ลักษณะสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์, แรงดันฮาร์โมนิก หรือผลจากฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจะแตกต่างไปจากกรณีในระบบสมดุล

3.5.1 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก

ในที่นี้พิจารณาว่ากระแสฮาร์โมนิกเกิดจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง คือ

- (1) คอนเวอร์เตอร์ หากกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆจากการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) หาสเปกตรัมของรูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์
- (2) ฮาร์โมนิกไหลอื่น ๆ เป็นไหลที่เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกโดยทราบค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆเป็นเปอร์เซ็นต์ของขนาดกระแสที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถหาค่าได้จากอาร์วัดฮาร์โมนิกสเปกตรัมที่บัสนั้นๆ

3.5.2 การแก้ปัญหาฮาร์โมนิกโฟลว์ (Harmonic flow)

การแก้ปัญหาใช้หลักการของวิธีกระแสอัดฉีด (Current injection) คือ พิจารณาว่าแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกเป็นแหล่งกระแสอุดมคติ ซึ่งในสภาวะไม่สมดุลการแก้ปัญหาต้องแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- (1) กรณีทั้ง 3 วงจรลำดับมีจำนวนบัสเท่ากัน

สามารถหาแรงดันฮาร์มอนิกส์ได้โดยตรงจากสมการ คือ

$$V_h^{abc} = [Y_h^{abc}]^{-1} I_h^{abc} \quad (3.52)$$

โดยที่

V_h^{abc} คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัสดั้ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h ในระบบพิกัดเฟส

I_h^{abc} คือ เวกเตอร์ของกระแสขั้ดัดที่บั้ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h ในระบบพิกัดเฟส

Y_h^{abc} คือ บั้สแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่บั้ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h ในระบบพิกัดเฟส

(2) กรณีทั้ง 3 วงจรลำดับมีจำนวนบั้ไม่เท่ากัน

กรณีนี้ไม่สามารถหาแรงดันฮาร์มอนิกส์ได้โดยตรง แต่สามารถหาแรงดันฮาร์มอนิกส์ได้จากสมการความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} Y_h^{00} & Y_h^{0+} & Y_h^{0-} \\ Y_h^{+0} & Y_h^{++} & Y_h^{+-} \\ Y_h^{-0} & Y_h^{-+} & Y_h^{--} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h^0 \\ V_h^+ \\ V_h^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_h^0 \\ I_h^+ \\ I_h^- \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

โดยแยกพิจารณาออกเป็น 3 ชุดสมการตามวงจรลำดับเช่นเดียวกันกับหลักการวิเคราะห์โหลดโพลาร์กระแสลับข้างต้น โดยอาศัยหลักการของการทำ Iteration เพื่อหาคำตอบ

$$Y_h^{00} V_h^0 = I_h^0 - (Y_h^{0+} V_h^+ + Y_h^{0-} V_h^-) \quad (3.54)$$

$$Y_h^{++} V_h^+ = I_h^+ - (Y_h^{+0} V_h^0 + Y_h^{+-} V_h^-) \quad (3.55)$$

$$Y_h^{--} V_h^- = I_h^- - (Y_h^{-0} V_h^0 + Y_h^{-+} V_h^+) \quad (3.56)$$

โดยที่

V_h^k คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัสดั้ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h ในระบบวงจรลำดับ ซึ่ง $k = 0, +, -$

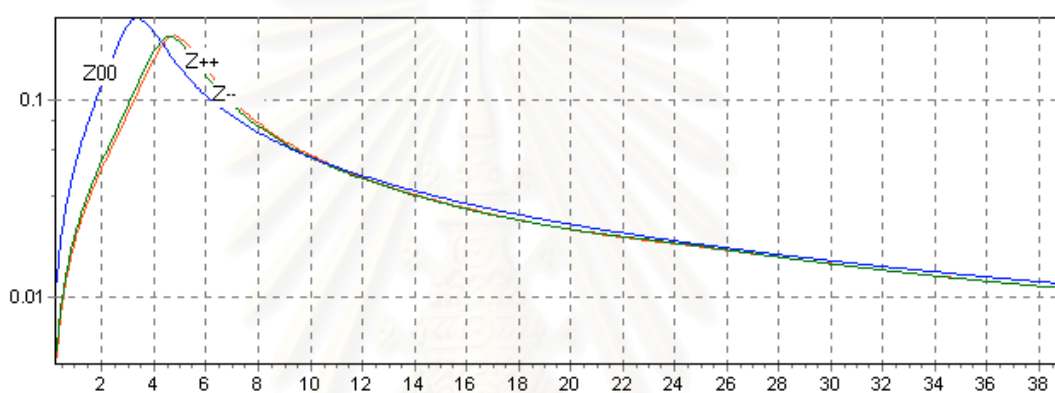
I_h^k คือ เวกเตอร์ของกระแสขั้ดัดที่บั้ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h ในระบบวงจรลำดับ ซึ่ง $k = 0, +, -$

Y_h^{kk} คือ เมตริกซ์ความนำตัวเองของวงจรลำดับ k ที่บั้ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ h ของระบบซึ่ง $k = 0, +, -$

Y_h^{km} คือ เมตริกซ์ความนำเหนี่ยวนำระบบระหว่างวงจรลำดับ k และวงจรลำดับ m ของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ซึ่ง $k, m = 0, +, -$ แต่ $k \neq m$ เมื่อระบบสมดุล Y^{km} จะเป็นเมตริกซ์ศูนย์

3.5.3 อิมพีแดนซ์สแกน (Impedance scan)

อิมพีแดนซ์สแกนมีความสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิก โดยเฉพาะปัญหาการเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า เนื่องจากสะท้อนให้เห็นถึงผลตอบของระบบที่ความถี่ต่างๆ ดังนั้นจึงต้องรู้ถึงการพิจารณาอย่างถูกต้องสำหรับฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับศูนย์, วงจรลำดับบวก และวงจรลำดับลบ ของระบบกับจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (Impedance scan)

ในการใช้อิมพีแดนซ์สแกนพิจารณากระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆนั้นจะต้องแยกพิจารณาเป็น 3 แบบ คือ

(1) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับศูนย์ ใช้พิจารณากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นจำนวนเท่าของ 3 หรือ Triplen harmonic คือ 3, 6, 9, 12, ... เป็นต้น เนื่องจากว่ากระแสฮาร์มอนิกในชุดของวงจรลำดับศูนย์ กระแสที่ไหลในวงจรส่วนใหญ่จะไหลในวงจรลำดับศูนย์ ซึ่งในกรณีที่ระบบไม่สมดุลอาจจะมีองค์ประกอบของกระแสในส่วนของวงจรลำดับบวกและลำดับลบอยู่บ้าง หรือไม่มีเลยในกรณีที่ระบบสมดุล

(2) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับบวก ใช้พิจารณากระแสฮาร์มอนิกในกลุ่มที่เป็นลำดับบวก คือ 4, 7, 10, 13, ... เป็นต้น เนื่องจากว่ากระแสฮาร์มอนิกในชุดของวงจรลำดับบวก กระแสที่ไหลในวงจรส่วนใหญ่จะไหลในวงจรลำดับบวก ซึ่งในกรณีที่ระบบไม่สมดุลอาจจะมีองค์ประกอบของกระแสในส่วนของวงจรลำดับลบและลำดับศูนย์อยู่บ้าง หรือไม่มีเลยในกรณีที่ระบบสมดุล

(3) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับลบ ใช้พิจารณากระแสฮาร์มอนิกสีกในกลุ่มที่เป็นลำดับลบ คือ 2, 5, 8, 11, ... เป็นต้น เนื่องจากว่ากระแสฮาร์มอนิกสีกในชุดของวงจรลำดับลบ กระแสที่ไหลในวงจรส่วนใหญ่จะไหลในวงจรลำดับลบ ซึ่งในกรณีที่ระบบไม่สมดุลอาจจะมีองค์ประกอบของกระแสในส่วนของวงจรลำดับบวกและลำดับศูนย์อยู่บ้าง หรือไม่มีเลยในกรณีที่ระบบสมดุล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์โหลดโพล์และฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากหลักการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งใช้วิธีการขององค์ประกอบสมมาตร(Symmetrical component) วิธีนิวตัน-ราฟสัน(Newton-Raphson method) และหลักการวิเคราะห์ระบบคอนเวอร์เตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการแก้ปัญหาโหลดโพล์ที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบที่อยู่ทั้งภายใต้สภาวะสมดุลและสภาวะไม่สมดุล โดยโปรแกรมจะมีอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้ากำลังไว้เพื่อให้ผู้ใช้เลือกสร้างไดอะแกรมตามต้องการ โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมบอร์แลนดเดลไฟล์ เวอร์ชันที่ 5 ซึ่งในเวอร์ชันนี้ได้มีการปรับปรุงความสามารถเพิ่มขึ้นจากเวอร์ชันเก่ามากขึ้น ทำให้ง่ายและสะดวกในการใช้งาน ทั้งยังมีความรวดเร็วในการคำนวณ และการใช้เนกไลบรารี(Nag library) ซึ่งเป็นไฟล์ DLL ที่รวบรวมฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์ไว้ ทำให้การคำนวณรวดเร็วและสะดวกยิ่งขึ้น

โครงสร้างของโปรแกรมแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ

- ส่วนป้อนข้อมูล เป็นส่วนที่ผู้ใช้สร้างระบบและป้อนข้อมูลที่ต้องการ
- ส่วนแสดงผล เป็นส่วนแสดงผลการคำนวณ ในรูปของรูปภาพ ตาราง และกราฟ

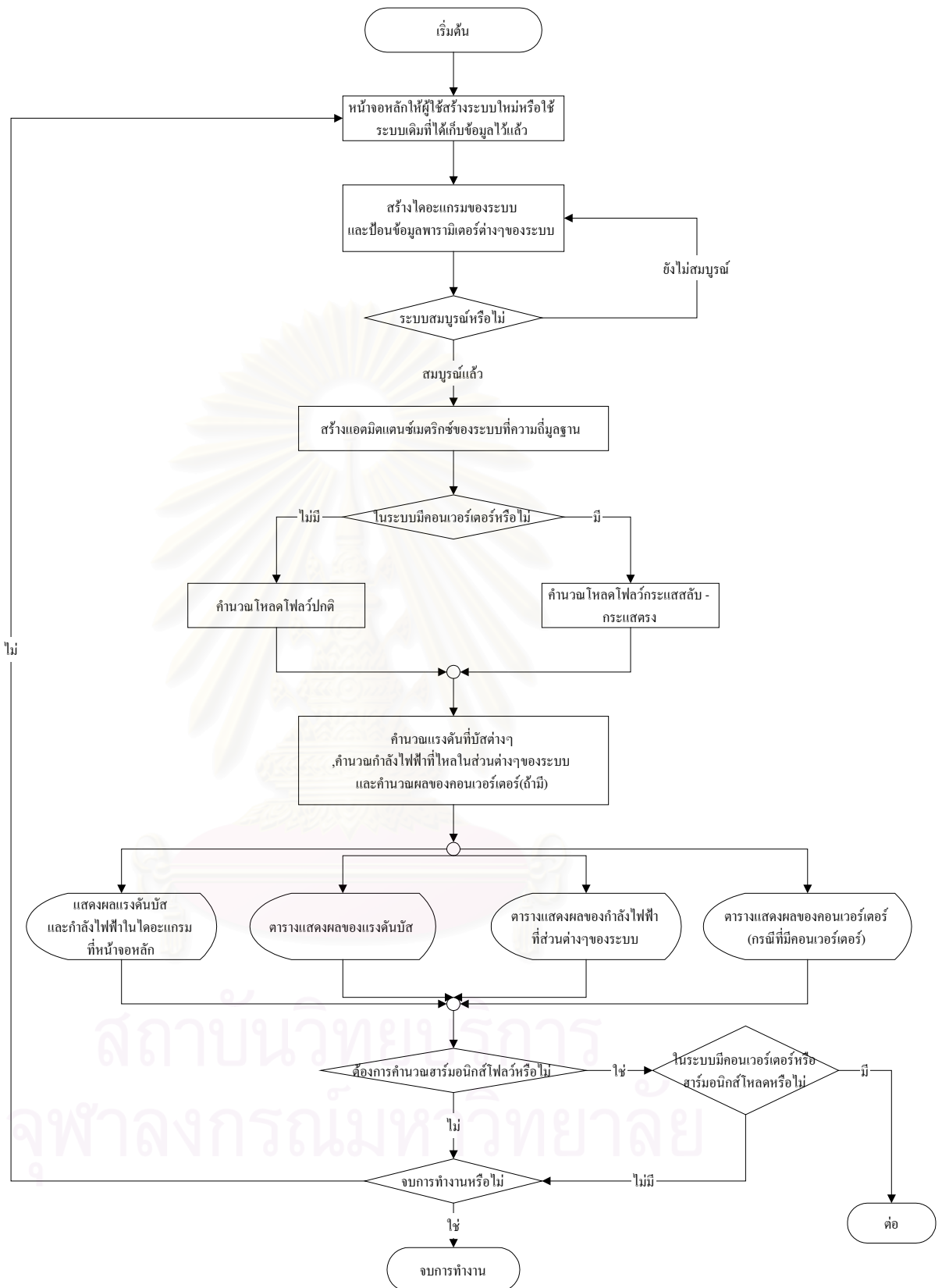
4.1 โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สำหรับการคำนวณโหลดโพล์และฮาร์มอนิกส์โพล์ การคำนวณโดยตรงอาจจะไม่สะดวก ดังนั้นจึงมีการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อความสะดวกและความถูกต้องในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

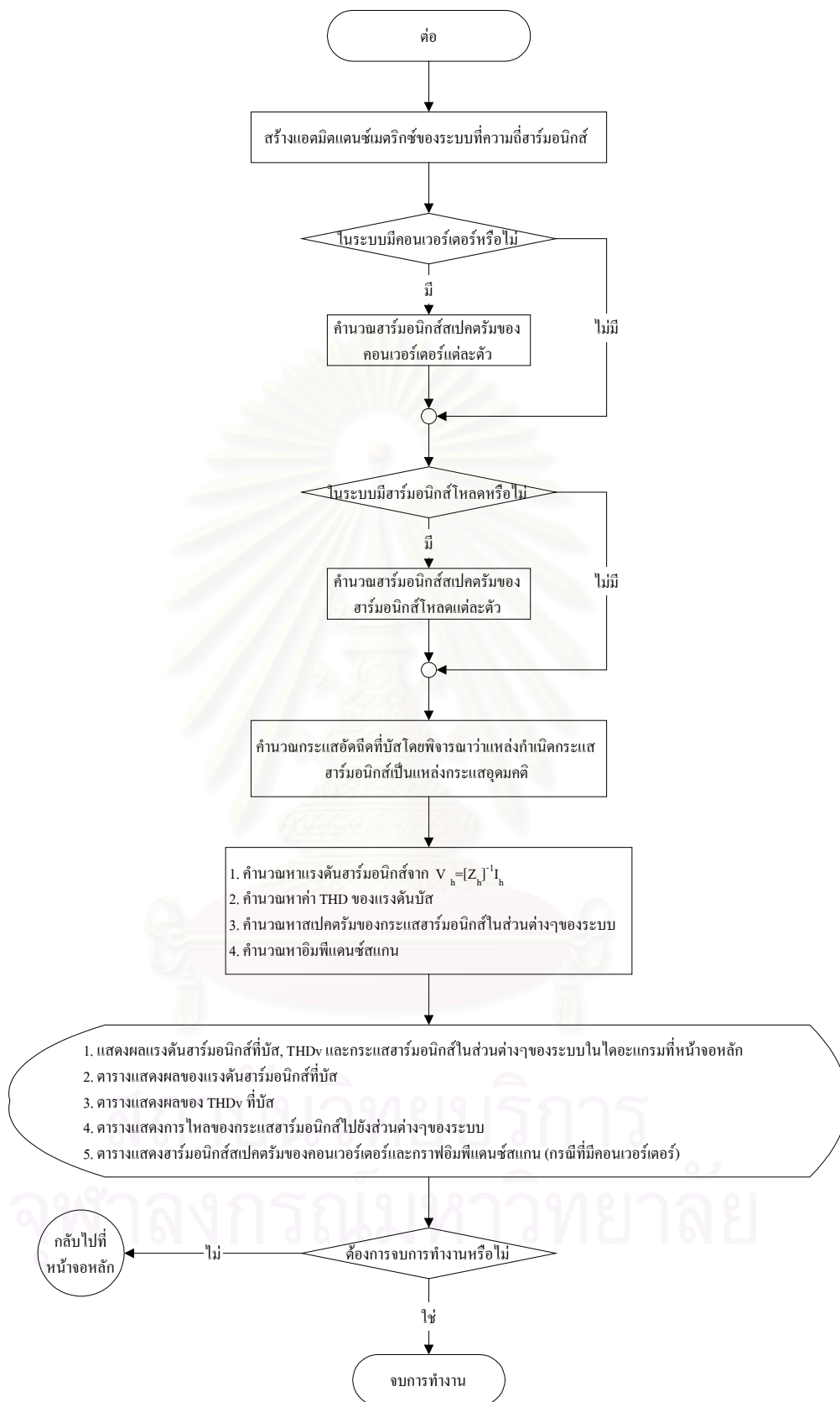
โครงสร้างของการคำนวณแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- การคำนวณโหลดโพล์ ซึ่งก็จะแบ่งออกไปอีกว่าเป็นการคำนวณโหลดโพล์ปกติ หรือการคำนวณโหลดโพล์แบบที่มีคอนเวอร์เตอร์
- การคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์ ต้องมีการคำนวณหาผลตอบของโหลดโพล์ของระบบมาก่อน จากนั้นจึงทำการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์โดยวิธีกระแสฉีด(Current injection method)

โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยสรุปสามารถแสดงเป็นแผนผังการทำงานได้ตามรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 4.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม (ส่วนวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์)

4.2 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม

โปรแกรมได้จัดเตรียมอุปกรณ์พื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลังไว้ รวมทั้งอุปกรณ์ในส่วนที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ และอุปกรณ์ในการจัดการกับปัญหาฮาร์มอนิกส์ สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรมแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1

อุปกรณ์ที่เตรียมไว้ในโปรแกรม คือ

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator)
- หม้อแปลงไฟฟ้า(Transformer)
- สายส่งกำลังไฟฟ้า(Transmission line)
- คาปาซิเตอร์แบงก์(Capacitor bank)
- มอเตอร์เหนี่ยวนำ(Induction motor)
- โหลดบัส(Load bus)
- ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบความถี่เดียว(Single-tuned filter)
- ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบผ่านสูง(High pass filter)
- คอนเวอร์เตอร์(Converter)
- ฮาร์มอนิกส์โหลด(Harmonic load)

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบไฟฟ้า

สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ในระบบ	ความหมายของสัญลักษณ์
	บัสบาร์
	สายส่งกำลังไฟฟ้า
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	หม้อแปลงไฟฟ้า
	มอเตอร์เหนี่ยวนำ
	โหลดบัส
	คาปาซิเตอร์แบงก์

	ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบความถี่เดียว
	ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบผ่านสูง
	คอนเวอร์เตอร์
	ฮาร์มอนิกส์โหด

ข้อสังเกตเพิ่มเติม คือ ในกรณีทีวางอุปกรณ์ในแผนภาพแล้วสามารถที่จะเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ได้ โดยจะให้ป็นสถานะต่อ(Online)ซึ่งอุปกรณ์จะเป็นสีดำ หรือสถานะไม่ต่อ(Offline)ซึ่งอุปกรณ์จะเป็นสีเขียวน

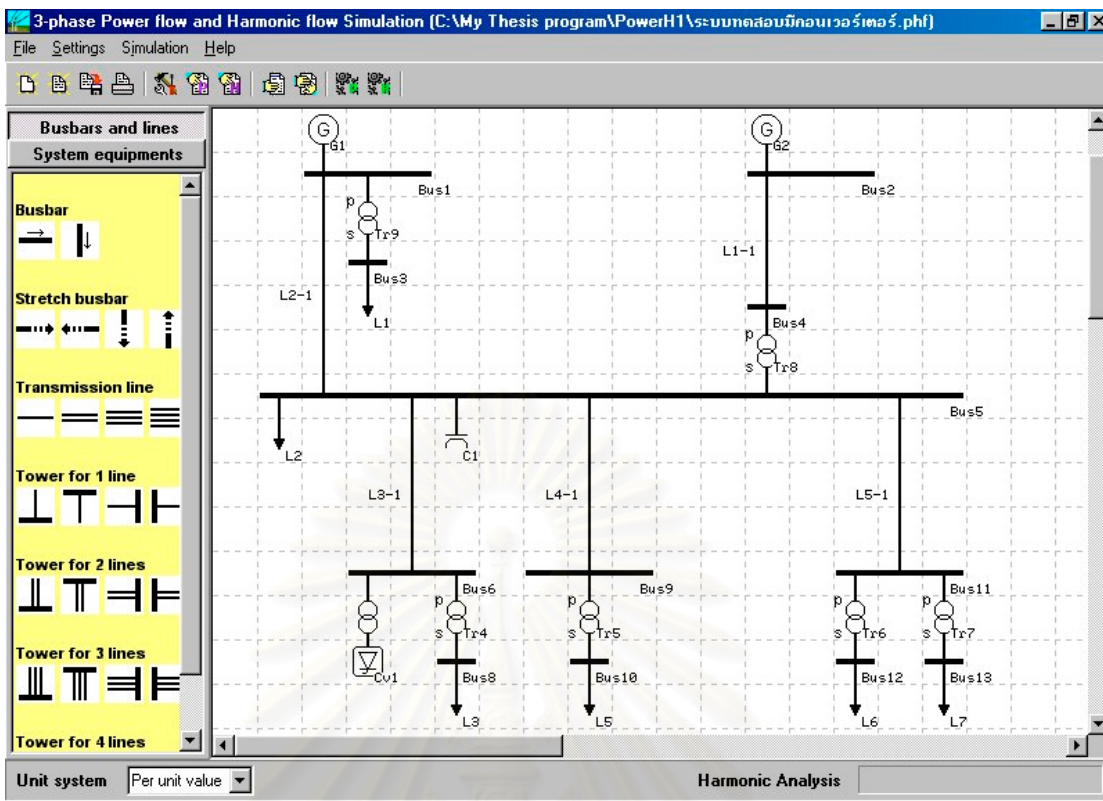
4.3 การป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม

วิธีการป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมเริ่มจากการสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยว(Single line diagram)ก่อน จากนั้นจึงป้อนข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัว

4.3.1 การสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยว

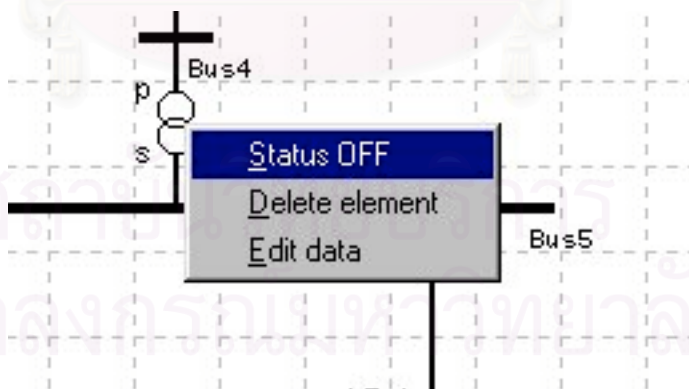
การสร้างแผนภาพเส้นเดี่ยวขั้นตอนแรก คือ การสร้างหรือวางบัส ซึ่งเลือกเอาจากทูลบาร์ทางซ้ายมือดังในรูปที่ 4.3 จากนั้นจึงทำการเลือกอุปกรณ์ต่อเข้ากับบัสที่ได้สร้างไว้ และทำการป้อนข้อมูลที่จำเป็นในแต่ละอุปกรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

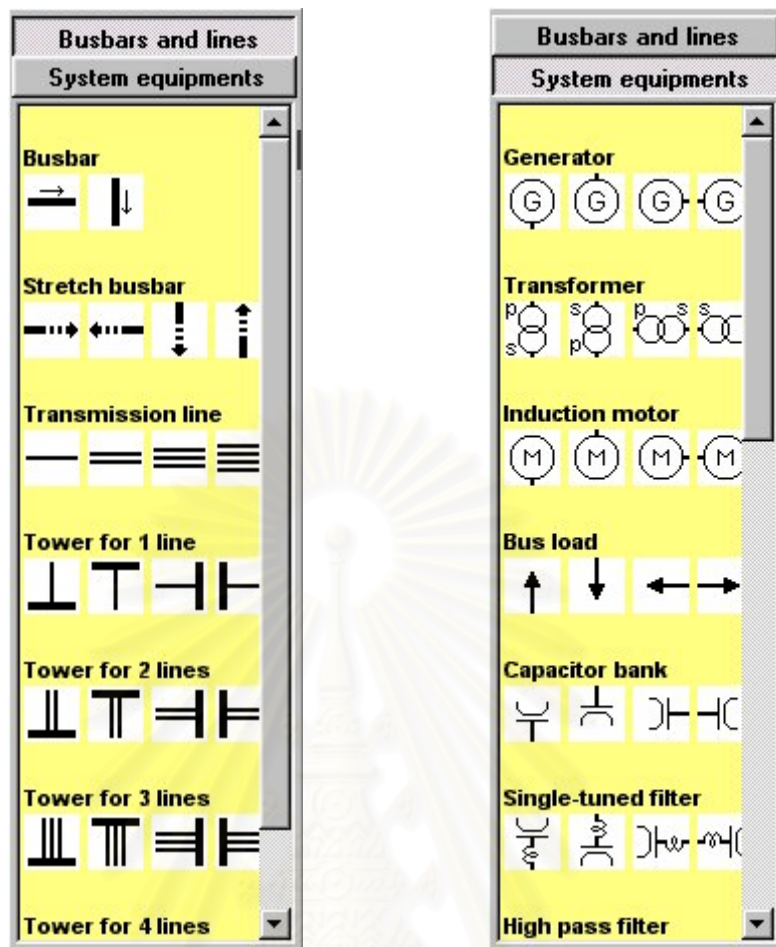


รูปที่ 4.3 หน้าจอหลัก(Main program) ให้ผู้ใช้เลือกสร้างไดอะแกรมของระบบที่ต้องการ

อุปกรณ์ที่ได้สร้างไว้แล้วในแผนภาพเส้นเดี่ยวสามารถจะจัดการได้โดยมีเมนูตัวเลือก 3 ตัว เลือกดังแสดงในรูปที่ 4.4 คือ การเปลี่ยนสถานะ Online หรือ Offline การลบอุปกรณ์ออกจากระบบ และการป้อนข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 เมนูจัดการกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในแผนภาพเส้นเดี่ยว



รูปที่ 4.5 ทูลบาร์การสร้างบัสและสายส่ง(รูปซ้าย) และทูลบาร์การสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้า(รูปขวา)

การป้อนข้อมูลสำหรับแต่ละอุปกรณ์จำเป็นต้องทราบข้อมูลที่ต้องการก่อน ซึ่งข้อมูลที่ต้องการจะสอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณโดยได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 สิ่งสำคัญที่ต้องทราบก่อนการป้อนข้อมูลคือ ข้อมูลที่เป็นค่าอิมพีแดนซ์ , แอตมิติแดนซ์ รีแอกแตนซ์ หรือซัสเซปแตนซ์ซึ่งในโปรแกรมโดยส่วนใหญ่จะระบุไว้ให้ป้อนค่าที่เป็นเปอร์ยูนิต โดยค่าเปอร์ยูนิตนี้จะอ้างอิงกับค่ากำลังไฟฟ้าเบสที่เลือกไว้ ตัวอย่างข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆในบทนี้อ้างอิงไว้ที่ 33.33 MVA สำหรับอุปกรณ์แต่ละชนิดมีข้อมูลที่ต้องการดังนี้คือ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 2) แรงดันเบส
- 3) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับบวก
- 4) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับลบ
- 5) อิมพีแดนซ์ของวงจรลำดับศูนย์

- 6) แรงดันควบคุมที่บัส
- 7) กำลังการผลิตที่จ่าย (กรณีที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PV)

Generator Number 2

General data

Name:

Base kV:

Type

Slack generator

PV generator

Sequence impedances

Positive: + i pu

Negative: + i pu

Zero: + i pu

Voltage and Power

Controlled voltage: pu

Power output: MW

OK Cancel

รูปที่ 4.6 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สายส่งกำลังไฟฟ้า ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงดันเบส
- 2) แบบจำลองที่จะใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์
- 3) เมตริกซ์อิมพีแดนซ์อนุกรมในแบบจำลอง PI
- 4) เมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ขนานในแบบจำลอง PI

Transmission Line(1 line) Number 2

General data

Name Base kV

Line model and line configuration

Model

Phase

Series impedance matrix

	Phase A		Phase B		Phase C	
Phase A	<input type="text" value="0.004"/>	<input type="text" value="0.008"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Phase B			<input type="text" value="0.004"/>	<input type="text" value="0.008"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Phase C					<input type="text" value="0.004"/>	<input type="text" value="0.008"/>

Shunt admittance matrix

	Phase A		Phase B		Phase C	
Phase A	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Phase B			<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Phase C					<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>

รูปที่ 4.7 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงดันเบสทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ
- 2) ชนิดของการต่อหม้อแปลง
- 3) เทปของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ
- 4) ลีคเกจิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

รูปที่ 4.8 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

คาปาซิเตอร์แบงค์ ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงดันเบส
- 2) ค่าซัสเซพแตนซ์ของคาปาซิเตอร์

รูปที่ 4.9 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของคาปาซิเตอร์แบงค์

โหลดบัส ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงดันเบส
- 2) แบบจำลองที่จะใช้ในกรณีของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์

3) ค่ากำลังจริงและกำลังจินตภาพ

The screenshot shows a dialog box titled "Load Bus Number 2". It is divided into several sections:

- General data:** Name is "L2", Base kV is "13.8000".
- Load model:** Model is "Model 2".
- Phase A:** Real power is "2.2400 MW", Reactive power is "2.0000 MVA".
- Phase B:** Real power is "2.2400 MW", Reactive power is "2.0000 MVA".
- Phase C:** Real power is "2.2400 MW", Reactive power is "2.0000 MVA".

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Cancel" buttons.

รูปที่ 4.10 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของโหลดบัส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงดันเบส
- 2) ความต้านทานของวงจรเตเตอร์ของวงจรลำดับบวกและลำดับลบ
- 3) ค่าลี้คเกจรีแอคแตนซ์ของวงจรเตเตอร์ของวงจรลำดับบวกและลำดับลบ
- 4) ความต้านทานของวงจรโรเตอร์ของวงจรลำดับบวกและลำดับลบ
- 5) ค่าลี้คเกจรีแอคแตนซ์ของวงจรโรเตอร์ของวงจรลำดับบวกและลำดับลบ
- 6) ค่าแมคนีไตซิงรีแอคแตนซ์ของวงจรลำดับบวกและลำดับลบ
- 7) ค่าสลิปของมอเตอร์

Induction Motor Number 1

General data

Name Base kV

Positive sequence circuit

Stator resistance	<input type="text" value="0.0154"/>	pu
Stator leakage reactance	<input type="text" value="0.0507"/>	pu
Rotor resistance	<input type="text" value="0.0210"/>	pu
Rotor leakage reactance	<input type="text" value="0.0421"/>	pu
Magnetizing reactance	<input type="text" value="1.4489"/>	pu

Negative sequence circuit

Stator resistance	<input type="text" value="0.0154"/>	pu
Stator leakage reactance	<input type="text" value="0.0507"/>	pu
Rotor resistance	<input type="text" value="0.0210"/>	pu
Rotor leakage reactance	<input type="text" value="0.0421"/>	pu
Magnetizing reactance	<input type="text" value="1.4489"/>	pu

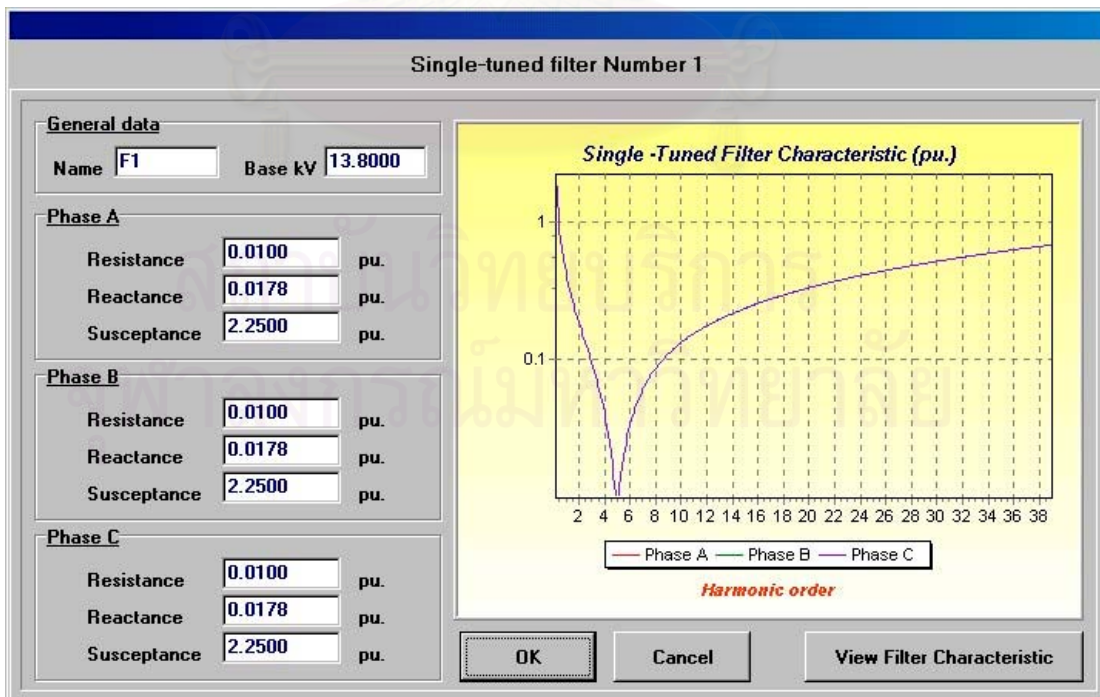
Motor Slip

Slip

รูปที่ 4.11 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบความถี่เดียว ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

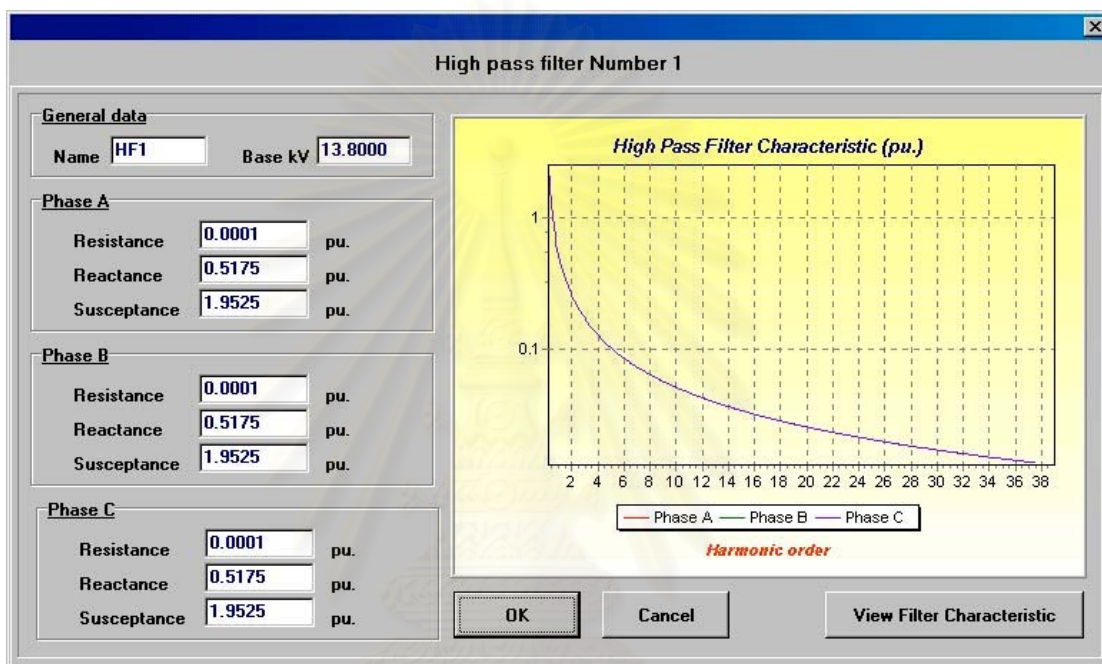
- 1) แรงดันเบส
- 2) ค่าความต้านทานของแต่ละเฟส
- 3) ค่ารีแอคแตนซ์ของแต่ละเฟส
- 4) ค่าซัสเซปแตนซ์ของแต่ละเฟส



รูปที่ 4.12 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ความถี่เดียว

ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบผ่านสูง ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงดันเบส
- 2) ค่าความต้านทานของแต่ละเฟส
- 3) ค่ารีแอกแตนซ์ของแต่ละเฟส
- 4) ค่าซัปเซปแตนซ์ของแต่ละเฟส



รูปที่ 4.13 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบผ่านสูง

คอนเวอร์เตอร์ ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงดันเบส
- 2) กำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์
- 3) แรงดันเบสทางด้านคอนเวอร์เตอร์
- 4) แรงดันขณะทำงานของคอนเวอร์เตอร์
- 5) ค่ามุมจุดชนวน
- 6) ค่าคอมมิวเตชันรีแอกแตนซ์ของแต่ละเฟส
- 7) ชนิดของการต่อหม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์
- 8) ค่าลี้คเกจิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์

Converter Number 1

General data

Name: Cv1 Base kV: 13.8000

Converter rating

DC power: 3.4500 MW
 DC base voltage: 0.4800 kV
 DC operating voltage: 0.9600 kV

Converter parameter

Firing angle: 20.0000 deg
 Commutation reactance phase A: 0.8500 pu
 Commutation reactance phase B: 0.8500 pu
 Commutation reactance phase C: 0.8500 pu

Converter transformer data

Type: WyeG-Wye
 Leakage impedance: 0.1973 + j1.1837 pu

OK Cancel

รูปที่ 4.14 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์

ฮาร์มอนิกส์ไหลด ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- 1) แรงแดันเบส
- 2) กำลังจริงและกำลังจินตภาพของฮาร์มอนิกส์ไหลดของแต่ละเฟส
- 3) ฮาร์มอนิกส์เปคตรีမ်ของฮาร์มอนิกส์ไหลดของแต่ละเฟส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Harmonic Load Number 1

General data

Name Base kV

Data of Phase A | Data of Phase B | Data of Phase C

Power of harmonic load

Real power MW Reactive power MVAr

Harmonic current spectrum

	Mag (%)	Angle (deg)		Mag (%)	Angle (deg)		Mag (%)	Angle (deg)	
			lh 11	5.7300	-143.5		lh 21	0.0000	0.0000
lh 2	0.0000	0.0000	lh 12	0.0000	0.0000		lh 22	0.0000	0.0000
lh 3	0.0000	0.0000	lh 13	4.0100	-175.5		lh 23	0.9400	-24.61
lh 4	0.0000	0.0000	lh 14	0.0000	0.0000		lh 24	0.0000	0.0000
lh 5	18.240	-55.68	lh 15	0.0000	0.0000		lh 25	0.8600	-67.64
lh 6	0.0000	0.0000	lh 16	0.0000	0.0000		lh 26	0.0000	0.0000
lh 7	11.900	-84.11	lh 17	1.9300	111.39		lh 27	0.0000	0.0000
lh 8	0.0000	0.0000	lh 18	0.0000	0.0000		lh 28	0.0000	0.0000
lh 9	0.0000	0.0000	lh 19	1.3900	68.300		lh 29	0.7100	-145.4
lh 10	0.0000	0.0000	lh 20	0.0000	0.0000		lh 30	0.0000	0.0000
							lh 31	0.6200	176.83
							lh 32	0.0000	0.0000
							lh 33	0.0000	0.0000
							lh 34	0.0000	0.0000
							lh 35	0.4400	97.400
							lh 36	0.0000	0.0000
							lh 37	0.3800	54.360
							lh 38	0.0000	0.0000
							lh 39	0.0000	0.0000

OK Cancel

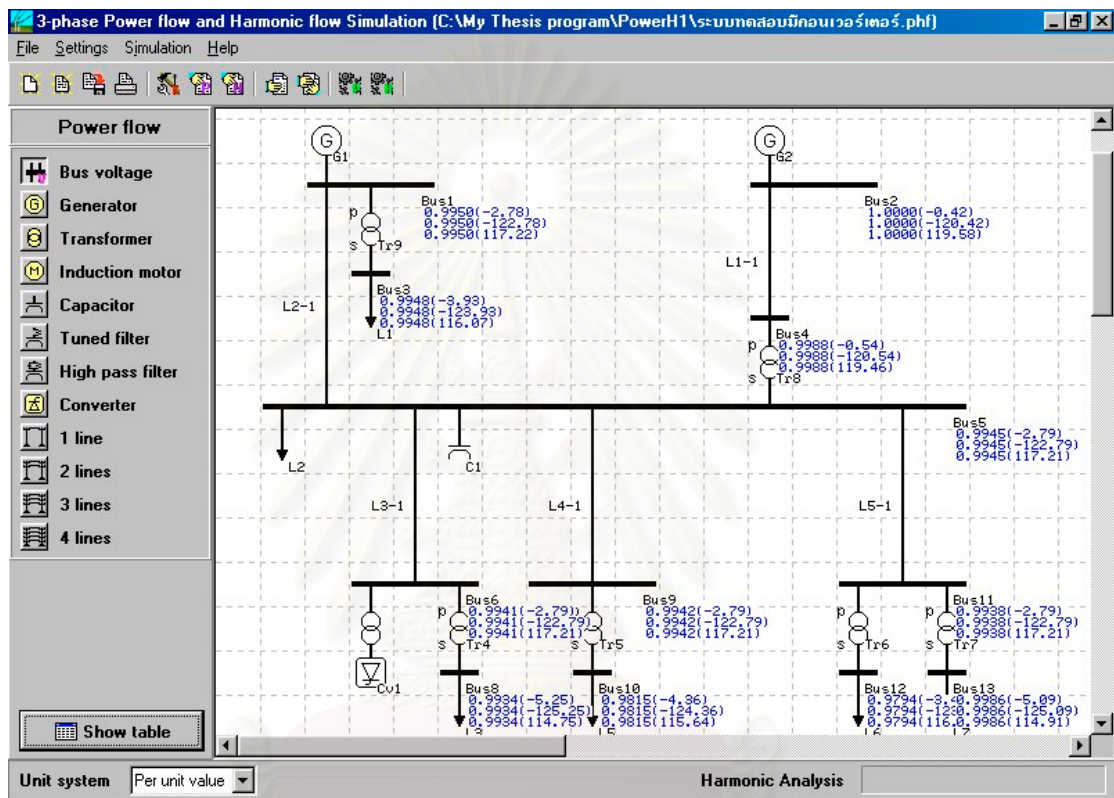
รูปที่ 4.15 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของฮาร์โมนิกส์โหลด

4.3.2 การแสดงผลการวิเคราะห์โหลดโพลว์

การวิเคราะห์โหลดโพลว์ในกรณีที่ไม่ได้ผลตอบไม่ลู่เข้าหรือหาผลตอบไม่ได้ในกรณีนี้คือโปรแกรมได้ตั้งค่าการทำ Iteration มากที่สุดปกติไว้ที่ 1000 รอบ ซึ่งจำนวนครั้งการทำ Iteration ที่มากที่สุดสามารถที่จะกำหนดให้เป็นค่าอื่นนอกจากนี้ได้ หากผลการคำนวณโหลดโพลว์ของระบบนั้นๆทำการ Iteration เกิน 1000 รอบ โปรแกรมจะถือว่าผลตอบไม่ลู่เข้า นั่นก็คือจะไม่มีผลแสดงผลออกมาในกรณีที่ไม่มีผลตอบ นอกจากนี้ถ้าระบบมีการต่อคอนเวอร์เตอร์ด้วย เวลาการคำนวณจะนานขึ้นเนื่องจากในกรณีที่ระบบมีคอนเวอร์เตอร์จะต้องทำการคำนวณโดยใช้วิธีโหลดโพลว์กระแสสลับ-กระแสตรง(AC-DC loadflow) ซึ่งหลักการวิเคราะห์ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 ส่วนในกรณีที่ระบบหาผลตอบได้ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมนี้จะแสดงอยู่ในรูปของรูปภาพแผนภาพเส้นเดี่ยว และตาราง

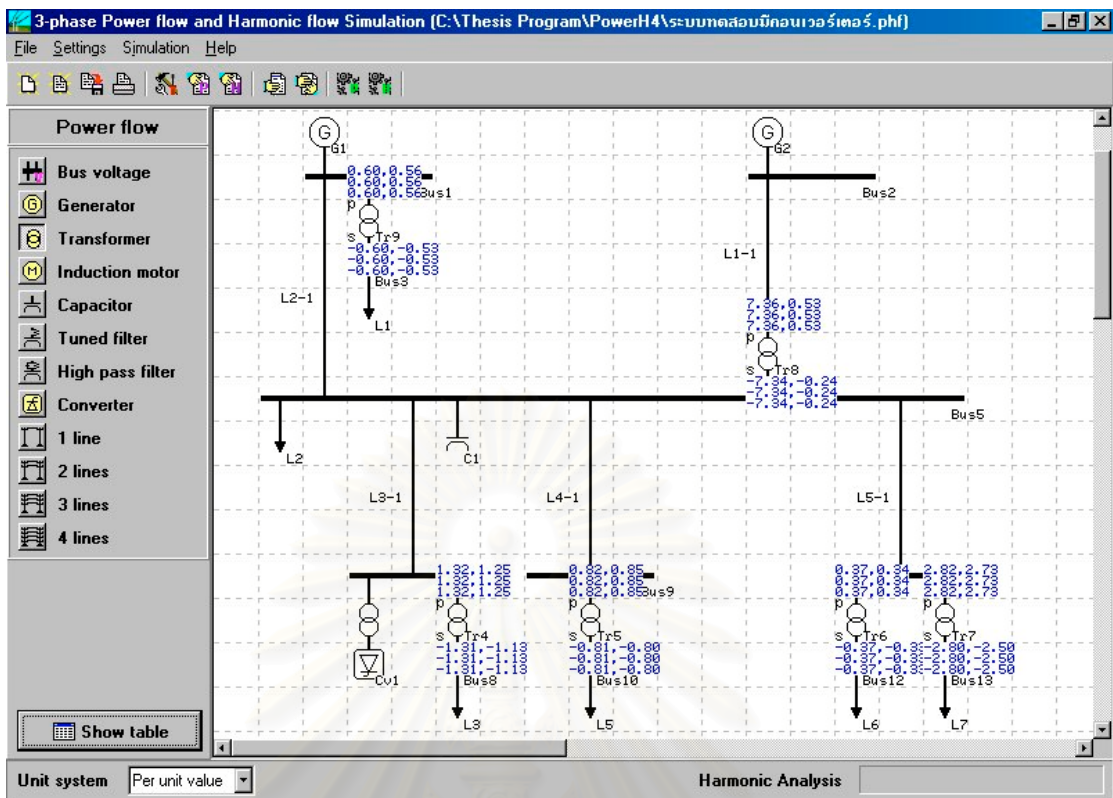
การแสดงผลในแผนภาพเส้นเดี่ยวที่สร้างไว้จะมีความสะดวกในการสังเกต และเข้าใจง่ายกว่าในตาราง ซึ่งจะดีกว่าแบบตารางในกรณีที่ระบบมีจำนวนบัสไม่มากนัก การแสดงผลจะแสดง

ผลของแรงดันที่บัสทุกบัสทั้ง 3 เฟส และแสดงผลการไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละส่วนของระบบ โดยผู้ใช้เลือกที่จะให้แสดงผลการไหลของกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์ที่ต้องการพิจารณาได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18

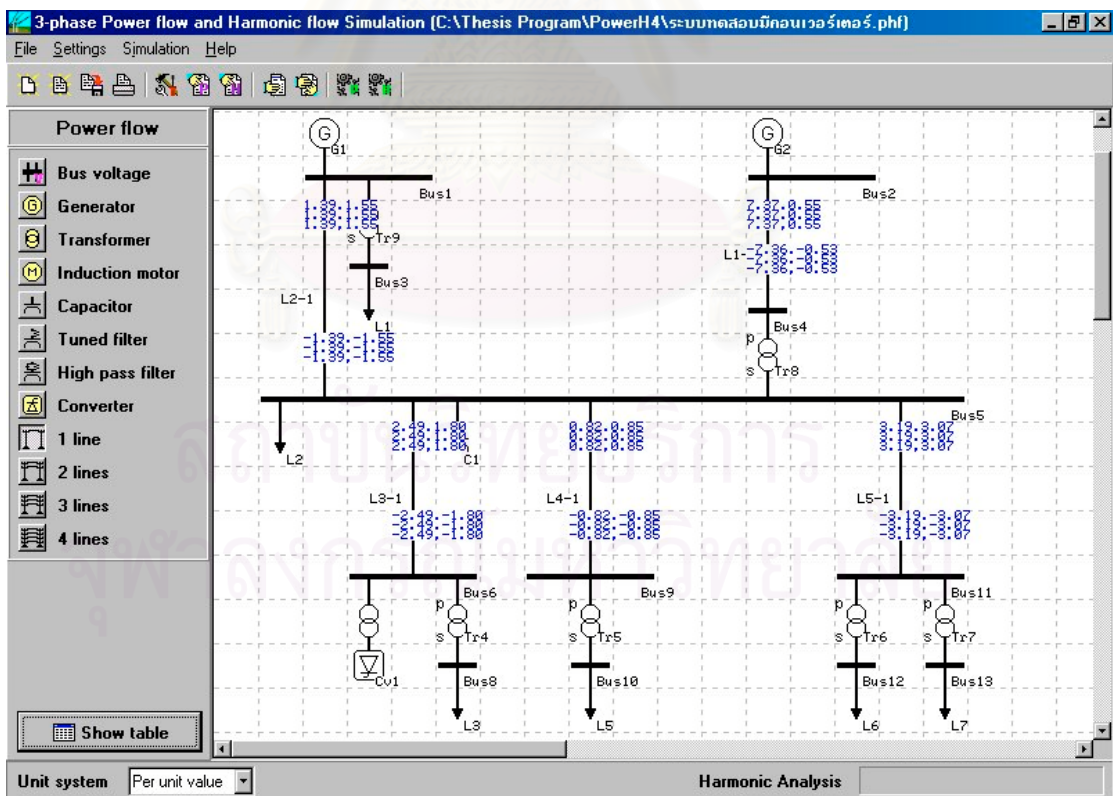


รูปที่ 4.16 ผลการคำนวณโหลดโพลาร์แสดงแรงดันที่บัสต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ผลการคำนวณโหลดโพลีแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลง



รูปที่ 4.18 ผลการคำนวณโหลดโพลีแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

การแสดงผลในรูปแบบตารางจะแสดงผลของแรงดันที่บัสต่างๆทั้ง 3 เฟส ผลการไหลของกำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆของระบบ และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์(ในกรณีที่มีระบบมีการต่อคอนเวอร์เตอร์) โดยตารางทั้ง 3 แบบแสดงไว้ในรูปที่ 4.19 รูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 ตามลำดับ

Bus Voltage and Power Flow Result Table

Three - Phase Power Flow Analysis Results

Base power 3 phase = 100 MVA

Per unit Actual value

Bus	Phase A		Phase B		Phase C		Generation	
	Mag	Ang(deg)	Mag	Ang(deg)	Mag	Ang(deg)	MW	MVAr
1	0.9950	-2.78	0.9950	-122.78	0.9950	117.22	6.00	6.31
2	1.0000	-0.42	1.0000	-120.42	1.0000	119.58	22.10	1.64
3	0.9948	-3.93	0.9948	-123.93	0.9948	116.07		
4	0.9988	-0.54	0.9988	-120.54	0.9988	119.46		
5	0.9945	-2.79	0.9945	-122.79	0.9945	117.21		
6	0.9941	-2.79	0.9941	-122.79	0.9941	117.21		
8	0.9934	-5.25	0.9934	-125.25	0.9934	114.75		
9	0.9942	-2.79	0.9942	-122.79	0.9942	117.21		
10	0.9815	-4.36	0.9815	-124.36	0.9815	115.64		
11	0.9938	-2.79	0.9938	-122.79	0.9938	117.21		
12	0.9794	-3.47	0.9794	-123.47	0.9794	116.53		
13	0.9986	-5.09	0.9986	-125.09	0.9986	114.91		

Bus voltages Power flows Converter results Print Close

รูปที่ 4.19 ตารางแสดงผลของแรงดันบัสทั้ง 3 เฟส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Bus Voltage and Power Flow Result Table

Three - Phase Power Flow Analysis Results

Base power 3 phase = 100 MVA

Per unit Actual value

Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending		Receiving	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
2 1 line	4 L1-1	a	7.368	0.546	-7.360	-0.530
		b	7.368	0.546	-7.360	-0.530
		c	7.368	0.546	-7.360	-0.530
1 1 line	5 L2-1	a	1.394	1.548	-1.393	-1.547
		b	1.394	1.548	-1.393	-1.547
		c	1.394	1.548	-1.393	-1.547
5 1 line	6 L3-1	a	2.486	1.797	-2.485	-1.797
		b	2.486	1.797	-2.485	-1.797
		c	2.486	1.797	-2.485	-1.797
5 1 line	9 L4-1	a	0.818	0.854	-0.818	-0.854
		b	0.818	0.854	-0.818	-0.854
		c	0.818	0.854	-0.818	-0.854
5 1 line	11 L5-1	a	3.193	3.069	-3.190	-3.067
		b	3.193	3.069	-3.190	-3.067
		c	3.193	3.069	-3.190	-3.067

Bus voltages Power flows Converter results Print Close

รูปที่ 4.20 ตารางแสดงผลการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส

Bus Voltage and Power Flow Result Table

Three - Phase Power Flow Analysis Results

Base power 3 phase = 100 MVA

Per unit Actual value

Converter	Phase	Tap ratio	Commutation angle	Terminal powers	
		(%)	(deg.)	(MW)	(MVA _r)
Cv1	a	4.007	5.706	1.161	0.552
	b	4.007	5.706	1.161	0.552
	c	4.007	5.706	1.161	0.552

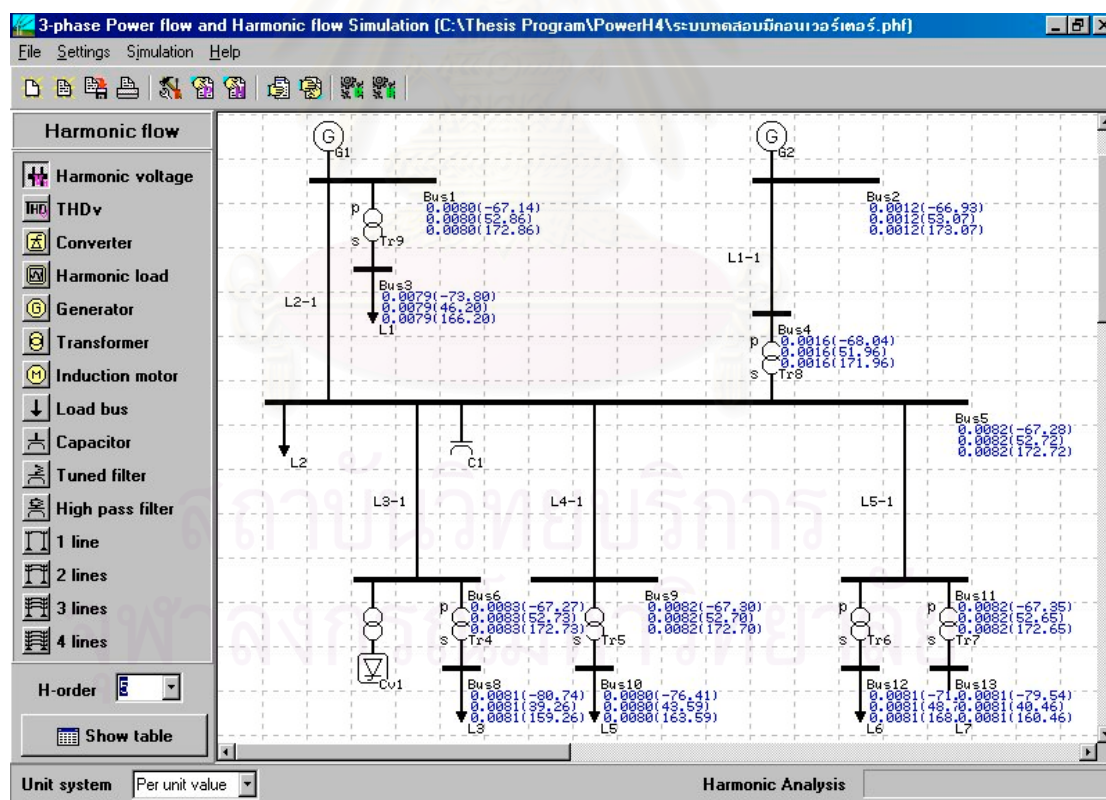
Bus voltages Power flows Converter results Print Close

รูปที่ 4.21 ตารางแสดงผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ กรณีที่ระบบมีการต่อคอนเวอร์เตอร์

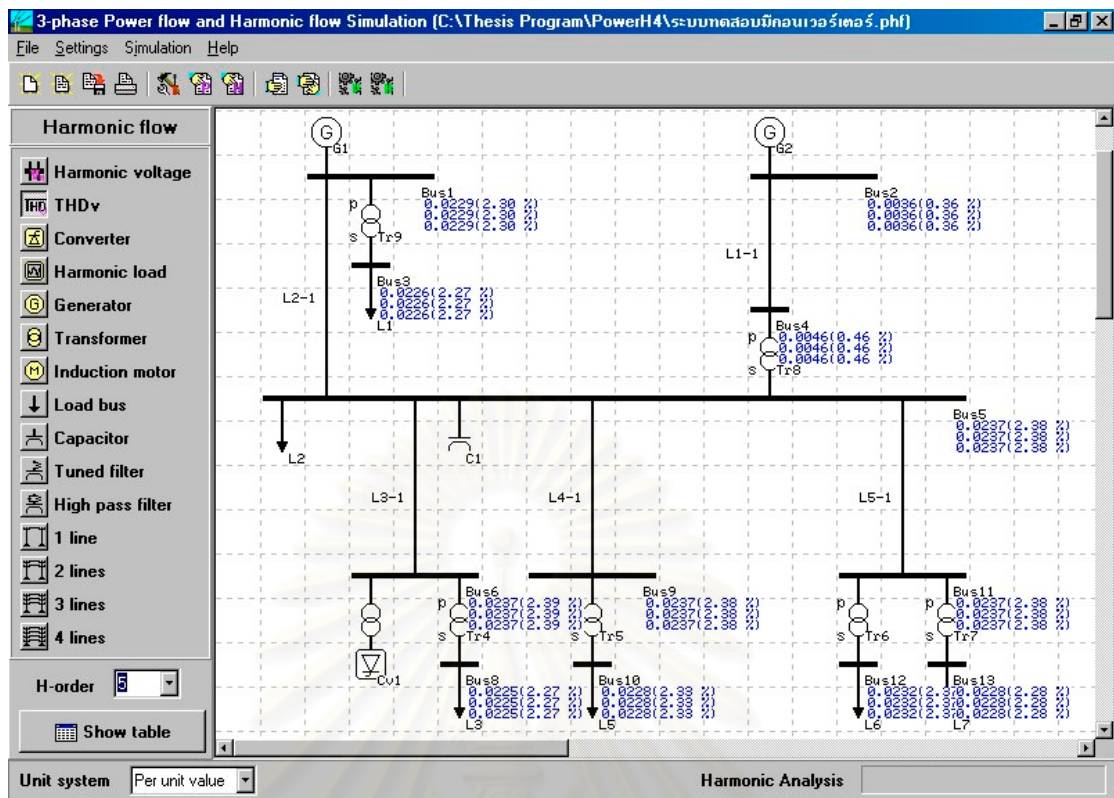
4.3.3 การแสดงผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โวลต์

ในการคำนวณฮาร์มอนิกส์โวลต์จำเป็นต้องทำการคำนวณโหลดโวลต์เพื่อให้ได้ผลตอบของระบบที่ความถี่หลักมูลก่อน เพื่อที่จะนำผลที่ได้ที่ความถี่หลักมูลไปคำนวณหาฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแส และนำไปคำนวณหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อไปด้วยวิธีการในบทที่ 3 ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมนี้จะแสดงอยู่ในรูปของรูปภาพแผนภาพเส้นเดียว ตาราง และกราฟ ในลักษณะเดียวกับการแสดงผลของกรณีโหลดโวลต์

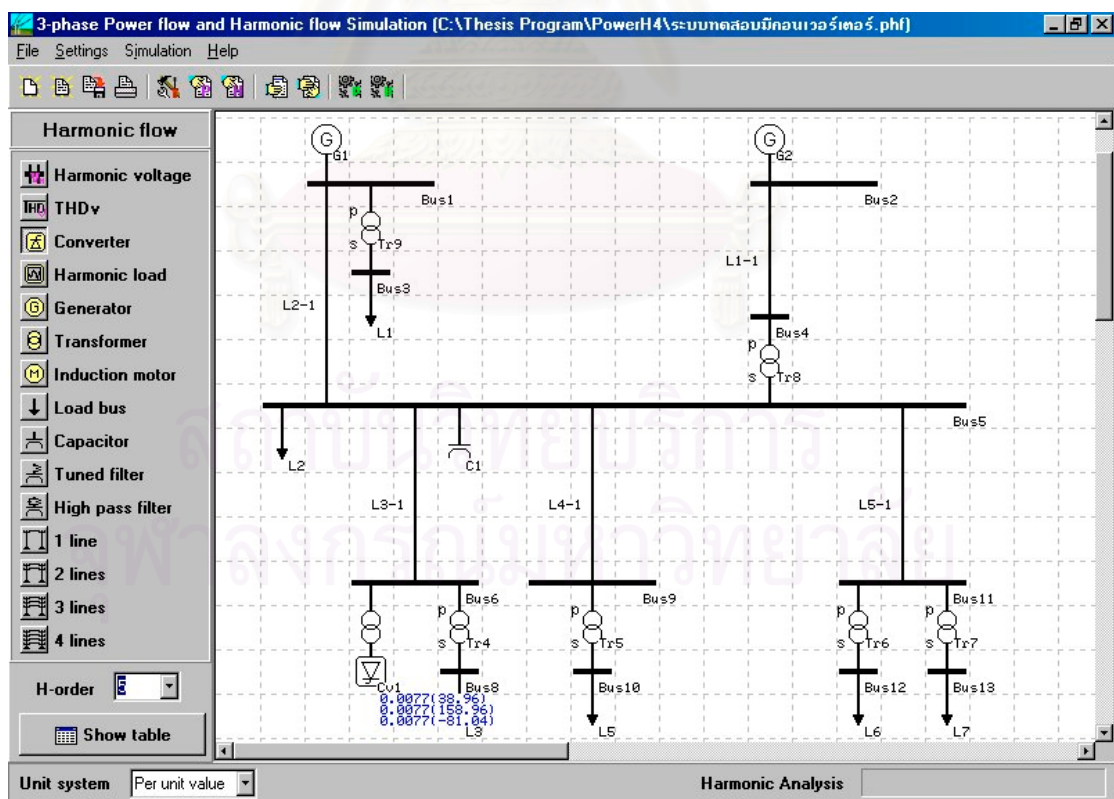
การแสดงผลในแผนภาพเส้นเดียวที่สร้างไว้จะแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่บัสทุกบัสทั้ง 3 เฟสในลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เลือกไว้ แสดงผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน(THDv) และแสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในแต่ละส่วนของระบบทั้ง 3 เฟสในลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เลือกไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.29 โดยผู้ใช้สามารถคลิกเลือกได้จากเมนูของโปรแกรมที่เตรียมไว้



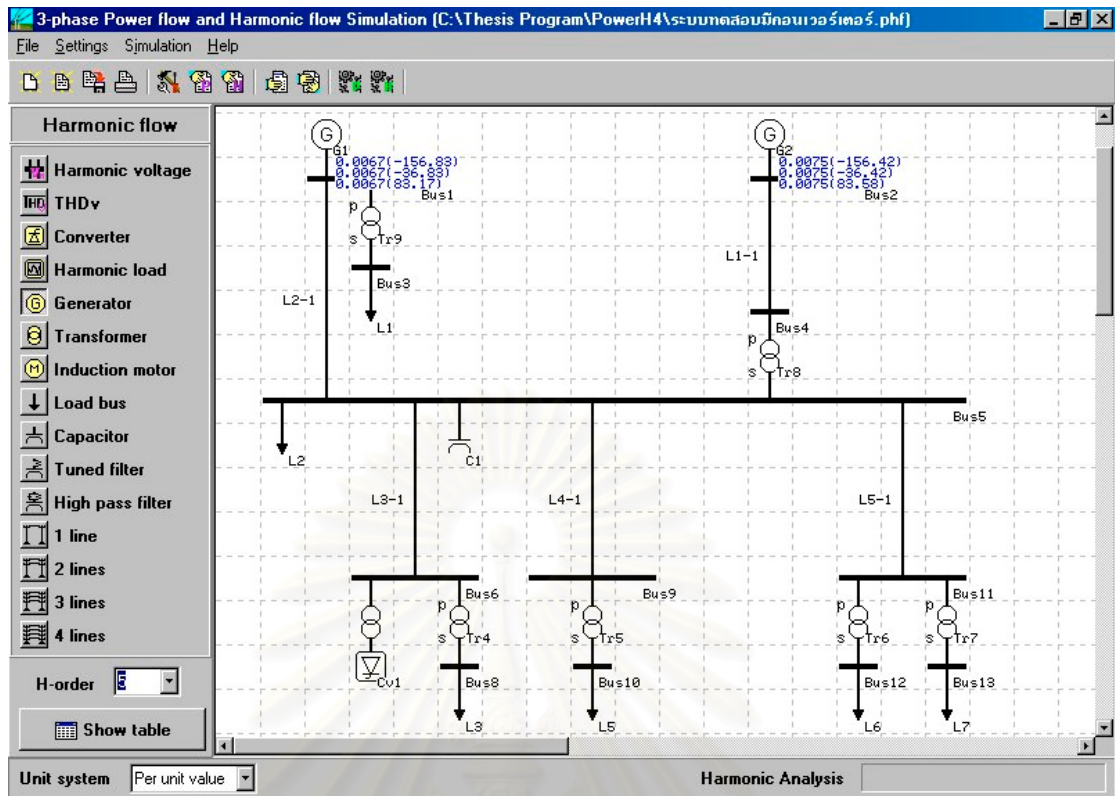
รูปที่ 4.22 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โวลต์แสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 ทั้ง 3 เฟส



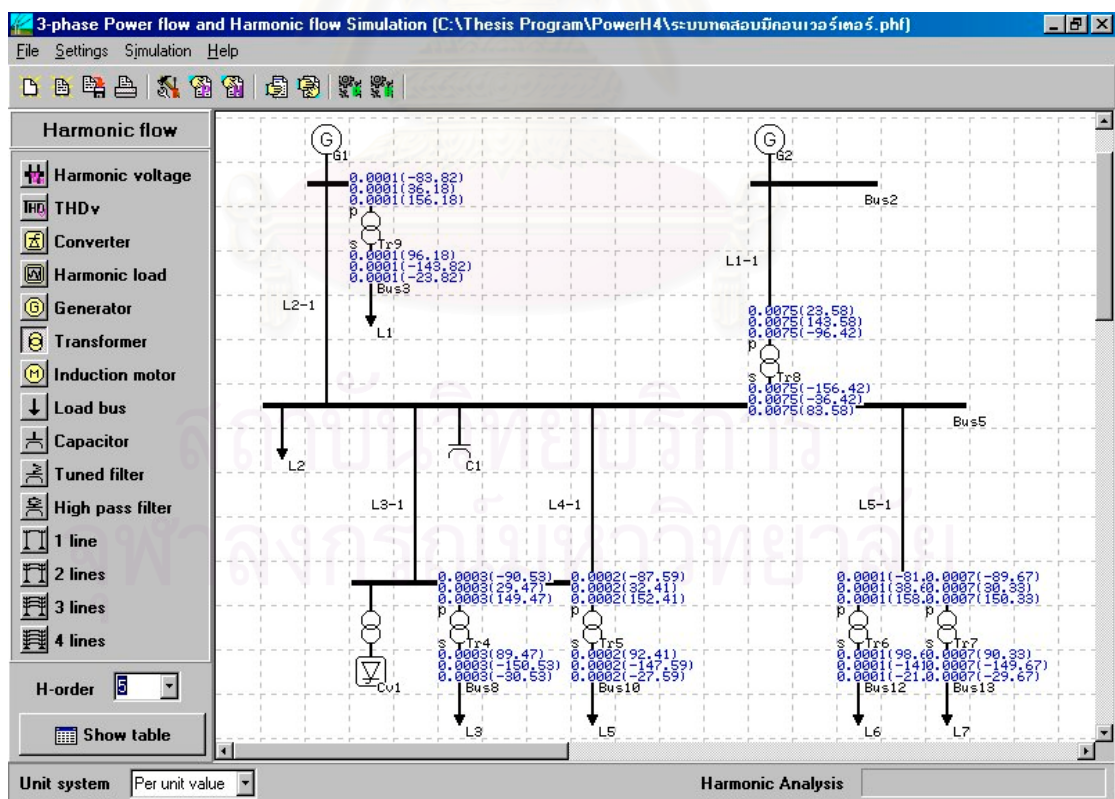
รูปที่ 4.23 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกสโพลว์แสดงผลแรงดันผิดเพี้ยนรวมทั้ง 3 เฟส



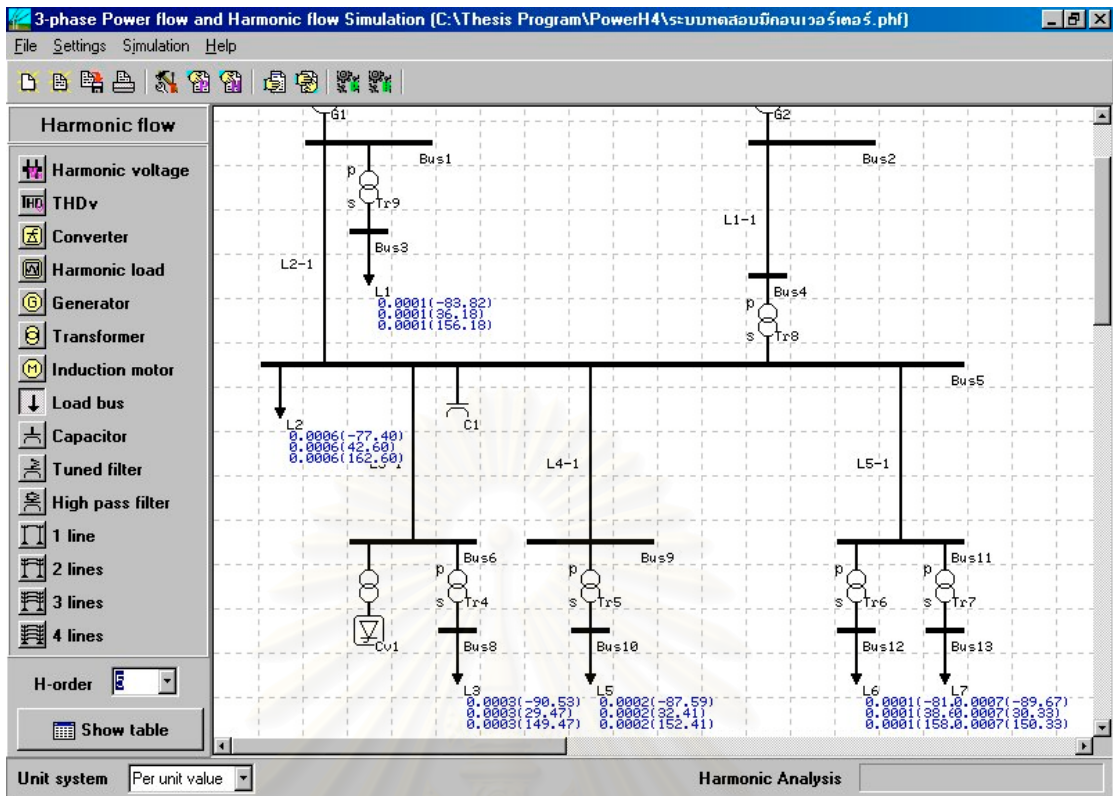
รูปที่ 4.24 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกสโพลว์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 จากคอนเวอร์เตอร์



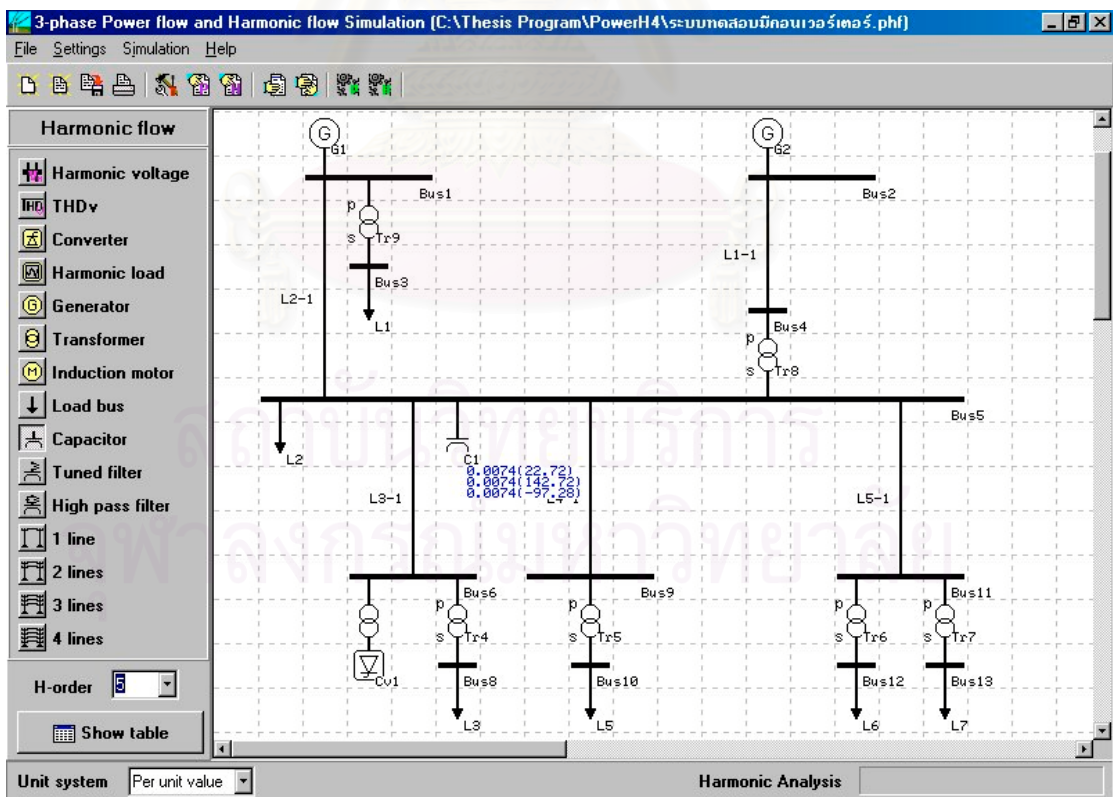
รูปที่ 4.25 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกสโรว์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



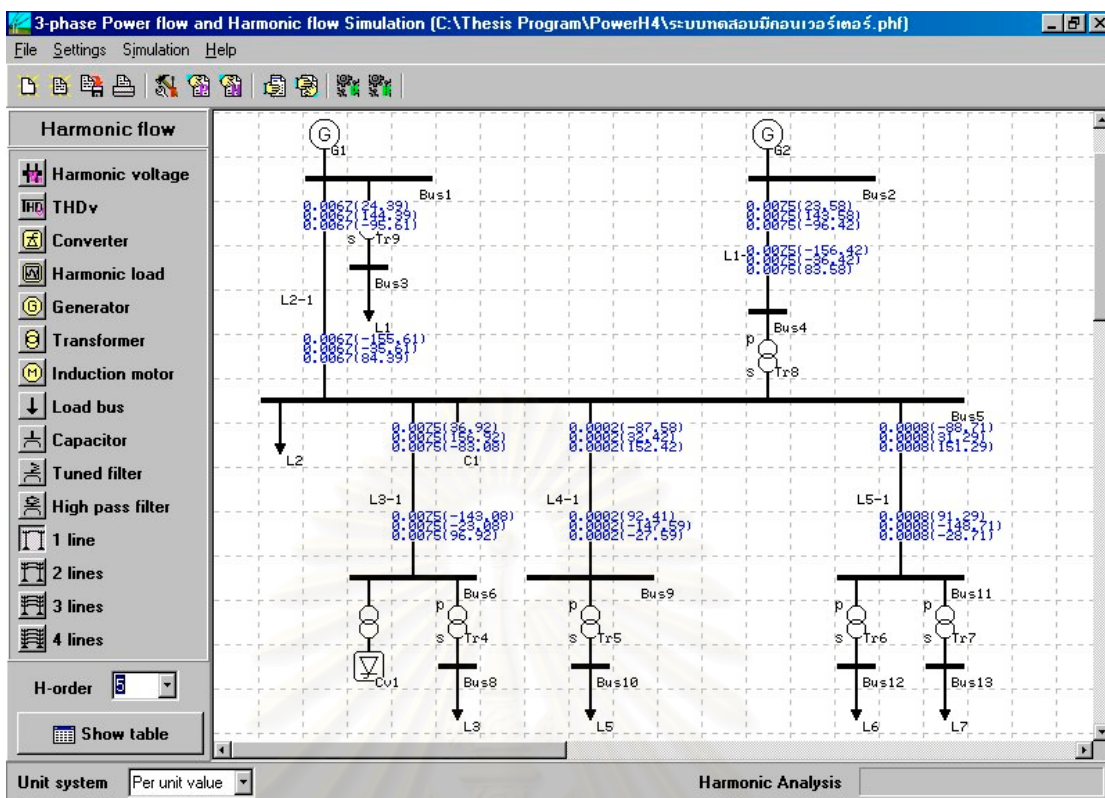
รูปที่ 4.26 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกสโรว์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4.27 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกสัฟฟาย์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ไปยังโหลดบัส



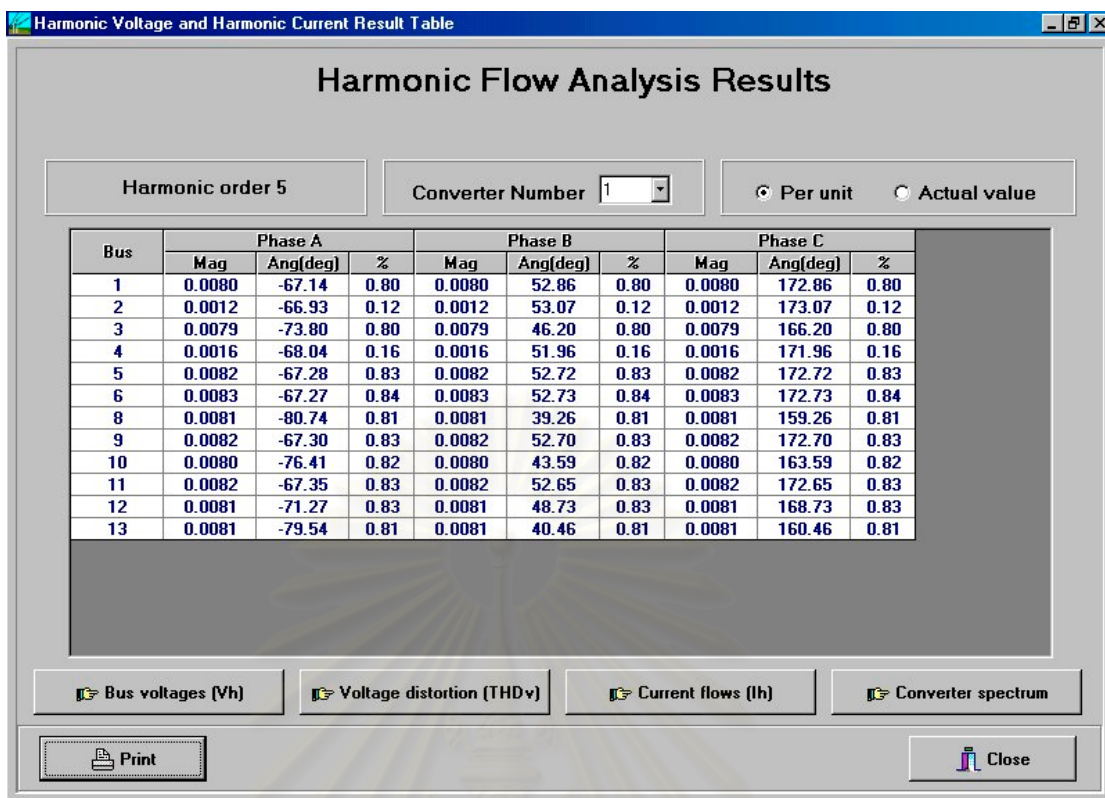
รูปที่ 4.28 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกสัฟฟาย์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ไปยังคาปาซิเตอร์แบงค์



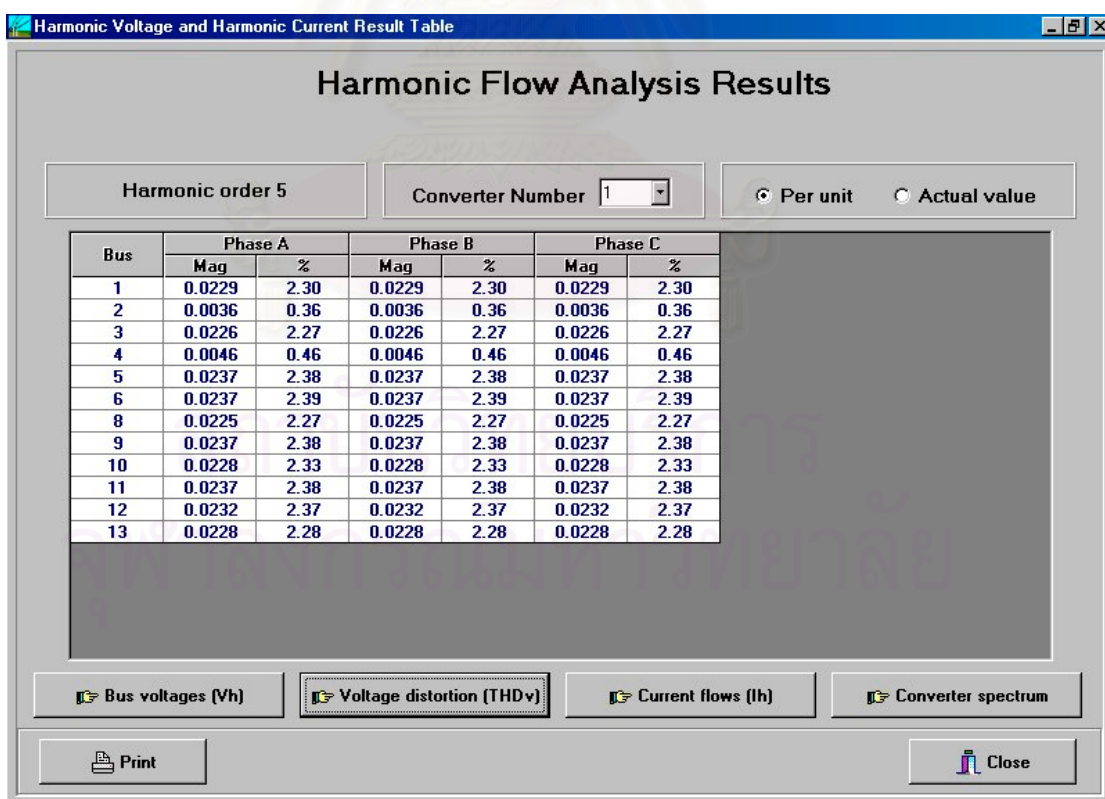
รูปที่ 4.29 ผลการคำนวณฮาร์มอนิกสโพลาร์แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ในสายส่งกำลังไฟฟ้า

การแสดงผลในรูปแบบตารางจะแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่巴士ทุก巴士ทั้ง 3 เฟสในลำดับฮาร์มอนิกที่เลือกไว้ แสดงผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน แสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละส่วนของระบบทั้ง 3 เฟสในลำดับฮาร์มอนิกที่เลือกไว้ และฮาร์มอนิกสเปกตรัมของกระแสที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์(ในกรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์) ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.33 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.30 ตารางแสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกของแต่ละบัสในลำดับฮาร์มอนิกที่เลือกไว้



รูปที่ 4.31 ตารางแสดงผลค่าแรงดันผิดเพี้ยน(THDv)ทั้ง 3 เฟสของแต่ละบัส

Harmonic Voltage and Harmonic Current Result Table

Harmonic Flow Analysis Results

Harmonic order 5 Converter Number 1 Per unit Actual value

Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			Mag	Ang(deg)	Mag	Ang(deg)
2	4	a	0.007470	23.58	0.007470	-156.42
1 line	L1-1	b	0.007470	143.58	0.007470	-36.42
		c	0.007470	-96.42	0.007470	83.58
1	5	a	0.006715	24.39	0.006715	-155.61
1 line	L2-1	b	0.006715	144.39	0.006715	-35.61
		c	0.006715	-95.61	0.006715	84.39
5	6	a	0.007466	36.92	0.007466	-143.08
1 line	L3-1	b	0.007466	156.92	0.007466	-23.08
		c	0.007466	-83.08	0.007466	96.92
5	9	a	0.000212	-87.58	0.000212	92.41
1 line	L4-1	b	0.000212	32.42	0.000212	-147.59
		c	0.000212	152.42	0.000212	-27.59
5	11	a	0.000821	-88.71	0.000821	91.29

Bus voltages (Vh)
 Voltage distortion (THDv)
 Current flows (Ih)
 Converter spectrum

รูปที่ 4.32 ตารางแสดงผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกสลับในส่วนต่างๆของระบบในลำดับฮาร์มอนิกที่เลือกไว้

Harmonic Voltage and Harmonic Current Result Table

Harmonic Flow Analysis Results

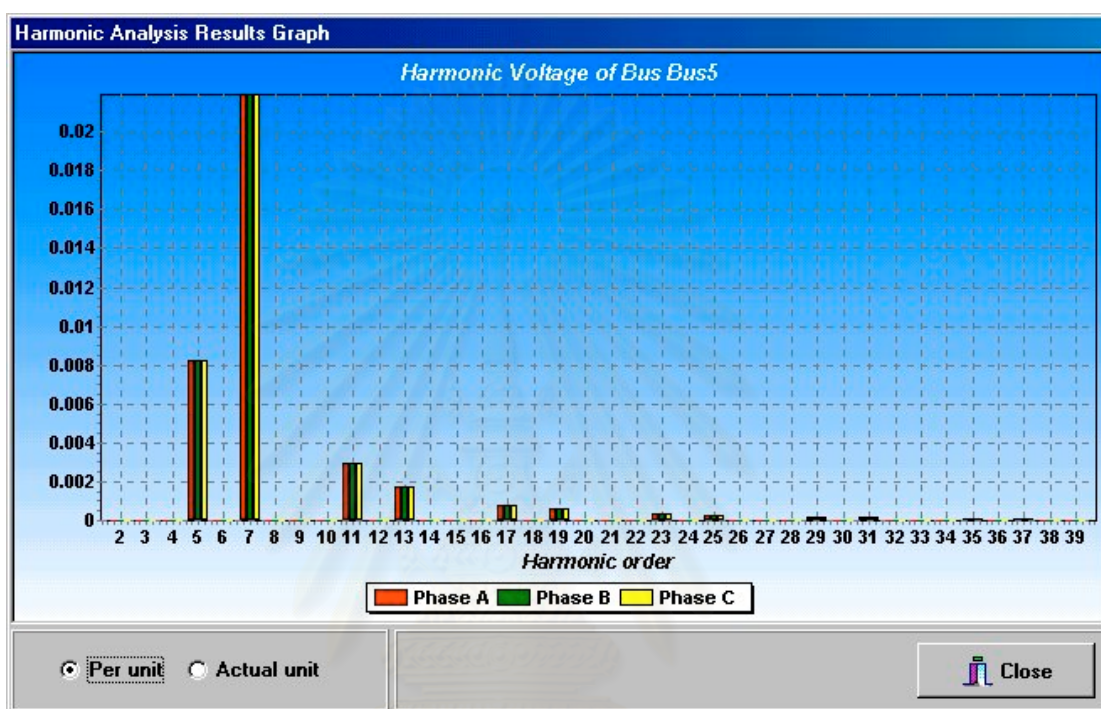
Harmonic order 5 Converter Number 1 Per unit Actual value

Harmonic order	Phase A			Phase B			Phase C		
	Mag	Ang(deg)	%	Mag	Ang(deg)	%	Mag	Ang(deg)	%
Fundamental	0.0388	-28.21	100.00	0.0388	-148.21	100.00	0.0388	91.79	100.00
3	0.0000	-84.26	0.00	0.0000	-84.78	0.00	0.0000	95.39	0.00
5	0.0077	38.96	19.80	0.0077	158.96	19.80	0.0077	-81.04	19.80
7	0.0054	162.54	14.01	0.0054	42.54	14.01	0.0054	-77.46	14.01
9	0.0000	107.23	0.00	0.0000	105.64	0.00	0.0000	-73.83	0.00
11	0.0034	-130.32	8.65	0.0034	-10.32	8.65	0.0034	109.68	8.65
13	0.0028	-6.75	7.17	0.0028	-126.75	7.17	0.0028	113.25	7.17
15	0.0000	-61.26	0.00	0.0000	-64.00	0.00	0.0000	116.91	0.00
17	0.0020	60.36	5.21	0.0020	-179.64	5.21	0.0020	-59.64	5.21
19	0.0018	-176.09	4.52	0.0018	63.91	4.52	0.0018	-56.09	4.52
21	0.0000	130.22	0.00	0.0000	126.26	0.00	0.0000	-52.43	0.00
23	0.0013	-109.05	3.46	0.0013	10.95	3.46	0.0013	130.95	3.46
25	0.0012	14.46	3.05	0.0012	-105.54	3.05	0.0012	134.46	3.05
27	0.0000	-38.24	0.00	0.0000	-43.67	0.00	0.0000	138.13	0.00
29	0.0009	81.40	2.38	0.0009	-158.60	2.38	0.0009	-38.60	2.38
31	0.0008	-155.17	2.10	0.0008	84.83	2.10	0.0008	-35.17	2.10
33	0.0000	153.26	0.00	0.0000	146.11	0.00	0.0000	-31.51	0.00

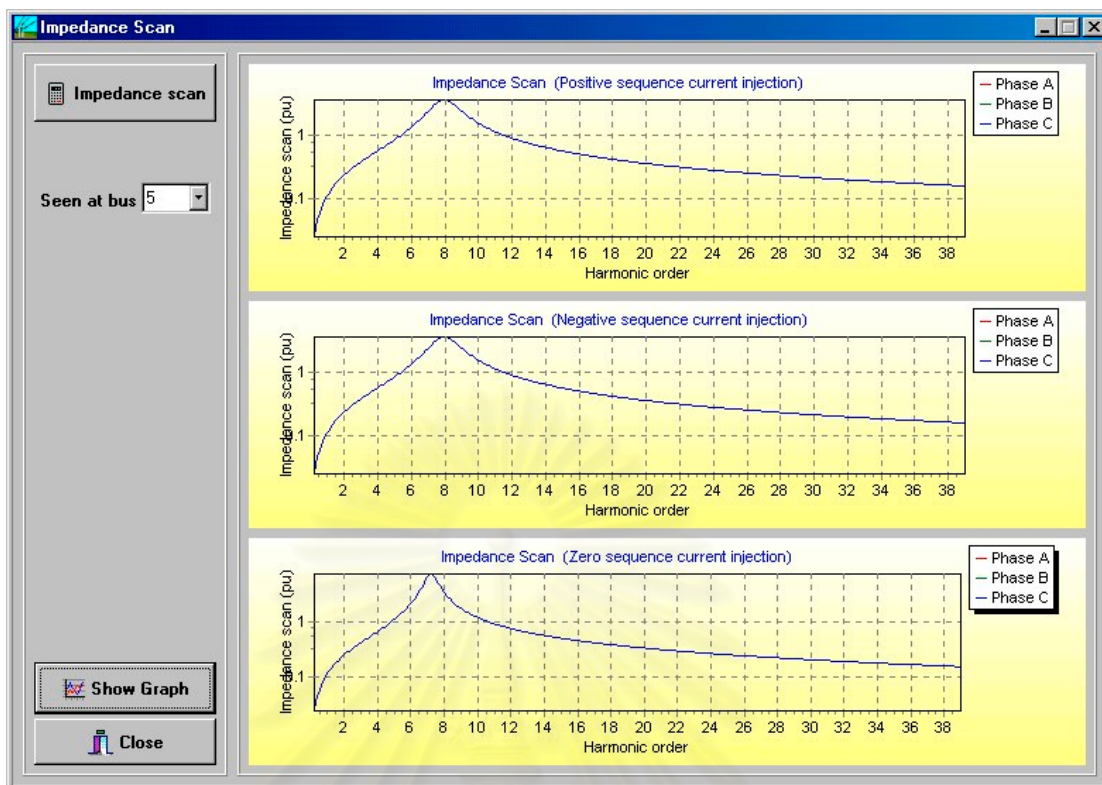
Bus voltages (Vh)
 Voltage distortion (THDv)
 Current flows (Ih)
 Converter spectrum

รูปที่ 4.33 ตารางแสดงฮาร์มอนิกสลับปกติของกระแสจากคอนเวอร์เตอร์

การแสดงผลในรูปแบบกราฟจะแสดงผลโดยรวมของฮาร์มอนิกส์ทุกลำดับ คือ ตั้งแต่ลำดับที่ 2 จนถึงลำดับที่ 39 ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบ กราฟฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของแรงดันที่บัส กราฟฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ กราฟฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสที่ไหลไปในอุปกรณ์ต่างๆของระบบ และกราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อพิจารณาจากขั้วของคอนเวอร์เตอร์ที่สนใจ



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของแรงดันที่บัส



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาจากบัสที่สนใจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ตัวอย่าง ผลการคำนวณ และการวิเคราะห์

บทนี้จะเสนอตัวอย่างของระบบที่ใช้วิเคราะห์โหลดโพลาร์ และฮาร์มอนิกส์โพลาร์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สภาวะสมดุลและไม่สมดุล ระบบทดสอบตัวอย่างที่เสนอประกอบด้วยระบบตัวอย่างของ IEEE 5 บัส IEEE 13 บัส และ IEEE 14 บัส การวิเคราะห์สภาวะไม่สมดุลของระบบจะทำได้โดยวิธีการดังนี้ เช่น การปลดสายเฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้าออกบางเฟส การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบบางส่วน การเปลี่ยนค่าโหลดของบัส เป็นต้น

5.1 ระบบ 5 บัส

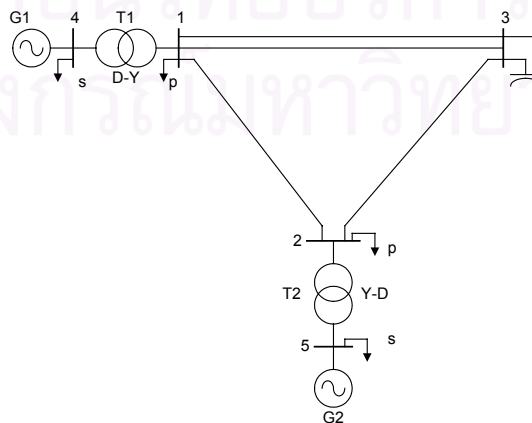
ระบบ IEEE 5 บัสตาม [2] โดยนำมาวิเคราะห์ใน 3 กรณี คือ

- ระบบ 5 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐานสภาวะโหลดไม่สมดุล)
- ระบบ 5 บัส กรณีที่ 2 (กรณีพื้นฐานสภาวะโหลดสมดุล)
- ระบบ 5 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบ)

5.1.1 ระบบ 5 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐานสภาวะโหลดไม่สมดุล)

ก. ข้อมูลของระบบ

กรณีนี้มาจาก[2] รูปที่ 5.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยบัสจำนวน 5 บัส ข้อมูลของระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.7 ข้อมูลทั้งหมดยกเว้นกำลังไฟฟ้าอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ และค่าเบสของกำลังไฟฟ้าคือ 33.33 MVA



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

Name	Sequence reactances			Power P_g^{abc}	Voltage V^+
	X^0	X^+	X^-		
G1	0.02	0.001	0.004	700.0	1.050
G2	0.02	0.001	0.004	slack	1.045

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

Name	Leakage impedance	Taps		Connection	
		P	S	P	S
T1	$0.0016+j0.015$	0.025	0.01	Wye-G	Delta
T2	$0.0016+j0.015$	0.025	0.00	Wye-G	Delta

ตารางที่ 5.3 เมตริกซ์อิมพีแดนซ์อนุกรมและเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ขนานของสาย L 1-2/2-3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

	A	B	C		A	B	C
A	$0.0066+j0.056$	$0.0017+j0.027$	$0.0012+j0.021$	A	$0.0+j0.15$	$0.0-j0.03$	$0.0-j0.01$
B		$0.0045+j0.047$	$0.0014+j0.022$	B		$0.0+j0.25$	$0.0-j0.02$
C			$0.0062+j0.061$	C			$0.0+j0.14$

ตารางที่ 5.4 เมตริกซ์อิมพีแดนซ์อนุกรมของสายคู่ควม L 1-3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

	A	B	C	A	B	C
A	$0.008+j0.055$	$0.004+j0.016$	$0.004+j0.011$	$0.002+j0.013$	$0.002+j0.011$	$0.001+j0.02$
B		$0.007+j0.054$	$0.004+j0.016$	$0.002+j0.013$	$0.002+j0.014$	$0.002+j0.02$
C			$0.008+j0.055$	$0.001+j0.013$	$0.002+j0.014$	$0.002+j0.02$
A				$0.008+j0.054$	$0.004+j0.016$	$0.003+j0.02$
B					$0.007+j0.054$	$0.004+j0.02$
C						$0.008+j0.055$

ตารางที่ 5.5 เมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ขนานของสายคู่ควม L 1-3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

	A	B	C	A	B	C
A	$0.0+j0.1484$	$0.0-j0.031$	$0.0-j0.025$	$0.0-j0.021$	$0.0-j0.027$	$0.0-j0.020$
B		$0.0+j0.1495$	$0.0-j0.030$	$0.0-j0.015$	$0.0-j0.018$	$0.0-j0.016$
C			$0.0+j0.150$	$0.0-j0.017$	$0.0-j0.016$	$0.0-j0.014$
A				$0.0+j0.1488$	$0.0-j0.031$	$0.0-j0.025$
B					$0.0+j0.1495$	$0.0-j0.031$
C						$0.0+j0.150$

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลของคาปาซิเตอร์ที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

	A	B	C
A	$j2.25$	$j0.0$	$j0.0$
B	$j0.0$	$j2.25$	$j0.0$
C	$j0.0$	$j0.0$	$j2.25$

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลของโหลดที่บัส ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	P_i^a	Q_i^a	P_i^b	Q_i^b	P_i^c	Q_i^c
1	20.0	10.0	20.0	10.0	20.0	10.0
2	65.5	25.5	65.5	25.5	65.5	25.5
3	200.0	100.0	210.0	90.0	190.0	110.0
4	10.0	5.0	10.0	5.0	10.0	5.0
5	5.0	3.0	5.0	3.0	5.0	3.0

ข. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

ตารางที่ 5.8 และ 5.9 เป็นตารางแสดงผลของแรงดันบัสและตารางแสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลตามลำดับ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลจากเอกสารอ้างอิง

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

ผลของแรงดันบัสจากเอกสารอ้างอิง [2]								
Bus	Phase A		Phase B		Phase C		P_g^{abc}	Q_g^{abc}
	Vol	Ang	Vol	Ang	Vol	Ang		
1	1.0478	30.75	1.0531	-89.58	1.0433	150.89		
2	1.0494	28.42	1.0529	-91.67	1.0479	148.41		
3	1.0308	26.17	1.0466	-93.94	1.0263	146.27		
4	1.0496	6.08	1.0508	-113.96	1.0495	126.00	700.00	92.93
5	1.0447	-0.10	1.0453	-120.10	1.0450	119.87	215.03	133.15
ผลของแรงดันบัสจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนา								
Bus	Phase A		Phase B		Phase C		P_g^{abc}	Q_g^{abc}
	Vol	Ang	Vol	Ang	Vol	Ang		
1	1.0478	30.74	1.0531	-89.58	1.0432	150.89		
2	1.0494	28.42	1.0529	-91.67	1.0479	148.41		
3	1.0309	26.17	1.0466	-93.94	1.0262	146.27		
4	1.0496	6.08	1.0508	-113.96	1.0495	126.00	700.00	93.03
5	1.0447	-0.10	1.0453	-120.10	1.0450	119.87	215.03	133.20
ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลของเอกสารอ้างอิง (%)								
Bus	Phase A		Phase B		Phase C		P_g^{abc}	Q_g^{abc}
	Vol	Ang	Vol	Ang	Vol	Ang		
1	0.00	-0.03	0.00	0.00	-0.01	0.00		
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
3	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00		
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04

ตารางที่ 5.9 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 1

ผลการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเอกสารอ้างอิง [2]						
Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
1	2	A	47.388	-20.447	-47.356	16.159

		B	58.442	-6.409	-58.026	-1.624
		C	39.093	-7.219	-38.716	3.274
1	3	A	73.958	8.299	-73.860	-8.717
		B	76.798	-5.132	-75.960	4.416
		C	62.284	13.784	-62.287	-15.138
		A	78.995	8.881	-78.554	-8.647
		B	74.833	-5.694	-73.635	4.576
		C	91.458	-1.433	-89.746	2.202
1	4	A	-220.342	-6.734	216.568	29.233
		B	-230.075	7.234	224.163	18.651
		C	-212.835	-15.134	229.273	30.044
2	3	A	47.769	-1.305	-47.585	-2.944
		B	60.569	9.231	-50.405	-16.852
		C	38.473	14.275	-37.967	-18.069
2	5	A	-65.916	-40.355	65.039	44.111
		B	-68.045	-33.110	65.135	38.649
		C	-65.256	-43.050	69.860	41.393
3		A	0.000	-79.691		
		B	0.000	-82.139		
		C	0.000	-78.995		
ผลการไหลของกำลังไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนา						
Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
1	2	A	47.392	-20.448	-47.360	16.160
		B	58.439	-6.412	-58.023	-1.623
		C	39.091	-7.237	-38.714	3.292
1	3	A	73.959	8.295	-73.862	-8.712
		B	76.799	-5.138	-75.962	4.419
		C	62.286	13.902	-62.287	-15.076
		A	78.995	8.878	-78.556	-8.644
		B	74.832	-5.700	-73.635	4.578
		C	91.457	-1.406	-89.741	2.176
1	4	A	-220.346	-6.724	216.529	29.290
		B	-230.069	7.249	224.161	18.640
		C	-212.834	-15.259	229.310	30.096
2	3	A	47.765	-1.309	-47.582	-2.940
		B	60.567	9.220	-60.403	-16.844
		C	38.479	14.325	-37.971	-18.116

2	5	A	-65.906	-40.351	65.015	44.149
		B	-68.044	-33.097	65.127	38.637
		C	-65.265	-43.117	69.887	41.419
3		A	0.000	-79.704		
		B	0.000	-82.153		
		C	0.000	-78.984		
ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลของเอกสารอ้างอิง (%)						
Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			MW	MVAr	MW	MVAr
1	2	A	0.01	0.00	0.01	0.01
		B	-0.01	0.05	-0.01	-0.06
		C	-0.01	0.25	-0.01	0.55
1	3	A	0.00	-0.05	0.00	-0.06
		B	0.00	0.12	0.00	0.07
		C	0.00	0.86	0.00	-0.41
		A	0.00	-0.03	0.00	0.75
		B	0.00	0.11	0.00	0.04
		C	0.00	1.88	-0.01	-1.18
1	4	A	0.00	-0.15	-0.02	0.19
		B	0.00	0.21	0.00	-0.06
		C	0.00	0.83	0.02	0.17
2	3	A	-0.01	0.31	-0.01	-0.14
		B	0.00	-0.12	0.00	-0.05
		C	0.02	0.35	0.01	0.26
2	5	A	-0.02	-0.01	-0.04	0.09
		B	0.00	-0.04	-0.01	-0.03
		C	0.01	0.16	0.04	0.06
3		A	0.00	0.02		
		B	0.00	0.02		
		C	0.00	-0.01		

จากผลที่ได้ทำให้ทราบว่าในกรณีที่ระบบเกิดสภาวะโหลดไม่สมดุลที่บัส 3 เป็นผลให้แรงดันในบัสต่างๆในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากันโดยเฉพาะบัสที่ 3 จะเห็นว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเป็นผลให้ระบบอาจจะเข้าสู่สภาวะที่ไม่มีเสถียรภาพได้

จากผลการคำนวณโดยโปรแกรมที่พัฒนาเมื่อเทียบกับผลการคำนวณจากเอกสารอ้างอิง [2] พบว่าทั้งผลของแรงดันบัสและผลของการไหลของกำลังไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมากไม่

เกิน 2% ความคลาดเคลื่อนเกิดเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์จากเอกสารอ้างอิง[2] บางค่ามีความไม่ถูกต้องซึ่งทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

5.1.2 ระบบ 5 บัส กรณีที่ 2 (กรณีพื้นฐานสภาวะโหลดสมดุล)

ก. ข้อมูลของระบบ

ระบบทดสอบในหัวข้อนี้ ข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆจะใช้ข้อมูลเดียวกันกับระบบทดสอบในหัวข้อที่ 5.1.1 ยกเว้นข้อมูลของโหลดบัสซึ่งมีค่าแตกต่างกัน สำหรับข้อมูลของโหลดบัสแสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ข้อมูลของโหลดที่บัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 2

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	P_i^a	Q_i^a	P_i^b	Q_i^b	P_i^c	Q_i^c
1	20.0	10.0	20.0	10.0	20.0	10.0
2	65.5	25.5	65.5	25.5	65.5	25.5
3	200	115	200	115	200	115
4	10.0	5.0	10.0	5.0	10.0	5.0
5	5.0	3.0	5.0	3.0	5.0	3.0

ข. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

จากการคำนวณจะได้ผลของแรงดันบัสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบแสดงในตารางที่ 5.11 และตารางที่ 5.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.11 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 2

Bus	Phase A		Phase B		Phase C		P_g^{abc}	Q_g^{abc}
	Vol	Ang	Vol	Ang	Vol	Ang		
1	1.0440	30.80	1.0467	-89.41	1.0408	150.78		
2	1.0459	28.41	1.0471	-91.52	1.0461	148.32		
3	1.0275	26.44	1.0260	-93.50	1.0213	145.54		
4	1.0497	6.10	1.0505	-113.92	1.0498	126.05	700.00	121.49
5	1.0448	-0.12	1.0449	-120.10	1.0452	119.88	215.39	158.43

ตารางที่ 5.12 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 2

Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			MW	MVAr	MW	MVAr
1	2	a	47.954	-20.955	-47.885	16.799
		b	58.408	-6.605	-58.012	-1.293
		c	38.912	-7.941	-38.537	4.011
1	3	a	72.923	12.359	-73.129	-12.986
		b	74.588	2.350	-73.306	-3.376

		c	65.299	15.836	-65.406	-15.943
		a	78.294	13.368	-78.189	-13.335
		b	72.583	1.910	-70.986	-3.328
		c	94.222	2.255	-92.517	-0.149
1	4	a	-219.171	-14.772	219.384	38.298
		b	-225.579	-7.656	223.028	30.817
		c	-218.432	-20.149	227.589	37.378
2	3	a	48.670	5.216	-48.682	-9.499
		b	56.272	21.939	-55.708	-29.341
		c	42.467	17.665	-42.077	-20.683
2	5	a	-66.285	-47.515	68.219	51.200
		b	-63.761	-46.147	64.851	50.350
		c	-69.430	-47.176	67.322	47.879
3		a	0.000	-79.180		
		b	0.000	-78.955		
		c	0.000	-78.225		

กรณีที่ 2 นี้จะใช้เป็นกรณีพื้นฐานของกรณีในหัวข้อที่ 5.1.3 เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการคำนวณโดยทำการพิจารณาใน 2 กรณี คือ กรณีโหลดที่บัส 3 เป็นโหลดสมดุล(หัวข้อ 5.1.2) และกรณีโหลดที่บัส 3 เป็นโหลดคอนเวอร์เตอร์(หัวข้อ 5.1.3)

ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าระบบมีแรงดันที่บัสต่างๆทั้ง 3 เฟสมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากในระบบนี้พิจารณาว่าโหลดที่บัสต่างๆมีความสมดุล แต่ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะไม่สมดุลเป็นผลให้การไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะแตกต่างกันออกไปจะเห็นได้จากตารางที่ 5.12

5.1.3 ระบบ 5 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่ระบบมีคอนเวอร์เตอร์ต่อที่บัส 3)

ก. ข้อมูลของระบบ

กรณีนี้เป็นการเปลี่ยนโหลดที่บัส 3 ครั้งหนึ่งเป็นโหลดที่เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่มีขนาดกำลังไฟฟ้า 3 เฟสรวมเท่ากับ 300 MW และอีกครั้งหนึ่งเป็นโหลดบัสคงที่สมดุลทั้ง 3 เฟสซึ่งข้อมูลของโหลดบัสแสดงไว้ในตารางที่ 5.14 ส่วนข้อมูลต่างๆนอกเหนือจากข้อมูลของโหลดบัสและข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์จะใช้ข้อมูลดังในกรณีพื้นฐาน(หัวข้อ 5.1.1)

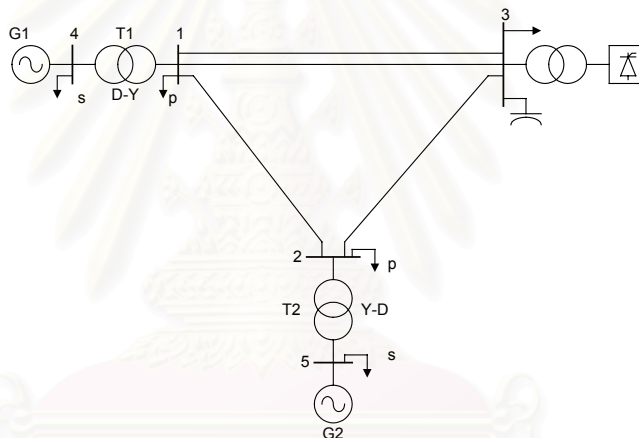
ตารางที่ 5.13 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

	Phase A	Phase B	Phase C
Transformer reactances	0.051	0.051	0.051

Commutation reactances	0.0537	0.0537	0.0537
Minimum firing angle	7 deg		
Minimum extinction angle	10 deg		
Nominal voltage	242.49 kV		
Operating voltage	292.80 kV		

ตารางที่ 5.14 ข้อมูลของโหลดที่บัสของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	P_i^a	Q_i^a	P_i^b	Q_i^b	P_i^c	Q_i^c
1	20.0	10.0	20.0	10.0	20.0	10.0
2	65.5	25.5	65.5	25.5	65.5	25.5
3	100.0	50.0	100.0	50.0	100.0	50.0
4	10.0	5.0	10.0	5.0	10.0	5.0
5	5.0	3.0	5.0	3.0	5.0	3.0



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

ข. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์โหลดโฟลว์

เนื่องจากในกรณีนี้มีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้าไปในระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ จะต้องใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีการแก้ปัญหาของโหลดโฟลว์กระแสสลับ-กระแสตรง (AC-DC power flow) ซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยผลของแรงดันบัลด์ ผลการไหลของกำลังไฟฟ้า และ ผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 5.15 ตารางที่ 5.16 และตารางที่ 5.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.15 ข้อมูลของแรงดันบัสดังของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C		P_g^{abc}	Q_g^{abc}
	Vol	Ang	Vol	Ang	Vol	Ang		
1	1.0438	30.80	1.0464	-89.41	1.0410	150.78		
2	1.0457	28.41	1.0467	-91.52	1.0463	148.32		
3	1.0270	26.48	1.0248	-93.52	1.0223	145.53		
4	1.0497	6.10	1.0505	-113.92	1.0498	126.05	700.00	122.22
5	1.0449	-0.12	1.0449	-120.10	1.0452	119.89	215.40	159.12

ตารางที่ 5.16 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
1	2	a	47.982	-20.979	-47.911	16.830
		b	58.411	-6.612	-58.017	-1.280
		c	38.925	-7.934	-38.549	4.002
1	3	a	72.805	12.592	-72.998	-13.262
		b	74.596	2.695	-73.278	-3.676
		c	65.353	15.554	-65.492	-15.660
		a	78.195	13.593	-78.076	-13.604
		b	72.615	2.269	-70.985	-3.641
		c	94.298	2.112	-92.655	0.020
1	4	a	-218.983	-15.206	219.601	38.394
		b	-225.622	-8.352	223.039	31.316
		c	-218.576	-19.732	227.360	37.514
2	3	a	48.627	5.534	-48.628	-9.840
		b	56.305	22.556	-55.723	-29.887
		c	42.529	17.358	-42.165	-20.390
2	5	a	-66.216	-47.863	68.410	51.250
		b	-63.789	-46.776	64.917	50.829
		c	-69.480	-46.860	67.077	48.041
3		a	0.000	-79.100		
		b	0.000	-78.771		
		c	0.000	-78.385		

ตารางที่ 5.17 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

Phase	Tap ratio (%)	Commutation angle (deg)	Terminal powers	
			MW	MVA _r
a	-4.990	29.667	99.702	65.808
b	-4.990	29.500	99.983	65.970
c	-4.990	29.557	100.315	64.418

ผลของแรงดันบัลด์และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบที่คำนวณได้ในกรณีนี้ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการพื้นฐานในหัวข้อ 5.1.2 แล้วมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งผลของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากในกรณีนี้โหลดที่บัลด์ 3 เป็นโหลดบัลด์สมดุลและโหลดคอนเวอร์เตอร์ ระบบที่มีคอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่จะต้องคำนวณโดยใช้หลักการของโหลดไฟลว์ AC-DC ซึ่งผลของกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์จะไม่สมดุล แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ในแต่ละเฟสมีค่าไม่ต่างกันมากจึงทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ไฟลว์

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆจะใช้แบบจำลองดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยที่ไม่คิดผลของ Skin effect และกรณีของโหลดบัลด์จะใช้แบบจำลองโหลดแบบที่ 3 ผลของฮาร์มอนิกส์เปคตริ่มที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ในตารางที่ 5.18 ซึ่งวิธีการหาสเปคตริ่มหาจากการใช้การแปลงฟูเรียร์ของรูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์ และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน(THDv) แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 และแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 แสดงไว้ในตารางที่ 5.19 ตารางที่ 5.20 และตารางที่ 5.21 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.18 ฮาร์มอนิกส์เปคตริ่มของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 5 บัลด์ กรณีที่ 3

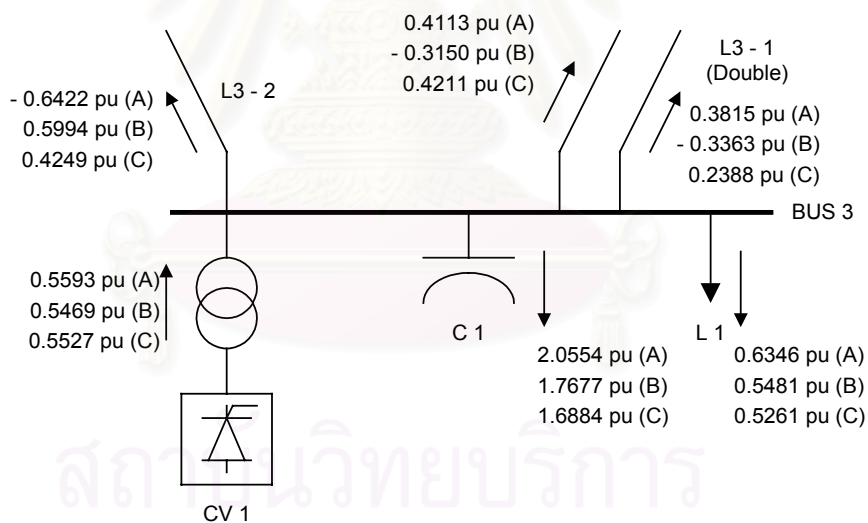
H	Phase A			Phase B			Phase C		
	Mag(pu)	Angle (deg)	%	Mag(pu)	Angle (deg)	%	Mag(pu)	Angle (deg)	%
1	3.4897	-6.94	100.00	3.5065	-126.94	100.00	3.4984	112.82	100.00
3	0.0156	-22.51	0.45	0.0152	159.66	0.43	0.0007	106.76	0.02
5	0.5593	143.79	16.03	0.5469	-96.15	15.60	0.5527	22.71	15.80
7	0.3014	-53.21	8.64	0.3125	-173.15	8.91	0.3073	65.02	8.78
9	0.0075	-79.57	0.22	0.0069	108.12	0.20	0.0012	47.82	0.03
11	0.0878	73.27	2.52	0.0838	-166.23	2.39	0.0852	-48.80	2.44
13	0.0486	-156.48	1.39	0.0519	84.29	1.48	0.0509	-39.38	1.46
15	0.0036	155.49	0.10	0.0030	-26.38	0.09	0.0006	-14.46	0.02
17	0.0457	-59.33	1.31	0.0421	61.07	1.20	0.0437	176.78	1.25
19	0.0358	94.43	1.03	0.0394	-25.23	1.12	0.0379	-150.08	1.08
21	0.0030	64.10	0.09	0.0027	-110.41	0.08	0.0004	-155.04	0.01
23	0.0199	-148.46	0.57	0.0180	-27.39	0.51	0.0187	87.01	0.53
25	0.0129	-17.97	0.37	0.0147	-136.52	0.42	0.0142	96.61	0.41
27	0.0020	-63.50	0.06	0.0017	114.50	0.05	0.0003	127.05	0.01
29	0.0160	81.06	0.46	0.0139	-158.21	0.40	0.0149	-45.63	0.43
31	0.0128	-126.08	0.37	0.0149	114.52	0.43	0.0141	-13.34	0.40
33	0.0019	-156.79	0.05	0.0017	28.32	0.05	0.0002	-14.30	0.01
35	0.0088	-10.25	0.25	0.0075	111.30	0.21	0.0080	-137.28	0.23
37	0.0057	120.61	0.16	0.0069	2.76	0.20	0.0066	-127.37	0.19
39	0.0014	75.38	0.04	0.0012	-106.38	0.03	0.0002	-95.62	0.01

ตารางที่ 5.19 เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนรวม(THDv)ของแรงดันที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	Vol (pu)	(%)	Vol (pu)	(%)	Vol (pu)	(%)
1	0.0923	8.84	0.0836	7.99	0.0782	7.51
2	0.0766	7.32	0.0762	7.28	0.0584	5.58
3	0.1858	18.09	0.1609	15.70	0.1538	15.04
4	0.0171	1.63	0.0171	1.63	0.0165	1.57
5	0.0139	1.33	0.0148	1.41	0.0137	1.31

ตารางที่ 5.20 แรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 ที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

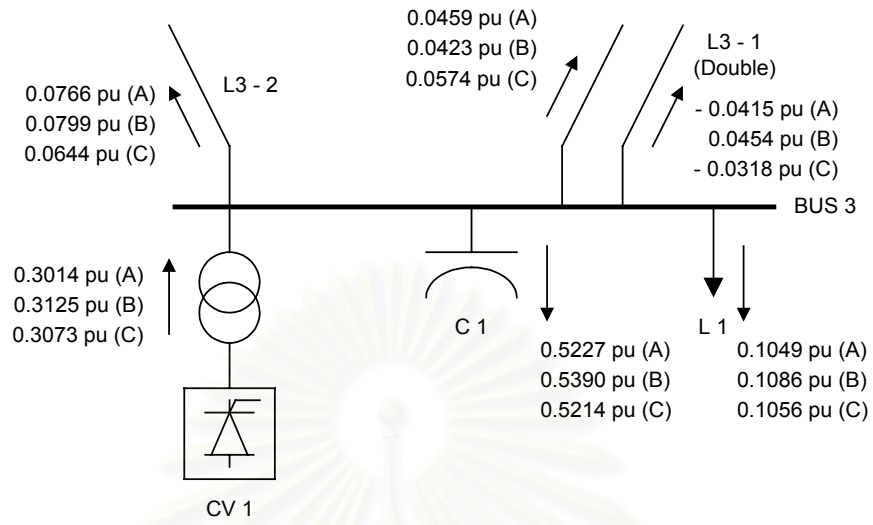
Bus	Phase A			Phase B			Phase C		
	Vol (pu)	Ang (deg)	%	Vol (pu)	Ang (deg)	%	Vol (pu)	Ang (deg)	%
1	0.0908	-57.78	8.70	0.0816	63.43	7.80	0.0765	176.74	7.35
2	0.0755	-64.64	7.22	0.0744	66.80	7.11	0.0573	174.95	5.47
3	0.1827	-55.80	17.79	0.1571	67.37	15.33	0.1501	175.93	14.68
4	0.0170	-29.52	1.62	0.0171	92.80	1.63	0.0165	-148.22	1.57
5	0.0139	-32.32	1.33	0.0147	90.84	1.41	0.0136	-147.89	1.31



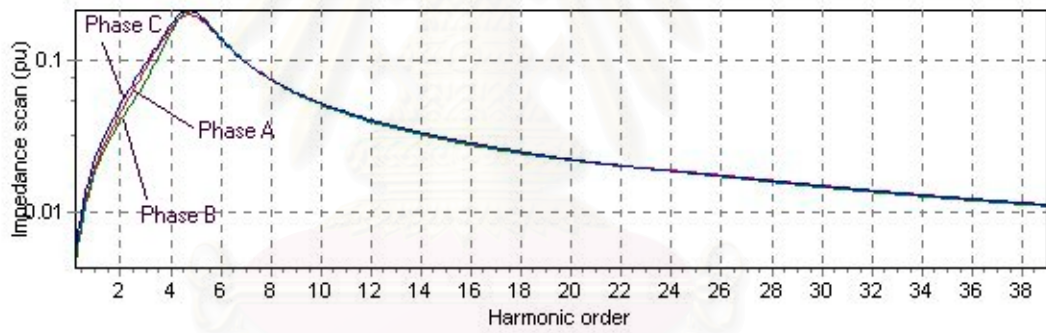
รูปที่ 5.3 การไหลของกระแสฮาร์โมนิกที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

ตารางที่ 5.21 แรงดันฮาร์โมนิกที่ 7 ที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

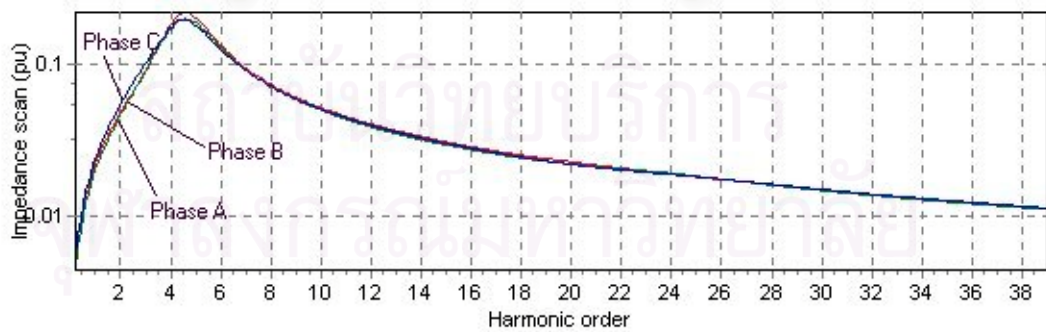
Bus	Phase A			Phase B			Phase C		
	Vol (pu)	Ang (deg)	%	Vol (pu)	Ang (deg)	%	Vol (pu)	Ang (deg)	%
1	0.0160	51.75	1.53	0.0176	-66.35	1.68	0.0158	167.72	1.52
2	0.0126	56.47	1.21	0.0160	-73.88	1.53	0.0112	162.86	1.07
3	0.0332	54.19	3.23	0.0342	-65.18	3.34	0.0331	171.37	3.24
4	0.0008	17.19	0.08	0.0010	-87.65	0.10	0.0011	135.72	0.11
5	0.0004	41.75	0.04	0.0012	-85.53	0.11	0.0010	112.11	0.10



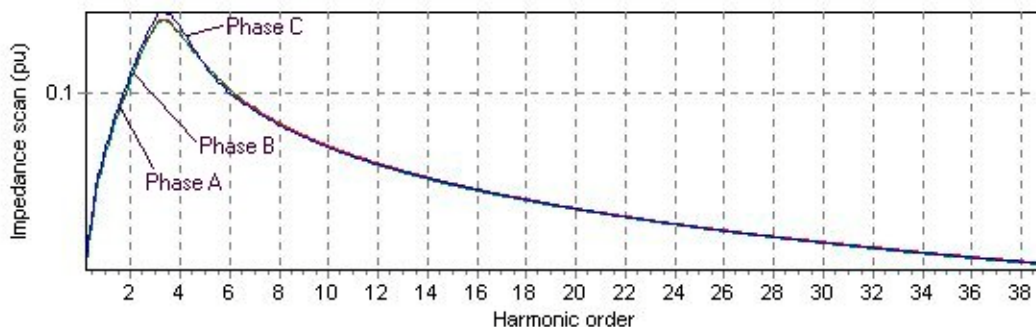
รูปที่ 5.4 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 5 บัส กรณีที่ 3

- (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก
- (b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ
- (c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

จากผลการคำนวณฮาร์มอนิกสโพลาร์ทำให้ทราบว่า จุดเรโซแนนซ์ของระบบอยู่ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ซึ่งทราบได้จากกราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบ(เมื่อพิจารณาที่บัส 3) ผลที่เกิดขึ้นคือ การขยายของกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ 5 โดยพบว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ถูกขยายในแต่ละเฟสเป็น 2.0554 pu, 1.7677 pu และ 1.6884 pu ตามรูปที่ 5.3 หรือคิดเป็น 367.50 %, 323.22 % และ 305.48 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกระแสที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีค่าสูงมากอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อคาปาซิเตอร์ได้

ส่วนผลของฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงดันบัสและอุปกรณ์ในระบบได้แสดงเป็นตารางไว้ในภาคผนวก

5.2 ระบบ 13 บัส

ระบบ IEEE 13 บัสตาม [7] ซึ่งเป็นแบบจำลองของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง โรงงานนี้ได้รับการจ่ายไฟจากระบบการไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 69 kV และระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานเองที่ระดับแรงดัน 13.8 kV โดยจะละเลยค่าคาปาซิแตนซ์ของสายส่งระยะสั้นและสายเคเบิล โดยนำระบบนี้มาวิเคราะห์ใน 4 กรณี คือ กรณีพื้นฐาน กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุดในระบบภายใต้สภาวะสมดุล กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุดในระบบภายใต้สภาวะไม่สมดุล และกรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุดในระบบภายใต้สภาวะสมดุล

ข้อมูลเพิ่มเติมที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบโรงงานอุตสาหกรรมมีดังนี้

1. อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบ สำหรับการศึกษานี้อิมพีแดนซ์ของระบบหาจาก fault MVA และ X/R ratio ที่จุดเชื่อมต่อการไฟฟ้า ซึ่งในระบบนี้มีค่าเป็น 1000 MVA และ 22.2 ตามลำดับ

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงงาน(In-plant) สามารถถูกแทนได้ด้วยวงจรสมมูลเทเวอ์นินท์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลก็คือค่าชั้บทรานเซียนส์อิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ $0.0366+j1.3651$ โอห์ม
3. ตัวเก็บประจุแก้ตัวประกอบกำลังของโรงงานมีค่าพิกัด 6000 kVAr ในการศึกษานี้จะละเลยค่าความต้านทานลี้คเกจและความต้านทานอนุกรม
4. ค่าตัวประกอบกำลังแบบดิสเพลสเมนต์ของโหลดที่เป็นโหลดชั้บเคลื่อน (Displacement power factor) มีค่า 0.97 ล้าหลัง

แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์จะพิจารณาดังนี้คือ

1. โหลดบัสทั้งหมดใช้แบบจำลองที่เป็นวงจรอนุกรม RL
2. แบบจำลองของความต้านทานจะพิจารณาว่าไม่ขึ้นกับความถี่
3. แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าจะละเลยผลของ Magnetizing branch และละเลยผลของการเพิ่มขึ้นของกำลังสูญเสียในขดลวดเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

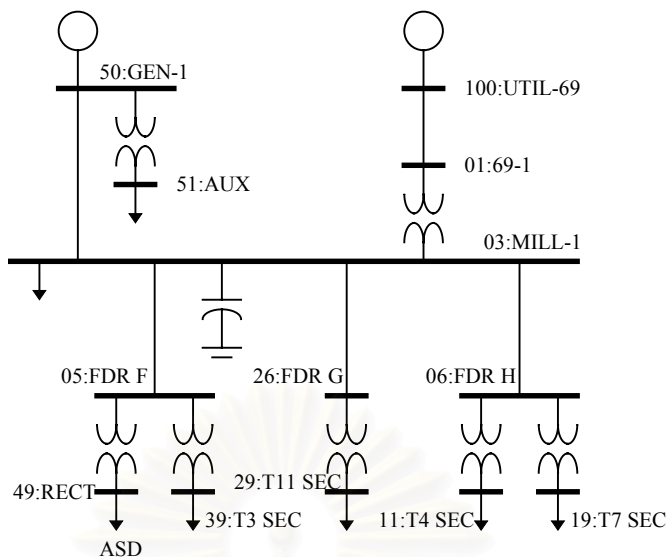
โดยจะนำระบบนี้มาทำการวิเคราะห์เป็น 4 กรณี คือ

- ระบบ 13 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐานระบบสมดุล)
- ระบบ 13 บัส กรณีที่ 2 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุดในระบบภายใต้สภาวะสมดุล)
- ระบบ 13 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุดในระบบภายใต้สภาวะไม่สมดุล)
- ระบบ 13 บัส กรณีที่ 4 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุดในระบบภายใต้สภาวะสมดุล)

5.2.1 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐานระบบสมดุล)

ก. ข้อมูลของระบบ

เป็นกรณีที่น่ามาจาก [7] ระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.6 และข้อมูลต่างๆแสดงในตารางที่ 5.22 ถึงตารางที่ 5.25 ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ กรณีของโหลดบัสในโปรแกรมจะเลือกใช้แบบจำลองโหลดแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแบบจำลองวงจร RL และสำหรับการคำนวณในกรณีนี้จะใช้วิธีการแก้ปัญหาโหลดไหลแบบ AC loadflow เพียงอย่างเดียวเนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์นั้นทราบค่ากำลังไฟฟ้าและฮาร์โมนิกส์สเปคตรัมแล้วจากข้อมูลที่ให้มา



รูปที่ 5.6 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1

ตารางที่ 5.22 ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและเคเบิลหน่วยเปอร์เซ็นต์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1 (ค่าเบส: 13.8 kV, 10,000 kVA)

From	To	R	X
100: UTIL-69	01:69-1	0.00139	0.00296
03:MILL-1	50:GEN-1	0.00122	0.00243
03:MILL-1	05:FDR F	0.00075	0.00063
03:MILL-1	26:FDR G	0.00157	0.00131
03:MILL-1	06:FDR H	0.00109	0.00091

ตารางที่ 5.23 ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1

From	To	Voltage	Tap	kVA	%R	%X
01:69-1	03:MILL-1	69:13.8	69	15000	0.4698	7.9862
50:GEN1	51:AUX	13.8:0.48	13.45	1500	0.9593	5.6694
05:FDR F	49:RECT	13.8:0.48	13.8	1250	0.7398	4.4388
05:FDR F	39:T3 SEC	13.8:4.16	13.11	1725	0.7442	5.9537
26:FDR G	29:T11 SEC	13.8:0.48	13.45	1500	0.8743	5.6831
06:FDR H	11:T4 SEC	13.8:0.48	13.8	1500	0.8363	5.4360
06:FDR H	19:T7 SEC	13.8:2.4	13.11	3750	0.4568	5.4810

ตารางที่ 5.24 ข้อมูลของโหลดที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1

Bus	P _{load} (kW)	Q _{load} (kVAR)
100:UTIL-69	-	-
01:69-1	-	-
03:MILL-1	2240	2000
50:GEN-1	-	-
51:AUX	600	530
05:FDR F	-	-
49:RECT	-	-

39:T3 SEC	1310	1130
26:FDR G	-	-
06:FDR H	-	-
11:T4 SEC	370	330
19: T7 SEC	2800	2500
29:T11 SEC	810	800

ตารางที่ 5.25 ข้อมูลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่มีกำลังไฟฟ้า 1150 kW 290 kVAr

ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1

Harmonic #	Percent	Relative Angle
1	100.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

ข. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

ผลการคำนวณโหลดไฟลว์

ผลของแรงดันบัสและผลการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงดังในตารางที่ 5.26 และ 5.27 ตาม

ลำดับ

ตารางที่ 5.26 ข้อมูลแรงดันบัสและกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1

(จากผลการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีพื้นฐาน)

Bus	ผลที่ได้จากโปรแกรม				ผลจากเอกสารอ้างอิง [7]				ความคลาดเคลื่อน			
	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	P_{gen} kW	Q_{gen} kVAr	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	P_{gen} kW	Q_{gen} kVAr	V_{mag} (%)	δ (%)	P_{gen} (%)	Q_{gen} (%)
100:UTIL-69	1.000	0.00	7367	537	1.000	0.00	7450	540	0.00	0.00	-1.11	-0.56
01:69-1	0.999	-0.12	-	-	0.999	-0.13	-	-	0.00	7.69	-	-
03:MILL-1	0.995	-2.37	-	-	0.994	-2.40	-	-	0.10	1.25	-	-
50:GEN-1	0.995	-2.36	2000	1903	0.995	-2.39	2000	1910	0.00	1.26	0.00	-0.37
51:AUX	0.995	-3.51	-	-	0.995	-3.53	-	-	0.00	0.57	-	-
05:FDR F	0.994	-2.37	-	-	0.994	-2.40	-	-	0.00	1.25	-	-
49:RECT	0.976	-4.68	-	-	0.980	-4.72	-	-	-0.41	0.85	-	-
39:T3 SEC	0.996	-4.83	-	-	0.996	-4.85	-	-	0.00	0.41	-	-
26:FDR G	0.994	-2.37	-	-	0.994	-2.40	-	-	0.00	1.25	-	-

06:FDR H	0.994	-2.37	-	-	0.994	-2.40	-	-	0.00	1.25	-	-
11:T4 SEC	0.980	-3.05	-	-	0.979	-3.08	-	-	0.10	0.97	-	-
19: T7 SEC	1.001	-4.67	-	-	1.001	-4.69	-	-	0.00	0.43	-	-
29:T11 SEC	0.982	-3.94	-	-	0.981	-4.16	-	-	0.10	5.29	-	-

ตารางที่ 5.27 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1

Sending bus	Receiving bus	Type	Sending end		Receiving end	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
100:UTIL-69	01:69-1	Line	7.366	0.537	-7.358	-0.521
03:MILL-1	50:GEN-1	Line	-1.394	-1.346	1.394	1.347
03:MILL-1	05:FDR F	Line	2.484	1.588	-2.483	-1.588
03:MILL-1	26:FDR G	Line	0.818	0.854	-0.818	-0.854
03:MILL-1	06:FDR H	Line	3.193	3.069	-3.190	-3.067
01:69-1	03:MILL-1	Transformer	7.358	0.521	-7.341	-0.231
50:GEN-1	51:AUX	Transformer	0.604	0.556	-0.600	-0.530
05:FDR F	49:RECT	Transformer	1.159	0.342	-1.150	-0.290
05:FDR F	39:T3 SEC	Transformer	1.324	1.245	-1.310	-1.130
26:FDR G	29:T11 SEC	Transformer	0.818	0.854	-0.810	-0.800
06:FDR H	11:T4 SEC	Transformer	0.371	0.339	-0.370	-0.330
06:FDR H	19: T7 SEC	Transformer	2.819	2.728	-2.800	-2.500
03:MILL-1	-	Capacitor	0.000	-5.934		

ผลของโหลดโพล์และกำลังไฟฟ้าที่โปรแกรมคำนวณได้เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [7] แล้วพบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อย โดยความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงดันของบัสต่างๆมีค่าไม่เกิน 0.5 % ส่วนความคลาดเคลื่อนของมุมเฟสมีค่ามากที่สุดคือ 7.69 % ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการใช้หลักการในการคำนวณโหลดโพล์ที่แตกต่างกันหรือเป็นความผิดพลาดของข้อมูล เป็นต้น

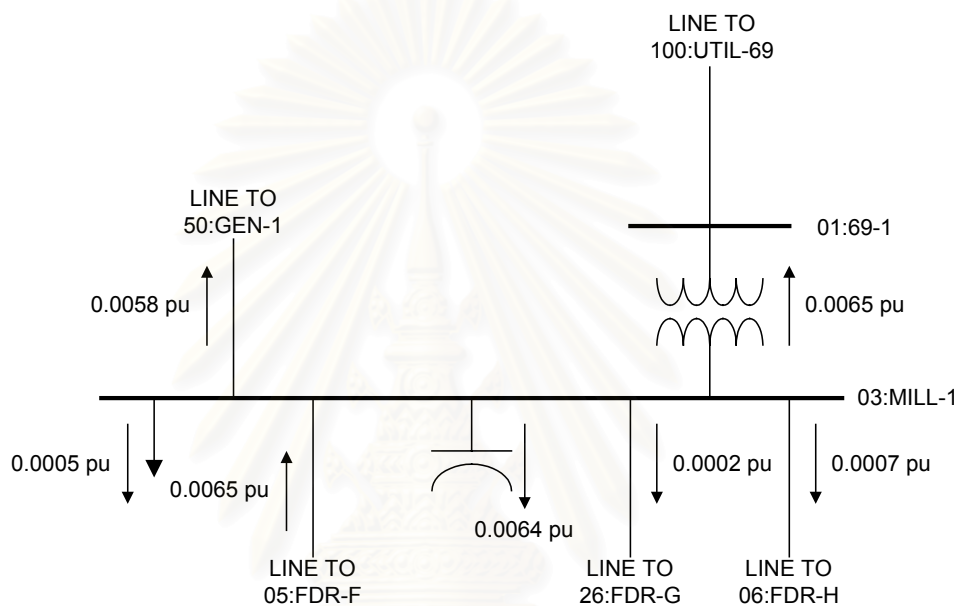
ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์

ผลความผิดเพี้ยนของแรงดันแสดงในตารางที่ 5.28 และรูปแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 5 และลำดับที่ 7 แสดงไว้ในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ตามลำดับ ส่วนกราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบแสดงในรูปที่ 5.9

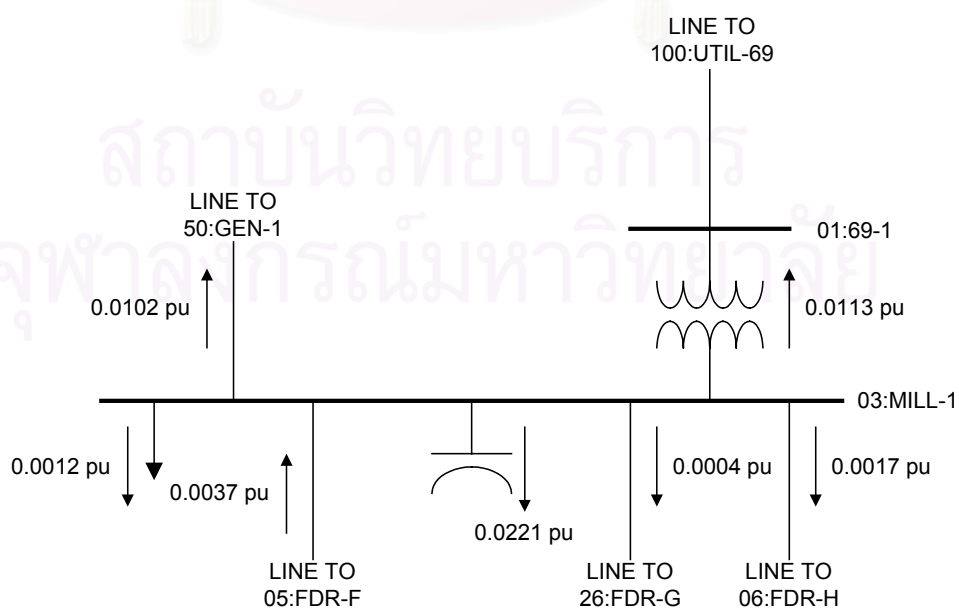
ตารางที่ 5.28 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1

Bus	V ₁ (line-line) kV	V ₅ (line-line)		V ₇ (line-line)		THD _v ที่ คำนวณได้(%)	THD _v จากเอกสาร อ้างอิง [7](%)	ความคลาดเคลื่อน ของ THD _v (%)
		kV	%	kV	%			
100:UTIL-69	69.0000	0.0743	0.11	0.1824	0.26	0.29	0.28	3.57
01:69-1	68.9185	0.0964	0.14	0.2365	0.34	0.37	0.37	0.00
03:MILL-1	13.7241	0.0985	0.72	0.2417	1.76	1.91	1.93	1.04
50:GEN1	13.7310	0.0952	0.69	0.2337	1.70	1.85	1.87	-1.07
51:Aux	0.4778	0.0033	0.69	0.0080	1.68	1.83	1.81	1.10

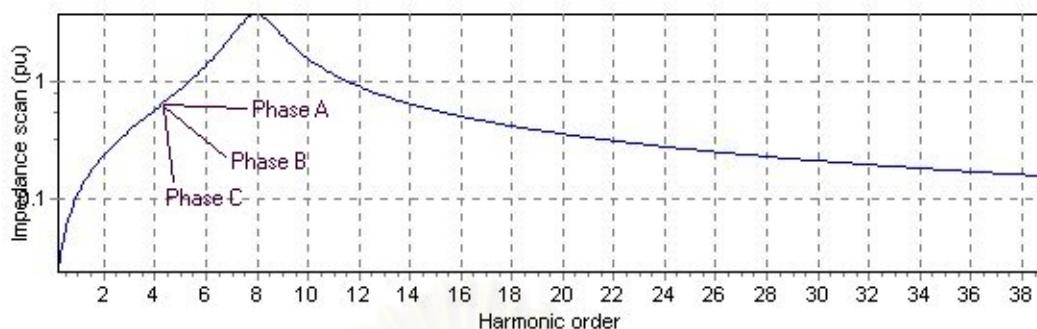
05:FDR F	13.7201	0.0995	0.72	0.2419	1.76	1.92	1.94	-1.03
49:RECT	0.4684	0.0223	4.75	0.0207	4.41	7.83	8.02	-2.37
39:T3 SEC	4.1431	0.0292	0.71	0.0693	1.67	1.82	1.80	1.11
26:FDR G	13.7208	0.0985	0.72	0.2416	1.76	1.91	1.93	1.04
06:FDR H	13.7154	0.0984	0.72	0.2414	1.76	1.91	1.93	1.04
11:T4 SEC	0.4702	0.0034	0.72	0.0082	1.75	1.90	1.90	0.00
19: T7 SEC	2.4027	0.0169	0.70	0.0405	1.69	1.84	1.81	1.66
29:T11 SEC	0.4715	0.0033	0.71	0.0081	1.72	1.87	1.84	1.63



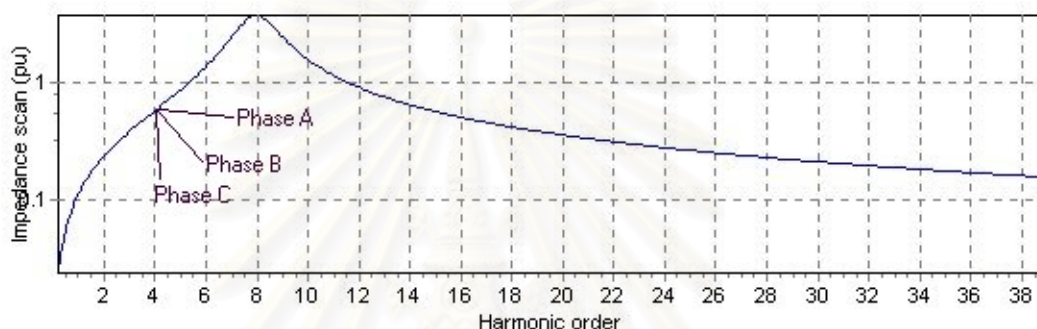
รูปที่ 5.7 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1



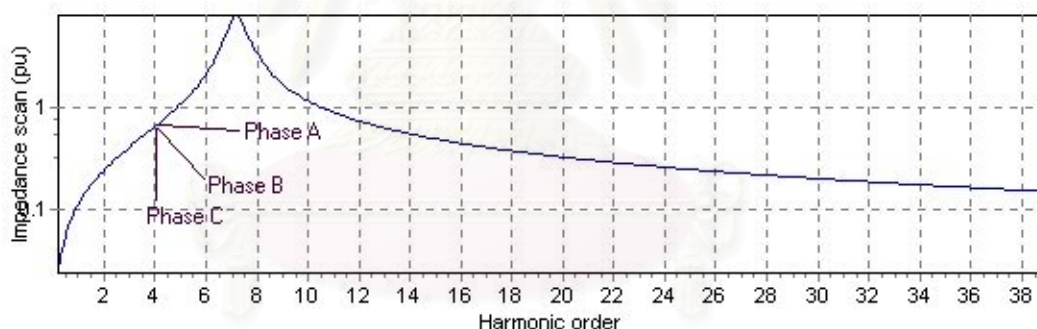
รูปที่ 5.8 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 1



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.9 อิมพีแดนซ์สแกนเมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บิต กรณีที่ 1

(a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก

(b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ

(c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

จากผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ที่ได้ คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยรวมของแรงดันเมื่อเทียบกับผลจากเอกสารอ้างอิง [7] พบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมากโดยความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 3.57 %

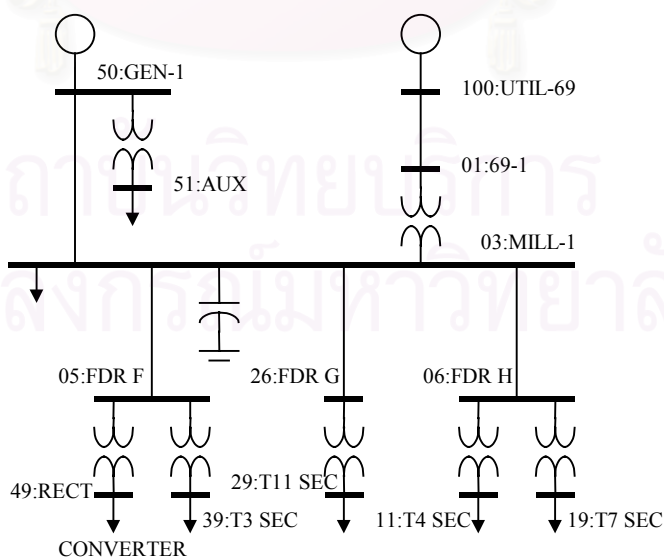
จากผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โฟลว์ทำให้ทราบว่า เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์สแกนที่บัส 03:MILL-1 ทำให้ทราบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่จะทำให้เกิดปัญหา คือ กระแสฮาร์มอนิกส์

ลำดับที่ 7 ผลที่เกิดขึ้นคือ การขยายของกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 7 โดยพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ถูกขยายเป็น 0.0221 pu หรือประมาณ 5.97 เท่าของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ถูกขยายมีค่าสูงขึ้นอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อคาปาซิเตอร์ได้ ส่วนกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ไหลเข้าไปยังระบบการไฟฟ้าก็ถูกขยายเช่นเดียวกันโดยมีค่าเป็น 0.0113 pu หรือประมาณ 3.05 เท่าของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 5.8 ซึ่งก็ต้องพิจารณาด้วยว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าเกินมาตรฐานที่การไฟฟ้ากำหนดหรือไม่ ถ้ามีค่าเกินมาตรฐานที่การไฟฟ้ากำหนดก็ต้องทำการแก้ไขปัญหาโดยการติดตั้งกรองฮาร์มอนิกส์ต่อไป

5.2.2 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 2 (กรณีที่มียอนเวอร์เตอร์ 1 ชุดในระบบภายใต้สภาวะสมดุล)

ก. ข้อมูลของระบบ

ระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.10 และข้อมูลต่างๆจะใช้ข้อมูลเดียวกับกรณีพื้นฐาน ยกเว้น บัส 49:RECT จะไม่มีในระบบแล้วเนื่องจากบัส 05:FDR F มีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้าไปซึ่งบัส 49:RECT ได้ถูกรวมเข้าไปในชุดของคอนเวอร์เตอร์แล้วซึ่งข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ดังตารางที่ 5.29 ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์กรณีของโหลดบัสในโปรแกรมจะเลือกใช้แบบจำลองโหลดแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแบบจำลองวงจร RL การคำนวณของระบบทดสอบนี้จะใช้หลักการของการวิเคราะห์ AC-DC loadflow เนื่องจากระบบมีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้าไปด้วย



รูปที่ 5.10 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

ตารางที่ 5.29 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสขนาด 3.45 MW ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

	Phase A	Phase B	Phase C
Transformer impedances (Yg-Y)	0.197280+j1.183680		
Commutation reactances	0.85	0.85	0.85
Minimum firing angle	20.0 deg		
Nominal voltage	480.00 V		
Operating voltage	554.27 V		

ตารางที่ 5.30 ข้อมูลของโหลดที่บัสต่างๆของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

Bus	P _{load} (kW)	Q _{load} (kVAr)
100:UTIL-69	-	-
01:69-1	-	-
03:MILL-1	2240	2000
50:GEN1	-	-
51:Aux	600	530
05:FDR F	-	-
49:RECT	-	-
39:T3 SEC	1310	1130
26:FDR G	-	-
06:FDR H	-	-
11:T4 SEC	370	330
19: T7 SEC	2800	2500
29:T11 SEC	810	800

ข. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

ผลการคำนวณโหลดโพล์

ผลของแรงดันบัส ผลการไหลของกำลังไฟฟ้า และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แสดงดังในตารางที่ 5.31 ตารางที่ 5.32 และตารางที่ 5.33 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.31 ข้อมูลของแรงดันบัสและกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

(จากผลการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีที่คอนเวอร์เตอร์ในสภาวะสมดุล)

Bus	V _{mag} (p.u.)	δ (deg)	P _{gen} (kW)	Q _{gen} (kVAr)
100:UTIL-69	1.000	0.00	7367	547
01:69-1	0.999	-0.12	-	-
03:MILL-1	0.995	-2.37	-	-
50:GEN1	0.995	-2.36	2000	2103
51:Aux	0.995	-3.51	-	-
05:FDR F	0.994	-2.37	-	-
49:RECT	-	-	-	-
39:T3 SEC	0.993	-4.83	-	-
26:FDR G	0.994	-2.37	-	-
06:FDR H	0.994	-2.37	-	-
11:T4 SEC	0.979	-3.05	-	-

19: T7 SEC	0.999	-4.67	-	-
29:T11 SEC	0.982	-3.94	-	-

ตารางที่ 5.32 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

Sending bus	Receiving bus	Type	Sending end		Receiving end	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
100:UTIL-69	01:69-1	Line	7.368	0.546	-7.360	-0.530
03:MILL-1	50:GEN-1	Line	-1.393	-1.547	1.394	1.548
03:MILL-1	05:FDR F	Line	2.486	1.797	-2.486	-1.797
03:MILL-1	26:FDR G	Line	0.818	0.854	-0.818	-0.854
03:MILL-1	06:FDR H	Line	3.193	3.069	-3.190	-3.067
01:69-1	03:MILL-1	Transformer	7.360	0.530	-7.343	-0.239
50:GEN-1	51:AUX	Transformer	0.604	0.556	-0.600	-0.530
05:FDR F	39:T3 SEC	Transformer	1.324	1.245	-1.310	-1.130
26:FDR G	29:T11 SEC	Transformer	0.818	0.854	-0.810	-0.800
06:FDR H	11:T4 SEC	Transformer	0.371	0.339	-0.370	-0.330
06:FDR H	19: T7 SEC	Transformer	2.819	2.728	-2.800	-2.500
03:MILL-1	-	Capacitor	0.000	-5.934		

ตารางที่ 5.33 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

Phase	Tap ratio (%)	Commutation angle (deg)	Terminal powers	
			MW	MVA _r
a	4.007	5.706	1.161	0.552
b	4.007	5.706	1.161	0.552
c	4.007	5.706	1.161	0.552

จากผลการคำนวณที่ได้จะเป็นกรณีพื้นฐานของกรณีต่อไปในหัวข้อ 5.2.3 และหัวข้อ 5.2.4 ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ระบบในกรณีไม่สมดุล และกรณีของการเกิดการหักล้างกันของกระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic cancellation)

ผลการคำนวณฮาร์โมนิกส์โวลต์

ผลความผิดเพี้ยนของแรงดัน และฮาร์โมนิกส์สเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์แสดงดังในตารางที่ 5.34 และตารางที่ 5.35 ตามลำดับ

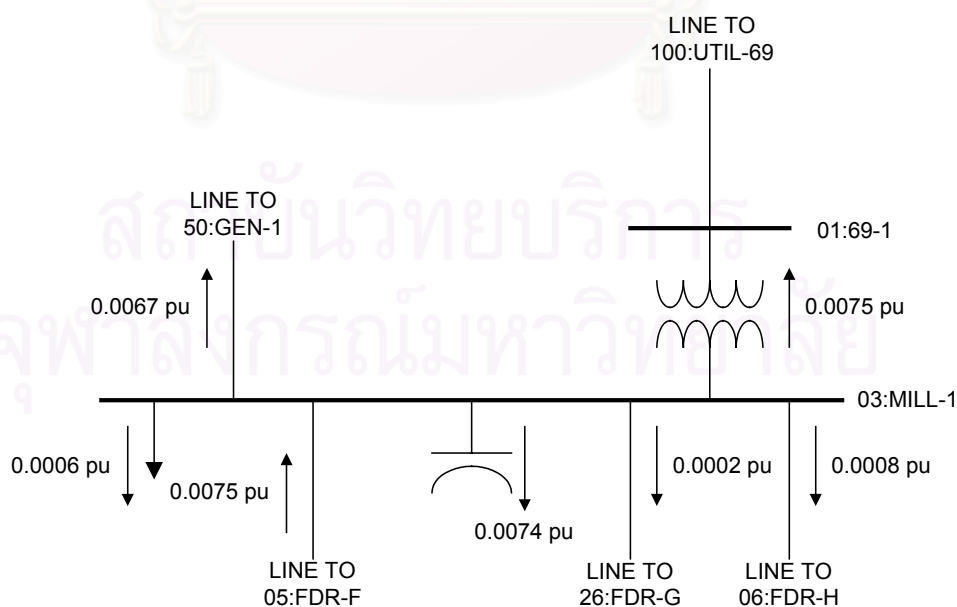
ตารางที่ 5.34 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

Bus	V ₁ (line-line) kV	V ₅ (line-line)		V ₇ (line-line)		THD _v (%)
		kV	%	kV	%	
100:UTIL-69	69.0000	0.0858	0.12	0.2283	0.33	0.36
01:69-1	68.9183	0.1113	0.16	0.2960	0.43	0.46
03:MILL-1	13.7234	0.1137	0.83	0.3025	2.20	2.38
50:GEN1	13.7310	0.1100	0.80	0.2925	2.13	2.30

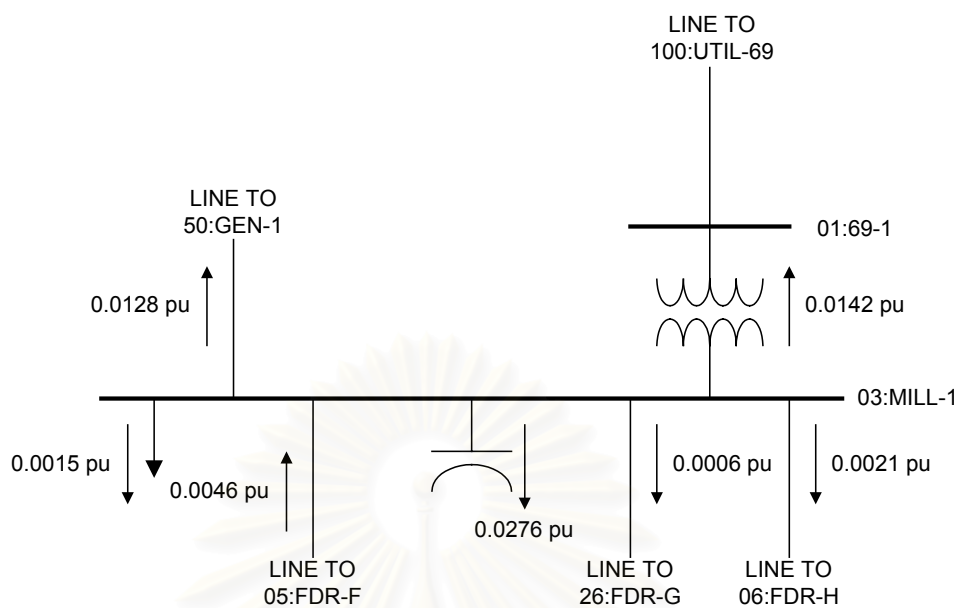
51:Aux	0.4775	0.0038	0.80	0.0100	2.10	2.27
05:FDR F	13.7193	0.1148	0.84	0.3028	2.21	2.39
49:RECT	-	-	-	-	-	-
39:T3 SEC	4.1324	0.0337	0.81	0.0865	2.09	2.27
26:FDR G	13.7201	0.1137	0.83	0.3024	2.20	2.38
06:FDR H	13.7147	0.1136	0.83	0.3022	2.20	2.38
11:T4 SEC	0.4701	0.0039	0.83	0.0103	2.19	2.37
19: T7 SEC	2.3966	0.0194	0.81	0.0506	2.11	2.28
29:T11 SEC	0.4711	0.0039	0.82	0.0101	2.15	2.33

ตารางที่ 5.35 ฮาร์มอนิกสเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

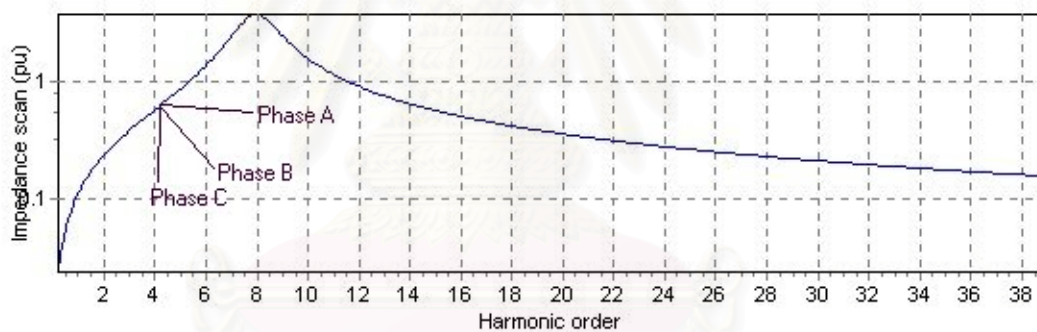
H - order	Percent	Relative Angle (deg)
1	100.00	-28.21
5	19.80	38.96
7	14.01	162.54
11	8.65	-130.32
13	7.17	-6.75
17	5.21	60.36
19	4.52	-176.09
23	3.46	-109.05
25	3.05	14.46
29	2.38	81.40
31	2.10	-155.17
35	1.62	-88.40
37	1.42	34.91



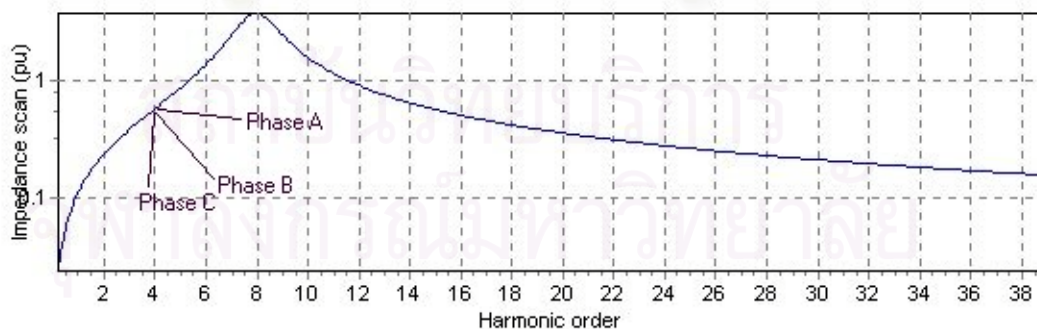
รูปที่ 5.11 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2



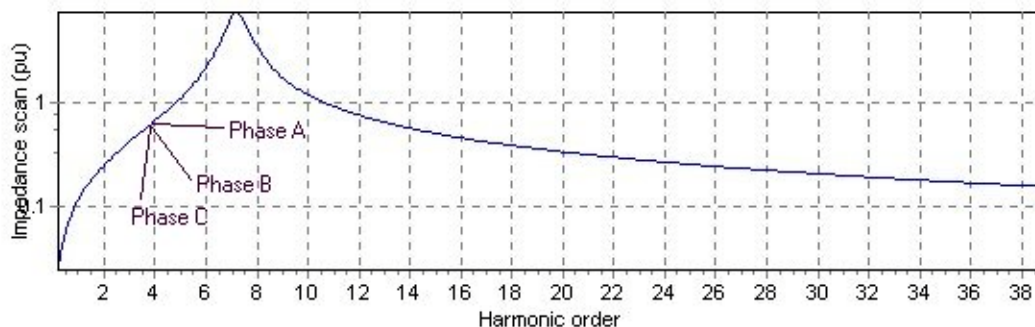
รูปที่ 5.12 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 2

- (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก
- (b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ
- (c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

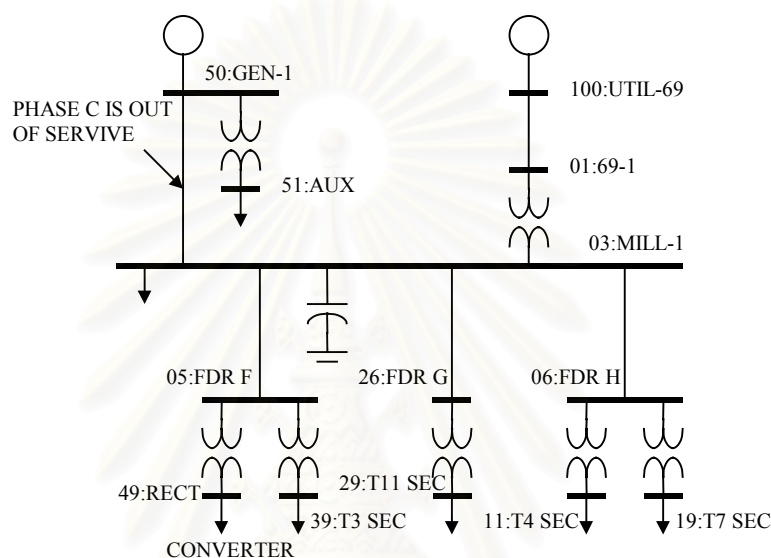
จากผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพลาร์ทำให้ทราบว่า เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์สแกนที่บัส 03:MILL-1 ทำให้ทราบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่จะทำให้เกิดปัญหา คือ กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 เช่นเดียวกับกรณีในหัวข้อ 5.2.1 ผลที่เกิดขึ้นคือ การขยายของกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 7 โดยพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ถูกขยายเป็น 0.0276 pu หรือประมาณ 6 เท่าของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ถูกขยายมีค่าสูงขึ้นอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อคาปาซิเตอร์ได้ ส่วนกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ไหลเข้าไปยังระบบการไฟฟ้าก็ถูกขยายเช่นเดียวกันโดยมีค่าเป็น 0.0142 pu หรือประมาณ 3.09 เท่าของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 5.12

ในกรณีนี้เพื่อต้องการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม จึงทำการวิเคราะห์ระบบเปรียบเทียบโดยการแทนคอนเวอร์เตอร์ชนิดด้วยฮาร์มอนิกส์ไหลดที่ทราบค่าไหลดและฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมซึ่งได้จากข้อมูลของผลของคอนเวอร์เตอร์ที่คำนวณได้จากตารางที่ 5.33 และตารางที่ 5.35 เมื่อทำการคำนวณเปรียบเทียบแล้วพบว่าผลการคำนวณที่ได้มีค่าเท่ากันทั้ง 2 กรณี

5.2.3 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุดในระบบภายใต้สภาวะไม่สมดุล)

ก. ข้อมูลของระบบ

ระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.14 และข้อมูลต่างๆจะใช้ข้อมูลเดียวกับกรณีในหัวข้อ 5.2.2 แต่ระบบมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นเนื่องจากสายเคเบิลระหว่างบัส 50:GEN-1 และ 03:MILL-1 เฟส C ขาดไป



รูปที่ 5.14 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

ข. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

ผลการคำนวณโหลดไฟลว์

ผลของแรงดันบัส ผลของกำลังการผลิต ผลการไหลของกำลังไฟฟ้า และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แสดงดังในตารางที่ 5.36 ถึงตารางที่ 5.39

ตารางที่ 5.36 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)
100:UTIL-69	1.0004	-0.38	1.0004	-120.38	0.9991	119.50
01:69-1	0.9992	-0.48	0.9992	-120.48	0.9972	119.37
03:MILL-1	0.9919	-2.51	0.9919	-122.51	0.9834	116.68
50:GEN1	0.9924	-2.49	0.9924	-122.49	1.0003	118.37
51:Aux	0.9980	-3.62	0.9891	-123.37	0.9974	116.95
05:FDR F	0.9916	-2.51	0.9916	-122.51	0.9831	116.68
49:RECT	-	-	-	-	-	-
39:T3 SEC	0.9845	-4.98	0.9931	-125.26	0.9846	114.44
26:FDR G	0.9917	-2.51	0.9916	-122.51	0.9832	116.68

06:FDR H	0.9913	-2.51	0.9913	-122.51	0.9828	116.68
11:T4 SEC	0.9713	-3.18	0.9794	-123.47	0.9712	116.26
19: T7 SEC	0.9897	-4.82	0.9983	-125.09	0.9898	114.61
29:T11 SEC	0.9730	-4.08	0.9813	-124.36	0.9730	115.35

ตารางที่ 5.37 ข้อมูลกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	MW	MVA _r	MW	MVA _r	MW	MVA _r
100:UTIL-69	6.66	1.10	6.66	1.11	8.79	2.30
50:GEN1	2.70	1.57	2.70	1.57	0.60	0.57

ตารางที่ 5.38 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
100:UTIL-69	01:69-1	A	6.658	1.105	-6.652	-1.092
Line		B	6.660	1.108	-6.654	-1.094
		C	8.791	2.296	-8.779	-2.272
03:MILL-1	50:GEN-1	A	-2.090	-1.015	2.091	1.017
Line		B	-2.092	-1.017	2.093	1.019
		C	0.000	0.000	0.000	0.000
03:MILL-1	05:FDR F	A	2.483	1.812	-2.482	-1.811
Line		B	2.487	1.816	-2.486	-1.816
		C	2.488	1.769	-2.488	-1.768
03:MILL-1	26:FDR G	A	0.817	0.861	-0.817	-0.860
Line		B	0.817	0.861	-0.817	-0.861
		C	0.822	0.842	-0.822	-0.842
03:MILL-1	06:FDR H	A	3.188	3.095	-3.185	-3.094
Line		B	3.188	3.095	-3.185	-3.094
		C	3.203	3.024	-3.201	-3.022
01:69-1	03:MILL-1	A	6.652	1.092	-6.637	-0.849
Transformer		B	6.654	1.094	-6.640	-0.852
		C	8.779	2.272	-8.753	-1.832
50:GEN-1	51:AUX	A	0.606	0.551	-0.604	-0.529
Transformer		B	0.606	0.551	-0.597	-0.527
		C	0.602	0.565	-0.599	-0.534
05:FDR F	39:T3 SEC	A	1.322	1.257	-1.301	-1.133
Transformer		B	1.323	1.257	-1.317	-1.137
		C	1.329	1.227	-1.312	-1.120

26:FDR G	29:T11 SEC	A	0.817	0.860	-0.804	-0.802
Transformer		B	0.817	0.861	-0.815	-0.805
		C	0.822	0.842	-0.812	-0.794
06:FDR H	11:T4 SEC	A	0.371	0.342	-0.367	-0.331
Transformer		B	0.371	0.342	-0.372	-0.332
		C	0.372	0.334	-0.371	-0.327
06:FDR H	19: T7 SEC	A	2.815	2.751	-2.779	-2.506
Transformer		B	2.815	2.752	-2.816	-2.515
		C	2.829	2.688	-2.805	-2.479
03:MILL-1	-	A	0.000	-5.903		
Capacitor		B	0.000	-5.903		
		C	0.000	-5.803		

ตารางที่ 5.39 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

Phase	Tap ratio (%)	Commutation angle (deg)	Terminal powers	
			MW	MVA _r
a	3.443	5.735	1.161	0.555
b	3.443	5.692	1.165	0.560
c	3.443	5.691	1.156	0.540

จากผลการคำนวณพบว่าเมื่อระบบเกิดเหตุการณ์เคเบิลเฟส C ที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 50:GEN-1 และ 03:MILL-1ขาดไป ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงานไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในเฟส C ได้โดยพบว่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงานจ่ายออกมาในแต่ละเฟสเป็นดังนี้ คือ เฟส A จ่าย 2.70 MW เฟส B จ่าย 2.70 MW และเฟส C จ่าย 0.60 MW กำลังไฟฟ้าในเฟส C ที่กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงานไม่สามารถจ่ายได้นี้ ระบบจึงต้องดึงกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้ามาใช้แทนโดยกำลังไฟฟ้าที่รับจากการไฟฟ้าในแต่ละเฟสเป็นดังนี้ คือ เฟส A จ่าย 6.66 MW เฟส B จ่าย 6.66 MW และเฟส C จ่าย 8.79 MW เป็นผลให้แรงดันที่บัสต่างๆของระบบเกิดความไม่สมดุลขึ้นแต่ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากในแต่ละเฟส ทั้งนี้เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่หายไปนเฟส C จากการขาดสายเคเบิลดังกล่าว ไม่ได้ทำให้กำลังไฟฟ้าเฟส C ของระบบขาดไปเพราะระบบจะไปดึงกำลังไฟฟ้าส่วนที่ขาดไปจากการไฟฟ้ามาชดเชย ทำให้ความไม่สมดุลเกิดขึ้นไม่มากนักถ้าพิจารณาที่บัส 03:MILL-1

ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพลาร์

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โพลาร์ คือ ฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 และแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 แสดงดังตารางที่ 5.40 ตารางที่ 5.41 ตารางที่ 5.42 และตารางที่ 5.43 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.40 ฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3 (เปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละเฟสเทียบกับขนาดของกระแสที่ความถี่มูลฐานของเฟสนั้นๆ)

Harmonic #	Phase A		Phase B		Phase C	
	Percent	Relative angle	Percent	Relative angle	Percent	Relative angle
1	100.00	-28.06	100.00	-148.19	100.00	91.66
3	0.30	-84.38	0.55	95.44	0.26	-84.77
5	19.98	39.70	19.47	159.06	19.95	-81.68
7	13.88	163.58	14.23	42.68	13.89	-78.36
9	0.29	106.83	0.54	-73.70	0.25	105.69
11	8.80	-128.69	8.35	-10.08	8.78	108.30
13	7.04	-4.79	7.40	-126.48	7.06	111.58
15	0.27	-62.02	0.50	117.12	0.23	-63.87
17	5.34	62.87	4.94	-179.28	5.33	-61.77
19	4.39	-173.22	4.73	64.31	4.41	-58.55
21	0.25	129.01	0.46	-52.12	0.21	126.55
23	3.58	-105.67	3.22	11.44	3.56	128.08
25	2.93	18.26	3.24	-105.01	2.95	131.20
27	0.22	-40.15	0.40	138.51	0.19	-43.06
29	2.47	85.63	2.16	-157.98	2.46	-42.20
31	1.99	-150.41	2.25	85.50	2.01	-39.25
33	0.18	150.37	0.34	-31.07	0.16	147.26
35	1.70	-83.32	1.44	32.35	1.69	147.27
37	1.34	40.65	1.55	-84.29	1.35	149.98
39	0.15	-19.69	0.27	159.00	0.12	-22.54

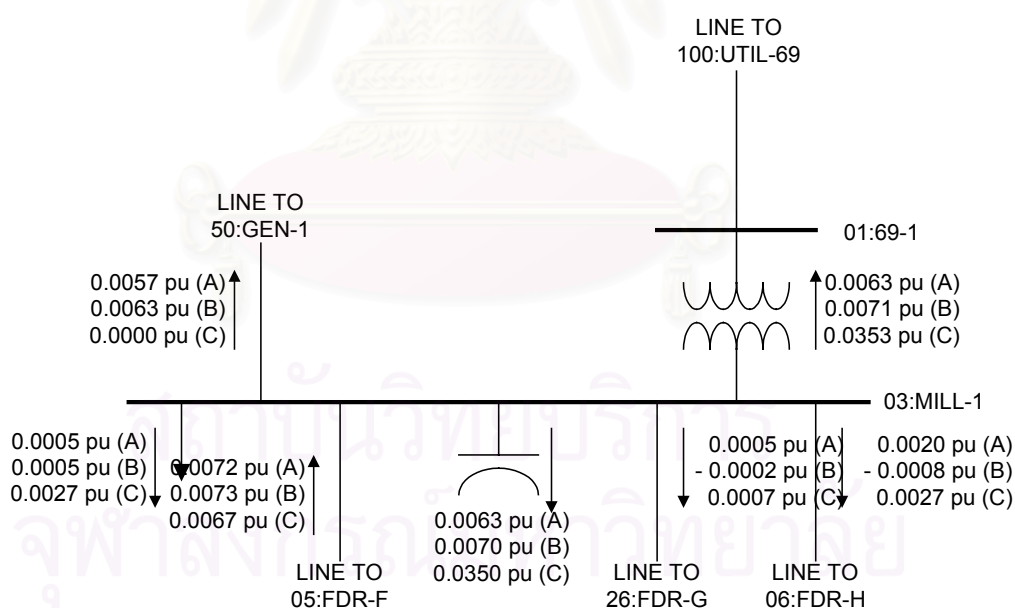
ตารางที่ 5.41 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3 (เปอร์เซ็นต์ของขนาดแรงดันผิดเพี้ยนรวมของแต่ละเฟสเทียบกับขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐานของเฟสนั้นๆ)

Bus	Phase A (%)	Phase B (%)	Phase C (%)
100:UTIL-69	0.41	0.46	0.60
01:69-1	0.53	0.60	0.77
03:MILL-1	2.75	3.07	4.01
50:GEN1	2.65	2.97	0.04
51:Aux	2.01	2.16	1.28
05:FDR F	2.75	3.08	4.01
49:RECT	-	-	-
39:T3 SEC	2.61	2.36	3.00
26:FDR G	2.75	3.07	4.01
06:FDR H	2.75	3.07	4.01

11:T4 SEC	2.70	2.48	3.09
19: T7 SEC	2.62	2.39	3.01
29:T11 SEC	2.66	2.43	3.05

ตารางที่ 5.42 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	pu	%	pu	%	pu	%
100:UTIL-69	0.0011	0.11	0.0012	0.12	0.0059	0.59
01:69-1	0.0014	0.14	0.0015	0.15	0.0076	0.76
03:MILL-1	0.0070	0.70	0.0078	0.78	0.0389	3.96
50:GEN1	0.0067	0.68	0.0075	0.76	0.0000	0.00
51:Aux	0.0068	0.68	0.0069	0.70	0.0013	0.13
05:FDR F	0.0070	0.71	0.0079	0.79	0.0390	3.96
49:RECT	-	-	-	-	-	-
39:T3 SEC	0.0190	1.94	0.0082	0.82	0.0256	2.60
26:FDR G	0.0070	0.70	0.0078	0.78	0.0389	3.96
06:FDR H	0.0070	0.70	0.0078	0.78	0.0389	3.96
11:T4 SEC	0.0192	1.98	0.0082	0.84	0.0259	2.67
19: T7 SEC	0.0192	1.94	0.0082	0.82	0.0259	2.61
29:T11 SEC	0.0190	0.70	0.0082	0.78	0.0257	3.96

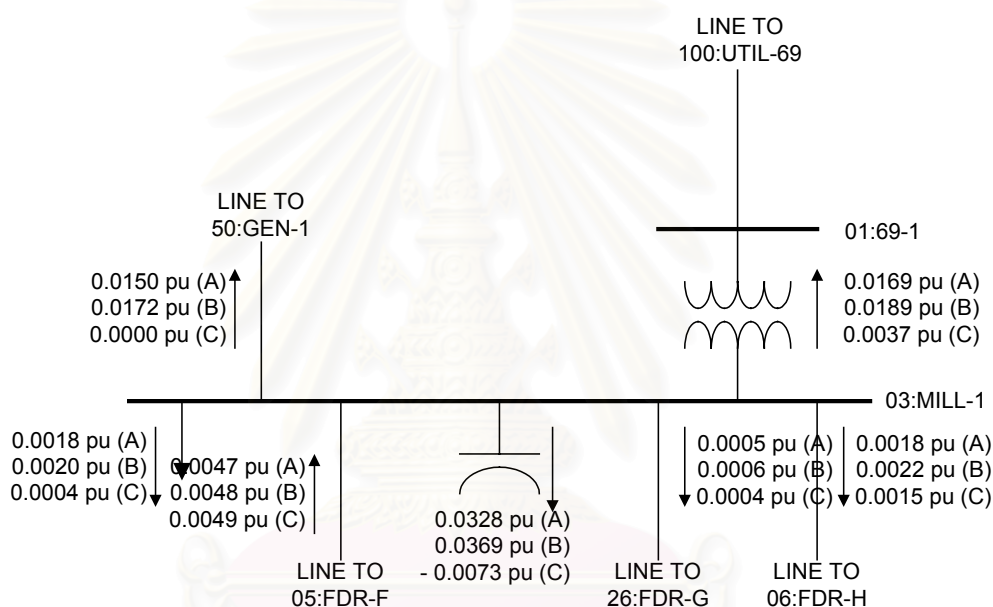


รูปที่ 5.15 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

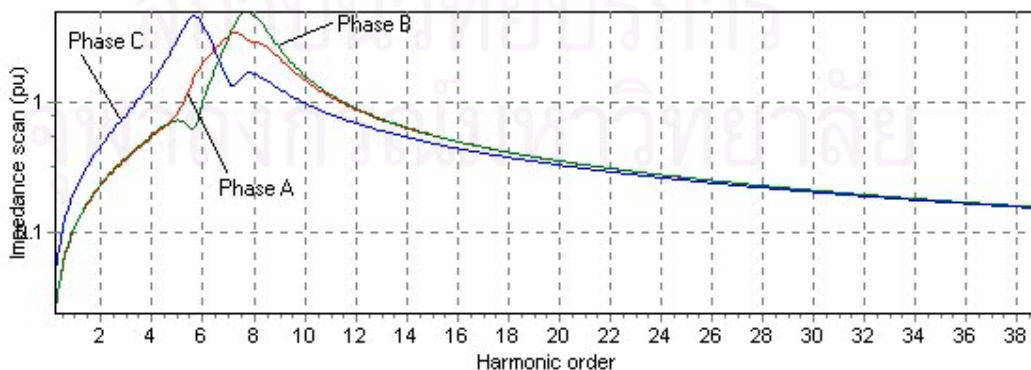
ตารางที่ 5.43 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 7 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	pu	%	pu	%	pu	%
100:UTIL-69	0.0039	0.39	0.0044	0.44	0.0009	0.09
01:69-1	0.0051	0.51	0.0057	0.57	0.0011	0.11

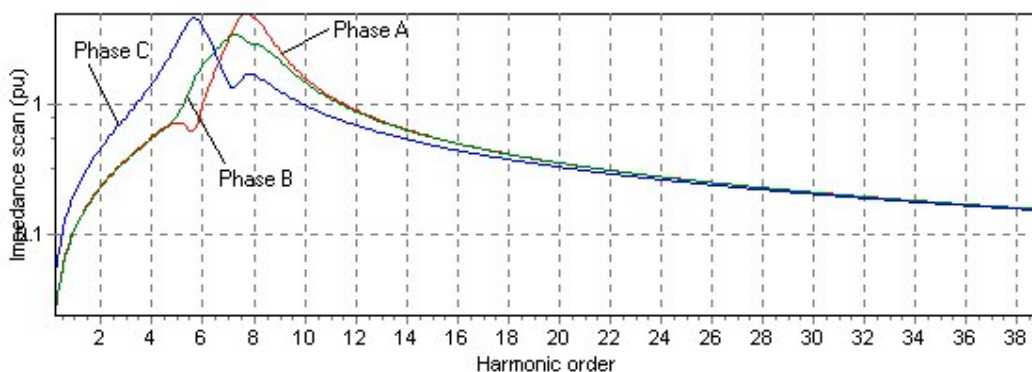
03:MILL-1	0.0261	2.63	0.0292	2.95	0.0058	0.59
50:GEN1	0.0252	2.54	0.0283	2.85	0.0004	0.04
51:Aux	0.0186	1.87	0.0200	2.02	0.0127	1.27
05:FDR F	0.0261	2.63	0.0293	2.95	0.0057	0.58
49:RECT	-	-	-	-	-	-
39:T3 SEC	0.0170	1.73	0.0218	2.20	0.0144	1.46
26:FDR G	0.0261	2.63	0.0292	2.95	0.0058	0.59
06:FDR H	0.0261	2.63	0.0292	2.95	0.0058	0.59
11:T4 SEC	0.0176	1.81	0.0226	2.31	0.0149	1.53
19: T7 SEC	0.0172	1.74	0.0221	2.22	0.0146	1.47
29:T11 SEC	0.0172	1.77	0.0222	2.26	0.0146	1.50



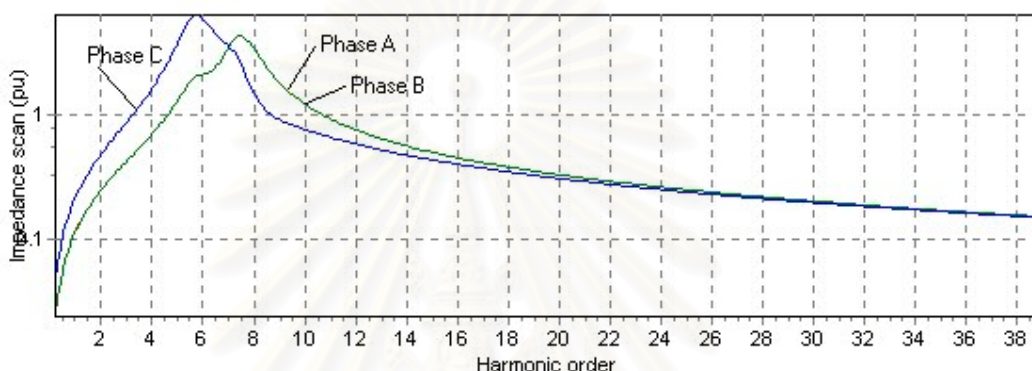
รูปที่ 5.16 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 3



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.17 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1 ของระบบทดสอบ 13 บัสกรณีที่ 3

- (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก
 (b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ
 (c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

จากผลการคำนวณที่ได้พบว่าสิ่งที่เกิดขึ้นที่น่าสังเกต คือ เมื่อพิจารณาในฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ซึ่งจากการคำนวณในหัวข้อที่ 5.2.2 ซึ่งเป็นกรณีพื้นฐาน(ระบบสมดุล)ของกรณีนี้จะไม่เกิดการขยายหรือไม่เกิดเรโซแนนซ์ เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากกราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบจะเห็นว่าจุดเรโซแนนซ์จะเกิดที่ประมาณฮาร์มอนิกส์ที่ 7 แต่เมื่อความไม่สมดุลดังกล่าวเกิดขึ้นผลที่ตามมา คือ การเกิดเรโซแนนซ์ของคาปาซิเตอร์กับระบบการไฟฟ้าในเฟส C ส่วนในเฟส A และเฟส B จะไม่เกิดเรโซแนนซ์ เมื่อพิจารณาฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ในเฟส C มีค่าเป็น 0.0350 pu หรือประมาณ 5.22 เท่าของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 เฟส C ที่มาจากคอนเวอร์เตอร์ และกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ที่ไหลเข้าระบบการไฟฟ้าในเฟส C มีค่าเป็น 0.0353 pu หรือประมาณ 5.27 เท่าของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 เฟส C ที่มาจากคอนเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 5.15 จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์แกนของระบบในรูปที่ 5.17(b) โดยเมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ซึ่งองค์ประกอบของ

กระแสส่วนใหญ่เป็นกระแสลำดับลบ พบว่าจากกราฟระบบจะเกิดเรโซแนนซ์ในเฟส C ส่วนเฟส A และ B จะไม่เกิดเรโซแนนซ์ ซึ่งสัมพันธ์กับผลการคำนวณ

ส่วนผลที่เกิดกับฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่จะเกิดเรโซแนนซ์เมื่อพิจารณาจากกราฟอิมพีแดนซ์แกน โดยกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ในแต่ละเฟสมีค่าเป็น 0.0328 pu (A) 0.0369 pu (B) และ 0.0073 pu (C) หรือประมาณ 6.98 เท่า (A) 7.69 เท่า (B) และ 1.49 เท่า (C) ของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ตามลำดับเฟสที่มาจากคอนเวอร์เตอร์ซึ่งพบว่าเฟสที่เกิดเรโซแนนซ์อย่างชัดเจน คือ เฟส A และเฟส B จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์แกนของระบบในรูปที่ 5.17(a) โดยเมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ซึ่งองค์ประกอบของกระแสส่วนใหญ่เป็นกระแสลำดับบวก พบว่าจากกราฟระบบจะเกิดเรโซแนนซ์ในเฟส A และ B ส่วนเฟส C จะไม่เกิดเรโซแนนซ์ ซึ่งสัมพันธ์กับผลการคำนวณ

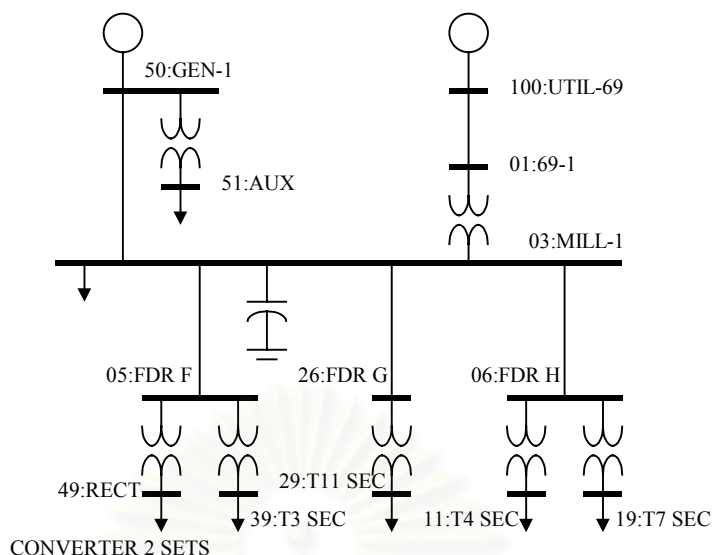
การเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ดังกล่าวเป็นการเกิดเรโซแนนซ์ในสภาวะระบบไม่สมดุลซึ่งเกิดในเฉพาะบางเฟสเท่านั้น ไม่เหมือนกับกรณีที่ระบบสมดุลที่จะเกิดเหมือนกันทั้ง 3 เฟส และการเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไม่สมดุลนั้นสามารถทราบได้จากพิจารณากราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบ

เพื่อต้องการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม จึงทำการวิเคราะห์ระบบเปรียบเทียบโดยการแทนคอนเวอร์เตอร์ยูนิต์ด้วยฮาร์มอนิกส์โหนดที่ทราบค่าโหนดและฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมซึ่งได้จากข้อมูลของผลของคอนเวอร์เตอร์ที่คำนวณได้จากตารางที่ 5.39 และตารางที่ 5.40 เมื่อทำการคำนวณเปรียบเทียบแล้วพบว่าผลการคำนวณที่ได้มีค่าเท่ากันทั้ง 2 กรณี

5.2.4 ระบบ 13 บัส กรณีที่ 4 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุดในระบบภายใต้สภาวะสมดุล)

ก. ข้อมูลของระบบ

ระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.18 และข้อมูลต่างๆจะใช้ข้อมูลเดียวกับกรณีในหัวข้อ 5.2.2 โดยในกรณีนี้มีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้าไปในระบบ 2 ชุดที่บัส 05:FDR-F ซึ่งกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวจะเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ในหัวข้อที่ 5.2.2 คือ ตัวละ 1.725 MW ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุดนี้มีการต่อหม้อแปลงไม่เหมือนกันคือ ชุดแรกมีการต่อหม้อแปลงแบบวาย-วาย และอีกชุดหนึ่งมีการต่อหม้อแปลงแบบวาย-เดลตา ทั้งนี้เพื่อให้เห็นผลของการหักล้างกันของกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 5, 7, 17, 19, ... คือ จะมีลักษณะเป็นแบบคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ผลที่ได้คือการลดลงของกระแสฮาร์มอนิกส์, ความผิดเพี้ยนของแรงดันลดลง เป็นต้น



รูปที่ 5.18 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4

ข. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

ผลการคำนวณโหลดไฟลว์

ผลของแรงดันบัส ผลของกำลังการผลิต ผลการไหลของกำลังไฟฟ้า และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แสดงดังตารางที่ 5.44 ถึงตารางที่ 5.46 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.44 ข้อมูลของแรงดันบัสและกำลังการผลิตของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4 (จากผลการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะสมดุล)

Bus	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	P_{gen} (kW)	Q_{gen} (kVAr)
100:UTIL-69	1.000	0.00	7363	543
01:69-1	0.999	-0.12	-	-
03:MILL-1	0.995	-2.37	-	-
50:GEN1	0.995	-2.36	2000	2040
51:Aux	0.995	-3.51	-	-
05:FDR F	0.994	-2.37	-	-
49:RECT	-	-	-	-
39:T3 SEC	0.993	-4.83	-	-
26:FDR G	0.994	-2.37	-	-
06:FDR H	0.994	-2.37	-	-
11:T4 SEC	0.979	-3.05	-	-
19: T7 SEC	0.999	-4.66	-	-
29:T11 SEC	0.982	-3.94	-	-

ตารางที่ 5.45 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4

Sending bus	Receiving bus	Type	Sending end		Receiving end	
			MW	MVAr	MW	MVAr
100:UTIL-69	01:69-1	Line	7.363	0.544	-7.355	-0.528

03:MILL-1	50:GEN-1	Line	-1.394	-1.484	1.394	1.485
03:MILL-1	05:FDR F	Line	2.480	1.732	-2.480	-1.732
03:MILL-1	26:FDR G	Line	0.818	0.854	-0.818	-0.854
03:MILL-1	06:FDR H	Line	3.193	3.069	-3.190	-3.067
01:69-1	03:MILL-1	Transformer	7.355	0.528	-7.338	-0.237
50:GEN-1	51:AUX	Transformer	0.604	0.556	-0.600	-0.530
05:FDR F	39:T3 SEC	Transformer	1.324	1.245	-1.310	-1.130
26:FDR G	29:T11 SEC	Transformer	0.818	0.854	-0.810	-0.800
06:FDR H	11:T4 SEC	Transformer	0.371	0.339	-0.370	-0.330
06:FDR H	19: T7 SEC	Transformer	2.819	2.728	-2.800	-2.500
03:MILL-1	-	Capacitor	0.000	-5.934		

ตารางที่ 5.46 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุดของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4

Name	Tap ratio (%)	Commutation angle (deg)	Terminal powers	
			MW	MVA _r
Cv1	6.651	3.050	0.578	0.243
Cv2	6.651	3.050	0.578	0.243

จากผลการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับผลโหนดโพลาร์ของกรณีพื้นฐาน (หัวข้อ 5.2.2) พบว่าผลที่คำนวณได้ทั้งผลของแรงดันบัสและผลการไหลของกำลังไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพลาร์

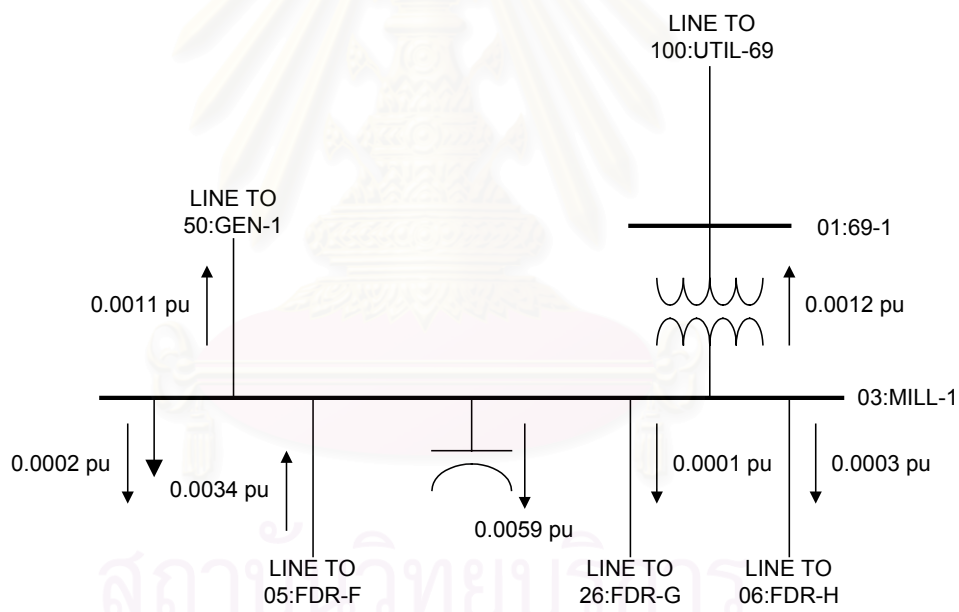
ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โพลาร์ คือ ฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์, ความผิดเพี้ยนของแรงดัน, แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 11 และแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 13 แสดงดังในตารางที่ 5.47 และ 5.48 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.47 ฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4

H - order	Converter No 1 (Wye - Wye)		Converter No 2 (Wye - Delta)	
	Percent	Relative Angle (deg)	Percent	Relative Angle (deg)
1	100.00	-25.63	100.00	-25.63
5	19.94	51.87	19.94	-128.13
7	14.21	-179.38	14.21	0.62
11	8.96	-101.89	8.96	-101.89
13	7.54	26.85	7.54	26.85
17	5.68	104.35	5.68	-75.66
19	5.04	-126.91	5.04	53.09
23	4.08	-49.42	4.08	-49.43
25	3.71	79.32	3.71	79.32
29	3.12	156.80	3.12	-23.20

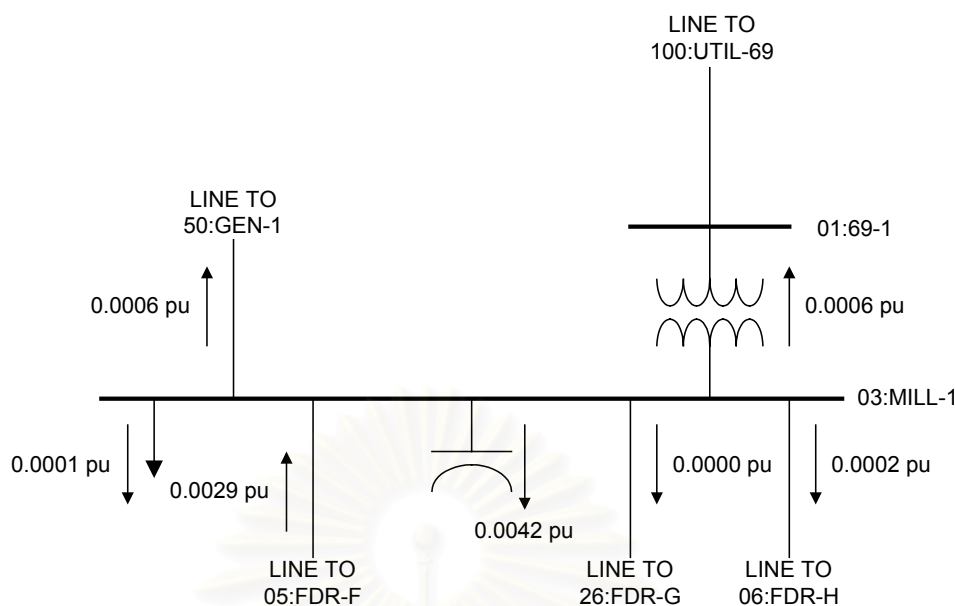
ตารางที่ 5.48 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4

Bus	V _l (line-line) kV	V ₁₁ (line-line)		V ₁₃ (line-line)		THD _v (%)
		kV	%	kV	%	
100:UTIL-69	69.0000	0.0310	0.04	0.0185	0.03	0.05
01:69-1	68.9184	0.0402	0.06	0.0240	0.03	0.07
03:MILL-1	13.7236	0.0411	0.30	0.0245	0.18	0.35
50:GEN1	13.7310	0.0397	0.29	0.0237	0.17	0.34
51:Aux	0.4775	0.0013	0.28	0.0008	0.16	0.33
05:FDR F	13.7195	0.0400	0.29	0.0234	0.17	0.34
49:RECT	-	-	-	-	-	-
39:T3 SEC	4.1325	0.0107	0.26	0.0060	0.14	0.30
26:FDR G	13.7203	0.0411	0.30	0.0245	0.18	0.35
06:FDR H	13.7149	0.0410	0.30	0.0244	0.18	0.35
11:T4 SEC	0.4701	0.0014	0.30	0.0008	0.18	0.35
19: T7 SEC	2.3966	0.0065	0.27	0.0037	0.16	0.31
29:T11 SEC	0.4711	0.0013	0.30	0.0008	0.16	0.33



รูปที่ 5.19 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1

ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4



รูปที่ 5.20 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 13 เมื่อพิจารณาที่บัส 03:MILL-1

ของระบบทดสอบ 13 บัส กรณีที่ 4

จากผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ฟูลวาที้ได้ เมื่อพิจารณาฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุดพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 5, 7, 17, 19, ... มีทิศทางตรงกันข้าม และกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 11, 13, 23, 25, ... มีทิศทางเดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาที่บัส 05:FDR-F ซึ่งเป็นเทอร์มินัลบัสของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุด กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่มีทิศทางตรงกันข้ามกันจะหักล้างกัน และกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่มีทิศทางเดียวกันจะเสริมกัน นั่นคือกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 5, 7, 17, 19, ... จะไม่มี ซึ่งจะมีแต่กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 11, 13, 23, 25, ... ซึ่งเป็นคุณลักษณะของคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ทำให้ผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์ในระบบลดลงเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ทำให้เกิดปัญหา คือ กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 และลำดับที่ 7 วิธีนี้ก็คือ การทำ Harmonic cancellation โดยการใช้นัดการ Phase – shifting ของหม้อแปลง

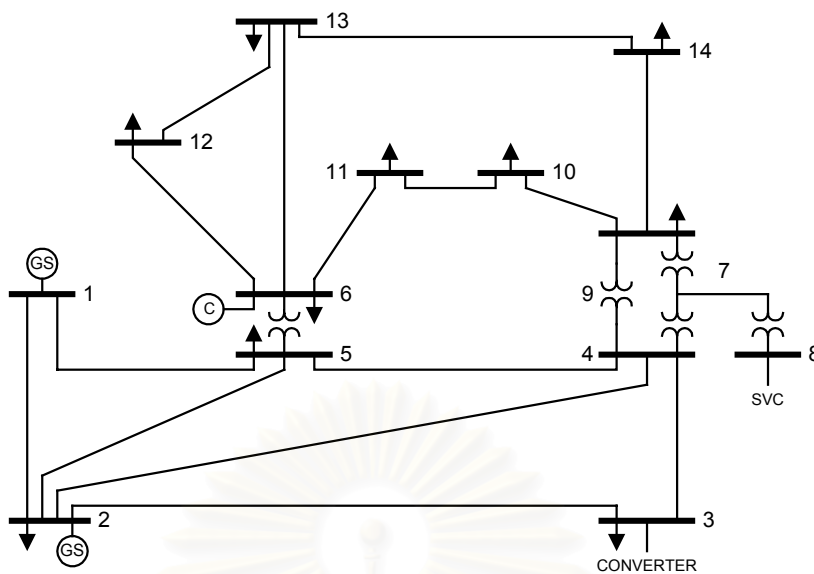
ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่เกิดขึ้นในกรณีนี้เมื่อเทียบกับผลความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของกรณีพื้นฐานในหัวข้อที่ 5.2.2 พบว่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันมีค่าลดลงไปมาก คือ ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันมีค่าไม่ถึง 0.4 % ในแต่ละบัสซึ่งน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ที่ได้ผล

เพื่อต้องการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม จึงทำการวิเคราะห์ระบบเปรียบเทียบโดยการแทนคอนเวอร์เตอร์ชนิดด้วยฮาร์มอนิกส์โหลดที่ทราบค่าโหลดและฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมซึ่งได้จากข้อมูลของผลของคอนเวอร์เตอร์ที่คำนวณได้จากตารางที่ 5.46 และตารางที่ 5.47 เมื่อทำการคำนวณเปรียบเทียบแล้วพบว่าผลการคำนวณที่ได้มีค่าเท่ากันทั้ง 2 กรณี

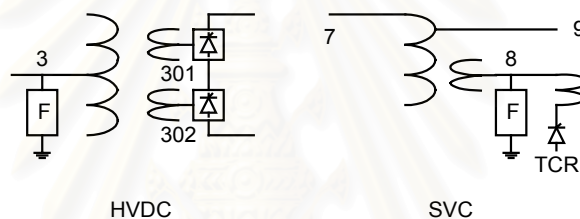
5.3 ระบบ 14 บัส

ระบบ IEEE 14 บัสตาม [7] ระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ 3 ชุด คือ HVDC แบบ 6 พัลส์ที่บัส 3 จำนวน 2 ชุด และ SVC ที่บัส 8 จำนวน 1 ชุด (รูปที่ 5.21) โดยนำระบบนี้มาวิเคราะห์ใน 3 กรณี คือ กรณีพื้นฐาน ,กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบ และกรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบภายใต้สภาวะไม่สมดุล

1. แบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าและสายเคเบิลใช้แบบจำลอง PI ปกติ
2. ในกรณีการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่มูลฐาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกจำลองเป็น Slack หรือ PV bus และสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โพลาร์ถูกจำลองเป็น Subtransient reactances โดยในระบบนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเป็น 0.25 pu.
3. หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจำลองโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ Short-circuit และค่าแทปของหม้อแปลงทุกตัวตั้งไว้ที่ 1.0 pu
4. ในกรณีการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่มูลฐาน โหลดบัลลิสต์ถูกแทนด้วยกำลังไฟฟ้าคงที่ และในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โพลาร์จะจำลองด้วยแบบจำลองของโหลดแบบที่ 3 (ในบทที่ 2)
5. ตัวกรองฮาร์มอนิกส์จำลองเป็นฮาร์มอนิกส์อิมพีแดนซ์ขนาน โดยตัวกรองฮาร์มอนิกส์ทั้งหมดเป็นชนิดตัวกรองแบบความถี่เดียว (Single-tuned type)
6. HVDC แบบ 6 พัลส์ที่บัส 3 จำนวน 2 ชุด ในกรณีการวิเคราะห์โหลดโพลาร์จะถูกแทนด้วยโหลดบัลลิสต์คงที่ และในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โพลาร์จะพิจารณาเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ซึ่งข้อมูลของฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมในกรณีพื้นฐานได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.50 ซึ่งขนาดและมุมเฟสจะต้องทำการปรับสเกลและเลื่อนมุมเฟสไปโดยเทียบจากผลของโหลดโพลาร์
7. SVC ในกรณีนี้จะจำลองในลักษณะเดียวกับ HVDC



รูปที่ 5.21 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1



รูปที่ 5.22 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

ตารางที่ 5.49 ข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1 (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	
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
Xfmr (Y-Y)	3	301	0.00000	0.02800	0.00000
Xfmr (Y-Y)	3	302	0.00000	0.02800	0.00000

ตารางที่ 5.50 ข้อมูลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

H-order	Six-Pulse HVDC		Delta Connected TCR	
	Mag (pu)	Angle (deg)	Mag (pu)	Angle (deg)
1	1.0000	-49.56	1.0000	46.92
5	0.1941	-67.77	0.0702	-124.40
7	0.1309	11.90	0.0250	-29.87
11	0.0758	-7.13	0.0136	-23.75
13	0.0586	68.57	0.0075	71.50
17	0.0379	46.53	0.0062	77.12
19	0.0329	116.46	0.0032	173.43
23	0.0226	87.47	0.0043	178.02
25	0.0241	159.32	0.0013	-83.45
29	0.0193	126.79	0.0040	-80.45

ในการวิเคราะห์จะนำระบบนี้มาวิเคราะห์เป็น 2 กรณี คือ

- ระบบ 14 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐาน)
- ระบบ 14 บัส กรณีที่ 2 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบ)
- ระบบ 14 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบภายใต้สภาวะไม่สมดุล)

5.3.1 ระบบ 14 บัส กรณีที่ 1 (กรณีพื้นฐาน)

เป็นกรณีที่นำมาจาก [7] ระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.21 และข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆในระบบแสดงในตารางที่ 5.49 และข้อมูลฮาร์มอนิกสเปคตรัมของ HVDC และ SVC แสดงในตารางที่ 5.50

ผลการคำนวณโหลดโฟลว์

ผลของแรงดันบัส ผลของกำลังการผลิต และผลการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 5.51 ถึงตารางที่ 5.53 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.51 ข้อมูลโหลด, และแรงดันบัสของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1 (จากผลการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีพื้นฐาน)

Bus #	Nominal voltage (kV)	P load (kW)	Q load (kVAr)	ผลจากโปรแกรม		ผลจากเอกสารอ้างอิง	
				Voltage (pu)	Angle (deg)	Voltage (pu)	Angle (deg)
1	230	0	0	1.0600	0.00	1.0600	0.00
2	230	0	0	1.0450	-5.68	1.0450	-5.68
3	230	0	0	1.0427	-15.30	1.0427	-15.30
301	35.4	59,505	3,363	1.0417	-16.18	1.0417	-16.18
302	35.4	59,505	3,363	1.0417	-16.18	1.0417	-16.18
4	230	47,790	-3,900	1.0282	-11.41	1.0282	-11.41
5	230	7,599	1,599	1.0337	-9.82	1.0337	-9.82
6	230	0	0	1.0700	-15.87	1.0700	-15.87
7	230	0	0	1.0193	-14.47	1.0193	-14.47
8	13.8	0	12,900	1.0209	-14.49	1.0209	-14.49
9	115	29,499	16,599	1.0147	-16.09	1.0147	-16.09
10	115	9,000	5,799	1.0168	-16.33	1.0168	-16.33
11	115	3,501	1,800	1.0394	-16.21	1.0394	-16.21
12	115	6,099	1,599	1.0528	-16.72	1.0528	-16.72
13	115	13,500	5,799	1.0458	-16.73	1.0458	-16.73
14	115	14,901	5,001	1.0154	-17.39	1.0154	-17.39

ตารางที่ 5.52 ข้อมูลกำลังการผลิตของระบบทดสอบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

Bus	Bus type	Voltage setting (pu)	ผลที่ได้จากโปรแกรม		ผลจากเอกสารอ้างอิง	
			Pgen (MW)	Qgen (MVar)	Pgen (MW)	Qgen (MVar)
1	Slack	1.0600	261.68	-28.54	261.68	-28.63
2	PV	1.0450	18.30	5.76	18.30	5.85
6	PV	1.0700	-11.20	44.19	-11.20	44.20

ตารางที่ 5.53 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

Sending bus	Receiving bus	Type	Sending end		Receiving end	
			MW	MVar	MW	MVar
4	7	Xfmr (Y-Y)	26.773	5.108	-26.773	-3.639
4	9	Xfmr (Y-Y)	15.297	3.116	-15.297	-1.833
5	6	Xfmr (Y-Y)	46.655	-12.517	-46.655	17.980
6	11	Line	9.077	12.128	-8.887	-11.730
6	12	Line	8.087	3.364	-8.005	-3.192
6	13	Line	18.290	10.719	-18.031	-10.207
7	8	Xfmr (Y-Y)	0.245	-0.946	-0.245	0.948
7	9	Xfmr (Y-Y)	26.528	4.585	-26.528	-3.818
9	10	Line	3.720	-3.880	-3.711	3.904
9	14	Line	8.607	-0.549	-8.597	0.744
10	11	Line	-5.289	-9.703	5.386	9.930
12	13	Line	1.906	1.593	-1.893	-1.582

13	14	Line	6.424	5.991	-6.304	-5.745
9	0	Capacitor	0.000	-6.518		
1	2	Line	178.053	-25.195	-172.503	36.300
1	5	Line	83.629	-3.342	-80.266	11.830
2	3	Line	89.109	-14.605	-85.629	24.495
2	4	Line	58.743	-8.417	-56.885	10.034
2	5	Line	42.951	-7.522	-41.972	6.852
3	4	Line	-33.401	21.506	34.426	-22.602
4	5	Line	-67.401	8.244	67.985	-7.764
8	0	Filter 2nd	0.089	-4.195		
8	0	Filter 5th	0.054	-3.274		
8	0	Filter 7th	0.052	-3.209		
8	0	Filter 11th	0.051	-3.170		
3	0	Filter 11th	0.010	-27.280		
3	0	Filter 11th	0.010	-27.280		
3	301	Xfmr (Y-Y)	59.505	4.279	-59.505	-3.363
3	302	Xfmr (Y-Y)	59.505	4.280	-59.505	-3.363

จากผลการคำนวณโหลดไฟลท์ที่ได้จากโปรแกรมเมื่อเทียบกับผลโหลดไฟลท์ของเอกสารอ้างอิงพบว่าผลของแรงดันบัสทั้งขนาดและมุมเฟสมีค่าเท่ากัน ส่วนผลของกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าค่า MVar มีความคลาดเคลื่อนไปจากเอกสารอ้างอิงแต่ไม่มากนักทั้งนี้อาจเนื่องจากการคำนวณที่ไม่เหมือนกันในการหาค่ากำลังการผลิต โดยโปรแกรมนี้อาจจะคำนวณกำลังไฟฟ้าที่บัสภายนอก(External bus)ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์ไฟลท์

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ไฟลท์ คือ แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 11 และความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันแสดงดังในตารางที่ 5.54

ตารางที่ 5.54 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

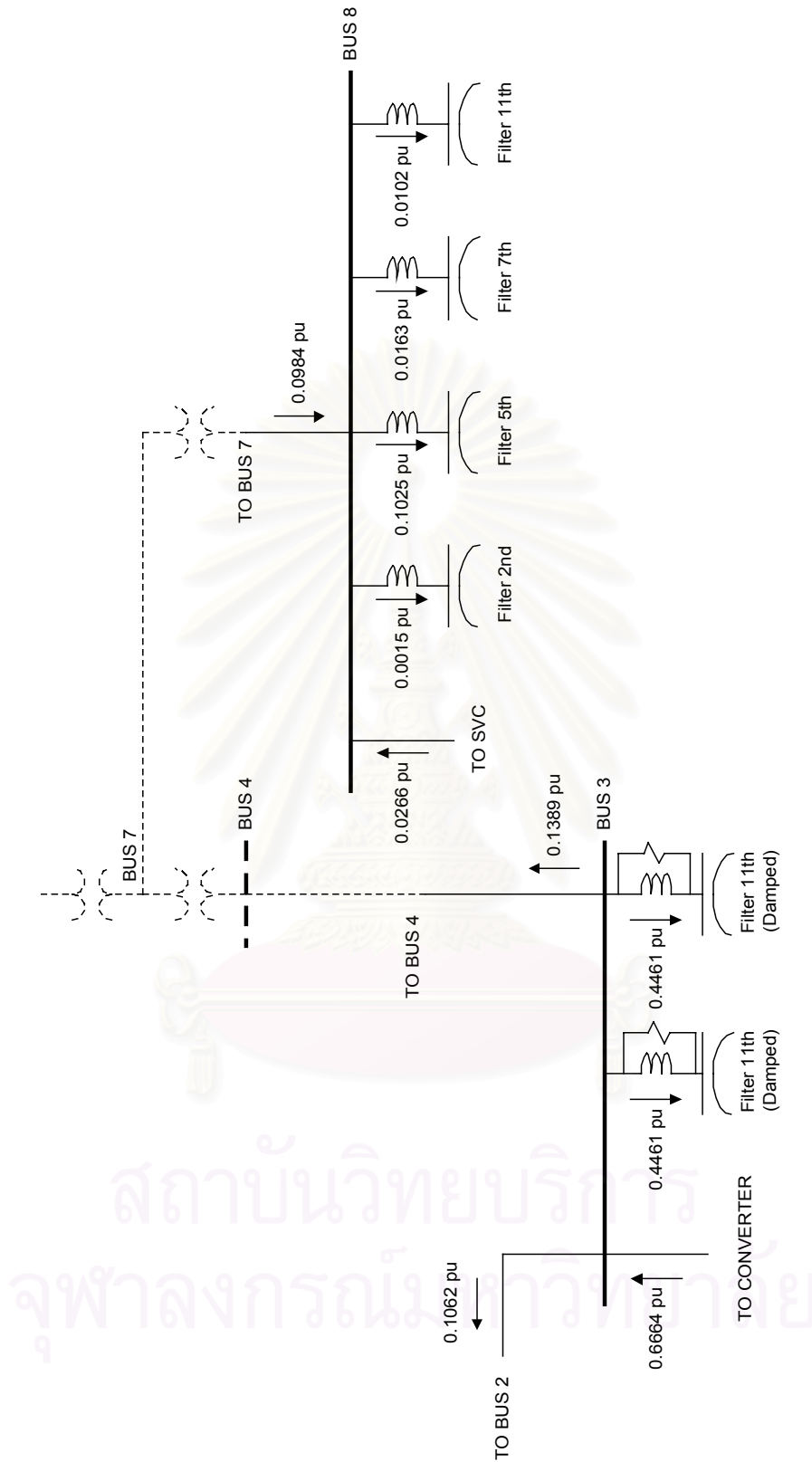
Bus	V5		V7		V11	
	pu	%	pu	%	pu	%
1	0.0476	4.49	0.0198	1.87	0.0058	0.55
2	0.0542	5.19	0.0214	2.05	0.0053	0.51
3	0.0988	9.48	0.0296	2.84	0.0028	0.26
301	0.0834	8.01	0.0150	1.44	0.0106	1.02
302	0.0834	8.01	0.0150	1.44	0.0106	1.02
4	0.0551	5.36	0.0205	1.99	0.0041	0.40
5	0.0521	5.04	0.0204	1.98	0.0050	0.48
6	0.0241	2.26	0.0093	0.87	0.0024	0.22
7	0.0263	2.58	0.0103	1.01	0.0030	0.29
8	0.0179	1.76	0.0055	0.54	0.0009	0.09

9	0.0277	2.73	0.0114	1.12	0.0039	0.39
10	0.0260	2.56	0.0105	1.03	0.0034	0.34
11	0.0246	2.36	0.0096	0.93	0.0028	0.27
12	0.0229	2.18	0.0087	0.82	0.0022	0.21
13	0.0228	2.18	0.0086	0.82	0.0022	0.21
14	0.0236	2.33	0.0092	0.90	0.0027	0.27

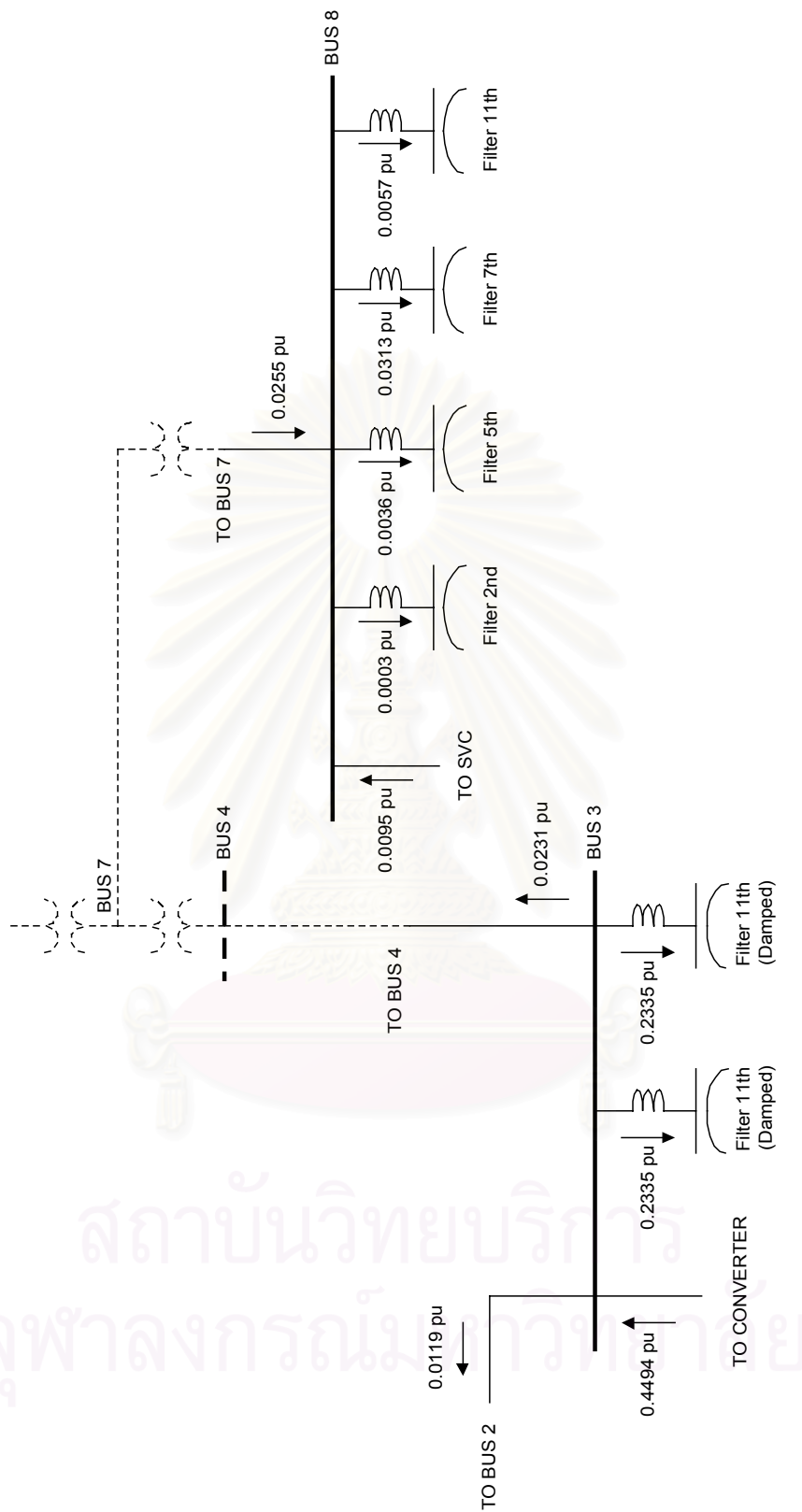
ตารางที่ 5.55 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

Bus	THDv (%) ที่ได้จากโปรแกรม	THDv (%) จากเอกสารอ้างอิง	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	4.93	5.30	-6.98
2	5.61	6.11	-8.18
3	10.02	10.10	-0.79
301	9.05	9.17	-1.31
302	9.05	9.17	-1.31
4	5.74	5.87	-2.21
5	5.46	5.70	-4.21
6	2.43	2.47	-1.62
7	2.79	2.82	-1.06
8	1.85	1.87	-1.07
9	2.99	3.00	-0.33
10	2.78	2.79	-0.36
11	2.56	2.57	-0.39
12	2.34	2.36	-0.85
13	2.34	2.35	-0.43
14	2.51	2.52	-0.40

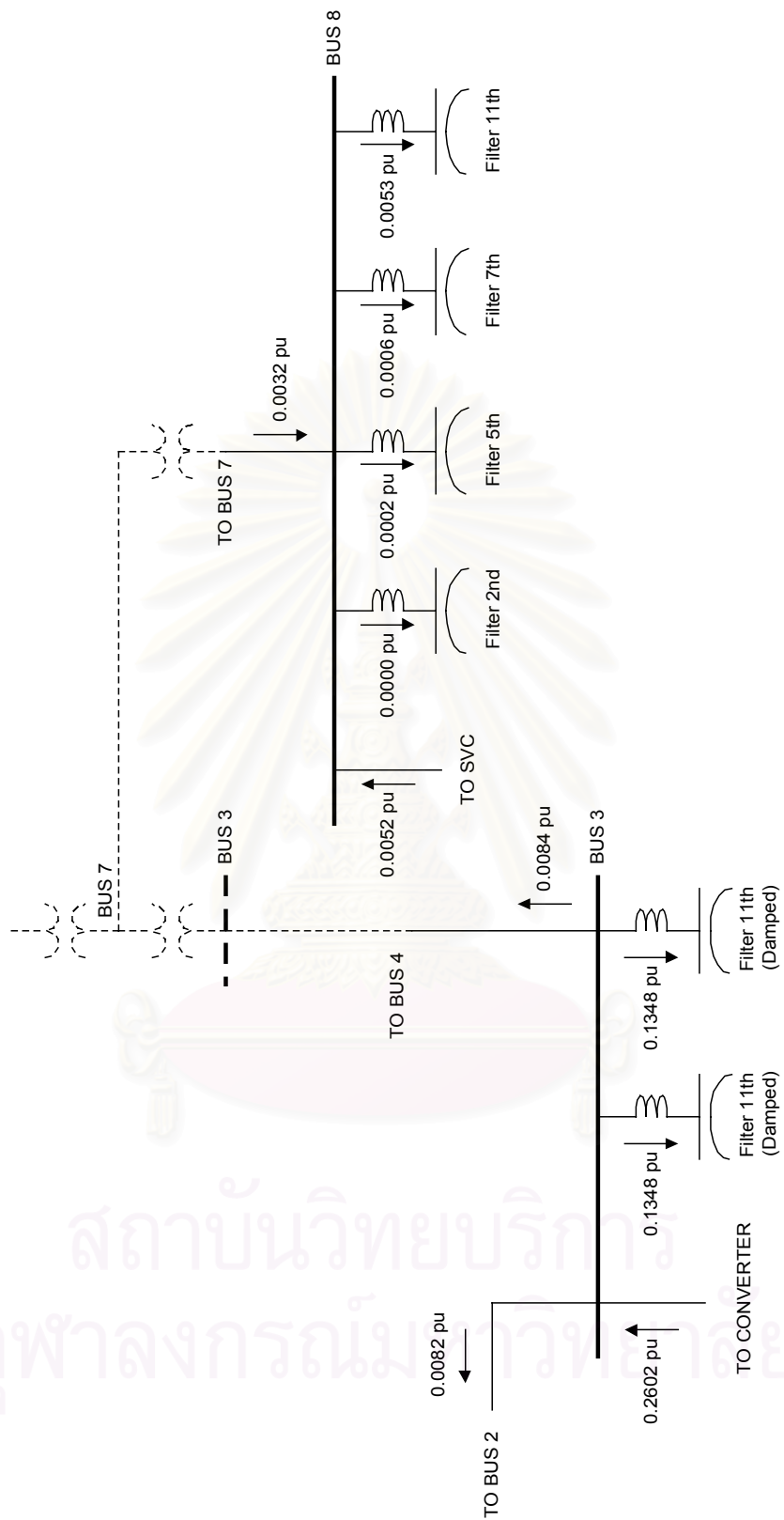
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



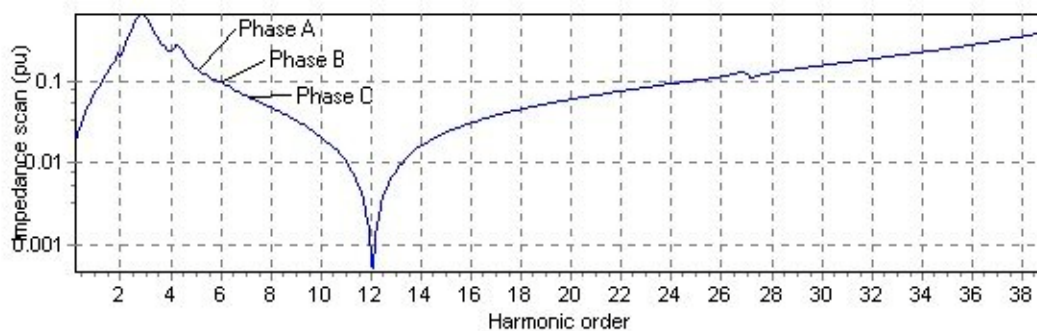
รูปที่ 5.23 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 1



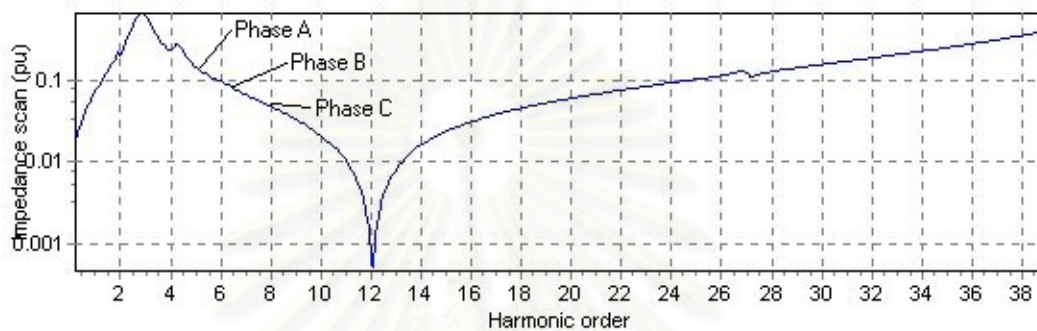
รูปที่ 5.24 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 1



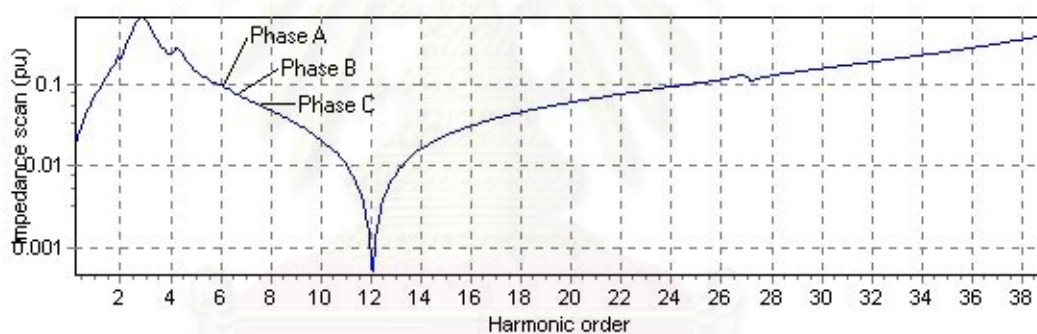
รูปที่ 5.25 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 1



(a)



(b)



(c)

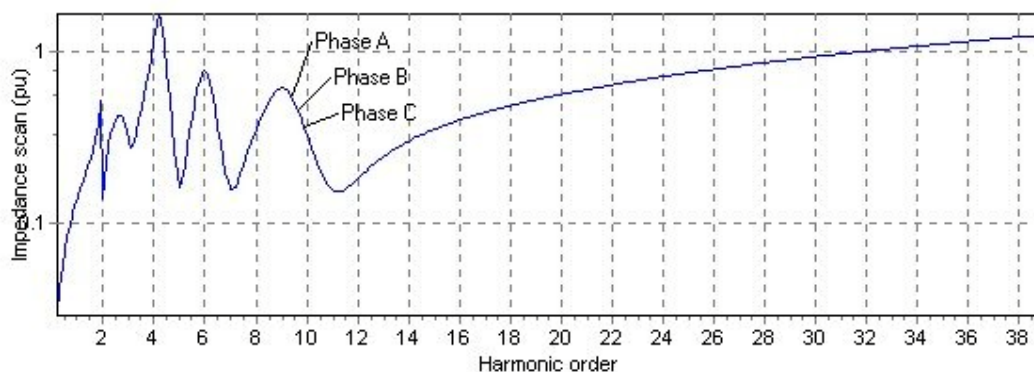
รูปที่ 5.26 กราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

(a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก

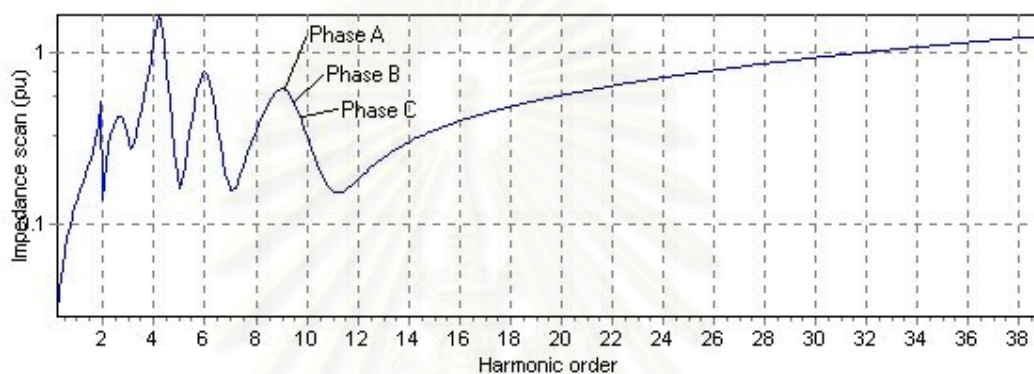
(b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ

(c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

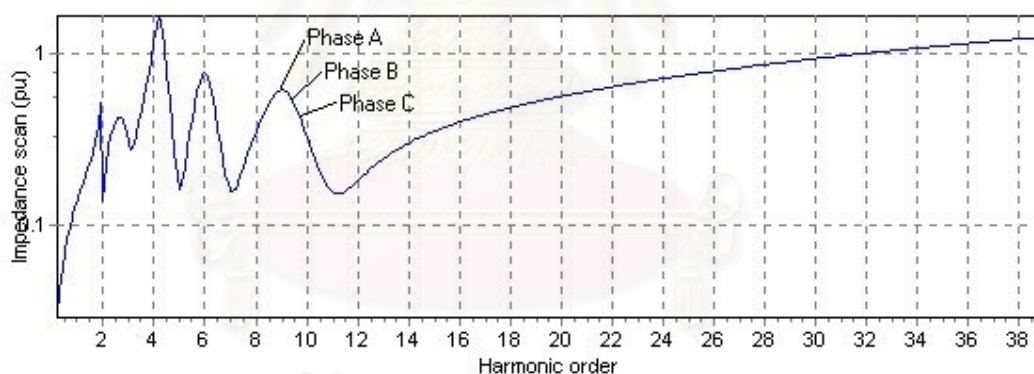
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.27 กราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 1

- (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก
- (b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ
- (c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

จากผลการคำนวณ ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันเมื่อเทียบกับเอกสารอ้างอิงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เหตุผลที่ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันมีค่าไม่เท่ากัน คือ แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าบางตัวไม่เหมือนกัน โดยแบบจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่โปรแกรมใช้ คือ แบบจำลองแบบ PI ปกติ (Nominal PI model) ส่วนแบบจำลองของสายส่ง

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง คือ แบบจำลองแบบกระจาย(Distributed PI model) เป็นเหตุให้ผลที่ได้ต่างกันไปบ้าง

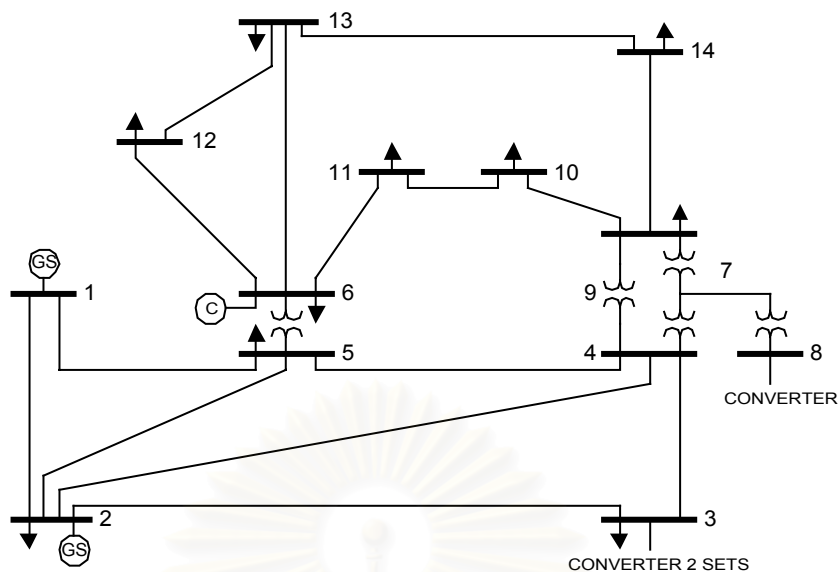
เมื่อพิจารณาสาร্মอนิกส์โพลาร์ของระบบ ระบบมีการติดตั้งตัวกรองสาร্মอนิกส์ไว้ที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 เนื่องจากเป็นเทอร์มินอลบัสของสาร্মอนิกส์โหลด ซึ่งที่บัสที่ 3 ติดตัวกรองสาร্মอนิกส์ในลำดับที่ 12 ไร่ 2 ชุด ทำให้อิมพีแดนซ์แกนของระบบเป็นดังรูปที่ 5.26 และที่บัสที่ 8 ติดตัวกรองสาร্মอนิกส์ในลำดับที่ 2 ลำดับที่ 5 ลำดับที่ 7 และลำดับที่ 11 ไร่อย่างละ 1 ชุด ทำให้อิมพีแดนซ์แกนของระบบเป็นดังรูปที่ 5.27 การพิจารณาจะพิจารณาที่บัสที่ 3 เป็นหลักเนื่องจากสาร্মอนิกส์โหลดที่บัสที่ 3 มีขนาดกำลังไฟฟ้ามากเมื่อเทียบกับขนาดกำลังไฟฟ้าของสาร্মอนิกส์โหลดที่บัสที่ 8

กระแสสาร্মอนิกส์ที่ 5 ที่เกิดจากสาร্মอนิกส์โหลดที่บัส 3 ส่วนใหญ่จะไหลเข้าไปในตัวกรองสาร্মอนิกส์ลำดับที่ 12 ทั้ง 2 ชุดเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับแหล่งกำเนิดกระแสสาร্মอนิกส์โดยกระแสไหลเข้าไปยังตัวกรองมีค่าเท่ากับ 0.4461 pu เท่ากันทั้ง 2 ชุด และกระแสสาร্মอนิกส์ส่วนที่เหลือจะไหลเข้าไปยังระบบ ซึ่งกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสที่ 2 มีค่า 0.1062 pu และกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสที่ 4 มีค่า 0.1389 pu และเมื่อพิจารณาที่บัสที่ 8 จะมีกระแสสาร্মอนิกส์ที่ไหลเข้าบัสซึ่งมาจากสาร্মอนิกส์โหลดที่บัส 3 เนื่องจากที่บัสนี้มีการติดตั้งตัวกรองสาร্মอนิกส์ที่ 5 ด้วยและใกล้กับบัสที่ 3 จึงเป็นทางให้กระแสสาร্মอนิกส์ที่ 5 ไหลเข้ามา พบว่ากระแสสาร্মอนิกส์ที่ 5 ที่ไหลเข้าสู่บัสที่ 8 มีค่าเป็น 0.0984 pu

ส่วนการวิเคราะห์กระแสสาร্মอนิกส์ที่ 7 และกระแสสาร্মอนิกส์ที่ 11 ก็สามารถอธิบายได้โดยใช้เหตุผลเดียวกับการวิเคราะห์กระแสสาร্মอนิกส์ที่ 5

5.3.2 ระบบ 14 บัส กรณีที่ 2 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบ)

ระบบทดสอบนี้ได้เปลี่ยนจาก HVDC ที่บัส 3 และ SVC ที่บัส 8 ซึ่งเป็นสาร্মอนิกส์โหลดที่ทราบสาร্মอนิกส์สเปคตรัมมาเป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิด โดยข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ชุดแสดงในตารางที่ 5.56 และตารางที่ 5.57



รูปที่ 5.28 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

ตารางที่ 5.56 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดที่บัส 3 ขนาด 178.515 MW ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

	Phase A	Phase B	Phase C
Transformer reactances	0.0093	0.0093	0.0093
Commutation reactances	0.0850	0.0850	0.0850
Minimum firing angle	20 deg		
Nominal voltage	61.3 kV		
Operating voltage	67.1 kV		

ตารางที่ 5.57 ข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 8 ขนาด 1.5 MW ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

	Phase A	Phase B	Phase C
Transformer reactances	0.0123	0.0123	0.0123
Commutation reactances	0.05	0.05	0.05
Minimum firing angle	10 deg		
Nominal voltage	416 V		
Operating voltage	461.9 V		

ผลการคำนวณโหลดไฟลว์

ผลของแรงดันบัส ผลการไหลของกำลังไฟฟ้า และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แสดงดังตารางที่ 5.58 ถึงตารางที่ 5.60 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.58 ข้อมูลโหลด, และแรงดันบัสของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2 (จากผลการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีพื้นฐาน)

Bus #	Nominal voltage (kV)	P load (kW)	Q load (kVAr)	Voltage (pu)	Angle (deg)	Pgen (MW)	Qgen (MVar)
1	230	0	0	1.0600	0.00	241.64	-21.71
2	230	0	0	1.0450	-5.25	18.30	56.72

3	230	0	0	0.9618	-13.91		
4	230	47,790	-3,900	1.0139	-10.51		
5	230	7,599	1,599	1.0264	-8.92		
6	230	0	0	1.0700	-13.32	7.97	44.20
7	230	0	0	1.0234	-13.21		
8	13.8	0	0	1.0478	-13.28		
9	115	29,499	16,599	1.0141	-14.59		
10	115	9,000	5,799	1.0161	-14.64		
11	115	3,501	1,800	1.0388	-14.09		
12	115	6,099	1,599	1.0527	-14.24		
13	115	13,500	5,799	1.0450	-14.33		
14	115	14,901	5,001	1.0131	-15.52		

ตารางที่ 5.59 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

Sending bus	Receiving bus	Type	Sending end		Receiving end	
			MW	MVA _r	MW	MVA _r
4	7	Xfmr (Y-Y)	23.436	-4.065	-23.436	5.215
4	9	Xfmr (Y-Y)	13.163	0.433	-13.163	0.506
5	6	Xfmr (Y-Y)	33.618	-16.597	-33.618	19.935
6	11	Line	12.663	10.784	-12.434	-10.304
6	12	Line	8.583	3.172	-8.493	-2.985
6	13	Line	20.339	10.307	-20.039	-9.716
7	8	Xfmr (Y-Y)	0.758	-14.158	-0.758	14.496
7	9	Xfmr (Y-Y)	22.678	8.943	-22.678	-8.319
9	10	Line	0.185	-2.429	-0.183	2.434
9	14	Line	6.157	0.154	-6.152	-0.054
10	11	Line	-8.817	-8.233	8.933	8.504
12	13	Line	2.394	1.386	-2.379	-1.372
13	14	Line	8.917	5.289	-8.749	-4.947
9	0	Capacitor	0.000	-6.510		
1	2	Line	165.139	-22.294	-160.373	31.001
1	5	Line	76.502	0.582	-73.682	5.700
2	3	Line	83.470	27.512	-80.089	-17.679
2	4	Line	55.848	0.496	-54.185	0.584
2	5	Line	39.355	-2.291	-38.547	1.125
3	4	Line	-38.939	-14.667	40.161	14.406
4	5	Line	-70.364	-7.459	71.013	8.173
8	0	Filter 2nd	0.093	-4.419		
8	0	Filter 5th	0.057	-3.449		
8	0	Filter 7th	0.055	-3.380		
8	0	Filter 11th	0.053	-3.339		
3	0	Filter 11th	0.009	-23.208		
3	0	Filter 11th	0.009	-23.208		

ตารางที่ 5.60 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ชุดของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

No	Tap ratio (%)	Commutation angle (deg)	Terminal powers	
			MW	MVA _r
1 (bus 3)	-1.636	22.536	59.505	39.381
2 (bus 3)	-1.636	22.536	59.505	39.381
3 (bus 8)	25.433	0.371	0.500	0.090

ผลที่ได้จากการคำนวณโหลดโพลาร์ที่ได้ในกรณีนี้จะเป็นกรณีพื้นฐานใช้เปรียบเทียบกับกรณีระบบไม่สมดุลในหัวข้อต่อไป

ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพลาร์

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โพลาร์ คือ ฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 11 และความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันแสดงดังในตารางที่ 5.61 และตารางที่ 5.62

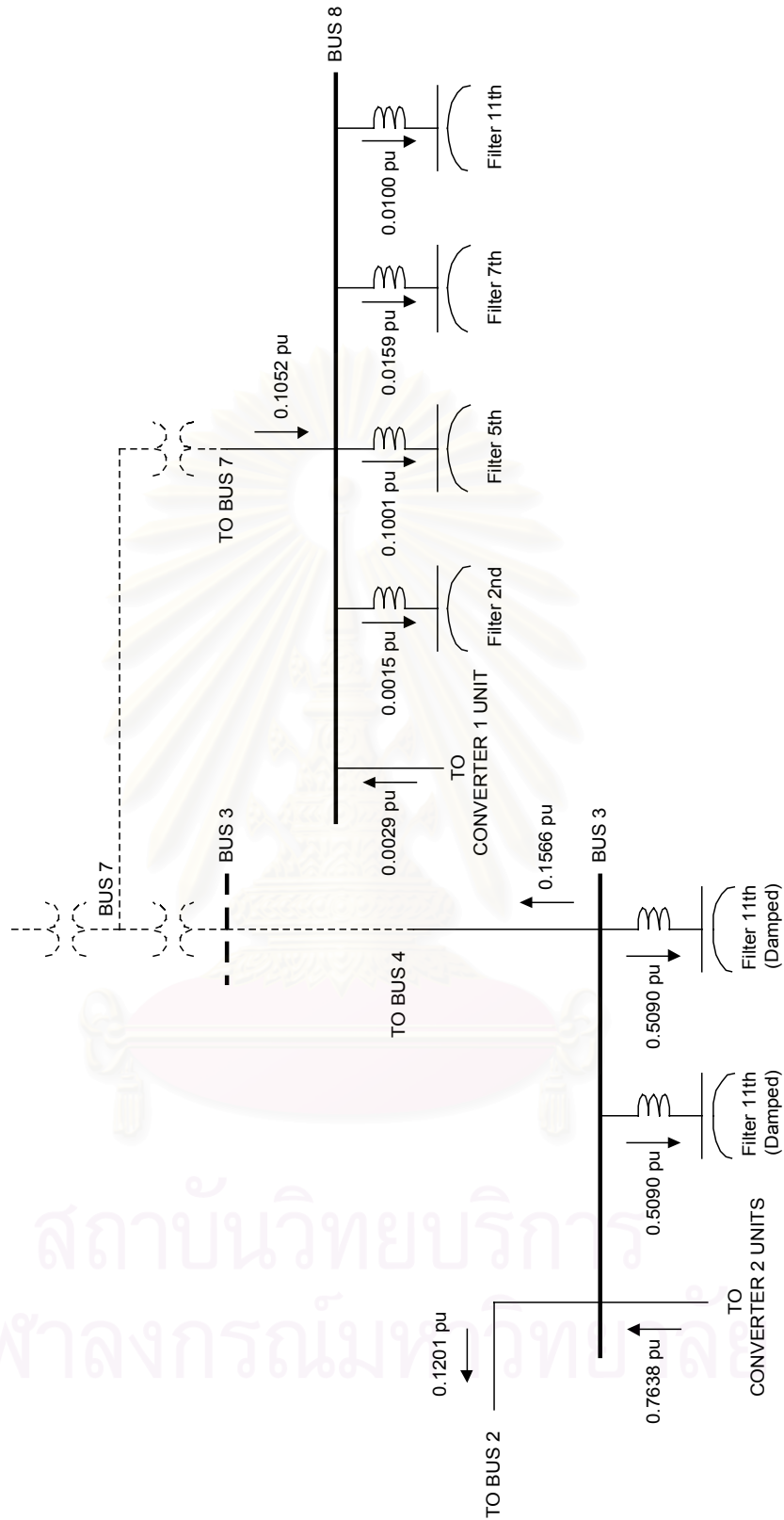
ตารางที่ 5.61 ฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

H-order	Conveter at bus 3		Conveter at bus 8	
	Mag (%)	Angle (deg)	Mag (%)	Angle (deg)
1	100.00	-76.87	100.00	-52.95
5	17.16	155.28	20.00	-84.74
7	10.42	-179.25	14.28	-10.64
11	3.76	47.81	9.09	-42.43
13	1.99	65.33	7.69	31.68
17	0.62	-147.97	5.88	-0.12
19	0.84	-155.22	5.26	73.99
23	0.94	59.69	4.34	42.20
25	0.80	81.30	4.00	116.30
29	0.38	-62.57	3.44	84.51
31	0.20	-64.97	3.22	158.61
35	0.25	76.03	2.85	126.82
37	0.31	90.82	2.70	-159.08

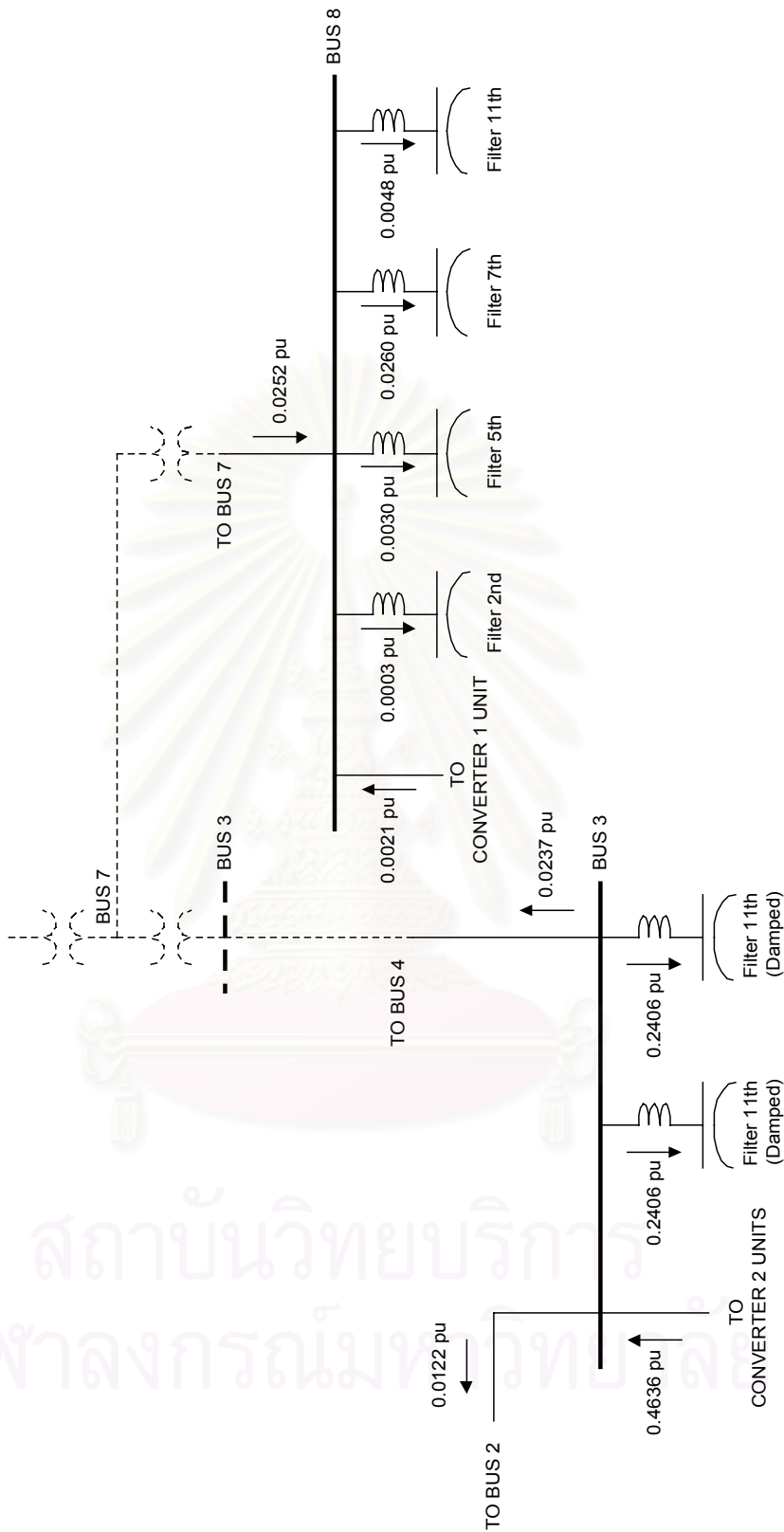
ตารางที่ 5.62 ผลของความผิดเพี้ยนของแรงดันของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

Bus	V5		V7		V11		THDv (%)
	pu	%	pu	%	pu	%	
1	0.0547	5.16	0.0205	1.94	0.0041	0.39	5.53
2	0.0622	5.95	0.0222	2.13	0.0038	0.36	6.33
3	0.1128	11.73	0.0305	3.17	0.0018	0.18	12.18
4	0.0636	6.27	0.0213	2.10	0.0028	0.28	6.63
5	0.0601	5.85	0.0212	2.07	0.0035	0.34	6.23
6	0.0281	2.63	0.0097	0.91	0.0016	0.15	2.78
7	0.0315	3.08	0.0109	1.07	0.0017	0.17	3.26
8	0.0175	1.67	0.0046	0.43	0.0003	0.03	1.73
9	0.0328	3.24	0.0120	1.18	0.0024	0.24	3.46
10	0.0307	3.02	0.0111	1.09	0.0021	0.21	3.22
11	0.0289	2.78	0.0101	0.98	0.0018	0.17	2.95
12	0.0267	2.54	0.0091	0.86	0.0014	0.14	2.69
13	0.0266	2.54	0.0090	0.87	0.0014	0.14	2.69
14	0.0279	2.75	0.0097	0.95	0.0017	0.17	2.92

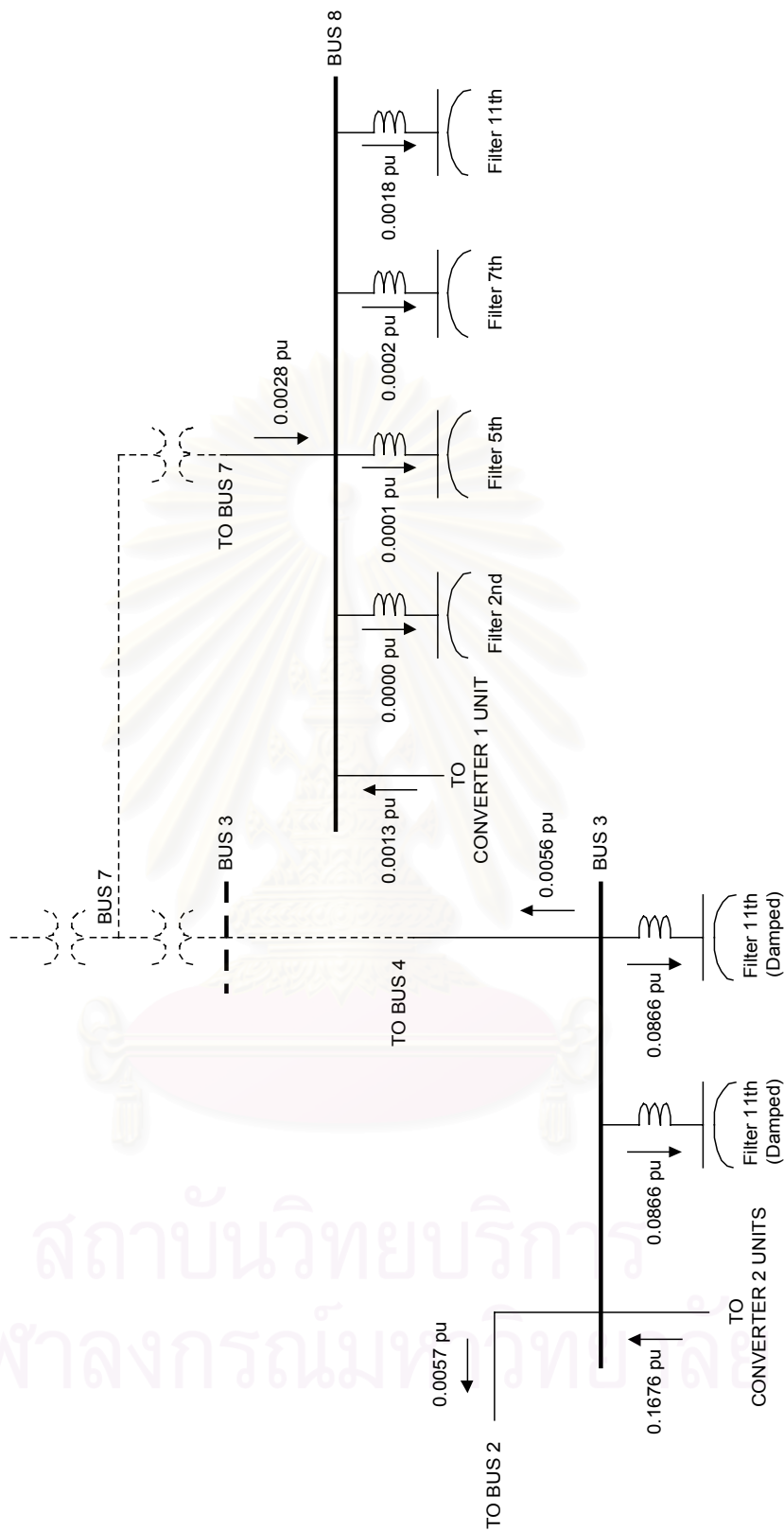




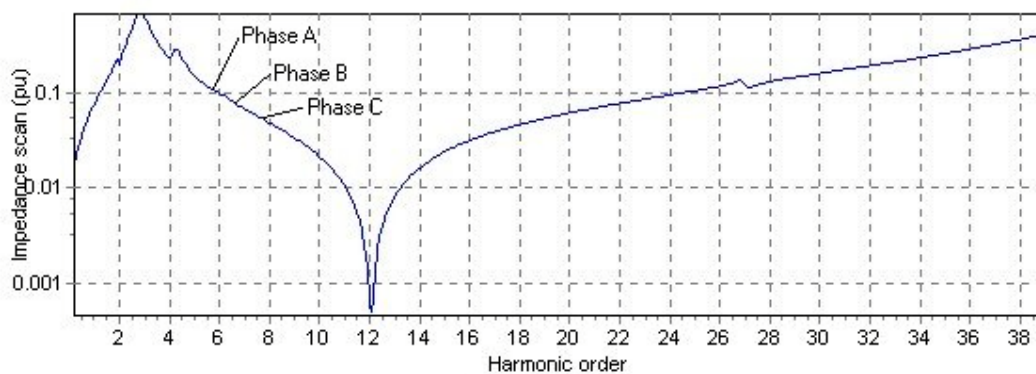
รูปที่ 5.29 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 2



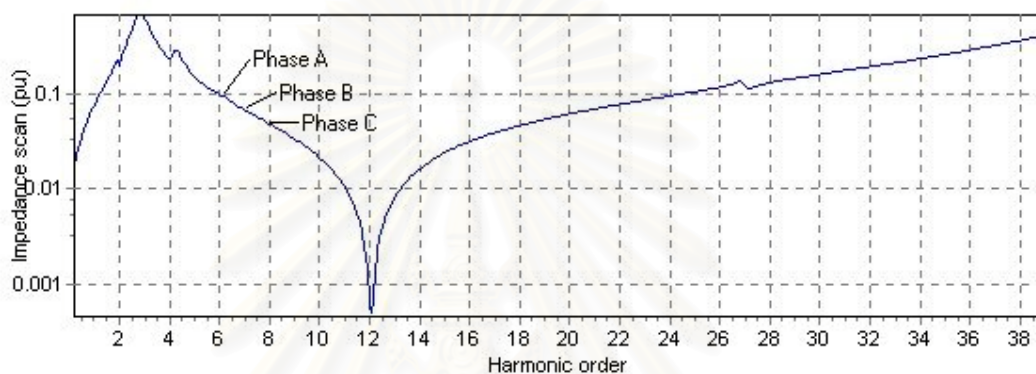
รูปที่ 5.30 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 2



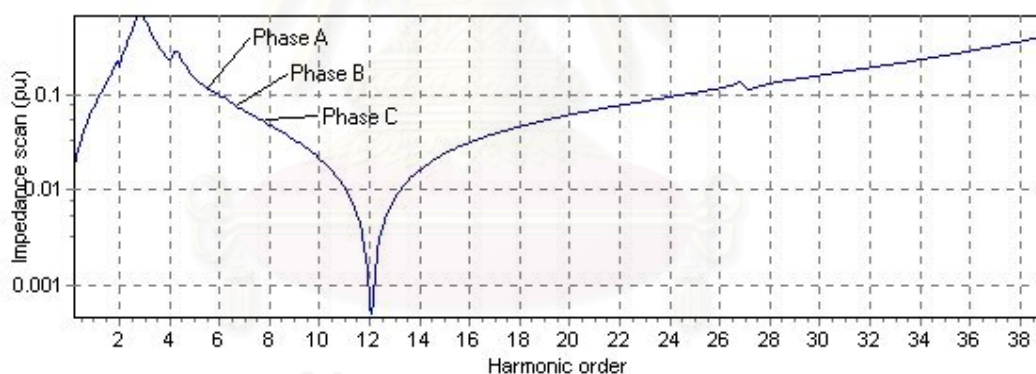
รูปที่ 5.31 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 2



(a)



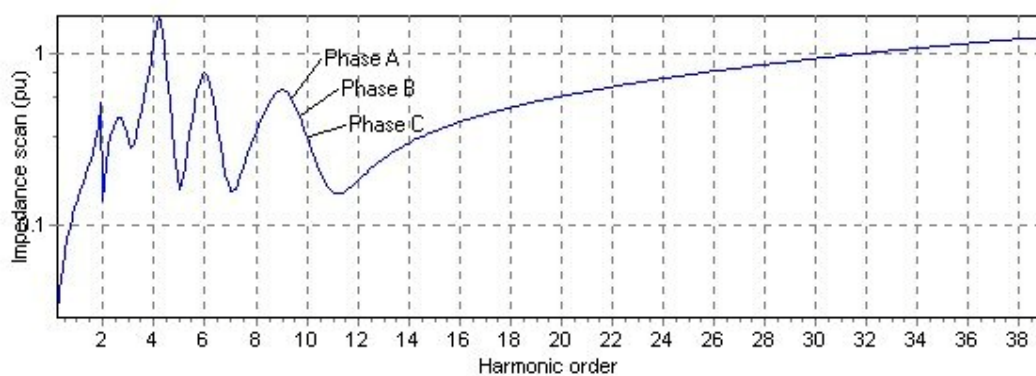
(b)



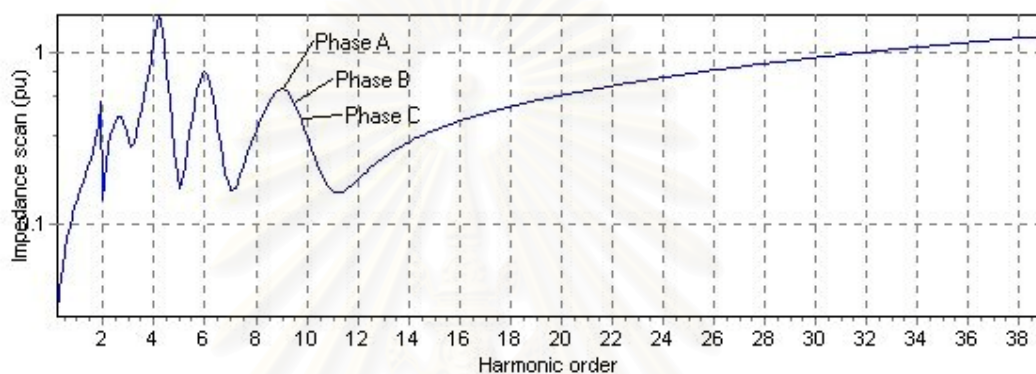
(c)

รูปที่ 5.32 กราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

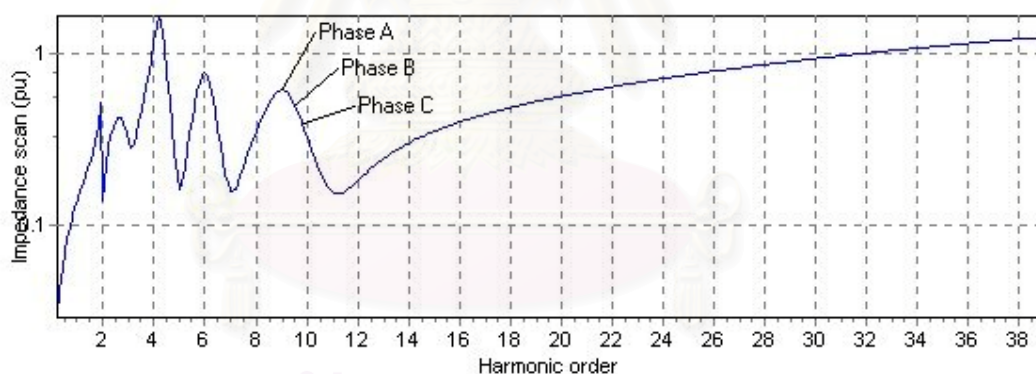
- (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก
- (b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ
- (c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.33 กราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 2

- (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก
- (b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ
- (c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

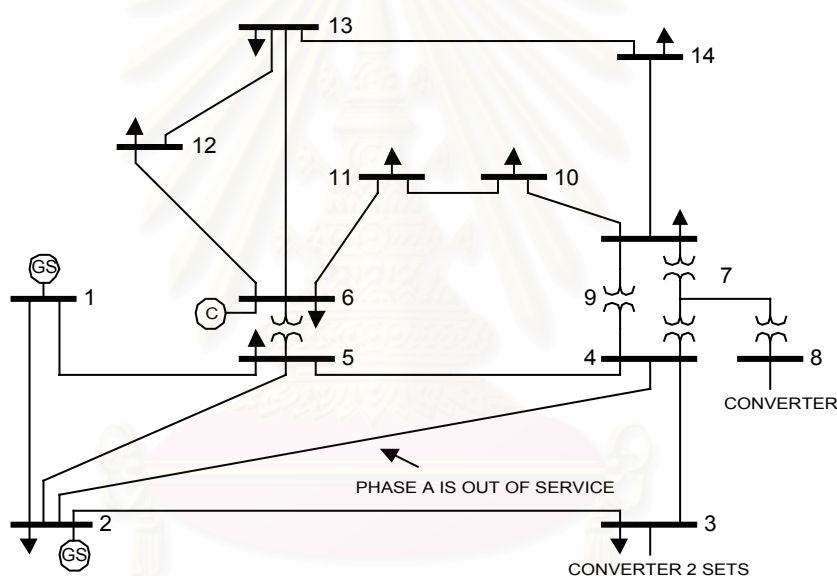
จากผลของเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันพบว่ามีค่าค่อนข้างมากเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 และลำดับที่ 7 ซึ่งเกิดจากคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุดที่บัสที่ 3 มีค่ามากและไม่ได้ทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 5 และ 7 ไว้ ทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 และ 7 ไหลเข้า

สู่ระบบเป็นผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่าง ๆ โดยเฉพาะที่บัสที่ 3 มีค่า THDv สูงถึง 12.18 %

ผลที่ได้จากการคำนวณฮาร์มอนิกโวลต์ที่ได้ในกรณีนี้จะเป็นกรณีพื้นฐานใช้เปรียบเทียบกับกรณีระบบไม่สมดุลในหัวข้อต่อไป

5.3.3 ระบบ 14 บัส กรณีที่ 3 (กรณีที่มีคอนเวอร์เตอร์ในระบบภายใต้สภาวะไม่สมดุล)

ระบบทดสอบนี้จะวิเคราะห์ผลของการเกิดความไม่สมดุลของระบบ โดยความไม่สมดุลเกิดขึ้นจากเฟส A ของสายส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 2 และบัส 4 ขาดไป ข้อมูลของระบบและอุปกรณ์ในระบบจะใช้ข้อมูลเดียวกับกรณีของระบบในหัวข้อ 5.3.1



รูปที่ 5.34 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3

ผลการคำนวณโหลดโวลต์

ผลของแรงดันบัส ผลการไหลของกำลังไฟฟ้า และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แสดงดังในตารางที่ 5.63 ถึงตารางที่ 5.65 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.63 ข้อมูลของแรงดันบัสของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3

Bus	Phase A		Phase B		Phase C		P_g^{abc}	Q_g^{abc}
	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)		
1	1.0551	-29.25	1.0631	-149.45	1.0619	90.54	727.03	-57.33
2	1.0414	-34.06	1.0475	-154.69	1.0461	85.29	54.90	169.38
3	0.9494	-44.45	0.9640	-163.35	0.9614	76.60		

4	0.9933	-42.43	1.0165	-160.01	1.0149	79.95		
5	1.0104	-39.93	1.0289	-158.45	1.0275	81.52		
6	1.0627	-44.22	1.0742	-163.11	1.0732	76.86	23.90	141.58
7	1.0045	-44.89	1.0268	-162.78	1.0253	77.19		
8	1.0284	-44.96	1.0513	-162.85	1.0497	77.11		
9	0.9962	-46.14	1.0180	-164.18	1.0165	75.78		
10	0.9997	-46.07	1.0201	-164.18	1.0187	75.70		
11	1.0267	-45.25	1.0429	-163.79	1.0418	76.17		
12	1.0445	-45.20	1.0569	-164.01	1.0559	75.96		
13	1.0356	-45.32	1.0493	-164.08	1.0483	75.89		
14	0.9974	-46.82	1.0175	-165.16	1.0161	74.80		

ตารางที่ 5.64 ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3

Sending bus	Receiving bus	Phase	Sending end		Receiving end	
			MW	MVAr	MW	MVAr
4	7	A	20.520	-4.869	-20.520	5.811
Xfmr (Y-Y)		B	24.070	-4.459	-24.070	5.672
		C	24.004	-4.495	-24.004	5.706
4	9	A	11.510	-0.132	-11.510	0.879
Xfmr (Y-Y)		B	13.522	0.222	13.484	0.192
		C	13.484	0.192	-13.484	0.791
5	6	A	32.113	-19.929	-32.113	23.429
Xfmr (Y-Y)		B	35.901	-17.135	-35.901	20.875
		C	35.774	-17.338	-35.774	21.084
6	11	A	15.556	11.935	-15.232	-11.259
Line		B	12.072	11.142	-11.850	-10.677
		C	12.143	11.225	-11.918	-10.752
6	12	A	9.010	3.326	-8.910	-3.117
Line		B	8.501	3.221	-8.413	-3.038
		C	8.513	3.232	-8.424	-3.048
6	13	A	21.875	11.174	-21.521	-10.479
Line		B	19.991	10.444	-19.699	-9.870
		C	20.026	10.495	-19.733	-9.917
7	8	A	0.742	-13.647	-0.742	13.973
Xfmr (Y-Y)		B	0.762	-14.250	-0.762	14.590
		C	0.765	-14.203	-0.765	14.542
7	9	A	19.779	7.836	-19.779	-7.342
Xfmr (Y-Y)		B	23.309	8.578	-23.309	-7.935
		C	23.239	8.497	-23.239	-7.857

9	10	A	-2.549	-3.231	2.555	3.246
Line		B	0.766	-2.809	-0.763	2.815
		C	0.700	-2.879	-0.697	2.886
9	14	A	4.339	-0.623	-4.337	0.675
Line		B	6.566	-0.059	-6.561	0.172
		C	6.524	-0.113	-6.519	0.224
10	11	A	-11.555	-9.045	11.731	9.459
Line		B	-8.237	-8.614	8.349	8.877
		C	-8.303	-8.685	8.417	8.952
12	13	A	2.811	1.518	-2.790	-1.500
Line		B	2.314	1.439	-2.300	-1.426
		C	2.325	1.449	-2.311	-1.436
13	14	A	10.812	6.179	-10.564	-5.676
Line		B	8.499	5.496	-8.340	-5.173
		C	8.543	5.554	-8.382	-5.225
9	0	A	0.000	-6.281		
Capacitor		B	0.000	-6.559		
		C	0.000	-6.541		
1	2	A	149.771	-21.111	-145.810	27.407
Line		B	165.909	-21.454	-161.133	30.163
		C	165.812	-21.131	-161.032	29.864
1	5	A	90.404	4.765	-86.411	6.471
Line		B	77.587	0.736	-74.703	5.782
		C	77.551	0.865	-74.664	5.685
2	3	A	98.022	30.991	-93.378	-15.773
Line		B	83.982	27.651	-80.576	-17.737
		C	84.061	28.262	-80.625	-18.202
2	4	A	0.000	0.000	0.000	0.000
Line		B	56.820	0.256	-55.108	0.955
		C	56.835	0.388	-55.117	0.852
2	5	A	62.337	-0.502	-60.296	3.169
Line		B	40.410	-2.573	-39.562	1.511
		C	40.407	-2.525	-39.558	1.479
3	4	A	-25.049	-15.811	25.667	14.120
Line		B	-38.643	-15.058	39.850	14.742

		C	-38.811	-15.465	40.043	15.227
4	5	A	-105.487	-5.219	106.995	8.690
Line		B	-70.124	-7.560	70.766	8.244
		C	-70.203	-7.875	70.849	8.575
8	0	A	0.090	-4.257		
Filter 8:2nd		B	0.094	-4.448		
		C	0.094	-4.435		
8	0	A	0.055	-3.323		
Filter 8:5th		B	0.057	-3.472		
		C	0.057	-3.462		
8	0	A	0.053	-3.256		
Filter 8:7th		B	0.055	-3.402		
		C	0.055	-3.392		
8	0	A	0.051	-3.217		
Filter 8:11th		B	0.054	-3.361		
		C	0.054	-3.351		
3	0	A	0.009	-22.613		
Filter 3:11th		B	0.009	-23.318		
		C	0.009	-23.190		
3	0	A	0.009	-22.613		
Filter 3:11th		B	0.009	-23.318		
		C	0.009	-23.190		

ตารางที่ 5.65 ผลการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3

No	Phase	Tap ratio (%)	Commutation angle (deg)	Terminal powers	
				MW	MVA _r
1 (bus 3)	A	-1.997	22.497	59.195	38.387
	B	-1.997	22.452	59.628	39.747
	C	-1.997	22.661	59.692	40.009
2 (bus 3)	A	-1.997	22.497	59.195	38.387
	B	-1.997	22.452	59.628	39.747
	C	-1.997	22.661	59.692	40.009
3 (bus 8)	A	24.862	0.368	0.493	0.079
	B	24.862	0.368	0.502	0.094
	C	24.862	0.376	0.505	0.097

จากผลการคำนวณโหลดโพล์พบว่าแรงดันที่บัสต่างๆเกิดความไม่สมดุลขึ้น แต่มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากระบบมีการเชื่อมต่อกันเป็นแบบโครงข่าย(Network) กำลังไฟฟ้าที่หายไปจากการขาดไปของเฟส A ในสายส่งที่ต่อระหว่างบัส 2 และบัส 4 ระบบจะจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยในสายส่งเส้นอื่นซึ่งจะกระจายกันไปในแต่ละส่วน เป็นผลทำให้แรงดันของระบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละเฟส

ผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์โพล์

ผลของฮาร์มอนิกส์เบคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 5 แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 7 และแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ 11 แสดงไว้ในตารางที่ 5.66 ถึงตารางที่ 5.71 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.66 ฮาร์มอนิกส์เบคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3 (เปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละเฟสเทียบกับขนาดของกระแสที่ความถี่มูลฐานของเฟสนั้นๆ)

H	Phase A			Phase B			Phase C		
	Mag(pu)	Angle (deg)	%	Mag(pu)	Angle (deg)	%	Mag(pu)	Angle (deg)	%
1	2.2295	-77.41	100.00	2.2300	162.96	100.00	2.2423	42.76	100.00
3	0.0084	129.95	0.38	0.0075	125.57	0.33	0.0159	-52.11	0.71
5	0.3868	152.60	17.35	0.3866	-85.63	17.33	0.3763	33.45	16.78
7	0.2291	176.85	10.28	0.2296	59.64	10.30	0.2390	-61.85	10.66
9	0.0050	28.72	0.22	0.0048	12.42	0.21	0.0097	-159.21	0.43
11	0.0854	41.99	3.83	0.0856	165.58	3.84	0.0808	-76.10	3.60
13	0.0431	57.61	1.93	0.0430	-56.42	1.93	0.0469	-179.32	2.09
15	0.0008	-93.89	0.04	0.0017	-133.30	0.08	0.0024	58.76	0.11
17	0.0143	-158.37	0.64	0.0147	-30.89	0.66	0.0128	86.85	0.57
19	0.0181	-165.37	0.81	0.0179	80.78	0.80	0.0197	-41.77	0.88
21	0.0017	23.37	0.08	0.0017	41.41	0.08	0.0034	-147.59	0.15
23	0.0218	47.11	0.98	0.0218	175.64	0.98	0.0189	-68.72	0.84
25	0.0169	67.34	0.76	0.0170	-42.76	0.76	0.0194	-167.87	0.87
27	0.0014	-83.66	0.06	0.0014	-94.50	0.06	0.0027	90.83	0.12
29	0.0088	-78.11	0.39	0.0089	51.34	0.40	0.0075	167.63	0.34
31	0.0043	-84.43	0.19	0.0040	170.61	0.18	0.0051	45.36	0.23
33	0.0003	39.18	0.01	0.0007	85.92	0.03	0.0010	-107.22	0.04
35	0.0060	55.92	0.27	0.0060	-169.50	0.27	0.0047	-56.56	0.21
37	0.0065	70.98	0.29	0.0065	-36.33	0.29	0.0077	-162.52	0.34
39	0.0011	-90.84	0.05	0.0010	-75.12	0.05	0.0021	96.85	0.09

ตารางที่ 5.67 ฮาร์มอนิกสเปคตรัมของคอนเวอร์เตอร์ที่บัส 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3 (เปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละเฟสเทียบกับขนาดของกระแสที่ความถี่มูลฐานของเฟสนั้นๆ)

H	Phase A			Phase B			Phase C		
	Mag(pu)	Angle (deg)	%	Mag(pu)	Angle (deg)	%	Mag(pu)	Angle (deg)	%
1	0.0146	-54.09	100.00	0.0146	-173.41	100.00	0.0147	66.23	100.00
3	0.0001	-162.27	0.73	0.0001	-160.23	0.64	0.0002	18.69	1.36
5	0.0030	-90.45	20.43	0.0030	32.95	20.38	0.0028	151.15	19.15
7	0.0020	-18.63	13.96	0.0020	-133.87	14.00	0.0022	103.61	14.82
9	0.0001	-126.80	0.73	0.0001	-120.70	0.64	0.0002	56.07	1.36
11	0.0014	-54.98	9.46	0.0014	72.48	9.42	0.0012	-171.47	8.27
13	0.0011	16.84	7.33	0.0011	-94.34	7.37	0.0012	140.98	8.22
15	0.0001	-91.34	0.73	0.0001	-81.16	0.64	0.0002	93.44	1.35
17	0.0009	-19.52	6.23	0.0009	112.02	6.19	0.0007	-134.10	5.05
19	0.0007	52.30	4.88	0.0007	-54.80	4.93	0.0008	178.36	5.77
21	0.0001	-55.87	0.73	0.0001	-41.63	0.64	0.0002	130.82	1.34
23	0.0007	15.94	4.68	0.0007	151.56	4.64	0.0005	-96.72	3.48
25	0.0005	87.76	3.60	0.0005	-15.26	3.65	0.0007	-144.26	4.46
27	0.0001	-20.41	0.72	0.0001	-2.09	0.64	0.0002	168.20	1.33
29	0.0005	51.41	3.76	0.0005	-168.90	3.73	0.0004	-59.34	2.55
31	0.0004	123.23	2.81	0.0004	24.28	2.86	0.0005	-106.88	3.65
33	0.0001	15.06	0.72	0.0001	37.44	0.64	0.0002	-154.42	1.32
35	0.0005	86.87	3.15	0.0005	-129.37	3.13	0.0003	-21.96	1.93
37	0.0003	158.69	2.27	0.0003	63.82	2.33	0.0005	-69.51	3.08
39	0.0001	50.53	0.72	0.0001	76.98	0.64	0.0002	-117.05	1.31

ตารางที่ 5.68 ผลของความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3 (เปอร์เซ็นต์ของขนาดแรงดันผิดเพี้ยนรวมของแต่ละเฟสเทียบกับขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐานของเฟสนั้นๆ)

Bus	Phase A (%)	Phase B (%)	Phase C (%)
1	5.45	5.59	5.58
2	6.24	6.41	6.39
3	12.89	12.33	12.29
4	6.69	6.71	6.71
5	6.23	6.30	6.30
6	2.75	2.82	2.84
7	3.32	3.34	3.47
8	1.90	1.88	2.24
9	3.47	3.52	3.59
10	3.22	3.28	3.34
11	2.93	3.00	3.03
12	2.66	2.73	2.75
13	2.67	2.73	2.76
14	2.91	2.97	3.02

ตารางที่ 5.69 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3 (หน่วย pu)

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	Pu	%	pu	%	Pu	%
1	0.0539	5.11	0.0554	5.21	0.0539	5.08
2	0.0613	5.88	0.0630	6.01	0.0613	5.86
3	0.1175	12.37	0.1141	11.84	0.1111	11.56
4	0.0631	6.36	0.0644	6.33	0.0627	6.17
5	0.0594	5.88	0.0608	5.91	0.0592	5.76
6	0.0276	2.60	0.0285	2.65	0.0277	2.58
7	0.0311	3.10	0.0319	3.11	0.0311	3.03
8	0.0173	1.68	0.0178	1.69	0.0173	1.64
9	0.0323	3.24	0.0333	3.27	0.0324	3.19
10	0.0302	3.02	0.0312	3.06	0.0303	2.98
11	0.0283	2.76	0.0293	2.81	0.0285	2.73
12	0.0263	2.51	0.0271	2.57	0.0264	2.50
13	0.0261	2.52	0.0270	2.57	0.0262	2.50
14	0.0273	2.74	0.0283	2.78	0.0275	2.71

ตารางที่ 5.70 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 7 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3 (หน่วย pu)

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	pu	%	Pu	%	Pu	%
1	0.0186	1.76	0.0204	1.92	0.0212	1.99
2	0.0202	1.94	0.0220	2.10	0.0229	2.19
3	0.0308	3.25	0.0302	3.13	0.0314	3.27
4	0.0189	1.91	0.0211	2.08	0.0220	2.16
5	0.0189	1.88	0.0210	2.04	0.0219	2.13
6	0.0086	0.81	0.0096	0.90	0.0100	0.93
7	0.0096	0.96	0.0108	1.06	0.0113	1.10
8	0.0041	0.39	0.0045	0.43	0.0047	0.45
9	0.0106	1.06	0.0119	1.17	0.0124	1.22
10	0.0097	0.97	0.0110	1.08	0.0114	1.12
11	0.0089	0.87	0.0101	0.97	0.0105	1.01
12	0.0080	0.77	0.0090	0.85	0.0094	0.89
13	0.0080	0.77	0.0090	0.86	0.0093	0.89
14	0.0085	0.85	0.0096	0.95	0.0100	0.98

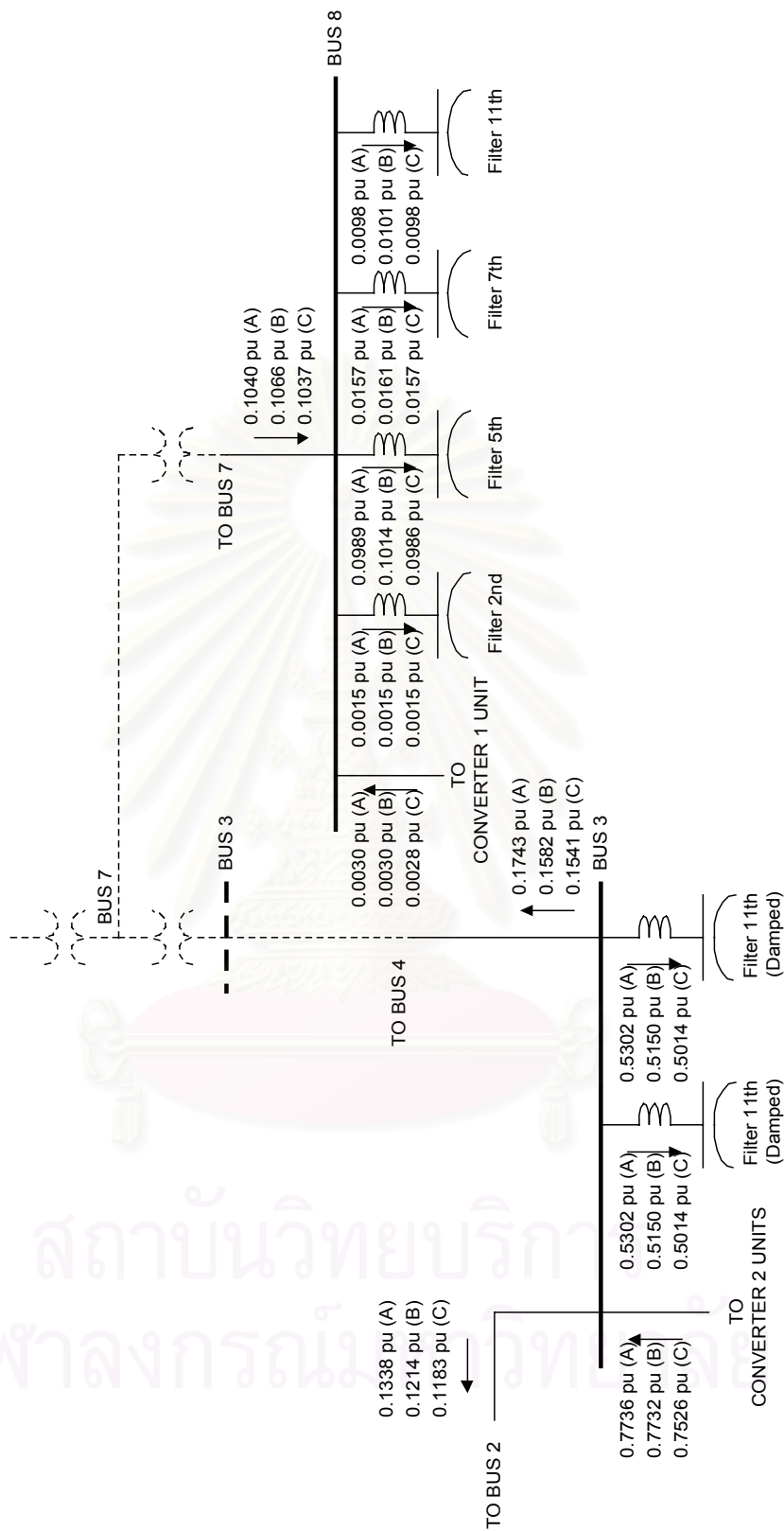
ตารางที่ 5.71 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 11 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3 (หน่วย pu)

Bus	Phase A		Phase B		Phase C	
	pu	%	pu	%	Pu	%
1	0.0047	0.44	0.0042	0.40	0.0040	0.37
2	0.0044	0.42	0.0039	0.37	0.0036	0.35
3	0.0017	0.18	0.0018	0.19	0.0017	0.18
4	0.0028	0.29	0.0029	0.29	0.0027	0.27
5	0.0036	0.36	0.0035	0.34	0.0033	0.33
6	0.0016	0.15	0.0016	0.15	0.0015	0.14
7	0.0018	0.18	0.0018	0.17	0.0017	0.16

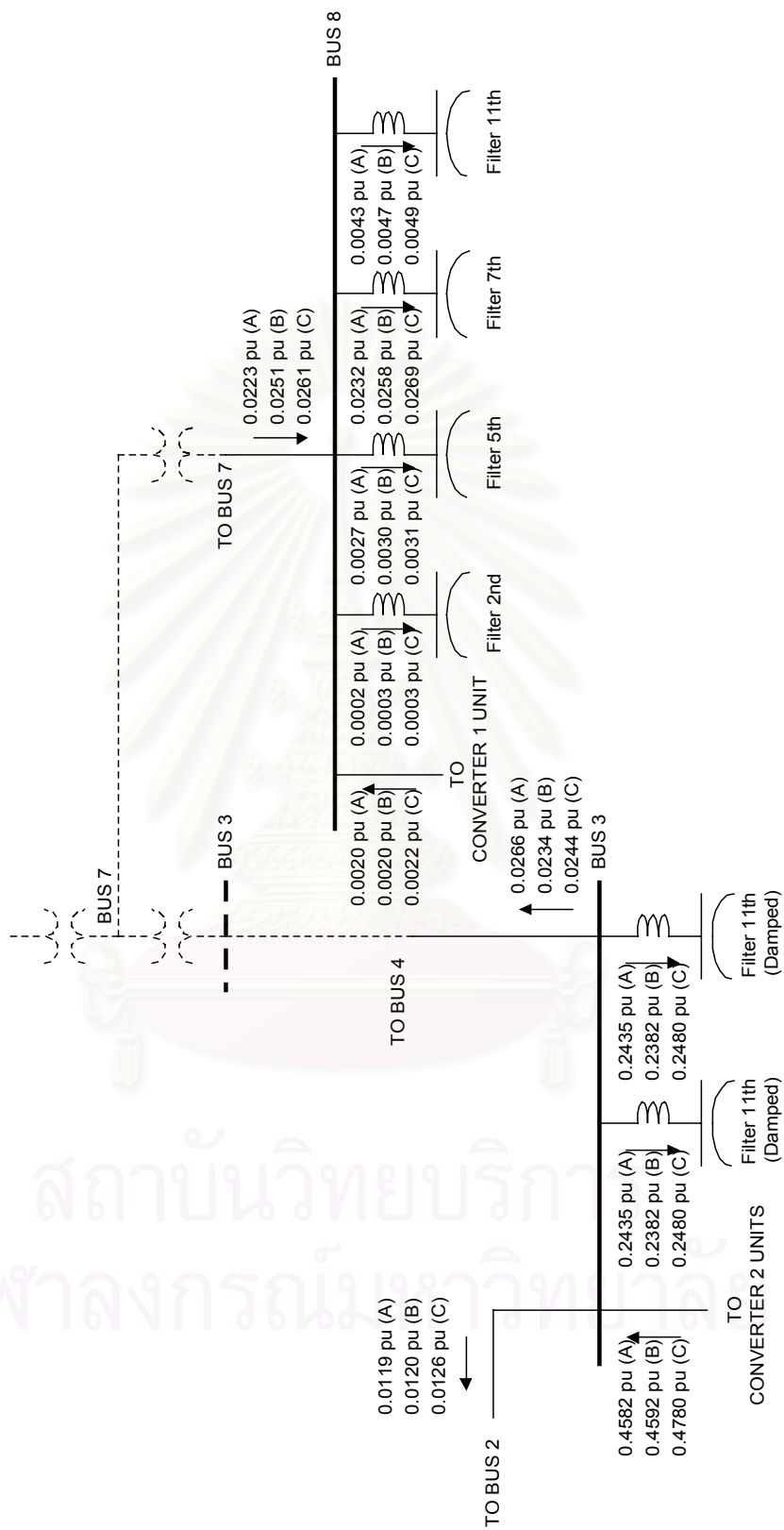
8	0.0002	0.02	0.0003	0.03	0.0003	0.03
9	0.0025	0.25	0.0025	0.25	0.0024	0.23
10	0.0022	0.22	0.0022	0.21	0.0021	0.20
11	0.0018	0.18	0.0018	0.18	0.0017	0.17
12	0.0015	0.14	0.0015	0.14	0.0014	0.13
13	0.0015	0.14	0.0015	0.14	0.0014	0.13
14	0.0017	0.17	0.0018	0.17	0.0017	0.16

จากผลการคำนวณ ค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันเมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐานพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนไปจากกรณีพื้นฐานในสภาวะสมดุล แต่สภาพความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นไม่ส่งผล กระทบต่อระบบมากนักซึ่งจะสังเกตว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของแรงดันที่บัสต่างๆ ในแต่ละเฟสจะมีค่าไม่ต่างกันเท่าใดนัก

ผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 5 ลำดับที่ 7 และลำดับที่ 11 มีแนวโน้ม เดียวกันกับการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อระบบสมดุล ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมดุลของ ระบบอันเนื่องจากการขาดไปของเฟส A ของสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส 2 และบัส 4 ไม่ทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงของ Configuration ของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 3 และบัส 8 ซึ่งจะสังเกตได้จาก กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบในรูปที่ 5.38 และ 5.39 ซึ่งกราฟในแต่ละกรณีคือ (a), (b) และ (c) จะมีรูปใกล้เคียงกัน

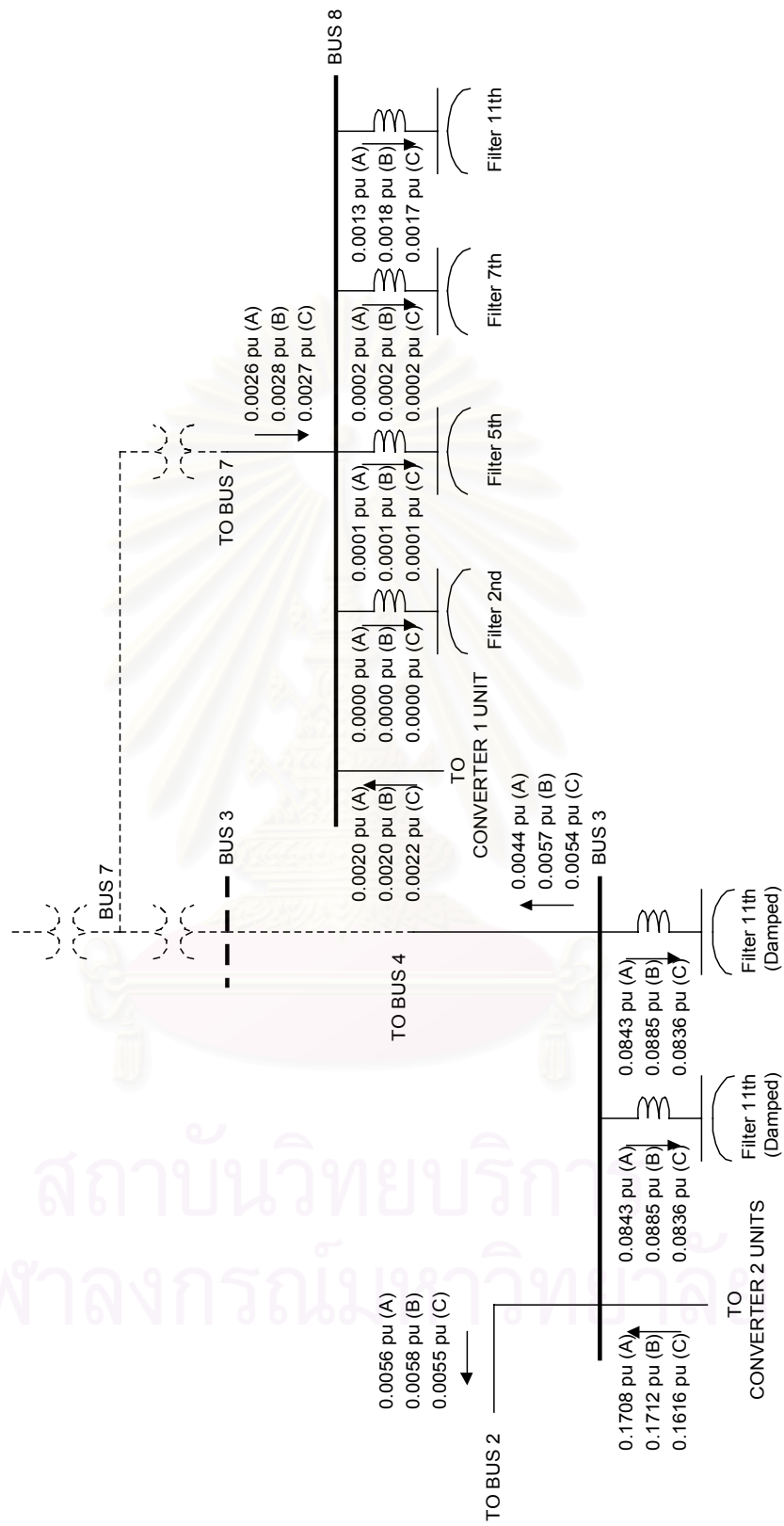


รูปที่ 5.35 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 3

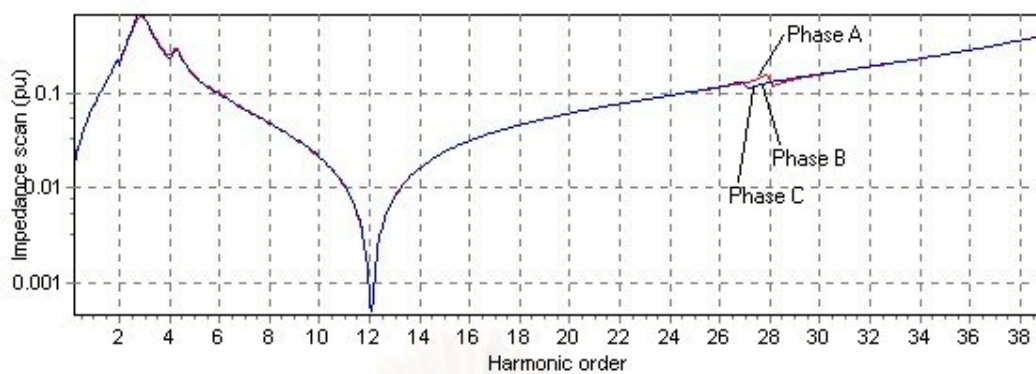


รูปที่ 5.36 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 7 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส

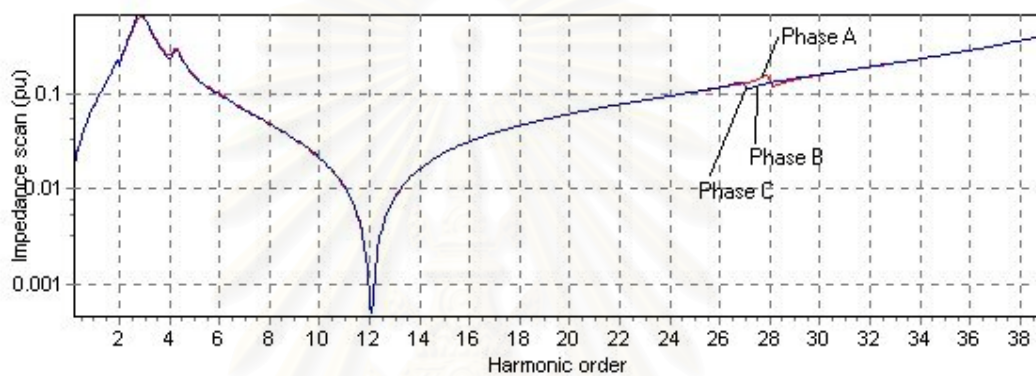
กรณีที่ 3



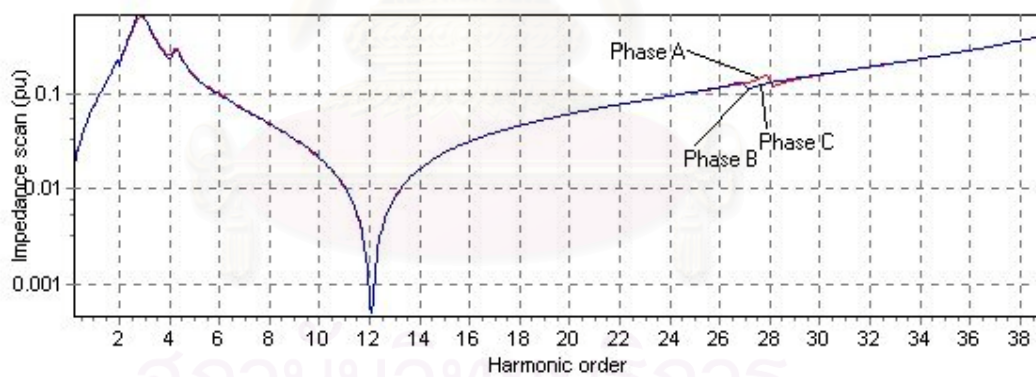
รูปที่ 5.37 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ 11 เมื่อพิจารณาที่บัสที่ 3 และบัสที่ 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส
กรณีที่ 3



(a)



(b)



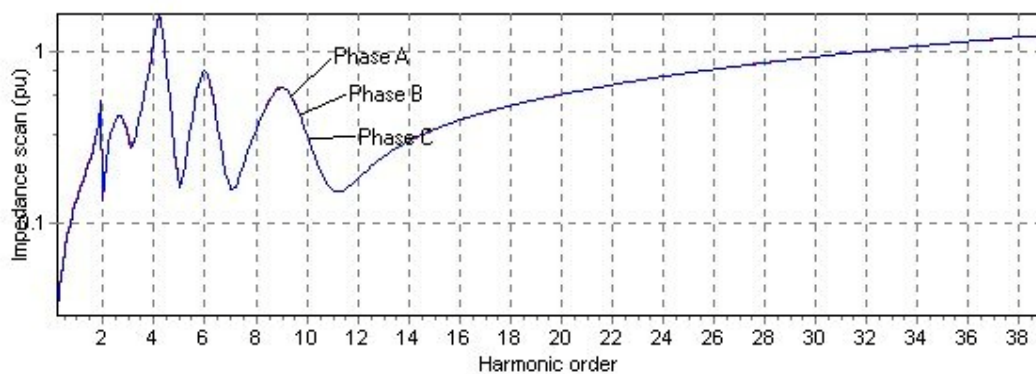
(c)

รูปที่ 5.38 กราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 3 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3

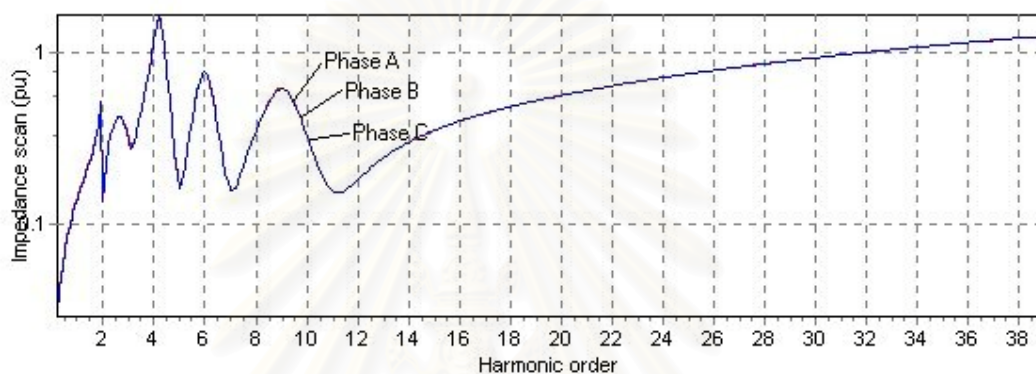
(a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก

(b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ

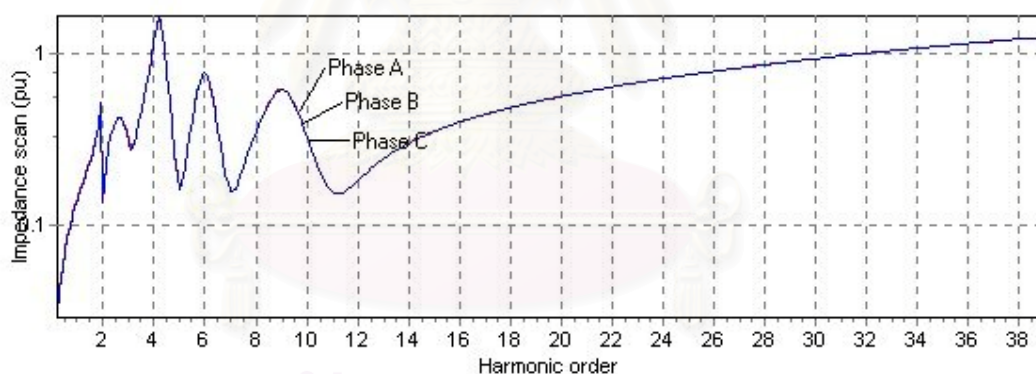
(c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.39 กราฟอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อพิจารณาที่บัส 8 ของระบบทดสอบ 14 บัส กรณีที่ 3

- (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับบวก
- (b) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับลบ
- (c) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์แกนของระบบเมื่อกระแสป้อนเข้าเป็นกระแสลำดับศูนย์

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการวิเคราะห์โหลดโพล์และฮาร์มอนิกโพล์ในสถานะไม่สมดุล โดยเน้นถึงการวิเคราะห์เมื่อระบบมีการต่อคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งได้พัฒนาและปรับปรุงหลักการเพื่อมาวิเคราะห์โดยเฉพาะ ทั้งการคำนวณโหลดโพล์และฮาร์มอนิกโพล์ใช้หลักการของการวิเคราะห์ โดยการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Y_{BUS}) ในการวิเคราะห์โหลดโพล์จะสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ใช้แบบจำลองที่ความถี่มูลฐาน ส่วนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพล์จะสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ใช้แบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกในลำดับนั้นๆ จากหลักการดังกล่าวได้นำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้ใช้งานจะสามารถที่จะสร้างแผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าลงบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ โดยการเลือกรูปภาพอุปกรณ์ต่างๆที่มีอยู่ในโปรแกรมมาสร้างเป็นแผนภาพเส้นเดียวได้ ซึ่งง่ายต่อความเข้าใจเนื่องจากโปรแกรมออกมาในรูปแบบรูปภาพ แต่อาจมีความไม่สะดวกและยุ่งยากได้ในกรณีที่ระบบมีจำนวนบัสมาก

การคำนวณโหลดโพล์ของระบบไฟฟ้า โปรแกรมสามารถคำนวณโหลดโพล์ทั้งในสถานะระบบสมดุลและระบบไม่สมดุลได้ ซึ่งจะได้ผลของแรงดันบัส ,กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ และผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ถ้าระบบมีคอนเวอร์เตอร์

ส่วนการคำนวณฮาร์มอนิกโพล์ โปรแกรมสามารถคำนวณหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกได้ถึงลำดับที่ 39 และสามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันของทุกๆบัส(THDv), แรงดันฮาร์มอนิกของทุกๆบัสของระบบในลำดับฮาร์มอนิกที่ต้องการ, ฮาร์มอนิกสเปกตรัมของคอนเวอร์เตอร์ รวมถึงกราฟอิมพีแดนซ์สแกนของระบบเมื่อพิจารณาจากบัสที่มีคอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่

อนึ่ง การพัฒนาโปรแกรมนี้ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ บอร์แลนด์เดลไฟล์ เวอร์ชันที่ 5 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ภาษาปาสคาล ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณและแสดงผล และใช้แนกไลบรารี(Nag library) ซึ่งเป็น DLL ที่รวบรวมฟังก์ชันในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้การคำนวณโดยโปรแกรมรวดเร็วและสะดวกยิ่งขึ้น

สำหรับข้อเสนอแนะที่จะเสนอไว้ เพื่อที่ว่าหากได้รับการศึกษาและปรับปรุงให้ดีขึ้น ก็จะทำให้โปรแกรมมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นไปอีก

1. โปรแกรมบอร์แลนด์เดลไฟล์ในเวอร์ชันต่อไป หรือโปรแกรมคอมพิวเตอรีโปรแกรมอื่น อาจมีความสามารถในการคำนวณเพิ่มขึ้นไปอีก คือการเพิ่มฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น การคำนวณเมตริกซ์ และตัวเลขระบบเชิงซ้อน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นมาก ในการสร้างโปรแกรมคำนวณทางวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้โปรแกรมสามารถทำการคำนวณได้รวดเร็วมากขึ้น และสะดวกในการเขียนโปรแกรม
2. การพัฒนาความถูกต้องและแม่นยำของโปรแกรม ซึ่งความถูกต้องของโปรแกรมจะดีขึ้นถ้าแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆเหมาะสมและดีขึ้น ทั้งในแบบจำลองที่ความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิกส์ แต่เนื่องจากในระหว่างที่ผู้วิจัยทำวิทยานิพนธ์ ไม่สามารถหาแบบจำลองทางฮาร์มอนิกส์แบบ 3 เฟสได้ จึงใช้แบบจำลองที่เป็นแบบจำลองเฟสเดียว
3. ปัญหาในการคำนวณที่เกิดขึ้นในขณะนี้ คือ หม้อแปลง โดยในการคำนวณบางระบบ เมื่อเลือกหม้อแปลงที่เป็น WyeG-Delta, WyeG-Wye, Wye-Delta, ... หรือการต่อแบบที่ไม่มีวงจรถัดกันทางด้านปฐมภูมิหรือทางด้านทุติยภูมิ จะมีปัญหา คือ ระบบจะหาผลตอบไม่ได้ซึ่งจะเป็นกับบางระบบ โดยสมมติฐานเบื้องต้น คือ แบบจำลองของหม้อแปลงที่นำมาใช้อาจจะเป็นแบบจำลองที่ยังมีความไม่สมบูรณ์ครอบคลุมทุกกรณี การต่อแบบต่างๆของหม้อแปลงซึ่งเมื่อใช้กับบางระบบทดสอบอาจจะทำให้ผลตอบไม่สามารถหาคำตอบได้

รายการอ้างอิง

1. Arrillaga, J., Arnold, C.P., and Harker, B.J. Computer Modelling of Electrical Power Systems. Chichester: John Wiley, 1983.
2. Lo, K.L., and Zhang, C. Decomposed three-phase power flow solution using the sequence component frame. Proceeding of the IEEE Published, May 1993, Vol. 140, No. 3, pp. 181-188.
3. Arrillaga, J., Bradley, D.A., and Bodger, P.S. Power System Harmonics. Norwich: John Wiley & Sons, 1985
4. ปานทอง ถินสถิตย์
5. Harley,R.G., Correia, J.M.E., Jennings,G.D., and Makram, E.B., Induction Motor Model for The Study of Transient Stability in Both Balanced and Unbalanced Multi-Machine Networks. Norwich: IEEE, 1992
6. Stevenson, W.D. Elements of Power System Analysis. Singapore: McGraw-Hill, 1982.
7. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์เฟลว์ของระบบทดสอบ 5 บัส (มีคอนเวอร์เตอร์)

ก.1 ตารางฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของแรงดันของแต่ละบัส

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของแรงดันของบัสที่ 1

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	1.0438	30.80	1.0464	-89.41	1.0410	150.78
3	0.0006	-128.77	0.0005	48.20	0.0000	89.69
5	0.0908	-57.78	0.0816	63.43	0.0765	176.74
7	0.0160	51.75	0.0176	-66.35	0.0158	167.72
9	0.0003	16.96	0.0002	-157.45	0.0000	147.44
11	0.0025	164.97	0.0026	-76.00	0.0024	43.72
13	0.0011	-65.28	0.0014	173.75	0.0012	49.26
15	0.0001	-115.70	0.0001	56.81	0.0000	99.47
17	0.0014	18.97	0.0018	144.59	0.0013	-97.08
19	0.0016	-166.74	0.0026	39.64	0.0010	-77.33
21	0.0002	61.80	0.0003	-162.43	0.0001	-46.33
23	0.0018	-131.08	0.0008	-118.38	0.0029	52.27
25	0.0003	-124.63	0.0003	149.44	0.0007	43.23
27	0.0000	-120.78	0.0000	18.47	0.0000	19.43
29	0.0003	43.86	0.0004	77.64	0.0002	121.96
31	0.0002	-177.74	0.0001	-173.66	0.0003	-148.85
33	0.0000	89.46	0.0000	5.75	0.0000	88.65
35	0.0000	-85.55	0.0000	-20.12	0.0000	148.83
37	0.0000	16.22	0.0000	-60.55	0.0000	128.37
39	0.0000	-13.97	0.0000	161.59	0.0000	-23.98
THDv	0.0923	8.84 %	0.0836	7.99 %	0.0782	7.51 %

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรี้มของแรงดันของบัสที่ 2

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	1.0457	28.41	1.0467	-91.52	1.0463	148.32
3	0.0005	-129.14	0.0005	47.40	0.0000	106.76
5	0.0755	-64.64	0.0744	66.80	0.0573	174.95
7	0.0126	56.47	0.0160	-73.88	0.0112	162.86
9	0.0002	15.71	0.0002	-161.02	0.0000	140.85
11	0.0019	157.22	0.0023	-75.61	0.0016	40.07
13	0.0008	-62.89	0.0012	166.09	0.0008	43.13
15	0.0001	-117.78	0.0001	52.93	0.0000	102.52
17	0.0010	16.09	0.0015	140.43	0.0008	-101.60
19	0.0009	-166.87	0.0022	32.54	0.0006	-83.66
21	0.0001	75.49	0.0003	-173.02	0.0001	-53.81
23	0.0011	-141.02	0.0009	-151.15	0.0013	46.54
25	0.0001	140.53	0.0004	101.97	0.0003	41.86
27	0.0000	-4.99	0.0000	46.80	0.0000	-12.27
29	0.0004	72.55	0.0000	145.16	0.0003	8.02
31	0.0001	162.98	0.0001	25.52	0.0002	-15.07
33	0.0000	140.26	0.0000	-62.34	0.0000	-133.29
35	0.0000	-106.86	0.0000	35.10	0.0000	150.62
37	0.0000	57.45	0.0000	-93.33	0.0000	144.92
39	0.0000	-10.17	0.0000	166.46	0.0000	135.52
THDv	0.0766	7.32 %	0.0762	7.28 %	0.0584	5.58 %

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงฮาร์มอนิกสเปคตรัมของแรงดันของบัสที่ 3

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	1.0270	26.48	1.0248	-93.52	1.0223	145.53
3	0.0013	-129.05	0.0011	51.17	0.0001	48.95
5	0.1827	-55.80	0.1571	67.37	0.1501	175.93
7	0.0332	54.19	0.0342	-65.18	0.0331	171.37
9	0.0005	18.71	0.0004	-152.26	0.0001	143.34
11	0.0039	169.47	0.0036	-70.75	0.0038	46.29
13	0.0017	-63.53	0.0018	178.75	0.0018	54.88
15	0.0001	-111.54	0.0001	67.78	0.0000	73.06
17	0.0011	35.45	0.0009	154.81	0.0011	-91.73
19	0.0007	-177.06	0.0007	75.68	0.0008	-54.68
21	0.0001	167.19	0.0001	-9.36	0.0000	-161.71
23	0.0004	-41.29	0.0004	61.19	0.0005	-166.54
25	0.0002	71.75	0.0003	-44.52	0.0003	-170.22
27	0.0000	27.41	0.0000	-154.83	0.0000	-143.89
29	0.0002	173.51	0.0002	-68.12	0.0002	44.74
31	0.0002	-35.37	0.0002	-154.80	0.0002	77.12
33	0.0000	-66.41	0.0000	118.78	0.0000	76.09
35	0.0001	80.30	0.0001	-158.71	0.0001	-47.03
37	0.0001	-149.51	0.0001	93.20	0.0001	-37.08
39	0.0000	165.60	0.0000	-16.19	0.0000	-5.52
THDv	0.1858	18.09 %	0.1609	15.70 %	0.1538	15.04 %

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงฮาร์มอนิกสเปคตรัมของแรงดันของบัสที่ 4

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	1.0497	6.10	1.0505	-113.92	1.0498	126.05
3	0.0001	-87.78	0.0001	49.43	0.0001	-177.80
5	0.0170	-29.52	0.0171	92.80	0.0165	-148.22
7	0.0008	17.19	0.0010	-87.65	0.0011	135.72
9	0.0000	56.17	0.0000	-161.76	0.0000	-23.99
11	0.0005	-165.79	0.0005	-45.83	0.0005	74.65
13	0.0001	-101.80	0.0001	157.73	0.0001	12.07
15	0.0000	-77.25	0.0000	58.43	0.0000	-170.66
17	0.0003	51.74	0.0003	170.92	0.0003	-65.64
19	0.0001	-105.89	0.0002	38.90	0.0002	-156.24
21	0.0000	100.23	0.0000	-140.95	0.0000	-12.48
23	0.0004	-138.48	0.0002	-17.25	0.0003	79.35
25	0.0001	-146.84	0.0000	-20.53	0.0001	49.13
27	0.0000	-126.15	0.0000	16.75	0.0000	135.11
29	0.0000	5.93	0.0000	127.98	0.0000	-121.46
31	0.0000	58.58	0.0000	34.75	0.0000	-132.98
33	0.0000	128.52	0.0000	-84.52	0.0000	51.16
35	0.0000	-69.63	0.0000	52.15	0.0000	164.77
37	0.0000	-28.48	0.0000	-120.63	0.0000	138.24
39	0.0000	14.50	0.0000	156.95	0.0000	-78.76
THDv	0.0171	1.63 %	0.0171	1.63 %	0.0165	1.57 %

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงฮาร์มอนิกสเปคตรัมของแรงดันของบัสที่ 5

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	1.0449	-0.12	1.0449	-120.10	1.0452	119.89
3	0.0001	-85.45	0.0001	50.20	0.0001	-175.49
5	0.0139	-32.32	0.0147	90.84	0.0136	-147.89
7	0.0004	41.75	0.0012	-85.53	0.0010	112.11
9	0.0000	59.25	0.0000	-162.02	0.0000	-23.13
11	0.0004	-170.29	0.0004	-49.63	0.0004	73.14
13	0.0000	-72.49	0.0001	159.55	0.0001	-10.84
15	0.0000	-75.56	0.0000	57.57	0.0000	-168.66
17	0.0002	47.65	0.0002	166.44	0.0002	-67.76
19	0.0001	-85.48	0.0002	39.38	0.0002	-163.79
21	0.0000	98.32	0.0000	-146.08	0.0000	-15.56
23	0.0002	-151.76	0.0001	-39.50	0.0002	60.56
25	0.0000	-153.85	0.0000	102.42	0.0000	-32.05
27	0.0000	51.56	0.0000	170.90	0.0000	-51.45
29	0.0000	118.33	0.0000	-117.15	0.0000	1.38
31	0.0000	169.28	0.0000	-39.68	0.0000	30.42
33	0.0000	152.08	0.0000	-56.24	0.0000	64.49
35	0.0000	-71.08	0.0000	56.36	0.0000	171.61
37	0.0000	22.75	0.0000	-117.60	0.0000	120.53
39	0.0000	16.19	0.0000	160.07	0.0000	-76.39
THDv	0.0139	1.33 %	0.0148	1.41 %	0.0137	1.31 %

ก.2 ตารางฮาร์มอนิกสเปคตรัมของกระแสของแต่ละอุปกรณ์

ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงฮาร์มอนิกสเปคตรัมของกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G1

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	6.6780	175.40	6.7355	57.22	6.8909	-64.10
3	0.0068	138.25	0.0122	-38.22	0.0054	146.22
5	0.8808	-122.99	0.8900	5.96	0.7632	122.11
7	0.1356	-69.13	0.1433	174.58	0.1474	50.16
9	0.0010	-84.26	0.0018	110.37	0.0008	-52.05
11	0.0111	103.79	0.0116	-136.34	0.0114	-14.42
13	0.0052	172.07	0.0058	57.01	0.0059	-70.18
15	0.0002	152.22	0.0004	-28.97	0.0002	149.47
17	0.0038	-40.37	0.0049	77.09	0.0046	-149.84
19	0.0036	66.45	0.0070	-61.23	0.0056	149.55
21	0.0003	0.82	0.0006	121.64	0.0006	-88.41
23	0.0065	142.63	0.0015	-27.03	0.0051	-40.39
25	0.0013	138.29	0.0006	20.12	0.0011	-69.71
27	0.0000	116.51	0.0001	-60.20	0.0000	134.80
29	0.0004	-80.15	0.0002	53.71	0.0003	131.75
31	0.0002	5.34	0.0002	-93.39	0.0002	136.45
33	0.0000	-6.01	0.0000	-169.08	0.0000	37.27
35	0.0000	-156.66	0.0000	-26.27	0.0000	61.50
37	0.0000	-102.15	0.0000	145.97	0.0000	32.97
39	0.0000	-108.45	0.0000	76.38	0.0000	-90.78
THDi	0.8913	13.35 %	0.9017	13.39 %	0.7775	11.28 %

ตารางที่ ก.7 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า G2

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	2.6207	143.42	2.5335	22.31	2.5350	-95.41
3	0.0058	137.61	0.0113	-39.08	0.0054	144.47
5	0.6821	-130.18	0.8282	2.46	0.6211	128.58
7	0.0991	-67.69	0.1281	174.29	0.1196	41.32
9	0.0008	-85.40	0.0016	107.90	0.0008	-58.90
11	0.0080	95.14	0.0103	-141.50	0.0089	-10.58
13	0.0035	171.42	0.0049	56.02	0.0046	-80.61
15	0.0002	148.73	0.0003	-32.77	0.0002	145.78
17	0.0025	-46.78	0.0039	70.56	0.0035	-148.16
19	0.0021	-61.54	0.0053	-64.26	0.0045	137.73
21	0.0002	5.16	0.0005	112.45	0.0004	-92.28
23	0.0034	135.61	0.0006	13.36	0.0031	-53.97
25	0.0004	120.93	0.0004	4.84	0.0005	-118.93
27	0.0000	-87.22	0.0000	70.05	0.0000	-116.18
29	0.0004	21.30	0.0004	158.14	0.0003	-86.67
31	0.0003	73.49	0.0002	-84.70	0.0001	-139.79
33	0.0000	31.69	0.0000	-132.28	0.0000	96.98
35	0.0001	-169.42	0.0001	-23.05	0.0000	78.61
37	0.0000	-77.57	0.0000	157.00	0.0000	37.14
39	0.0000	-106.24	0.0000	80.42	0.0000	-80.47
THDi	0.6894	26.31 %	0.8382	33.08 %	0.6326	24.95 %

ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า T1

Harmonic order	Sending end (Bus 1)						Receiving end (Bus 4)					
	Phase A		Phase B		Phase C		Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	6.3713	-3.82	6.4320	-121.91	6.5851	116.68	6.3089	-153.73	6.4729	88.47	6.3247	-34.38
3	0.0109	140.66	0.0099	-36.78	0.0008	-72.26	0.0068	-41.53	0.0122	141.88	0.0054	-33.84
5	0.9299	-146.40	0.8208	-25.21	0.7567	86.88	0.8845	57.29	0.8942	-173.80	0.7670	-57.60
7	0.1372	-37.86	0.1489	-155.58	0.1346	79.06	0.1358	110.94	0.1435	-5.31	0.1476	-129.75
9	0.0016	-74.83	0.0015	116.24	0.0003	41.14	0.0010	96.13	0.0018	-69.42	0.0008	127.81
11	0.0112	75.77	0.0119	-165.56	0.0107	-45.94	0.0112	-75.79	0.0117	44.08	0.0115	165.99
13	0.0052	-155.63	0.0062	84.08	0.0053	-39.36	0.0052	-7.86	0.0058	-122.84	0.0059	109.92
15	0.0003	152.37	0.0003	-29.78	0.0000	-24.02	0.0002	-27.17	0.0004	151.27	0.0002	-30.74
17	0.0039	-71.04	0.0054	55.31	0.0038	173.02	0.0038	140.12	0.0049	-102.49	0.0046	30.49
19	0.0047	99.35	0.0078	-49.27	0.0034	-162.36	0.0036	-113.35	0.0071	119.01	0.0056	-30.49
21	0.0004	-29.53	0.0008	108.49	0.0003	-136.96	0.0003	-178.48	0.0007	-57.96	0.0006	91.76
23	0.0043	144.80	0.0017	134.34	0.0070	-38.48	0.0066	-37.24	0.0015	151.79	0.0051	140.10
25	0.0006	151.31	0.0008	54.50	0.0016	-46.26	0.0013	-41.65	0.0006	-160.13	0.0011	110.61
27	0.0000	160.76	0.0001	-69.24	0.0001	-75.04	0.0000	-63.03	0.0001	119.89	0.0000	-46.92
29	0.0007	-40.68	0.0007	-13.33	0.0004	22.66	0.0004	100.06	0.0002	-126.19	0.0003	-47.70
31	0.0005	92.67	0.0002	98.80	0.0006	120.77	0.0002	-174.73	0.0002	86.80	0.0002	-43.43
33	0.0000	-1.76	0.0000	-68.23	0.0000	3.85	0.0000	174.50	0.0000	11.04	0.0000	-143.30
35	0.0001	-173.67	0.0000	-119.13	0.0000	63.28	0.0000	23.54	0.0000	153.85	0.0000	-118.02
37	0.0000	-72.34	0.0000	-150.80	0.0000	36.77	0.0000	77.85	0.0000	-34.00	0.0000	-146.86
39	0.0000	-104.70	0.0000	81.15	0.0000	-76.00	0.0000	72.05	0.0000	-103.55	0.0000	88.10
THDi	0.9401	14.76 %	0.8344	12.97 %	0.7687	11.67 %	0.8950	14.19 %	0.9059	14.00 %	0.7813	12.35 %

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า T2

Harmonic order	Sending end (Bus 2)						Receiving end (Bus 5)					
	Phase A		Phase B		Phase C		Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	2.4541	-36.96	2.3673	-158.16	2.3682	84.28	2.3440	172.55	2.2673	52.23	2.4029	-65.68
3	0.0094	139.86	0.0096	-37.93	0.0006	-81.11	0.0058	-42.27	0.0113	140.97	0.0055	-35.56
5	0.7689	-154.18	0.7596	-20.97	0.5521	84.72	0.6837	49.98	0.8302	-177.42	0.6231	-51.29
7	0.1075	-34.49	0.1330	-162.69	0.0974	75.17	0.0992	112.34	0.1282	-5.64	0.1197	-138.65
9	0.0013	-76.66	0.0014	112.23	0.0002	34.24	0.0008	94.83	0.0016	-71.99	0.0008	121.05
11	0.0087	67.29	0.0106	-164.59	0.0072	-49.93	0.0081	-84.61	0.0103	38.70	0.0089	169.60
13	0.0037	-154.99	0.0054	76.74	0.0035	-44.08	0.0035	-8.55	0.0049	-123.88	0.0046	99.42
15	0.0002	149.64	0.0003	-34.38	0.0000	-35.13	0.0002	-30.91	0.0003	147.36	0.0002	-34.29
17	0.0027	-73.28	0.0047	50.92	0.0022	167.67	0.0025	133.51	0.0039	-109.23	0.0036	31.98
19	0.0025	95.69	0.0067	-56.73	0.0020	-163.76	0.0021	-118.35	0.0054	115.88	0.0045	-42.29
21	0.0002	-9.23	0.0007	96.92	0.0001	-149.01	0.0002	-174.49	0.0005	-67.32	0.0004	87.80
23	0.0027	133.78	0.0023	111.82	0.0030	-42.71	0.0034	-44.36	0.0006	-167.36	0.0031	126.24
25	0.0002	42.49	0.0009	11.31	0.0007	-46.08	0.0004	-59.04	0.0004	-175.10	0.0005	61.12
27	0.0000	-96.12	0.0000	-58.35	0.0000	-98.20	0.0000	93.71	0.0000	-109.78	0.0000	63.80
29	0.0008	-19.41	0.0001	-3.08	0.0005	-75.44	0.0004	-158.49	0.0004	-21.75	0.0003	93.51
31	0.0002	74.23	0.0002	-58.80	0.0003	-106.83	0.0003	-106.40	0.0002	95.18	0.0001	40.50
33	0.0000	50.79	0.0000	-147.67	0.0000	130.04	0.0000	-148.10	0.0000	47.74	0.0000	-83.42
35	0.0001	161.70	0.0000	-47.84	0.0000	63.92	0.0001	10.76	0.0001	157.00	0.0000	-101.17
37	0.0000	-31.56	0.0000	177.08	0.0000	54.10	0.0000	102.49	0.0000	-22.97	0.0000	-142.85
39	0.0000	-100.83	0.0000	84.20	0.0000	-8.41	0.0000	74.01	0.0000	-99.55	0.0000	98.91
THDi	0.7765	31.64 %	0.7714	32.59 %	0.5607	23.68 %	0.6910	29.48 %	0.8402	37.06 %	0.6346	26.41 %

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงฮาร์มอนิกสเปคตรัมของกระแสของคาปาซิเตอร์

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	2.3106	116.48	2.3059	-3.52	2.3004	-124.47
3	0.0086	-39.05	0.0078	141.17	0.0008	138.95
5	2.0554	34.20	1.7677	-157.37	1.6884	-94.07
7	0.5227	144.19	0.5390	24.82	0.5214	-98.63
9	0.0096	108.71	0.0085	-62.26	0.0016	-126.66
11	0.0972	-100.53	0.0890	19.25	0.0934	136.29
13	0.0506	26.47	0.0520	-91.25	0.0531	144.88
15	0.0035	-21.54	0.0028	157.78	0.0006	163.06
17	0.0423	125.45	0.0354	-115.19	0.0403	-1.73
19	0.0299	-87.06	0.0304	165.68	0.0356	35.32
21	0.0032	-102.81	0.0037	80.64	0.0003	-71.71
23	0.0187	48.71	0.0208	151.19	0.0239	-76.54
25	0.0135	161.75	0.0149	45.48	0.0151	-80.22
27	0.0020	117.41	0.0016	-64.83	0.0003	-53.89
29	0.0156	-96.49	0.0132	21.88	0.0143	134.74
31	0.0124	54.63	0.0140	-64.80	0.0135	167.12
33	0.0018	23.59	0.0016	-151.22	0.0002	166.09
35	0.0083	170.30	0.0069	-68.71	0.0075	42.97
37	0.0053	-59.51	0.0063	-176.80	0.0061	52.92
39	0.0013	-104.40	0.0011	73.81	0.0002	84.48
THDi	2.1246	91.95 %	1.8519	80.31 %	1.7715	77.01 %

ตารางที่ ก.11 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสของโหลดบัสที่บัสที่ 1

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	0.6427	4.23	0.6411	-115.98	0.6444	124.21
3	0.0005	-177.28	0.0004	-0.31	0.0000	41.17
5	0.0611	-101.50	0.0546	19.71	0.0517	133.01
7	0.0098	7.29	0.0107	-110.81	0.0097	123.26
9	0.0001	-30.03	0.0001	155.55	0.0000	100.45
11	0.0013	114.93	0.0013	-126.03	0.0012	-6.32
13	0.0005	-118.35	0.0007	120.67	0.0006	-3.81
15	0.0000	-171.61	0.0000	0.90	0.0000	43.56
17	0.0006	-39.51	0.0007	86.10	0.0005	-155.56
19	0.0006	132.47	0.0010	-21.15	0.0004	-138.12
21	0.0001	-1.04	0.0001	134.73	0.0001	-109.18
23	0.0006	164.26	0.0003	176.95	0.0010	-12.40
25	0.0001	169.08	0.0001	83.15	0.0002	-23.06
27	0.0000	171.48	0.0000	-49.27	0.0000	-48.31
29	0.0001	-25.18	0.0001	8.60	0.0001	52.92
31	0.0001	112.05	0.0000	116.14	0.0001	140.95
33	0.0000	18.20	0.0000	-65.50	0.0000	17.39
35	0.0000	-157.76	0.0000	-92.33	0.0000	76.62
37	0.0000	-56.86	0.0000	-133.62	0.0000	55.30
39	0.0000	-87.83	0.0000	87.72	0.0000	-97.84
THDi	0.0619	9.63 %	0.0557	8.67 %	0.0526	8.16 %

ตารางที่ ก.12 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสของโหลดบัสที่บัสที่ 2

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	2.0165	7.14	2.0146	-112.79	2.0154	127.05
3	0.0012	-170.22	0.0012	6.32	0.0001	65.68
5	0.1524	-102.90	0.1500	28.55	0.1155	136.69
7	0.0236	16.18	0.0298	-114.16	0.0210	122.58
9	0.0004	-27.95	0.0004	155.32	0.0000	97.19
11	0.0031	109.96	0.0036	-122.88	0.0026	-7.20
13	0.0012	-113.60	0.0018	115.38	0.0011	-7.58
15	0.0001	-171.63	0.0001	-0.92	0.0000	48.67
17	0.0012	-40.57	0.0019	83.77	0.0010	-158.26
19	0.0010	133.98	0.0027	-26.61	0.0007	-142.82
21	0.0001	14.13	0.0003	125.62	0.0001	-115.17
23	0.0011	155.66	0.0009	145.53	0.0014	-16.77
25	0.0001	75.48	0.0003	36.93	0.0003	-23.18
27	0.0000	-71.58	0.0000	-19.78	0.0000	-78.85
29	0.0003	4.59	0.0000	77.20	0.0002	-59.94
31	0.0001	93.78	0.0001	-43.67	0.0001	-84.27
33	0.0000	69.95	0.0000	-132.64	0.0000	156.41
35	0.0000	-178.17	0.0000	-36.21	0.0000	79.31
37	0.0000	-14.78	0.0000	-165.56	0.0000	72.69
39	0.0000	-83.23	0.0000	93.40	0.0000	62.46
THDi	0.1543	7.65 %	0.1530	7.59 %	0.1174	5.83 %

ตารางที่ ก.13 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสของโหลดบัสที่บัสที่ 3

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	3.2659	-0.09	3.2729	-120.09	3.2809	118.96
3	0.0052	-177.56	0.0047	2.65	0.0005	0.44
5	0.6346	-99.53	0.5481	23.64	0.5261	132.20
7	0.1049	9.73	0.1086	-109.64	0.1056	126.91
9	0.0014	-28.29	0.0012	160.74	0.0002	96.34
11	0.0106	119.44	0.0097	-120.79	0.0102	-3.75
13	0.0043	-116.60	0.0044	125.68	0.0046	1.81
15	0.0002	-167.45	0.0002	11.87	0.0000	17.15
17	0.0024	-23.04	0.0020	96.32	0.0023	-150.21
19	0.0014	122.15	0.0014	14.89	0.0017	-115.47
21	0.0001	104.35	0.0001	-72.21	0.0000	135.45
23	0.0006	-105.96	0.0007	-3.47	0.0008	128.79
25	0.0004	5.46	0.0004	-110.81	0.0004	123.49
27	0.0000	-40.33	0.0000	137.43	0.0000	148.37
29	0.0003	104.47	0.0003	-137.16	0.0003	-24.29
31	0.0002	-105.57	0.0003	134.99	0.0003	6.92
33	0.0000	-137.67	0.0000	47.52	0.0000	4.83
35	0.0001	8.09	0.0001	129.09	0.0001	-119.24
37	0.0001	137.42	0.0001	20.13	0.0001	-110.15
39	0.0000	91.74	0.0000	-90.05	0.0000	-79.38
THDi	0.6433	19.70 %	0.5589	17.08 %	0.5367	16.36 %

ตารางที่ ก.14 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสของโหลดบัสที่บัสที่ 4

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	0.3195	-20.47	0.3193	-140.49	0.3195	99.48
3	0.0000	-136.29	0.0000	0.92	0.0000	133.69
5	0.0057	49.07	0.0057	49.07	0.0055	168.06
7	0.0002	-27.26	0.0003	-132.11	0.0003	91.26
9	0.0000	9.18	0.0000	151.25	0.0000	-70.99
11	0.0001	144.17	0.0001	-95.86	0.0001	24.62
13	0.0000	-154.87	0.0000	104.65	0.0000	-41.00
15	0.0000	-133.16	0.0000	2.52	0.0000	133.43
17	0.0001	-6.75	0.0001	112.44	0.0001	-124.13
19	0.0000	-166.68	0.0000	-21.89	0.0000	142.97
21	0.0000	37.38	0.0000	156.20	0.0000	-75.32
23	0.0001	156.85	0.0000	-81.91	0.0001	14.68
25	0.0000	146.87	0.0000	-86.82	0.0000	-17.16
27	0.0000	166.11	0.0000	-50.99	0.0000	67.37
29	0.0000	-63.11	0.0000	58.94	0.0000	169.50
31	0.0000	-11.62	0.0000	-35.46	0.0000	156.81
33	0.0000	57.27	0.0000	-155.77	0.0000	-20.10
35	0.0000	-141.84	0.0000	-20.06	0.0000	92.56
37	0.0000	-101.55	0.0000	166.29	0.0000	65.17
39	0.0000	-59.36	0.0000	83.08	0.0000	-152.62
THDi	0.0057	1.78 %	0.0057	1.79 %	0.0055	1.72 %

ตารางที่ ก.15 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสของโหลดบัสที่บัสที่ 5

Harmonic order	Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	0.1674	-31.08	0.1674	-151.06	0.1674	88.93
3	0.0000	-139.22	0.0000	-3.56	0.0000	130.74
5	0.0025	-80.27	0.0027	42.90	0.0025	164.16
7	0.0001	-6.02	0.0002	-133.31	0.0002	64.33
9	0.0000	9.56	0.0000	148.29	0.0000	-72.82
11	0.0001	137.42	0.0001	-101.93	0.0001	20.84
13	0.0000	-127.49	0.0000	104.54	0.0000	-65.84
15	0.0000	-133.16	0.0000	-0.03	0.0000	133.74
17	0.0000	-12.33	0.0000	106.45	0.0000	-127.75
19	0.0000	-147.62	0.0000	-22.76	0.0000	134.07
21	0.0000	34.25	0.0000	149.86	0.0000	-79.62
23	0.0000	142.45	0.0000	-105.29	0.0000	-5.23
25	0.0000	138.83	0.0000	35.10	0.0000	-99.37
27	0.0000	-17.13	0.0000	102.21	0.0000	-120.15
29	0.0000	48.40	0.0000	172.92	0.0000	-68.55
31	0.0000	98.25	0.0000	-110.72	0.0000	-40.62
33	0.0000	80.04	0.0000	-128.28	0.0000	-7.55
35	0.0000	-144.03	0.0000	-16.59	0.0000	98.66
37	0.0000	-51.02	0.0000	168.63	0.0000	46.76
39	0.0000	-58.34	0.0000	85.54	0.0000	-150.92
THDi	0.0025	1.49 %	0.0027	1.61 %	0.0025	1.49 %

ตารางที่ ก.16 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เปคตรัมของกระแสที่ปลายของสายส่ง L1 – 2

Harmonic order	Sending end (Bus 1)						Receiving end (Bus 2)					
	Phase A		Phase B		Phase C		Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	1.5051	54.42	1.6853	-82.95	1.1447	162.30	1.4568	-132.23	1.6633	87.22	1.1113	-25.76
3	0.0006	150.60	0.0003	-9.48	0.0002	-43.86	0.0009	-32.76	0.0007	149.51	0.0002	140.76
5	0.0672	-105.70	0.0080	-80.64	0.0730	93.53	0.1252	48.22	0.1117	153.63	0.1249	-87.86
7	0.0037	-76.61	0.0101	-32.87	0.0103	106.46	0.0201	142.91	0.0269	35.34	0.0241	-94.19
9	0.0001	75.84	0.0002	-84.84	0.0000	83.53	0.0003	112.39	0.0004	-61.35	0.0000	-127.02
11	0.0011	-151.79	0.0026	10.31	0.0004	114.60	0.0033	-103.63	0.0047	19.02	0.0031	139.34
13	0.0006	34.55	0.0018	-108.61	0.0005	102.34	0.0016	32.75	0.0027	-96.06	0.0016	140.45
15	0.0001	-34.60	0.0002	141.46	0.0000	-100.93	0.0001	-24.43	0.0002	148.24	0.0000	-156.75
17	0.0013	92.93	0.0033	-129.20	0.0011	-4.79	0.0023	102.74	0.0042	-123.51	0.0018	-1.20
19	0.0018	-75.25	0.0056	124.95	0.0010	-13.13	0.0029	-70.01	0.0066	127.43	0.0015	3.25
21	0.0002	141.40	0.0007	-77.40	0.0002	51.32	0.0003	145.30	0.0008	-75.07	0.0002	54.45
23	0.0020	-42.02	0.0022	-43.92	0.0035	137.67	0.0029	-45.60	0.0023	-46.45	0.0039	141.96
25	0.0004	-30.53	0.0009	-136.65	0.0008	126.45	0.0003	-26.91	0.0010	-147.18	0.0009	129.31
27	0.0000	31.18	0.0001	112.69	0.0000	102.77	0.0000	-30.11	0.0000	116.91	0.0000	96.59
29	0.0007	148.09	0.0007	176.12	0.0002	169.01	0.0006	146.16	0.0003	-164.48	0.0002	101.68
31	0.0005	-91.16	0.0002	-92.36	0.0004	-42.59	0.0003	-102.86	0.0003	117.47	0.0002	42.86
33	0.0000	-156.36	0.0000	57.77	0.0000	-163.66	0.0000	-137.57	0.0000	29.87	0.0000	-48.21
35	0.0001	-4.54	0.0001	91.78	0.0001	-124.50	0.0001	-14.68	0.0001	120.24	0.0001	-122.24
37	0.0001	121.05	0.0001	17.77	0.0000	-134.71	0.0001	141.53	0.0001	-0.56	0.0001	-126.80
39	0.0000	76.95	0.0000	-105.29	0.0000	32.18	0.0000	78.87	0.0000	-103.51	0.0000	-122.41
THDi	0.0674	4.48 %	0.0150	0.89 %	0.0738	6.45 %	0.1269	8.71 %	0.1153	6.93 %	0.1273	11.46 %

ตารางที่ ก.17 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์เป็ดรึมของกระแสที่ปลายของสายส่ง L2 – 3

Harmonic order	Sending end (Bus 2)						Receiving end (Bus 3)					
	Phase A		Phase B		Phase C		Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	1.4041	21.92	1.7386	-113.35	1.3171	126.12	1.4493	-164.96	1.8510	58.27	1.3743	-60.28
3	0.0094	-35.29	0.0098	146.44	0.0004	87.69	0.0089	44.93	0.0091	-33.07	0.0004	-93.48
5	0.7519	31.26	0.7561	168.51	0.5050	-86.75	0.6422	-147.92	0.5994	-9.04	0.4249	93.91
7	0.1041	156.12	0.1279	23.58	0.0885	-97.70	0.0766	-22.06	0.0799	-154.47	0.0644	84.77
9	0.0012	113.87	0.0013	-57.94	0.0002	-143.28	0.0007	-61.70	0.0005	133.94	0.0001	41.75
11	0.0079	-101.20	0.0089	29.17	0.0063	142.04	0.0026	98.61	0.0015	-68.35	0.0017	-26.96
13	0.0031	35.91	0.0042	-92.49	0.0029	146.72	0.0002	-109.21	0.0012	-117.46	0.0005	19.17
15	0.0002	-15.59	0.0002	161.20	0.0000	146.66	0.0001	-45.98	0.0001	136.98	0.0000	-83.75
17	0.0017	135.96	0.0023	-112.67	0.0013	-2.08	0.0017	81.70	0.0033	-128.89	0.0012	0.09
19	0.0005	-93.52	0.0026	142.56	0.0013	43.39	0.0025	-71.38	0.0045	126.78	0.0011	-20.27
21	0.0002	-103.24	0.0001	-71.64	0.0000	-50.03	0.0002	131.06	0.0004	-74.19	0.0001	62.48
23	0.0009	-21.59	0.0010	-86.77	0.0004	176.91	0.0009	-32.21	0.0006	-84.26	0.0014	139.26
25	0.0004	-177.57	0.0004	155.30	0.0002	-151.49	0.0000	84.54	0.0002	104.67	0.0000	-107.96
27	0.0001	108.92	0.0000	-67.94	0.0000	68.27	0.0000	107.88	0.0001	-71.57	0.0000	12.40
29	0.0006	-169.15	0.0002	15.98	0.0005	112.75	0.0004	-147.43	0.0006	2.72	0.0004	115.18
31	0.0000	-0.49	0.0000	-105.62	0.0003	105.83	0.0002	28.54	0.0005	-63.60	0.0003	143.17
33	0.0000	-82.40	0.0000	-157.41	0.0000	-37.28	0.0000	9.99	0.0001	-155.21	0.0000	122.73
35	0.0000	128.93	0.0001	-67.82	0.0000	3.20	0.0002	168.88	0.0003	-70.87	0.0002	44.24
37	0.0000	-89.06	0.0000	177.43	0.0000	9.45	0.0001	-59.15	0.0003	-176.79	0.0001	49.95
39	0.0000	-116.07	0.0000	71.01	0.0000	134.02	0.0000	-104.99	0.0000	73.50	0.0000	89.01
THDi	0.7592	54.07 %	0.7670	44.12 %	0.5127	38.93 %	0.6468	44.63 %	0.6048	32.67 %	0.4298	31.27 %

ตารางที่ ก.18 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสที่ปลายของสายส่ง L1 – 3 (First line)

Harmonic order	Sending end (Bus 1)						Receiving end (Bus 3)					
	Phase A		Phase B		Phase C		Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	2.1237	20.99	2.1402	-91.48	1.9359	137.39	2.1673	-163.82	2.1479	83.61	1.9760	-47.92
3	0.0057	-37.32	0.0054	145.25	0.0003	19.31	0.0052	142.84	0.0049	-34.28	0.0003	-164.93
5	0.5009	38.50	0.4407	157.17	0.3417	-85.37	0.3815	-138.59	0.3363	-22.82	0.2388	97.59
7	0.0719	144.00	0.0771	30.49	0.0630	-101.86	0.0415	-38.78	0.0454	-144.71	0.0318	76.93
9	0.0008	109.76	0.0007	-57.15	0.0001	-156.18	0.0002	-66.86	0.0002	141.74	0.0001	-6.66
11	0.0057	-96.92	0.0052	19.76	0.0049	141.37	0.0011	-163.32	0.0008	1.89	0.0013	117.23
13	0.0025	27.64	0.0025	-85.95	0.0024	143.55	0.0008	37.99	0.0012	-110.12	0.0011	136.10
15	0.0001	-21.65	0.0001	162.12	0.0000	156.50	0.0001	-26.74	0.0001	143.48	0.0000	-150.90
17	0.0017	117.10	0.0014	-113.09	0.0016	-3.55	0.0021	106.17	0.0026	-126.63	0.0020	-0.25
19	0.0019	-76.01	0.0015	152.03	0.0015	27.92	0.0024	-75.50	0.0036	132.79	0.0017	4.94
21	0.0001	156.89	0.0001	-32.20	0.0001	39.60	0.0002	165.27	0.0003	-71.51	0.0002	62.90
23	0.0015	-27.55	0.0001	98.72	0.0029	146.67	0.0023	-32.27	0.0010	-34.68	0.0022	152.36
25	0.0002	-16.15	0.0001	-26.20	0.0007	139.58	0.0002	-82.81	0.0003	-36.46	0.0002	166.85
27	0.0000	-59.67	0.0000	109.38	0.0000	116.63	0.0000	111.35	0.0000	-60.21	0.0000	30.40
29	0.0001	48.64	0.0001	128.05	0.0002	-110.77	0.0003	-124.86	0.0002	55.72	0.0004	145.01
31	0.0000	-29.73	0.0001	-62.93	0.0002	-56.16	0.0003	55.94	0.0003	-70.16	0.0003	-177.96
33	0.0000	55.80	0.0000	-141.78	0.0000	104.39	0.0001	26.24	0.0000	-151.37	0.0000	173.74
35	0.0000	160.73	0.0000	-65.76	0.0000	169.80	0.0002	163.82	0.0002	-64.70	0.0002	41.57
37	0.0000	-44.64	0.0000	-175.02	0.0000	-68.11	0.0002	-51.58	0.0002	-179.12	0.0002	53.87
39	0.0000	-103.22	0.0000	73.47	0.0000	-109.16	0.0000	-104.61	0.0000	73.87	0.0000	83.93
THDi	0.5061	23.83 %	0.4475	20.91 %	0.3475	17.95 %	0.3838	17.71 %	0.3394	15.80 %	0.2409	12.19 %

ตารางที่ ก.19 ตารางแสดงฮาร์มอนิกส์สเปคตรัมของกระแสที่ปลายของสายส่ง L1 – 3 (Second line)

Harmonic order	Sending end (Bus 1)						Receiving end (Bus 3)					
	Phase A		Phase B		Phase C		Phase A		Phase B		Phase C	
	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)
1	2.2812	20.94	2.0827	-91.20	2.7183	149.50	2.3152	-163.40	2.0806	83.54	2.7192	-34.48
3	0.0061	-37.32	0.0051	145.26	0.0010	131.26	0.0056	142.82	0.0046	-34.21	0.0010	-49.50
5	0.5268	38.40	0.4239	156.64	0.5265	-93.16	0.4113	-139.64	0.3150	-24.69	0.4211	86.75
7	0.0751	143.91	0.0747	30.46	0.0886	-92.82	0.0459	-36.86	0.0423	-141.98	0.0574	91.16
9	0.0008	109.83	0.0007	-57.42	0.0002	-118.64	0.0003	-66.80	0.0002	150.04	0.0001	67.49
11	0.0059	-95.45	0.0052	20.56	0.0064	136.72	0.0009	-179.49	0.0010	20.31	0.0002	-23.42
13	0.0025	26.08	0.0025	-87.63	0.0030	150.06	0.0007	32.83	0.0013	-113.01	0.0007	105.83
15	0.0001	-20.67	0.0001	161.00	0.0000	151.93	0.0001	-27.54	0.0001	145.03	0.0000	-123.37
17	0.0016	123.67	0.0015	-110.71	0.0015	-1.55	0.0021	106.08	0.0026	-124.21	0.0022	-2.77
19	0.0015	-80.42	0.0018	146.12	0.0014	34.16	0.0025	-76.24	0.0036	132.48	0.0018	2.40
21	0.0001	176.59	0.0001	-37.66	0.0001	48.33	0.0002	159.76	0.0003	-70.44	0.0002	53.94
23	0.0014	-24.93	0.0002	121.61	0.0015	157.38	0.0024	-33.53	0.0009	-38.39	0.0037	145.77
25	0.0001	-30.25	0.0001	-36.90	0.0004	154.21	0.0002	-60.05	0.0003	-29.77	0.0006	141.61
27	0.0000	-31.06	0.0000	119.32	0.0000	107.42	0.0000	109.66	0.0000	-60.57	0.0000	118.81
29	0.0001	125.38	0.0000	125.68	0.0002	-167.11	0.0002	-122.81	0.0003	59.65	0.0002	165.81
31	0.0001	-47.05	0.0000	-2.72	0.0002	-90.66	0.0002	50.84	0.0004	-74.00	0.0002	172.49
33	0.0000	54.05	0.0000	-127.70	0.0000	-175.00	0.0000	26.22	0.0000	-151.98	0.0000	160.64
35	0.0000	155.16	0.0000	-81.63	0.0000	34.87	0.0002	166.49	0.0002	-60.03	0.0002	44.24
37	0.0000	-38.33	0.0000	-162.87	0.0000	63.77	0.0001	-55.33	0.0002	177.44	0.0002	51.65
39	0.0000	-103.78	0.0000	72.51	0.0000	84.04	0.0000	-104.53	0.0000	74.02	0.0000	85.74
THDi	0.5322	23.33 %	0.4305	20.67 %	0.5340	19.64 %	0.4139	17.88 %	0.3179	15.28 %	0.4250	15.63 %

ประวัติผู้วิจัย

นายแสงเพชร โล่ห์อร่ามทวีทอง เกิดวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2520 ที่อำเภอบางซื่อ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยในระหว่างที่ศึกษาอยู่ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้รับทุนการศึกษาจากโครงการศิษย์ก้นกุฏิ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย