

การวิเคราะห์การไหลของโหลดและฮาร์มอนิกในสถานะอยู่ตัว  
ของระบบเอซี - ดีซี

ANALYSIS OF LOAD AND HARMONIC FLOW IN THE STEADY STATE  
OF AC-DC SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-510-5

การวิเคราะห์การไหลของโหลดและฮาร์มอนิกในสถานะอยู่ตัว  
ของระบบเอซี-ดีซี

ANALYSIS OF LOAD AND HARMONIC FLOW IN THE STEADY STATE  
OF AC-DC SYSTEMS



สืบพงศ์ สุวรรณภู  
SUEBPONG SUWANNAKUT

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 41516  
วัน, เดือน, ปี 1.9 ก.พ. 2545

b.....  
f.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-510-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ANALYSIS OF LOAD AND HARMONIC FLOW IN THE STEADY STATE  
OF AC-DC SYSTEMS**



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

**2001**

**ISBN 974-648-510-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การไหลของโหลดและฮาร์มอนิกในสถานะอยู่ตัวของระบบเอซี-ดีซี  
ANALYSIS OF LOAD AND HARMONIC FLOW IN THE STEADY  
STATE OF AC-DC SYSTEMS

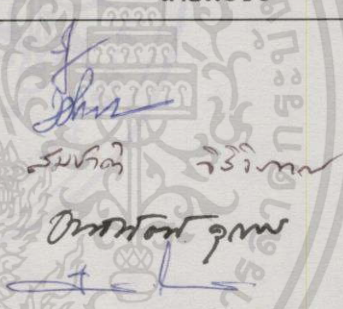
ชื่อนักศึกษา นายสืบพงศ์ สุวรรณภู

รหัสประจำตัว 41061027

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ร.อ.ยศ.ดร. วีระเชษฐ์	ชันเงิน	
ยศ.ดร. วิจิตร	กิมเรศ	
ดร.สมชาติ	จิรวีภากร	
ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ศิริวัฒน์	โปธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 29 ตุลาคม 2544 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัทธู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 2 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การ โฟลว์ของโหลดและฮาร์มอนิกในสถานะอยู่ตัว  
ของระบบเอช-ดีซี

นักศึกษา

นายสืบพงศ์ สุวรรณภู

รหัสประจำตัว

41061027

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2544

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอการศึกษาและการวิเคราะห์การ โฟลว์ของกำลังไฟฟ้า และการ โฟลว์ของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในสถานะอยู่ตัวและเป็น โหลดสมมูล โดยมีคอนเวอร์เตอร์ 12-พัลส์ ของระบบดีซีเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ทำการคำนวณการ โฟลว์ของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันซึ่งสามารถทำการคำนวณการ โฟลว์ของกำลังไฟฟ้าในระบบที่ทำการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสชนิดต่างๆได้ โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบวิธีเชิงเส้นและวิธียูนิไฟด์ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการ โฟลว์ของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อไม่มีและมีการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งผลจากการทดสอบการคำนวณของโปรแกรมโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันจะพบว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบโดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณน้อยและมีความถูกต้อง สำหรับการวิเคราะห์การ โฟลว์ของฮาร์มอนิกจะทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันร่วมกับแบบจำลองฮาร์มอนิกของซีเกอร์ เพื่อคำนวณหาระดับความเพี้ยนของแรงดันและกระแสโดยตรวจสอบระดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในขีดจำกัดของฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้หรือไม่ การสแกนในแต่ละความถี่ที่พิจารณาจะนำมาใช้ในการตรวจสอบหาสถานะการเกิดเรโซแนนซ์ในระบบ ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการ โฟลว์ของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งและทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก โดยทำการเขียนโปรแกรมการรับค่าข้อมูลอินพุตด้วย Delphi และทำการเขียน โปรแกรมในส่วนของคำนวณพร้อมทั้งการแสดงผลบน MATLAB

<b>Thesis Title</b>	Analysis of Load and Harmonic Flow in the Steady State of AC-DC Systems
<b>Student</b>	Mr.Suebphong Suwannakut
<b>Student ID.</b>	41061027
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul

### ABSTRACT

The research presented in this thesis concerns the study and analysis of power flow and harmonic flow in the steady state of AC-DC systems and balanced load. The sources of harmonic are 12-pulse HVDC converters. Unified-Newton-Raphson method is used for the power flow solution in AC-DC systems with HVDC connected between a generator bus and the other bus type. The results of the proposed method are compared with those obtained using the sequential method and the unified method and also compared the system with and without HVDC link. It is found that the Unified-Newton-Raphson method gives satisfactory results in term of the fast convergence and the accuracy. Unified-Newton-Raphson method with CIGRE harmonic impedance modeling is used to quantify the distortion in voltage and current waveforms at various points in the AC-DC systems and is applied to determine distortion levels as well as to check compliance with harmonic limits. Frequency scan analysis is used to detect harmonic resonance conditions in the systems. The results of the harmonic analysis are compared in the system with and without filters. Simulations are performed using Delphi programming for input data and MATLAB programming for solution and output.

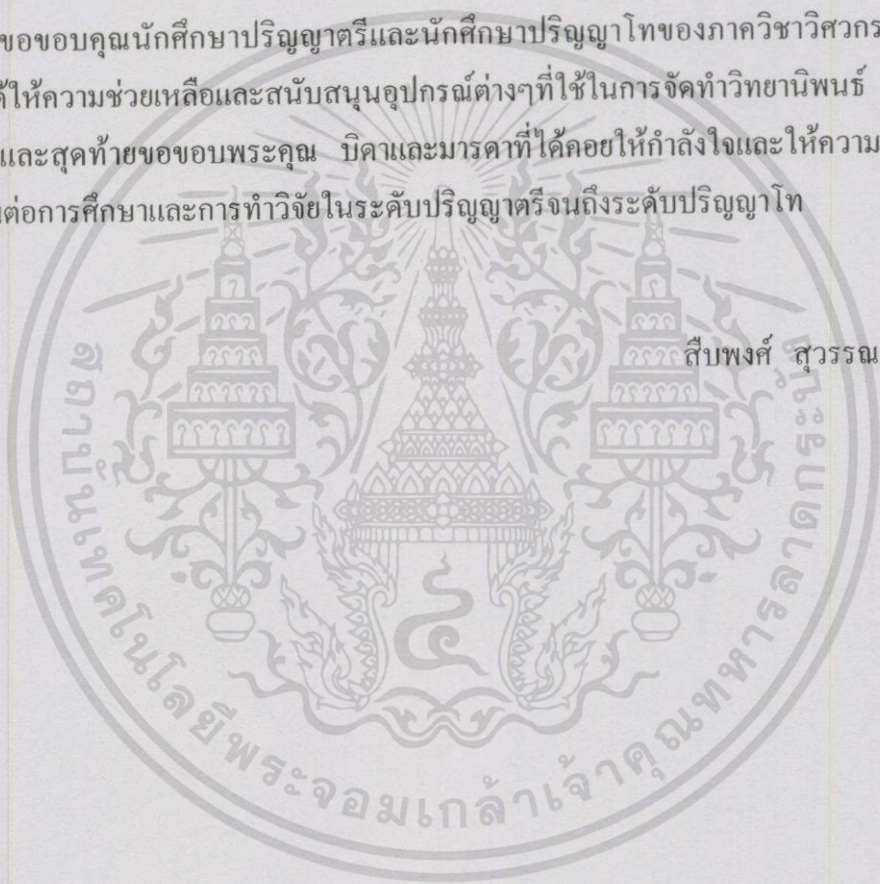
# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจากท่าน รศ.ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่างๆและเงินทุนสนับสนุนในการจัดทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณพิทักษ์ ปิ่นอนงค์ คุณฉันทกร จำศีลปี คุณวรวิทย์ กัลยาเรื่อน และพนักงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทุกท่านที่ได้ให้ความร่วมมือและสนับสนุนข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีและนักศึกษาปริญญาโทของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดาและมารดาที่ได้คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านต่อการศึกษาและการทำวิจัยในระดับปริญญาตรีจนถึงระดับปริญญาโท



สืบพงศ์ สุวรรณภู

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีของระบบเอช-ดีซี.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 การวิเคราะห์ในระบบเอช-ดีซี.....	6
2.2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	6
2.2.2 การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก.....	6
2.3 วงจรของคอนเวอร์เตอร์และสมการคุณลักษณะ.....	7
2.3.1 การวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย.....	9
2.3.2 การวิเคราะห์โดยการพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย.....	13
2.3.3 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสถานะของเครื่องเรียงกระแส.....	15
2.3.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสถานะของอินเวอร์เตอร์.....	15
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เป็นเอชกับปริมาณที่เป็นดีซี.....	16
2.4.1 ความสัมพันธ์ที่เป็นค่าโดยตรง.....	17
2.4.2 ความสัมพันธ์ที่เป็นค่าโดยประมาณ.....	18
2.4.3 ความสัมพันธ์ของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแบบหลายบริดจ์.....	20
2.5 การควบคุมการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบ HVDC.....	22

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 โหมคที่ 1 : การควบคุม $\alpha_r P_{dr} \gamma_i V_{di}$ .....	24
2.5.2 โหมคที่ 2 : การควบคุม $\alpha_r P_{dr} a_i V_{di}$ .....	25
2.5.3 โหมคที่ 3 : การควบคุม $a_r P_{dr} a_i V_{di}$ .....	25
2.5.4 โหมคที่ 4 : การควบคุม $a_r P_{dr} \gamma_i V_{di}$ .....	25
2.5.5 โหมคที่ 5 : การควบคุม $a_r P_{dr} \gamma_i a_i$ .....	25
2.5.6 โหมคที่ 6 : การควบคุม $a_r P_{dr} \alpha_r \gamma_i$ .....	25
2.5.7 โหมคที่ 7 : การควบคุม $\alpha_r I_d \gamma_i V_{di}$ .....	25
2.5.8 โหมคที่ 8 : การควบคุม $\alpha_r V_{dr} \gamma_i P_{di}$ .....	25
2.6 สมการของฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์.....	26
2.6.1 สมการของฮาร์มอนิกเอชโดยไม่พิจารณามุมเหลื่อม.....	26
2.6.2 สมการของฮาร์มอนิกเอชโดยทำการพิจารณามุมเหลื่อม.....	27
2.6.3 ลำดับเฟสของฮาร์มอนิก.....	29
2.7 สรุป.....	30
บทที่ 3 ทฤษฎีและการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี.....	31
3.1 บทนำ.....	31
3.2 การแปลงค่าต่อหน่วยของระบบเอช-ดีซี.....	31
3.3 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ.....	33
3.3.1 สายส่งไฟฟ้า.....	33
3.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทป.....	33
3.4 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	34
3.5 สมการของการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบเอช.....	36
3.6 สมการของการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบดีซี.....	38
3.6.1 สมการเรซิควล.....	39
3.6.2 สมการที่ใช้ในการควบคุมการลู่เข้าหาค่าตอบ.....	39
3.7 ชนิดของบัล.....	40
3.8 การคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบเอช-ดีซี.....	41
3.8.1 วิธีซีเวนเซียด.....	42
3.8.2 วิธียูนิไฟด์.....	44

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8.3 วิธียูนิตไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน.....	46
3.9 สรุป.....	51
บทที่ 4 ทฤษฎีและการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี.....	52
4.1 บทนำ.....	52
4.2 ทฤษฎีของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	52
4.2.1 ลักษณะของฮาร์มอนิก.....	53
4.2.2 ปริมาณทางไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นไซนูซอยด์.....	53
4.2.3 สมการของกำลังไฟฟ้า.....	55
4.2.4 สมการของค่าตัวประกอบกำลัง.....	56
4.3 แบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	57
4.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	58
4.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	58
4.3.3 สายส่งไฟฟ้า.....	59
4.3.4 โหลด.....	60
4.3.5 คาปาซิเตอร์.....	61
4.3.6 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	62
4.4 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี.....	62
4.4.1 การวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่.....	62
4.4.2 การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก.....	63
4.4.3 เครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	68
4.5 การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก.....	71
4.6 สรุป.....	74
บทที่ 5 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการศึกษาและผลการวิเคราะห์.....	75
5.1 บทนำ.....	75
5.2 การทดสอบโปรแกรมเพาเวอร์โฟลว์เทียบกับ IEEE standard.....	75
5.2.1 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส.....	76
5.2.2 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	77
5.2.3 ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส.....	79

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.4 ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	81
5.3 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพล์.....	83
5.3.1 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพล์เทียบกับ IEE AC-DC 14 บัส.....	83
5.3.2 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพล์เทียบกับ ระบบเอช-ดีซี 14 บัส.....	85
5.3.3 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพล์ โดยทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	85
5.3.3.1 ระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส.....	86
5.3.3.2 ระบบทดสอบเอช-ดีซี 30 บัส.....	86
5.3.3.3 ระบบทดสอบเอช-ดีซี 57 บัส.....	87
5.3.3.4 ระบบทดสอบเอช-ดีซี 118 บัส.....	88
5.3.4 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพล์ โดยทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส.....	90
5.3.4.1 เมื่อเจนบัสเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ $P_G$ และ $Q_G$ .....	90
5.3.4.2 เมื่อเจนบัสเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ $P_G$ และ $ V $ .....	94
5.3.5 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพล์ โดยทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส.....	97
5.3.6 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพล์ เมื่อทำการพิจารณา การควบคุมของระบบ HVDC.....	99
5.4 การวิเคราะห์การโพล์ของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี.....	102
5.4.1 การวิเคราะห์การโพล์ของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	102
5.4.2 การวิเคราะห์การโพล์ของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส.....	107
5.4.3 การวิเคราะห์การโพล์ของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส.....	109
5.4.4 การวิเคราะห์การโพล์ของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซีโดยรวม.....	111

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 การทดสอบโปรแกรมการสแกนความถี่ด้วยระบบทดสอบ IEEE.....	114
5.6 การทดสอบโปรแกรมการไหลของฮาร์มอนิกด้วยระบบทดสอบ IEEE .....	120
5.7 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี.....	122
5.8 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังภาคใต้ของประเทศไทย.....	129
5.9 สรุป.....	138
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	139
6.1 การเขียนโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี.....	139
6.2 การเขียนโปรแกรมการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี.....	140
6.3 การนำโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี ไปใช้วิเคราะห์กับระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย.....	140
6.4 ข้อเสนอแนะ.....	141
6.5 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป.....	142
เอกสารอ้างอิง.....	144
ภาคผนวก.....	146
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของระบบทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี.....	147
ภาคผนวก ข. ข้อมูลของระบบทดสอบการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี.....	150
ภาคผนวก ค. ข้อมูลของระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย.....	154
ภาคผนวก ง. โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี.....	170
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	179
ประวัติผู้เขียน.....	199

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลำดับของฮาร์มอนิกสัณฐานลักษณะ.....	26
2.2 กระแสฮาร์มอนิกสัณฐานลักษณะเอซึ่ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ในแต่ละจำนวนพัลส์.....	29
2.3 ลำดับเฟสของเอซึ่ฮาร์มอนิกในกรณีทีระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล.....	30
2.4 ลำดับเฟสของแรงดันคิซึ่ฮาร์มอนิก.....	30
3.1 ค่าฐานของระบบเอซึ่และระบบคิซึ่.....	32
3.2 ความสัมพันธ์ของค่าฐานในระบบเอซึ่-คิซึ่.....	32
3.3 ความสัมพันธ์ของค่าต่อหน่วยของระบบคิซึ่กับค่าฐานของระบบเอซึ่.....	33
3.4 การกำหนดคุณสมบัติของบัลในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์.....	41
4.1 ค่าคงทีของแฟกเตอร์ในสมการที (4.29) และ (4.30).....	59
4.2 เปรียบเทียบการกำหนดค่ากระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกของมาตรฐานต่างๆ.....	71
4.3 ซิดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย (120 V ถึง 69 kV).....	72
4.4 ซิดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายย่อย (69.001 kV ถึง 161 kV).....	72
4.5 ซิดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่าย (มากกว่า 161 kV).....	73
4.6 ซิดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	73
4.7 ซิดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดทีจุดต่อร่วม.....	73
4.8 ซิดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดทีจุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนทีมีอยู่เดิม).....	74
5.1 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำทีใช้ของระบบ IEEE 14 บัซ โดยไมค่านึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	76
5.2 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำทีใช้ของระบบ IEEE 14 บัซ โดยค่านึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	76
5.3 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำทีใช้ของระบบ IEEE 30 บัซ โดยไมค่านึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	78
5.4 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำทีใช้ของระบบ IEEE 30 บัซ โดยค่านึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	78
5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 บัซ ทีคำนวณจากโปรแกรมโดยทำการพิจารณาและไม่พิจารณาพิกัดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลของ IEEE Standard.....	79

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.6 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 57 บัส โดยไม่นับถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้านิวตันที่พของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	79
5.7 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 57 บัส โดยนับถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้านิวตันที่พของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	80
5.8 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 118 บัส โดยไม่นับถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้านิวตันที่พของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	81
5.9 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 118 บัส โดยนับถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้านิวตันที่พของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	81
5.10 การเปรียบเทียบค่าจำนวนรอบของวิธี Newton-Raphson และ วิธี Fast-Decoupled ของระบบ IEEE 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส โดยพิจารณาและไม่พิจารณา พิกัดของกำลังไฟฟ้านิวตันที่พของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ค่ามิตแมตซ์ 0.001.....	83
5.11 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดีซีของระบบ AC-DC 14 บัส.....	85
5.12 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์.....	86
5.13 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอช-ดีซี 30 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์.....	86
5.14 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอช-ดีซี 57 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์.....	87
5.15 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอช-ดีซี 118 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์.....	88
5.16 การเปรียบเทียบค่าจำนวนรอบของวิธีซีแควนเซียล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน- ราฟสัน ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส ที่ค่ามิตแมตซ์ 0.001.....	88
5.17 รายละเอียดของระบบทดสอบเอช-ดีซี 5 บัส และระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส.....	90
5.18 ค่าของจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด.....	92
5.19 ค่าของจำนวนรอบในการคำนวณในแต่ละค่ามิตแมตซ์ที่พิจารณา.....	92
5.20 ค่าของจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของทั้ง 8 โหมดของการควบคุม.....	99
6.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี.....	140
ผ.5.1 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส.....	148

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.5.2 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 5 บัส.....	148
ผ.5.3 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อเงินบัสเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ $P_G$ และ $ V $ .....	149
ผ.5.4 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส.....	151
ผ.5.5 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส.....	151
ผ.5.6 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส.....	152
ผ.5.7 ข้อมูลของคาปาซิเตอร์คั้งที่ ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส.....	152
ผ.5.8 ข้อมูลของเครื่องกรองฮาร์มอนิก ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส.....	153
ผ.5.9 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส.....	153
ผ.5.10 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย.....	156
ผ.5.11 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย.....	161
ผ.5.12 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย.....	161
ผ.5.13 ข้อมูลของคาปาซิเตอร์ที่บัส ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย.....	166
ผ.5.14 ข้อมูลของเครื่องกรองฮาร์มอนิก ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย.....	168
ผ.5.15 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย.....	168

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ HVDC.....	7
2.2 วงจรบริดจ์แบบเต็มคลื่นของระบบไฟสามเฟส.....	8
2.3 วงจรบริดจ์แบบเต็มคลื่นของระบบไฟสามเฟส.....	8
2.4 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของวงจรบริดจ์ของรูปที่ 2.3.....	9
2.5 รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสที่ไหลผ่านไทรสเตอร์ เมื่อมีมุม $\alpha$ .....	10
2.6 การเปลี่ยนแปลงของการกระแสระหว่างแรงดันและกระแสของเฟส $a$ เมื่อมีมุม $\alpha$ .....	11
2.7 รูปคลื่นของกระแสในสาย.....	12
2.8 เวกเตอร์กำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์.....	13
2.9 รูปคลื่นของแรงดันที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดมุมเหลื่อม ( $\mu$ ) ในระหว่างช่วงของการ สับเปลี่ยนจากไทรสเตอร์ตัวที่ 1 ไปยังไทรสเตอร์ตัวที่ 3.....	14
2.10 วงจรสมมูลของเครื่องเรียงกระแสแบบบริดจ์.....	15
2.11 รูปคลื่นของแรงดันและคาบเวลาของการทำงานในโหมคของเครื่องเรียงกระแส.....	15
2.12 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ (เมื่อ $V_{di}$ มีค่าเป็นบวก).....	16
2.13 รูปคลื่นของแรงดันและคาบเวลาของการทำงานในโหมคของอินเวอร์เตอร์.....	16
2.14 วงจรสมมูลของเครื่องเรียงกระแสแบบสามเฟสบริดจ์ โดยมีการปรับแทปของหม้อ แปลงคอนเวอร์เตอร์.....	19
2.15 คอนเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ 12-พัลส์.....	20
2.16 รูปคลื่นของแรงดันไฟตรงและกระแสไฟสลับ.....	20
2.17 บริดจ์จำนวน $n_b$ ต่ออนุกรมกันในด้านดีซี และต่อขนานกันในด้านเอซี.....	21
2.18 วงจรสมมูลในสถานะอยู่ตัวของระบบ HVDC สองขั้วต่อ.....	23
2.19 การไหลของกำลังไฟฟ้าไปหน้า (Forward Power Flow) โดยผ่านระบบ HVDC.....	23
2.20 การไหลของกำลังไฟฟ้าย้อนกลับ (Reverse Power Flow) โดยผ่านระบบ HVDC.....	23
3.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทป : (ก) ค่าเปอร์ยูนิคของ $Y_{im}$ ซึ่งอยู่ตรง ข้ามกับด้านที่เปลี่ยนแทป; (ข) วงจรเทียบเคียงเปอร์ยูนิค เมื่อ $\alpha$ เป็นค่าจริง.....	34
3.2 แบบจำลองของระบบ HVDC ชนิดขั้วเดียว 12-พัลส์.....	34
3.3 แบบจำลอง 1 เฟส ของวงจรสมมูลคอนเวอร์เตอร์ (มุม $\phi$ และ $\varphi$ อ้างอิงกับ $I_s < 0$ ).....	35
3.4 วงจรสมมูลของสายส่งระหว่างบัส $i$ และบัส $m$ ใดๆของระบบ.....	37
3.5 (ก) กำลังไฟฟ้าจริง และ (ข) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ที่บัส $i$ ในการศึกษาเพาเวอร์โฟลว์.....	38

# สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 แผนผังโปรแกรมการคำนวณ โดยวิธีซีเคเวนเซียล.....	43
3.7 แผนผังโปรแกรมการคำนวณ โดยวิธียูนิไฟด์.....	45
3.8 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเมตริกซ์ย่อย $[A']$ , $[A'']$ , $[B]$ , $[B']$ และ $[B'']$ .....	46
3.9 แผนผังโปรแกรมการคำนวณ โดยวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน.....	50
4.1 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้า.....	56
4.2 แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	58
4.3 แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	58
4.4 แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของสายส่งไฟฟ้า.....	59
4.5 แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของโหลด.....	60
4.6 แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของคาปาซิเตอร์.....	61
4.7 แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก.....	62
4.8 การเลือกจุดต่อร่วม PCC ระหว่างการไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟ ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	63
4.9 การไหลว้ของกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบ.....	63
4.10 การต่อของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	63
4.11 การไหลว้ของกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบโดยพิจารณาการต่อของหม้อแปลง.....	63
4.12 ขั้นตอนของการคำนวณการไหลว้ของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี.....	66
4.13 เวกเตอร์ของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 ที่มีมุมเริ่มต้น $59^\circ$ .....	66
4.14 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกที่ 5 เข้ามารบกวน.....	67
4.15 เวกเตอร์ของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 ที่มีมุมเริ่มต้น $180^\circ$ .....	67
4.16 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกที่ 5 เข้ามารบกวน โดยมีมุมเริ่มต้นของฮาร์มอนิกที่ 5 ที่ $180^\circ$ .....	67
4.17 เครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนานชนิดต่างๆที่ใช้ในการลดปริมาณของฮาร์มอนิก.....	68
4.18 ลักษณะทั่วไปของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12-พัลส์.....	69
4.19 ลักษณะการจัดเรียงเครื่องกรองฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6-พัลส์.....	70
4.20 ลักษณะทั่วไปของเครื่องกรองฮาร์มอนิก ที่ 1,000 MW Converter Station.....	70
5.1 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส.....	76
5.2 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 14 บัส (แสดงบัสอยู่ที่บัส 1).....	77
5.3 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 14 บัส (มุมอ้างอิงที่ $0^\circ$ ).....	77

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.4 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	77
5.5 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 30 บัส (แสดงคบัสอยู่ที่บัส 1).....	78
5.6 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 30 บัส (มุมอ้างอิงที่ $0^\circ$ ).....	79
5.7 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 57 บัส (แสดงคบัสอยู่ที่บัส 1).....	80
5.8 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 57 บัส (มุมอ้างอิงที่ $0^\circ$ ).....	80
5.9 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส (แสดงคบัสอยู่ที่บัส 69).....	81
5.10 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส (มุมอ้างอิงที่ $30^\circ$ ).....	82
5.11 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เจนบัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส.....	82
5.12 ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เจนบัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส (IEEE Standard ไม่ได้แสดงผลของค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า).....	82
5.13 ระบบทดสอบ IEE AC-DC 14 บัส.....	84
5.14 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEE AC-DC 14 บัส.....	84
5.15 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEE AC-DC 14 บัส.....	84
5.16 ระบบทดสอบเอชี่-ดีซี 30 บัส.....	87
5.17 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอชี่-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี.....	89
5.18 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอชี่-ดีซี 30 บัส ในแต่ละวิธี.....	89
5.19 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอชี่-ดีซี 57 บัส ในแต่ละวิธี.....	89
5.20 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอชี่-ดีซี 118 บัส ในแต่ละวิธี.....	89
5.21 ระบบทดสอบเอชี่-ดีซี 5 บัส.....	91
5.22 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีซีแควนเซียล ของระบบเอชี่-ดีซี 5 บัส.....	91
5.23 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของระบบเอชี่-ดีซี 5 บัส.....	91
5.24 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของระบบเอชี่-ดีซี 5 บัส.....	92
5.25 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีซีแควนเซียล ของแรงดัน $V_{term}$ .....	93
5.26 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของแรงดัน $V_{term}$ .....	93
5.27 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของแรงดัน $V_{term}$ .....	93
5.28 ระบบทดสอบเอชี่-ดีซี 14 บัส ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 4....	94
5.29 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีซีแควนเซียล ของระบบเอชี่-ดีซี 14 บัส.....	95
5.30 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของระบบเอชี่-ดีซี 14 บัส.....	95

# สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.31 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส.....	95
5.32 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีสี่เหลี่ยมเชิงคอสของแรงดันบัส 4.....	96
5.33 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของแรงดันบัส 4.....	96
5.34 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของแรงดันบัส 4.....	96
5.35 ระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3.....	97
5.36 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีสี่เหลี่ยมเชิงคอสของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส.....	98
5.37 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส.....	98
5.38 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส.....	98
5.39 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 1.....	100
5.40 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 2.....	100
5.41 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 3.....	100
5.42 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 4.....	100
5.43 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 5.....	101
5.44 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 6.....	101
5.45 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 7.....	101
5.46 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 8.....	101
5.47 ค่าขนาดของแรงดัน ไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	102
5.48 ค่ามุมของแรงดัน ไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	102
5.49 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วย ระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	103
5.50 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	103
5.51 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 บัส.....	104
5.52 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	104

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.53 การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 กับบัส 5 ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	105
5.54 การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 2 กับบัส 3 ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	105
5.55 การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 4 กับบัส 5 ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	106
5.56 การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 4 กับบัส 5 โดยทำการแปลงเป็นค่าจริงของระบบ เอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส.....	106
5.57 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส.....	107
5.58 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส.....	107
5.59 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส.....	108
5.60 ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส.....	108
5.61 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส.....	109
5.62 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส.....	109
5.63 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส.....	110
5.64 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส.....	110
5.65 ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส.....	110
5.66 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส.....	111

# สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.67 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอชวี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ.....	111
5.68 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอชวี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ.....	112
5.69 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอชวี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ.....	112
5.70 ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอชวี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ.....	112
5.71 การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอชวี-ดีซี 14 บัสเมื่อทำการเชื่อมโยง ด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ เทียบกับระบบ IEEE 14 บัส.....	113
5.72 ระดับของแรงดันที่พิกัดต่างๆของระบบ HVDC.....	114
5.73 ระบบทดสอบ 14 บัส ที่ใช้ในการทดสอบ โปรแกรม Frequency Scan Analysis.....	114
5.74 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบทดสอบ 14 บัส จากรูปที่ 5.73.....	115
5.75 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 3 ระหว่าง VPSA-H กับ IEEE TF.....	115
5.76 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 3 ระหว่าง โปรแกรม FSA กับ VPSA-H.....	116
5.77 การเปรียบเทียบการเลือกใช้แบบจำลองของสายส่ง ด้วยโปรแกรม FSA ที่พัฒนาขึ้นมา.....	116
5.78 ค่า $R_h$ และ $X_h$ ของสายส่งแบบ Distributed parameter line model.....	117
5.79 ค่า $R_h$ และ $X_h$ ของสายส่งแบบ Lumped PI line model.....	117
5.80 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 3 เมื่อระบบมีและไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	118
5.81 ค่า $R_h$ และ $X_h$ จากการสแกนความถี่ที่บัส 3 เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	118
5.82 การเปรียบเทียบการเลือกใช้แบบจำลองของสายส่ง เมื่อสแกนความถี่ที่บัส 8.....	119
5.83 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 8 เมื่อระบบมีและไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	119
5.84 การเปรียบเทียบการรัน โปรแกรม HPF เทียบกับ โปรแกรม VPSA-H และ IEEE TF.....	120
5.85 การเปรียบเทียบการรัน โปรแกรม HPF เมื่อระบบมีและไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	120
5.86 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	121
5.87 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	121
5.88 การสแกนความถี่ที่บัส 4 เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	122
5.89 การสแกนความถี่ที่บัส 4 เมื่อระบบติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	122

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.90 การสแกนความถี่ที่บัส 5 เมื่อระบบ ไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	123
5.91 การสแกนความถี่ที่บัส 5 เมื่อระบบ ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	123
5.92 การเปรียบเทียบผลของการรัน โปรแกรม AC-DC HPF เมื่อระบบมี และ ไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก ของระบบทดสอบ IEE AC-DC 14 บัส.....	124
5.93 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ เมื่อพิจารณาและไม่พิจารณาฮาร์มอนิก.....	124
5.94 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters.....	124
5.95 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters.....	125
5.96 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters.....	125
5.97 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters.....	125
5.98 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบ ไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	126
5.99 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบ ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	126
5.100 รูปคลื่นของกระแสไอซีทีที่ไหลเข้าไปยังเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC.....	127
5.101 รูปคลื่นของกระแสไอซีทีที่ไหลเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC.....	127
5.102 สเปกตรัมของกระแสไอซีทีที่ไหลเข้าไปยังเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC.....	127
5.103 สเปกตรัมของกระแสไอซีทีที่ไหลเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC.....	128
5.104 ระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส ต่อกับระบบทดสอบ ภาคเหนือของประเทศไทยมาเลเซีย 4 บัส ที่กำหนดขึ้น.....	129
5.105 การสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบ ไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	130
5.106 การสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบ ไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	130
5.107 ค่า $R_h$ และ $X_h$ จากการสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบ ไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	131
5.108 ค่า $R_h$ และ $X_h$ จากการสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบ ไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	131
5.109 การสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบ ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	132
5.110 การสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบ ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	132
5.111 ค่า $R_h$ และ $X_h$ จากการสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบ ได้ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	133
5.112 ค่า $R_h$ และ $X_h$ จากการสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบ ได้ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	133
5.113 รูปคลื่นของกระแสที่ไหลเข้าสู่อินเวอร์เตอร์และเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC.....	133
5.114 สเปกตรัมของกระแสที่ไหลไปยังอินเวอร์เตอร์และเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC.....	134
5.115 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 72 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters.....	134

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.116 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 137 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters.....	134
5.117 ค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆ เมื่อระบบไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	135
5.118 ค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆ เมื่อระบบได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	135
5.119 ค่าขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส.....	136
5.120 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส.....	136
5.121 ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส.....	136
5.122 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส เมื่อระบบไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	137
5.123 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส เมื่อระบบได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก.....	137
ผ.5.1 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่าง EGAT – TNB.....	155
ผ.5.2 แผนที่แสดงการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่าง EGAT – TNB.....	169
ผ.5.3 โปรแกรม HarmDC.....	171
ผ.5.4 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณเพาเวอร์โพลว์.....	171
ผ.5.5 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์.....	172
ผ.5.6 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณการสแกนความถี่.....	172
ผ.5.7 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณเอช-ดีซีฮาร์มอนิกเพาเวอร์โพลว์.....	173
ผ.5.8 รูปแบบ Help ของโปรแกรม HarmDC.....	174
ผ.5.9 ข้อมูลของจำนวนอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบ.....	174
ผ.5.10 ข้อมูลของระบบทั้งหมด โดยแสดงเป็นข้อมูลของบัสและข้อมูลของสายส่ง.....	175
ผ.5.11 การเก็บไฟล์เป็นไฟล์ที่มีนามสกุล *.m เพื่อนำไปรันในโปรแกรม MATLAB.....	175
ผ.5.12 การจัดข้อมูลของระบบที่มีนามสกุล *.m ที่สามารถทำการคำนวณการโพลว์ของกำลัง ไฟฟ้าและการโพลว์ของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี.....	176
ผ.5.13 รูปคลื่นของกระแสเอชที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC.....	176
ผ.5.14 สเปกตรัมของกระแสที่เอชที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC.....	177
ผ.5.15 ค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆในระบบเอช-ดีซี.....	177
ผ.5.16 ค่าของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่บัสต่างๆในระบบเอช-ดีซี.....	178
ผ.5.17 ค่าของผลลัพธ์ต่างๆของระบบเอช-ดีซีโดยแสดงเป็นตัวเลข.....	178

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากว่าปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์มาใช้งานในด้านอุตสาหกรรมและนำประยุกต์ใช้กับเครื่องใช้สำนักงานกันอย่างกว้างขวาง แต่เนื่องจากว่าอุปกรณ์เหล่านี้ไม่มีความเป็นเชิงเส้น (Non-linear) ของกระแสและแรงดันจึงทำให้รูปคลื่นของสัญญาณผิดเพี้ยนไป และทำให้ปริมาณของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย อันเนื่องจากว่าโหลดเหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Generation, transmission and distribution systems) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้ตระหนักถึงปัญหาที่กำลังเกิดขึ้นนี้จึงได้มีมติให้แต่งตั้งกรรมการร่างกฎข้อบังคับขึ้นมาเมื่อปีพ.ศ. 2538 ซึ่งก็คือข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม PRC-PQG-01 / 1998 เพื่อเป็นข้อบังคับที่ใช้ในการควบคุมปริมาณของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง อีกทั้งในปัจจุบันนี้ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT) ได้ทำการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าในช่วงโหลดสูงสุด (Peak load) กับทางการไฟฟ้าของประเทศมาเลเซีย (Tenaga Nasional Berhad: TNB) โดยเชื่อมต่อผ่านระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current : HVDC) ซึ่งจะทำให้มีปริมาณของฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่เครื่องกรองฮาร์มอนิกไม่สามารถที่จะกำจัดปริมาณของฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับระบบเอซีได้ ดังนั้นจึงต้องมีโปรแกรมที่จะสามารถวิเคราะห์และวางแผนทั้งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี และการวางแผนการป้องกันปัญหาต่างๆที่จะเกิดจากฮาร์มอนิกนี้ได้

เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆและพฤติกรรมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง และเมื่อมีปริมาณของฮาร์มอนิกไหลจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่ในระบบ เช่น เพิ่มกำลังสูญเสียให้กับเครื่องจักรไฟฟ้า, ทำให้อุปกรณ์ในระบบการป้องกันระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาด, อุปกรณ์การวัดอ่านค่าได้ไม่ถูกต้อง, ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่อยู่ในเครื่องใช้ไฟฟ้าไวต่อความเพี้ยนของสัญญาณ, ผลกระทบต่อระบบการสื่อสารทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง และทำให้ปริมาณการไหลของพลังงานไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งในขณะนี้ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยยังไม่ได้มี

การวิเคราะห์ถึงการไหลของฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างจริงจัง ซึ่งจะทำให้งานวิจัยนี้มีคุณค่าและมีประโยชน์มากยิ่งขึ้นในอนาคต

## 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อที่จะนำเสนอแบบจำลองของการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและสมการเรซิดวล ในการนำไปใช้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (AC-DC Power Flow) โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อมีและไม่มี การเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และนำเสนอแบบจำลองอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกและการวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่ (Frequency Scan Analysis) เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิก (AC-DC Harmonic Power Flow) เพื่อหาระดับความถี่ของแรงดันและกระแสโดยตรวจสอบระดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในขีดจำกัดของฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้หรือไม่ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อไม่ติดตั้งและทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สำหรับสมมติฐานของการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

- 1) โปรแกรม AC-DC Power Flow สามารถทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีที่มีการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC ระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Gen. bus) ที่มีการควบคุมค่าของ  $P$  และ ค่าของ  $Q$  หรือมีการควบคุมค่าของ  $P$  และ ค่าของ  $|V|$  โดยเชื่อมต่อกับบัสที่มีชิ่งโครนัสคอนเดนเซอร์ (Voltage-controlled bus) ที่มีการควบคุมค่าของ  $|V|$  และสามารถทำการเชื่อมต่อระหว่างบัสต่างๆเหล่านี้กับโหลดบัส (Load bus) อื่นๆที่ติดตั้งอยู่ในระบบเอซี-ดีซี
- 2) โปรแกรม Frequency Scan Analysis สามารถทำการวิเคราะห์โดยการสแกนที่ความถี่ที่พิจารณาเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบเอซี-ดีซีที่มีผลต่อความถี่
- 3) โปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow สามารถทำการคำนวณหาการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี โดยทำการวิเคราะห์หาค่าของ %THD ของแรงดันไฟฟ้า, ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟารวมที่บัสต่างๆในระบบ โดยคำนึงถึงการต่อของหม้อแปลงในระบบและมุมเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ

## 1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีจะมีวิธีการคำนวณสองวิธีคือ วิธีการคำนวณแบบซีควนเชียล (Sequential method) และวิธีการคำนวณแบบยูนิไฟด์ (Unified method) โดยที่วิธีการคำนวณแบบซีควนเชียลเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่อนแอ (Weak AC system) ส่วนวิธีการคำนวณแบบยูนิไฟด์เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีแรก แต่จะมีความรวดเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีความเหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่อนแอ อีกทั้งสามารถที่จะพัฒนาวิธีนี้ในการคำนวณระบบไฟฟ้าที่มี HVDC เชื่อมต่อหลายๆบัส (Multiterminal DC ; MTDC) ได้อีกด้วย แต่เนื่องจากว่าวิธียูนิไฟด์จะมีปัญหาในเรื่องของ ill-condition และเมื่อนำไปพัฒนาการคำนวณการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีที่มีการเชื่อมต่อระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสที่มีโหลดต่ออยู่ หรือระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสที่มีขงโคจรสคอนเดนเซอร์ต่ออยู่ จะพบว่ามีปัญหาในเรื่องของการหาคำตอบ จึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีโดยทำการปรับปรุงสมการจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrix equation) และสมการเรซิดวล (Residual equations) ให้เหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือและมีความเหมาะสมในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีที่มีการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสชนิดต่างๆในระบบเอซี-ดีซี

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำได้สองรูปแบบคือทำการวิเคราะห์ในโดเมนของเวลา (Time domain simulation) โดยจะอยู่ในรูปแบบของตัวแปรสถานะ (State variable) และการวิเคราะห์แบบโนดัล (Nodal analysis) ซึ่งต่อมาก็จะเป็น Norton equivalents แต่ในการวิเคราะห์ในโดเมนของเวลาจะมีข้อเสียคือมีความยุ่งยากในการที่จะสร้างแบบจำลองของตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังและการวิเคราะห์ในโดเมนของเวลาจะต้องทำการรันโปรแกรมจนกระทั่งผ่านช่วงเวลาทรานเซียนไปก่อนจึงจะสามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกอีกรูปแบบหนึ่งคือการวิเคราะห์ในโดเมนของความถี่ (Frequency Domain Simulation) ซึ่งจะเป็นการคำนวณแบบตรง (Direct Solution) โดยการพิจารณาแต่ละฮาร์มอนิกที่เข้าไปในระบบที่เป็นเชิงเส้นแต่ไม่ได้พิจารณาฮาร์มอนิกที่เชื่อมตอลึกันระหว่างโครงข่ายและส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น การคำนวณแบบตรงจะไม่สามารถทำได้ถ้าแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกไม่คงที่ ดังนั้นควรต้องทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกแบบการคำนวณซ้ำ (Iterative Harmonic Analysis) ซึ่งปริมาณของฮาร์มอนิกที่เข้ามาในระบบจากแต่ละแหล่งกำเนิดจะอยู่ในฟังก์ชันของแต่ละแหล่งกำเนิดและสถานะของระบบ สามารถคำนวณผลที่ถูกต้องได้จากการคำนวณซ้ำของสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยอยู่ในสถานะอยู่ตัว (Steady state) แต่ข้อดีของวิธีการคำนวณแบบตรงก็คือมีความง่ายในการพัฒนาโปรแกรม, ใช้หน่วยความจำในการประมวลผลไม่มาก อีกทั้งใช้เวลาในการ

คำนวณเร็วกว่าวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกแบบการคำนวณซ้ำถ้าสามารถทำการเชื่อมต่อถึงกันระหว่างโครงข่ายและส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น นั่นก็คือโครงข่ายของระบบเอช-ดีซีที่มีคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบ จึงได้นำเสนอวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟส์ันร่วมกับการอัปเดตกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อที่จะนำเสนอแบบจำลองของการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและสมการเรซิดิวล ในการนำไปใช้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (AC-DC Power Flow) โดยแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นแบบโมโนโพลาร์ดีซีลิงค์ 12-พัลส์ (12-pulse monopolar dc link) ซึ่งใช้วงจรสมมูลคอนเวอร์เตอร์ และมีการควบคุมปริมาณการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ และการปรับแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะการทำงานปกติและโหลดสมดุล แล้วทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อมีและไม่มี การเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ :

- 1) แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต้องสมดุล (Balanced phase) และเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal)
- 2) การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ต้องกำเนิดแรงดันที่สมดุล
- 3) กระแสและแรงดันไฟตรงต้องเรียบ (Smooth)
- 4) หม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์ไม่มีการสูญเสียและไม่เกิดแอดมิตแตนซ์ทำแม่เหล็ก (Magnetizing admittance)

สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี จะนำเสนอในเรื่องของสมการที่ใช้ในการคำนวณ, แบบจำลองอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง, สมการของกำลังไฟฟ้า, การสแกนความถี่เพื่อบ่งบอกพฤติกรรมของระบบเอช-ดีซีที่มีผลเกิดจากฮาร์มอนิกส์ และวิธีการคำนวณหาการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดี โดยกำหนดให้ :

- 1) แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีความสมดุลของสัญญาณไซน์ของแรงดันฮาร์มอนิกส์
- 2) ไม่มีการกระเพื่อมของกระแสไฟตรง  $I_d$
- 3) มุมเหลื่อม (Overlap angle) ไม่เกิน  $60^\circ$
- 4) หม้อแปลงในระบบไม่เกิดการอิ่มตัว, ไม่คำนึงถึงเวกเตอร์รูป (คำนึงถึงลักษณะการต่อเท่านั้น) และไม่กระทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในระบบ

- 5) คอนเวอร์เตอร์ 12-พัลส์ จะกำเนิดเฉพาะฮาร์มอนิกส์คุณลักษณะ คือฮาร์มอนิกส์ที่ 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47 และ 49 ตามลำดับ

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

สำหรับขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยมีดังนี้

- 1) ทำการศึกษาและวิเคราะห์การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซีโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) และวิธีฟาส-ดีคัปเปิล (Fast-Decoupled method) เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี โดยได้ทำการทดสอบความถูกต้องกับระบบทดสอบของ IEEE
- 2) ทำการเขียนโปรแกรม AC-DC Power Flow (AC-DC PF) โดยใช้วิธีซีเวนเชี่ยล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ตามลำดับ โดยได้ทำการทดสอบความถูกต้องกับวารสาร IEE
- 3) ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการคำนวณของโปรแกรม AC-DC PF ด้วยวิธีต่างๆ และวิเคราะห์ผลของการนำไปใช้ทดสอบกับระบบต่างๆ โดยทำการพิจารณาถึงพฤติกรรมของระบบเมื่อไม่มีหรือมีระบบ HVDC ติดตั้งอยู่ในระบบ
- 4) ทำการเขียนโปรแกรม Frequency Scan Analysis (FSA) โดยทดสอบความถูกต้องกับวารสาร IEEE (IEEE TF) และทดสอบความถูกต้องกับโปรแกรม Visual PSA-H
- 5) ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของความถี่ต่างๆที่มีผลต่อระบบ โดยใช้โปรแกรม FSA โดยทำการพิจารณาเมื่อไม่มีหรือมีเครื่องกรองฮาร์มอนิกติดตั้งอยู่ในระบบ
- 6) ทำการเขียนโปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow (AC-DC HPF) โดยทำการทดสอบความถูกต้องในส่วนของการคำนวณ AC Harmonic Power Flow (HPF) กับวารสาร IEEE (IEEE TF) และโปรแกรม Visual PSA-H โดยที่โปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow ได้ทำการพัฒนามาจากโปรแกรม HPF
- 7) ทำการวิเคราะห์ระบบโดยใช้โปรแกรม AC-DC HPF โดยทำการพิจารณาเมื่อไม่มีหรือมีเครื่องกรองฮาร์มอนิกติดตั้งอยู่ในระบบ
- 8) ทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีของระบบเอซี-ดีซี

### 2.1 บทนำ

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆและระยะทางไกลๆจะพบว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงมีคุณสมบัติที่ดีกว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับอยู่หลายประการทั้งทางด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางด้านเศรษฐศาสตร์ [1,2] และประเทศไทยจะมีการใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยทำการเชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับของประเทศไทยกับประเทศมาเลเซีย โดยความร่วมมือระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) กับการไฟฟ้าของประเทศไทย (TNB) จึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์โมนิกในระบบเอซี-ดีซี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และการวางแผนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นตามมา

### 2.2 การวิเคราะห์ในระบบเอซี-ดีซี

การวิเคราะห์ในระบบเอซี-ดีซีที่ทำการพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (AC-DC Power Flow Analysis) และการวิเคราะห์การไหลของฮาร์โมนิก (AC-DC Harmonic Power Flow Analysis) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

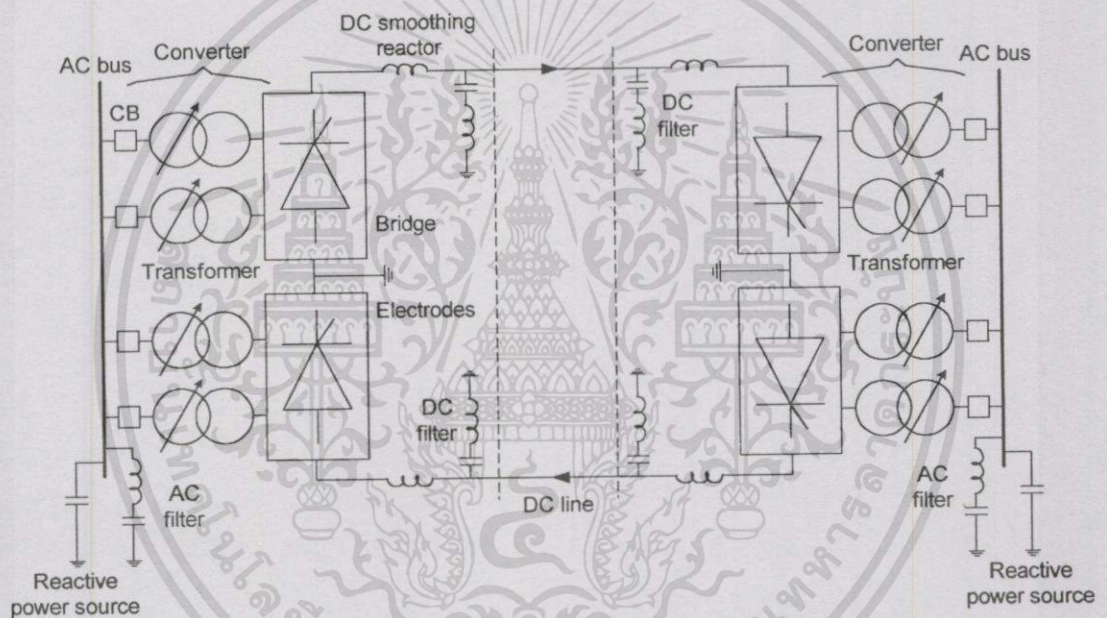
ในสถานะอยู่ตัว (Steady state condition) ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบจะมีค่าคงที่ในแต่ละคาบเวลาที่ทำการพิจารณา ซึ่งในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะอยู่ตัวโดยส่วนมากก็คือการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow หรือ Power Flow) เพื่อใช้ในการวางแผนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ โดยจะทำการพิจารณาในสภาวะที่เป็นสัญญาณไซน์ซอซด์ที่ความถี่หลักมูลเท่านั้น (Fundamental-frequency study) ซึ่งจะไม่คำนึงถึงรูปคลื่นของสัญญาณ

#### 2.2.2 การวิเคราะห์การไหลของฮาร์โมนิก

เมื่อพิจารณาถึงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆในระบบเอซี-ดีซี พบว่ามีความเพี้ยนในรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสเกิดขึ้นทั้งในส่วนที่เป็นดีซีและเอซี อันเนื่องมาจากปริมาณของฮาร์โมนิกที่ออกมาจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC ไหลเข้าสู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้การวางแผนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเกิดความผิดพลาดมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์โมนิกควบคู่กันไป ซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การไหลของฮาร์โมนิกในระบบสมัยใหม่ ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) ติดตั้งอยู่

## 2.3 วงจรของคอนเวอร์เตอร์และสมการคุณลักษณะ

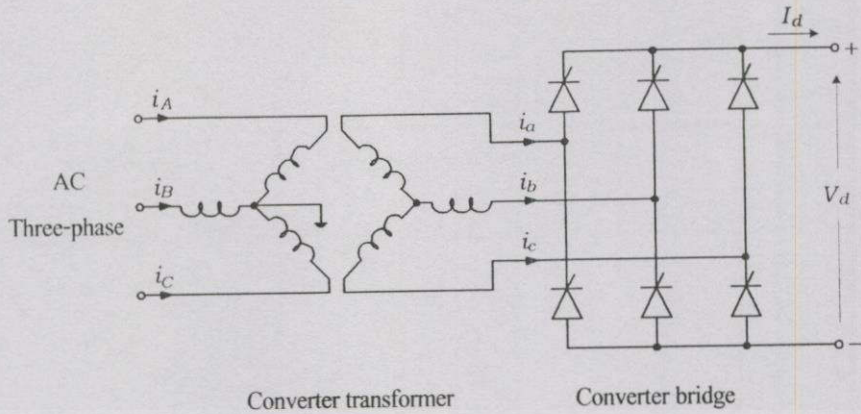
สำหรับคอนเวอร์เตอร์ในระบบเอเชีย-ซีซึ่งจะใช้ในการควบคุมเพาเวอร์โฟลว์ที่ผ่าน HVDC link โดยอุปกรณ์หลักๆ คือ บริดจ์ของตัวปิดเปิด (Valve bridges) และหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ (Converter transformer) โดยที่บริดจ์ของตัวปิดเปิดจะเป็นแถวของสวิตช์ไฟฟ้าแรงดันสูง (High-voltage switches) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในปัจจุบันนี้ระบบ HVDC ทั้งหมดได้พัฒนามาใช้อุปกรณ์ปิดเปิดชนิดไทรสเตอร์ (Thyristor valves) ซึ่งมีพิคกระแสมากระหว่าง 2,500 ถึง 3,000 A และพิคคัลยอดแรงดันหมักผันระหว่าง 3 ถึง 5 kV [3] โดยนำไทรสเตอร์มาต่ออนุกรมกันจนสามารถนำไปใช้กับระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าที่ต้องการ ซึ่งตัวอย่างของส่วนประกอบของระบบ HVDC แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ HVDC

จากรูปที่ 2.1 รูปแบบคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC จะเป็นวงจรบริดจ์แบบเต็มคลื่น (Full-wave bridge circuit) ของระบบไฟสามเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยเรียกวงจรนี้ว่าเกรตซ์บริดจ์ (Graetz bridge) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC เนื่องจากว่าเป็นการจัดหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดและมีแรงดันตกคร่อมที่ไทรสเตอร์ต่ำเมื่อไม่มีการนำกระแส [1,2] สำหรับหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์จะมีการปรับแทปในสถานะที่มีโหลด (On-load taps) ในด้านเอซีเพื่อการควบคุมแรงดัน สำหรับลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงในด้านเอซีจะต่อเป็นแบบสตาร์ต่อร่วมกับสายนิวทรัลถูกต่อลงดิน (Star-connected with grounded neutral) และลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงในด้านไทรสเตอร์จะต่อเป็นแบบเดลตา (Delta connected) หรือทำการต่อแบบสตาร์ที่ไม่ได้ต่อร่วมกับสายนิวทรัลถูกต่อลงดิน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

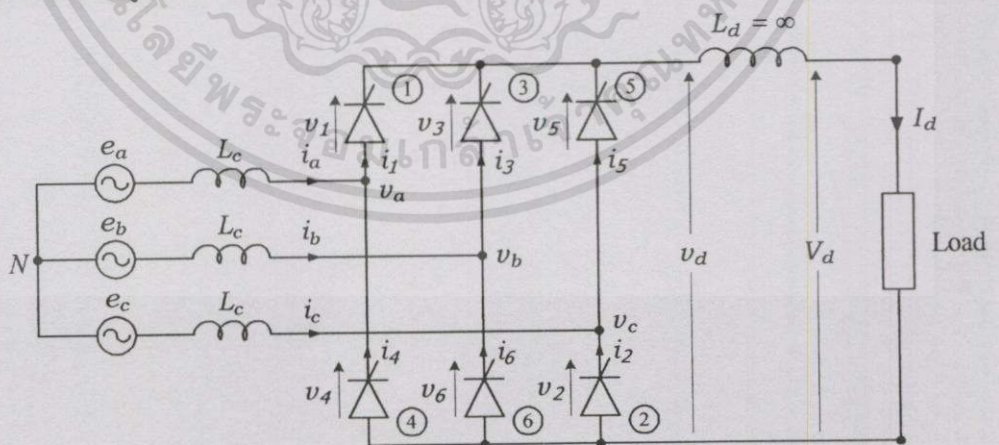


รูปที่ 2.2 วงจรบริดจ์แบบเต็มคลื่นของระบบไฟสามเฟส

สำหรับการวิเคราะห์ห้วงจรบริดจ์แบบเต็มคลื่นของระบบไฟสามเฟสจะกำหนดให้

1. ระบบไฟฟ้ากระแสสลับรวมทั้งหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งกำเนิดในอุดมคติ (Ideal source) โดยมีแรงดันและความถี่คงที่
2. กระแสไฟตรง ( $I_d$ ) มีค่าคงที่และไม่มีควมพลิว (Ripple-free) เนื่องจากมีรีแอคเตอร์ขนาดใหญ่ ( $L_d$ ) ในด้านไฟดีซี
3. ไทริสเตอร์เป็นสวิตช์ในอุดมคติที่มีค่าความต้านทานเป็นศูนย์เมื่อนำกระแส และจะมีค่าความต้านทานไม่จำกัด (Infinite resistance) เมื่อไม่นำกระแส
4. การนำกระแสของไทริสเตอร์จะต้องมีช่วงเวลาที่  $60^\circ$  เท่ากันตลอด

จากข้อกำหนดทั้งสี่ข้อดังกล่าวข้างต้น บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ของรูปที่ 2.2 จะนำเสนอเป็นวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรบริดจ์แบบเต็มคลื่นของระบบไฟสามเฟส

จากรูปที่ 2.3 เมื่อทำการพิจารณาที่แหล่งจ่ายเอชซีของระบบไฟสามเฟส จะได้สมการของ

แรงดันชั่วขณะระหว่างสายกับสายนิวทรัล (Line-to-neutral voltage) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

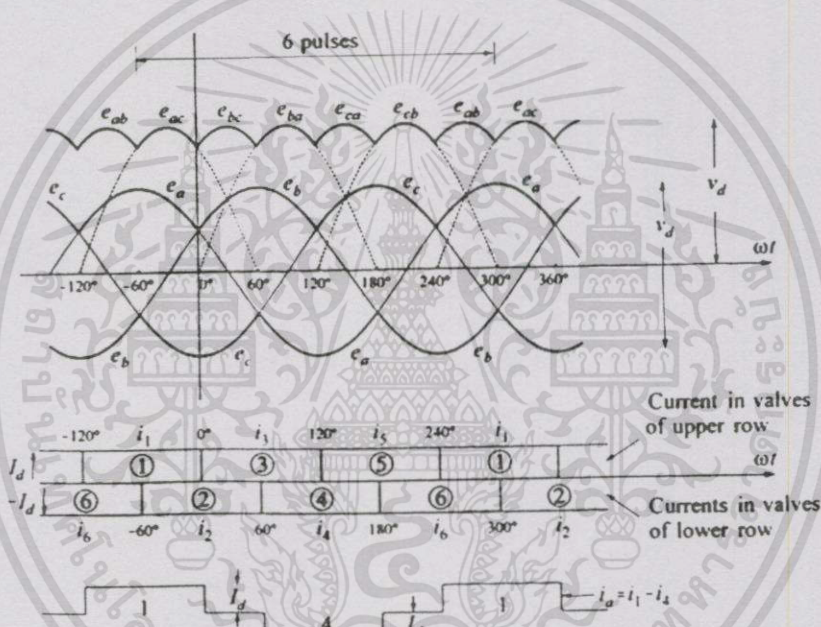
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 e_a &= E_m \cos(\omega t + 60^\circ) \\
 e_b &= E_m \cos(\omega t - 60^\circ) \\
 e_c &= E_m \cos(\omega t - 180^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

และจะได้สมการของแรงดันชั่วขณะระหว่างสาย (Line-to-line voltage) คือ

$$\begin{aligned}
 e_{ac} &= e_a - e_c = \sqrt{3}E_m \cos(\omega t + 30^\circ) \\
 e_{ba} &= e_b - e_a = \sqrt{3}E_m \cos(\omega t - 90^\circ) \\
 e_{cb} &= e_c - e_b = \sqrt{3}E_m \cos(\omega t + 150^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

รูปที่ 2.4 (ก) แสดงรูปคลื่นของแรงดันตามสมการที่ (2.1) และ (2.2)



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของวงจรบริดจ์ของรูปที่ 2.3

- (ก) แรงดันระหว่างสายกับสายนิวทรัล และแรงดันระหว่างสายของแหล่งจ่าย  
 (ข) กระแส และคาบเวลาในการนำกระแสของไทรสเตอร์  
 (ค) กระแสเฟส  $i_a$

### 2.3.1 การวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย

การวิเคราะห์ในขั้นแรกจะไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย ( $L_c = 0$ ) และไม่มีมุมประวิงการจุด (Ignition delay angle:  $\alpha$ ) หรือมุมประวิงการจุดเท่ากับศูนย์องศา ( $\alpha = 0^\circ$ ) สำหรับรูปที่ 2.4 (ข) แสดงคาบเวลาต่างๆของการนำกระแสที่ไหลผ่านไทรสเตอร์แต่ละตัว โดยกำหนดให้กระแส  $I_d$  มีค่าคงที่ กระแสที่ไหลผ่านไทรสเตอร์แต่ละตัว มีค่าเท่ากับกระแส  $I_d$  เมื่อไทรสเตอร์เกิดการนำกระแส และมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อไทรสเตอร์ไม่นำกระแส สำหรับการเปลี่ยน

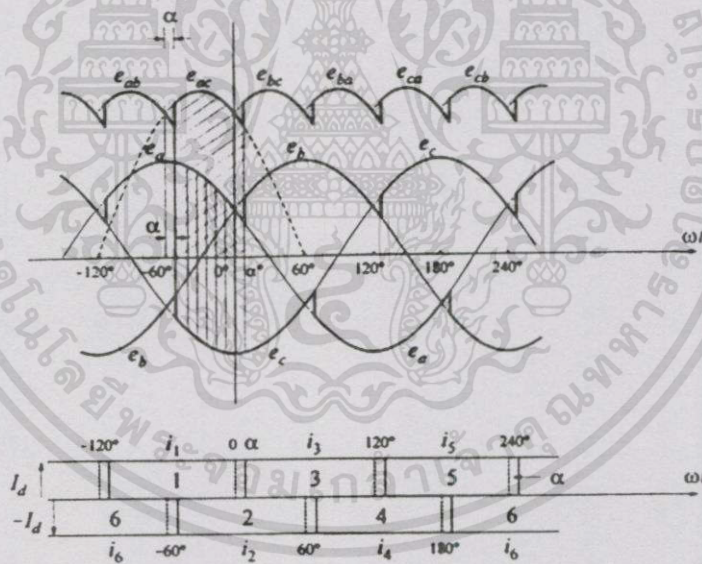
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงการนำกระแสจากทรินสเตอร์ตัวหนึ่งไปยังทรินสเตอร์ตัวอื่นๆในแถวเดียวกันเรียกว่าการสับเปลี่ยน (Commutation) และเมื่อกำหนดให้ไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย การสับเปลี่ยนจะไม่เกิดมุมเหลื่อม (Overlap angle:  $\mu$ )

ค่าแรงดันไฟตรงชั่วขณะ ( $v_d$ ) ที่ข้ามบริดจ์ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆของแรงดันระหว่างสายในแต่ละคาบ  $60^\circ$  เมื่อทำการแทน  $\omega t$  ด้วย  $\theta$  และพิจารณาคาบระหว่าง  $\omega t = -60^\circ$  กับ  $0^\circ$  จะได้ค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ย ( $V_{d0}$ ) ที่ไม่มีมุม  $\alpha$  คือ

$$\begin{aligned} V_{d0} &= \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^{0^\circ} e_{ac} d\theta \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_m$  คือค่ายอดของแรงดันระหว่างสายกับสายนิวทรัล ในเทอมของ RMS:  $E_{LN}$  คือค่าแรงดันระหว่างสายกับสายนิวทรัล และ  $E_{LL}$  คือค่าแรงดันระหว่างสาย



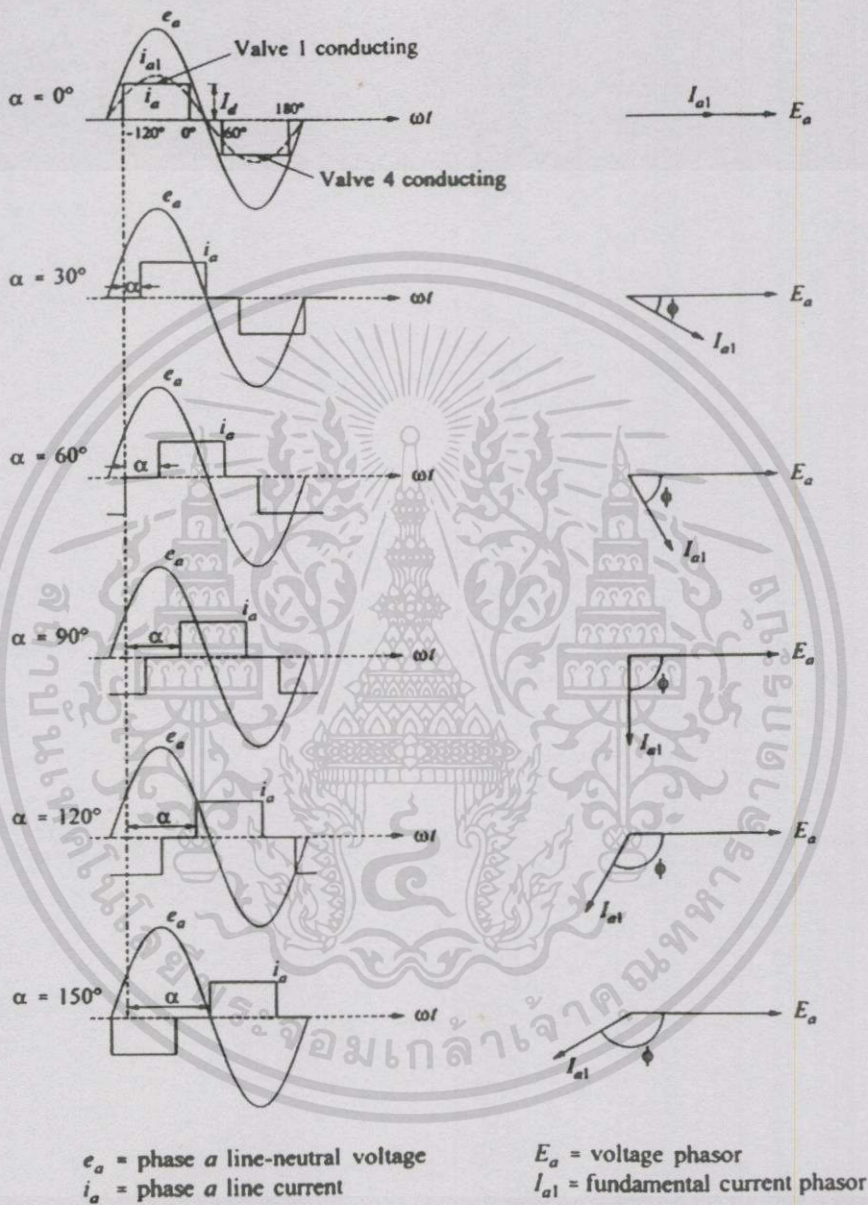
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสที่ไหลผ่าน ทรินสเตอร์ เมื่อมีมุม  $\alpha$

เมื่อทำการพิจารณามุมประวิงการจุด ( $\alpha$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มุม  $\alpha$  จะต้องมีค่าไม่เกิน  $180^\circ$  ถ้ามุม  $\alpha$  เกิน  $180^\circ$  ทรินสเตอร์จะเกิดความล้มเหลวในการนำกระแส และจะได้ค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ย ( $V_d$ ) ที่มีมุม  $\alpha$  คือ

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{3}{\pi} \int_{(60^\circ - \alpha)}^{\alpha} e_{ac} d\theta \\ &= V_{d0} \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.4) พบว่าผลของการมีมุม  $\alpha$  จะทำให้ค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ยมีค่าลดลง ด้วยแฟกเตอร์  $\cos\alpha$  ซึ่งมุม  $\alpha$  จะอยู่ในช่วง  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  เพราะฉะนั้น  $\cos\alpha$  จะอยู่ในช่วง  $1$  ถึง  $-1$  ดังนั้น  $V_d$  ก็จะอยู่ในช่วง  $V_{d0}$  ถึง  $-V_{d0}$

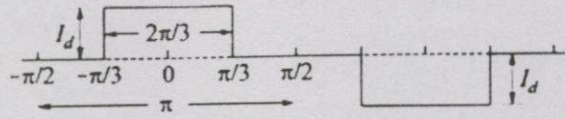


รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของการกระจัดเฟสระหว่างแรงดันและกระแสของเฟส  $a$  เมื่อมีมุม  $\alpha$

เมื่อมุม  $\alpha$  มีค่าเพิ่มขึ้น การกระจัดเฟส (Phase displacement) ระหว่างแรงดันไฟสลับกับกระแสไฟสลับในแต่ละเฟสของแหล่งจ่ายจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงเฟส  $\alpha$  ในรูปที่ 2.6 และรูปคลื่นของกระแสไฟสลับจะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.7 สำหรับกระแสไฟตรง ( $I_d$ ) จะมีค่าคงที่โดยมีขนาดเท่ากับ  $I_d$  และมีความกว้างเท่ากับ  $120^\circ$  หรือ  $2\pi/3$  rad. เมื่อกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีมุมเหลื่อม ( $\mu$ ) รูปลักษณะของกระแสไฟสลับจะไม่ขึ้นกับค่าของมุม  $\alpha$  แต่ว่าการกระจัดเฟสจะเปลี่ยนตามค่าของมุม  $\alpha$  และส่วนประกอบความถี่หลักมูลของกระแสไฟสลับสามารถหาได้จาก การวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier analysis) ของรูปคลื่นของกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นของกระแสในสาย

จากรูปที่ 2.7 ค่าของส่วนประกอบความถี่หลักมูลของกระแสไฟสลับ คือ

$$\begin{aligned} I_{LM} &= \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} I_d \cos x \, dx \\ &= \frac{2}{\pi} \sqrt{3} I_d \end{aligned} \quad (2.5)$$

และค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูลของกระแสไฟสลับ คือ

$$\begin{aligned} I_{LI} &= \frac{I_{LM}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงค่าความสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์ ค่าของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องเท่ากับค่าของกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

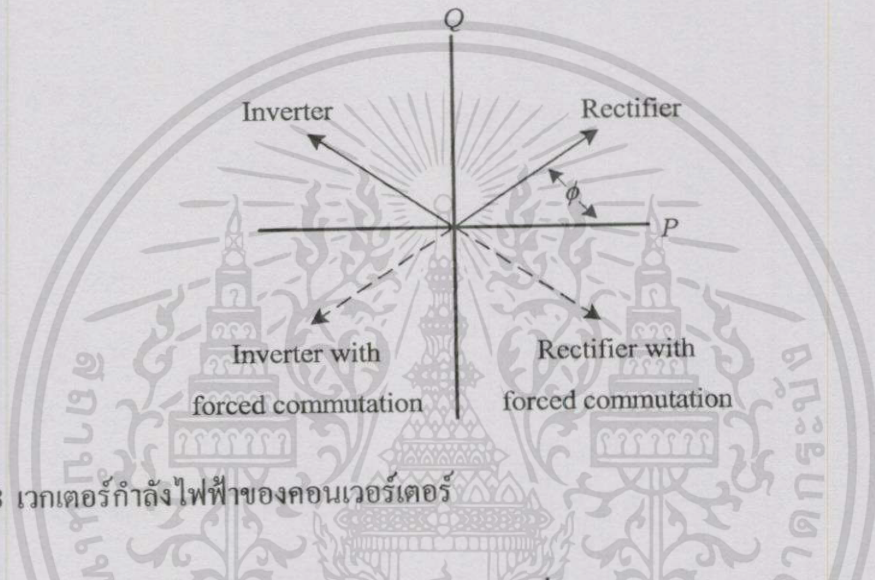
$$\begin{aligned} 3E_{LN} I_{LI} \cos \phi &= V_d \cdot I_d \\ &= V_{d0} \cos \alpha \cdot I_d \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่มุม  $\phi$  คือมุมของกระแสในสายที่ความถี่หลักมูลล้าหลังแรงดันระหว่างสายกับสายนิวทรัลของแหล่งจ่าย และจะได้ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ของรูปคลื่นความถี่หลักมูล คือ

$$\cos \phi = \cos \alpha \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) เทอมของ  $\cos \phi$  เรียกว่าตัวประกอบการกระจัด (Displacement factor) มุม  $\alpha$  จะเลื่อนรูปคลื่นกระแสและส่วนที่เป็นความถี่หลักมูลไปเป็นมุม  $\phi = \alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเมื่อมุม  $\alpha = 0^\circ$  (ทำการพิจารณาที่เฟส  $\alpha$ ) ส่วนประกอบของกระแสที่ความถี่หลักมูล ( $i_{d1}$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีเฟสตรงกันกับเฟสของแรงดัน ( $e_a$ ) ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าจริง ( $P_a = E_a I_{a1} \cos \phi$ ) จะมีค่าเป็นบวกและค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ( $Q_a = E_a I_{a1} \sin \phi$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์, เมื่อมุม  $\alpha$  เพิ่มขึ้นจากมุม  $0^\circ$  ถึงมุม  $90^\circ$   $P_a$  จะมีค่าลดลงและ  $Q_a$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น, ที่มุม  $\alpha = 90^\circ$   $P_a$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์และ  $Q_a$  จะมีค่าสูงสุด, เมื่อมุม  $\alpha$  เพิ่มขึ้นจากมุม  $90^\circ$  ถึงมุม  $180^\circ$   $P_a$  จะมีค่าเป็นลบและสำหรับขนาดจะมีค่าเพิ่มขึ้น  $Q_a$  จะยังคงมีค่าเป็นบวกและสำหรับขนาดจะมีค่าลดลง และที่มุม  $\alpha = 180^\circ$   $P_a$  จะมีค่าเป็นลบสูงสุดและ  $Q_a$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือคอนเวอร์เตอร์สามารถที่จะกระทำตัวเป็นได้ทั้งเครื่องเรียงกระแส (Rectifier) หรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เวกเตอร์กำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์

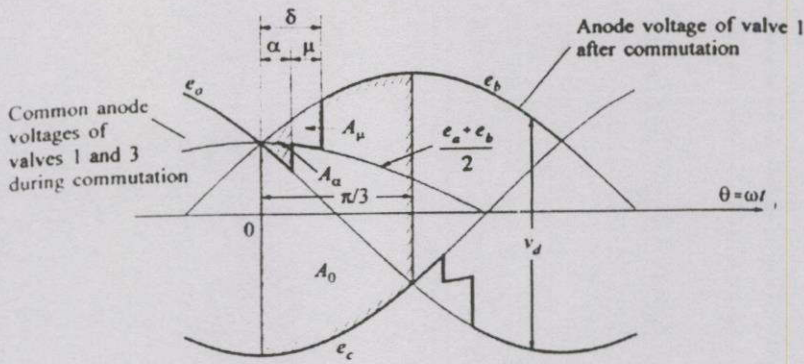
### 2.3.2 การวิเคราะห์โดยการพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 2.3 เมื่อทำการพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย ( $L_c$ ) การเปลี่ยนแปลงการนำกระแสจากเฟสหนึ่งไปยังเฟสอื่นๆ ในช่วงเวลาที่จำกัด เรียกว่าช่วงเวลาของการสับเปลี่ยน (Commutation time) หรือช่วงเวลาของการเหลื่อม (Overlap time) ซึ่งจะทำให้เกิดมุมสับเปลี่ยนหรือมุมเหลื่อม ( $\mu$ ) โดยในสถานะการทำงานปกติ มุม  $\mu$  มีค่าน้อยกว่า  $60^\circ$  นั่นคือจะอยู่ในช่วง  $0^\circ < \mu < 60^\circ$  ซึ่งในช่วงของการสับเปลี่ยนจะมีเพียงทรินสเตอร์สองตัวเท่านั้นที่นำกระแส และถ้าอยู่ในช่วง  $60^\circ < \mu < 120^\circ$  จะเรียกว่าเป็นสถานะการทำงานที่ไม่ปกติซึ่งในช่วงของการสับเปลี่ยนจะมีทรินสเตอร์สามตัวหรือสี่ตัวที่นำกระแส [1]

รูปลักษณะของกระแสจะขึ้นอยู่กับค่ามุม  $\alpha$  ดังนั้นมุม  $\mu$  จะขึ้นอยู่กับค่าของ  $E_m$ ,  $I_d$ ,  $L_c$  และ  $\alpha$  โดยที่การสับเปลี่ยนจะเริ่มขึ้นเมื่อ  $\omega t = \alpha$  และจะหยุดลงเมื่อ  $\omega t = \alpha + \mu = \delta$  เมื่อ  $\delta$  คือมุมดับ (Extinction angle) จะได้ค่าของกระแสสับเปลี่ยน (Commutation currents) คือ

$$I_{s2} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2\omega L_c} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นของแรงดันที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดมุมเหลื่อม ( $\mu$ ) ในระหว่างช่วงของการสับเปลี่ยนจากไทรสเตอร์ตัวที่ 1 ไปยังไทรสเตอร์ตัวที่ 3

จากรูปที่ 2.9 ผลของการควบคุมมุม  $\alpha$  จะทำให้พื้นที่  $A_0$  ของแรงดันมีค่าลดลงเท่ากับพื้นที่  $A_\alpha$  ลบออกจากพื้นที่  $A_0$  และผลของการเกิดมุม  $\mu$  จะทำให้พื้นที่  $A_0$  ของแรงดันมีค่าลดลงเท่ากับ  $A_0 - A_\alpha - A_\mu$  ในทุกๆ  $60^\circ$  ( $\pi/3$  rad.) [3] และจะได้

$$A_\mu = \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \left( e_b - \frac{e_a + e_b}{2} \right) d\theta \quad (2.10)$$

$$= \frac{\sqrt{3}E_m}{2} (\cos \alpha - \cos \delta)$$

จะได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันตก (Voltage drop) ที่เกิดจากมุม  $\mu$  คือ

$$\Delta V_d = \frac{A_\mu}{\pi/3} \quad (2.11)$$

$$= \frac{V_{d0}}{2} (\cos \alpha - \cos \delta)$$

และจะได้ค่าของกระแสไฟตรง คือ

$$I_d = \frac{\sqrt{3}E_m}{2\omega L_c} (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.12)$$

$$= I_{S2} (\cos \alpha - \cos \delta)$$

จากการที่พิจารณามุม  $\alpha$  และมุม  $\mu$  จะได้ค่าของแรงดันไฟตรง คือ

$$V_d = V_{d0} \cos \alpha - \Delta V_d \quad (2.13)$$

$$= V_{d0} \cos \alpha - R_c I_d$$

เมื่อ

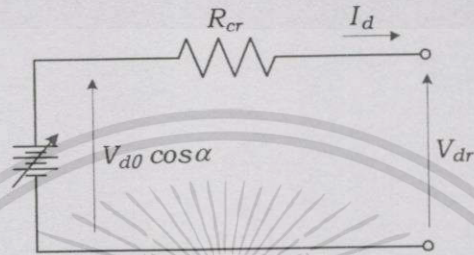
$$R_c = \frac{3}{\pi} \omega L_c = \frac{3}{\pi} x_c = 6 f L_c \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

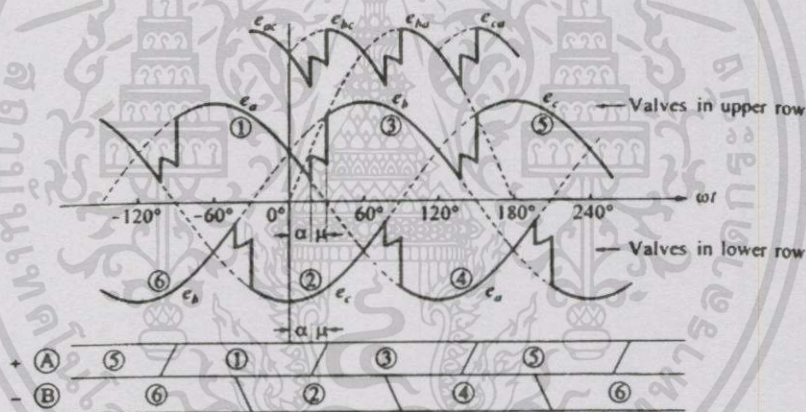
โดยที่  $R_c$  เรียกว่าค่าความต้านทานสมมูลในการสับเปลี่ยน (Equivalent commutating resistance) ซึ่งจะไม่มีการดูดซับพลังงาน (Consumes no power) นั่นคือ  $R_c = |\bar{Z}|$

### 2.3.3 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสถานะของเครื่องเรียงกระแส

วงจรสมมูลของเครื่องเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.10 โดยที่แรงดันและกระแสไฟตรงในวงจรสมมูลจะเป็นค่าเฉลี่ย และสำหรับรูปคลื่นในโหมดการทำงานนี้แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของเครื่องเรียงกระแสแบบบริดจ์



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นของแรงดันและคาบเวลาของการทำงานในโหมดของเครื่องเรียงกระแส

จากสมการที่ (2.13) จะได้สมการของแรงดันไฟตรงของเครื่องเรียงกระแส คือ

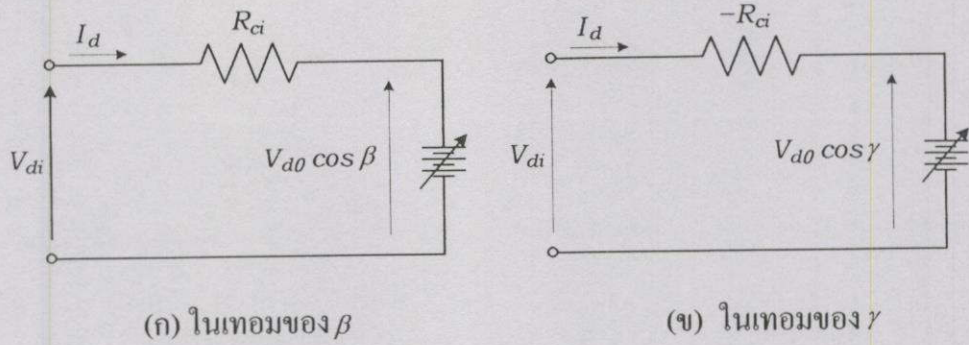
$$\begin{aligned} V_d &= V_{d0} \cos \alpha - \frac{V_{d0}}{2} (\cos \alpha - \cos \delta) \\ &= \frac{V_{d0}}{2} (\cos \alpha + \cos \delta) \end{aligned} \quad (2.15)$$

### 2.3.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสถานะของอินเวอร์เตอร์

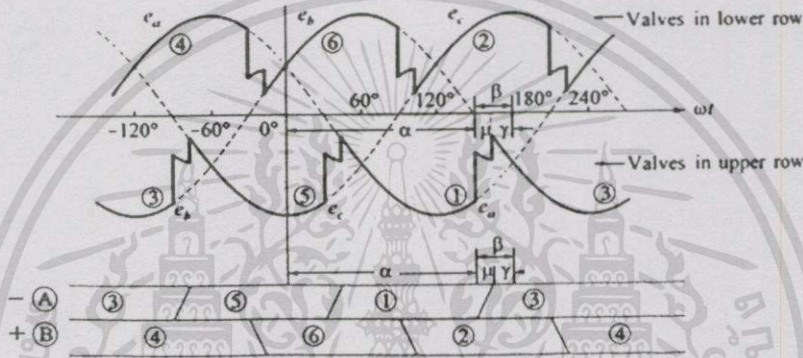
วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับมุม  $\alpha$  และมุม  $\delta$  ในโหมดการทำงานของเครื่องเรียงกระแสเมื่อนำมาพิจารณาในโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะใช้เป็นมุม  $\beta$  (Ignition advance angle) และมุม  $\gamma$  (Extinction advance angle) โดยที่  $\beta = \pi - \alpha$ ,  $\gamma = \pi - \delta$  และ  $\mu = \delta - \alpha = \beta - \gamma$  สำหรับรูปคลื่นโหมดนี้แสดงในรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ (เมื่อ  $V_{di}$  มีค่าเป็นบวก)



รูปที่ 2.13 รูปคลื่นของแรงดันและคาบเวลาของการทำงานในโหมดของอินเวอร์เตอร์

จากการที่ค่าของ  $\cos \alpha = -\cos \beta$  และ  $\cos \delta = -\cos \gamma$  สมการที่ (2.12) และ (2.15) สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในเทอมของมุม  $\gamma$  และมุม  $\beta$  คือ

$$I_d = I_{s2}(\cos \gamma - \cos \beta) \tag{2.16}$$

$$V_d = V_{d0} \frac{\cos \gamma + \cos \beta}{2} \tag{2.17}$$

หรือจะได้สมการ

$$V_d = V_{d0} \cos \beta + R_c I_d \tag{2.18}$$

$$V_d = V_{d0} \cos \gamma - R_c I_d \tag{2.19}$$

### 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เป็นเอชกับปริมาณที่เป็นดีซี

ในการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เป็นเอชกับปริมาณที่เป็นดีซี จะแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 ความสัมพันธ์ที่เป็นค่าโดยตรง

จาก [1] จะได้สมการของกระแสเอชซีที่ความถี่หลักมูล ( $\bar{I}_1$ ) ซึ่งเป็นค่า RMS ในรูปแบบเชิงซ้อน (Complex RMS value) คือ

$$\bar{I}_1 = \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \right) \cdot \left( \frac{e^{-j2\alpha} - e^{-j2\delta} - j2\mu}{4(\cos\alpha + \cos\delta)} \right) \quad (2.20)$$

และจะได้สมการเชิงซ้อนของกำลังไฟฟ้าคือ

$$P + jQ = \sqrt{3} E_{LL} \bar{I}_1^* = 3 E_{LN} \bar{I}_1^* \quad (2.21)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\bar{I}_{L1} = \bar{I}_1^* = \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \right) \cdot \left( \frac{e^{j2\alpha} - e^{j2\delta} + j2\mu}{4(\cos\alpha + \cos\delta)} \right) \quad (2.22)$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\bar{I}_{L1} = I_{L1} \cos\phi + j I_{L1} \sin\phi \quad (2.23)$$

โดยที่

$$I_{L1} = \sqrt{(I_{L1} \cos\phi)^2 + (I_{L1} \sin\phi)^2} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) จะได้เทอมที่เป็นส่วนของค่าจำนวนจริงและส่วนของค่าจำนวนจินตภาพ คือ

$$I_{L1} \cos\phi = \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \right) \cdot \left( \frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \right) \quad (2.25)$$

$$I_{L1} \sin\phi = \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \right) \cdot \left( \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2\delta}{4(\cos\alpha + \cos\delta)} \right) \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.24)-(2.26) เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะค่าขนาดของกระแส ( $I_{L1}$ ) จะได้

$$I_{L1} = k \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2.27)$$

นั่นคือ จาก [4] จะได้

$$k = \frac{\sqrt{|\cos 2\alpha - \cos 2\delta|^2 + |2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2\delta|^2}}{4|\cos\alpha - \cos\delta|}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของมุม  $\phi$  ของระบบเอชซีกับมุมต่างๆของระบบดีซี คือ

$$\cos\phi = \frac{1}{2k} (\cos\alpha + \cos\delta) \quad (2.28)$$

และจากสมการที่ (2.25) และ (2.26) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{\sin 2\delta - \sin 2\alpha - 2\mu}{\cos 2\alpha - \cos 2\delta} \\ &= \mu \cdot \csc \mu \cdot \csc(\alpha + \delta) - \cot(\alpha + \delta) \end{aligned} \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.15) จะได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟตรง คือ

$$\begin{aligned} V_d &= V_{d0} \cos \alpha - \Delta V_d \\ &= V_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} \end{aligned} \quad (2.30)$$

หรือ

$$V_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} E_{LN} \quad (2.31)$$

เมื่อไม่พิจารณาถึงค่าความสูญเสีย จะได้กำลังไฟฟ้าเอชมีค่าเท่ากับค่าของกำลังไฟฟ้าดีซี คือ

$$P_{ac} = P_{dc} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$3E_{LN} I_{L1} \cos \phi = V_d I_d \quad (2.33)$$

และจากสมการที่ (2.31) และ (2.33) จะได้

$$3E_{LN} I_{L1} \cos \phi = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} E_{LN} I_d \quad (2.34)$$

#### 2.4.2 ความสัมพันธ์ที่เป็นค่าโดยประมาณ

จากสมการที่ (2.27) สามารถประมาณค่าของกระแส  $I_{L1}$  คือ

$$I_{L1} \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = I_{L10} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $k \approx 1$  หรือจาก [4] จะกำหนดให้  $k = 0.995$  และสมการที่ (2.35) จะมีค่าที่ถูกต้องถ้า  $\mu = 0^\circ$  เท่านั้น แต่จะมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 4.3 % ที่  $\mu = 60^\circ$  และมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 1.1 % ที่  $\mu \leq 30^\circ$  [1] ดังนั้นค่าตัวประกอบการจัดโดยประมาณ คือ

$$\cos \phi \approx \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} \quad (2.36)$$

หรือ

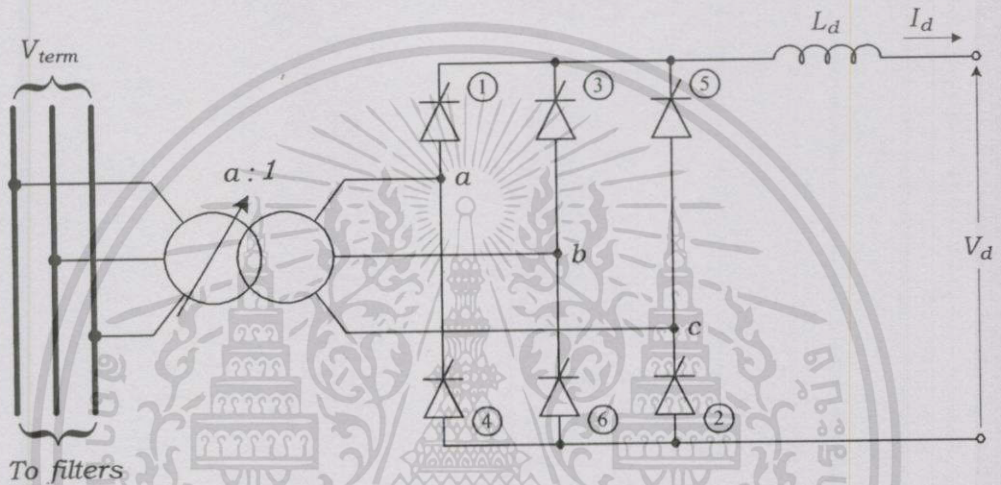
$$\cos \phi \approx \frac{V_d}{V_{d0}} = \cos \alpha - \frac{R_c I_d}{V_{d0}} \quad (2.37)$$

เมื่อแทนค่าของสมการที่ (2.36) ในสมการที่ (2.31) จะได้

$$V_d \approx \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} \cos \phi \quad (2.38)$$

$$\approx \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} \cos \phi$$

จากรูปที่ 2.2 เมื่อทำการพิจารณาที่หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์จะพบว่า หม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์สามารถทำการปรับแทปเพื่อควบคุมระดับของแรงดันไฟฟ้าเอซี [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของเครื่องเรียงกระแสแบบสามเฟสบริดจ์ โดยมีการปรับแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.16 เมื่อทำการคิดค่าแทป ( $a$ ) ของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ สมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.13) จะเปลี่ยนไป คือ

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a \cdot V_{term} \quad (2.39)$$

และ

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a \cdot V_{term} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} x_c \cdot I_d \quad (2.40)$$

เมื่อ  $V_{term}$  คือแรงดันเอซีที่บัสคอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $E_{LL}$  และจะได้สมการของมุม  $\mu$  คือ

$$\mu = \cos^{-1} \left[ \cos \alpha - \frac{\sqrt{2} \cdot x_c \cdot I_d}{a \cdot V_{term}} \right] - \alpha \quad (2.41)$$

หรือจาก [5] จะได้

$$\mu = \cos^{-1} \left( G^2 - EG + \sqrt{(EG - G^2)^2 - G^2 - E^2 + F^2 + 2EG} \right) \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

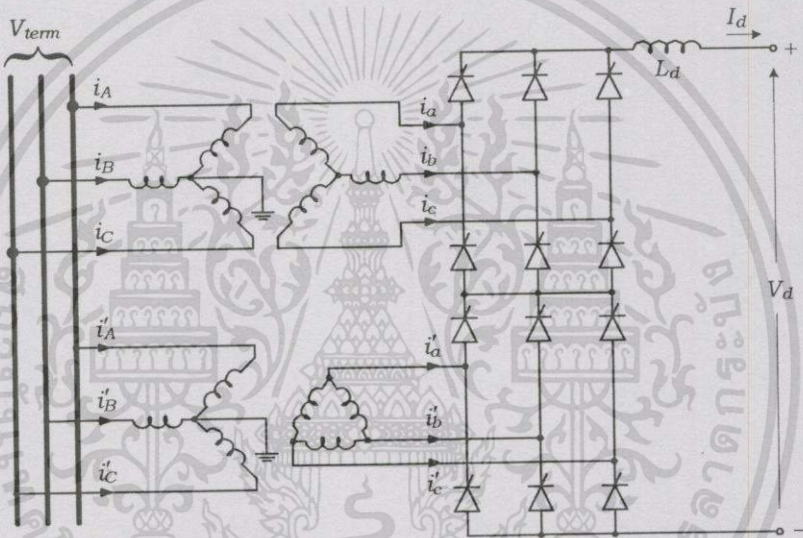
$$E = X_c \frac{I_d}{I_{d,rated}} \tag{2.43}$$

$$F = \sin \alpha \tag{2.44}$$

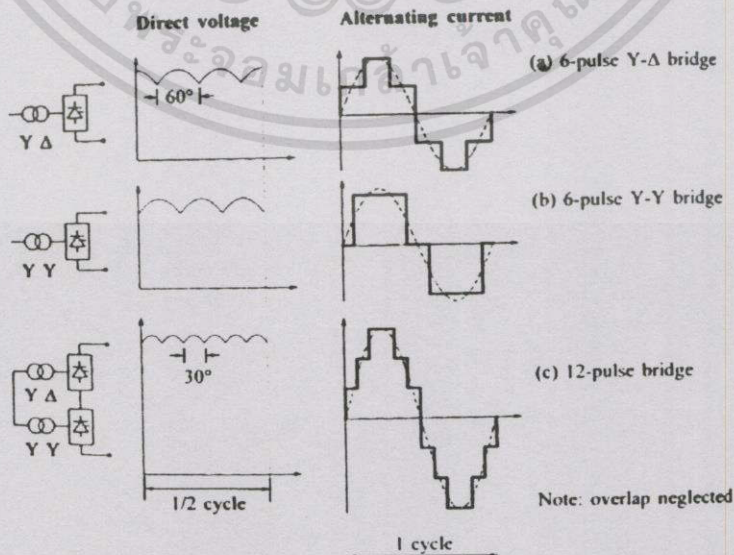
$$G = \cos \alpha \tag{2.45}$$

### 2.4.3 ความสัมพันธ์ของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแบบหลายบริดจ์

จากรูปที่ 2.14 เมื่อต้องการระดับของแรงดันไฟตรงที่สูงขึ้น บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC สามารถนำมาต่ออนุกรมกันในด้านที่เป็นดีซี และนำหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์มาต่อขนานกันในด้านที่เป็นเอซี [3] โดยอัตราส่วนของหม้อแปลงสามารถที่จะปรับได้ในสภาวะมีโหลด ซึ่งระบบ HVDC แบบบริดจ์ 12-พัลส์ แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 คอนเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ 12-พัลส์



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นของแรงดันไฟตรงและกระแสไฟสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.15 สำหรับหม้อแปลงที่นำมาต่อขนานกัน ชุดแรกจะเป็นหม้อแปลงที่ต่อขดลวดแบบ Y-Y และหม้อแปลงอีกชุดจะต่อขดลวดแบบ Y-Δ โดยรูปคลื่นของแรงดันและกระแสแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งรูปคลื่นของกระแสเอชซีจะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้นและสามารถที่จะกำจัดฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ในด้านเอชซีออกไปได้ ทำให้สามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก และสำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่มากกว่าสองบริดจ์โดยเพิ่มจำนวนพัลส์มากขึ้น เช่น 18-พัลส์ จะมีคอนเวอร์เตอร์สามบริดจ์ หรือ 24-พัลส์ จะมีคอนเวอร์เตอร์สี่บริดจ์ ซึ่งจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เป็นเอชซีกับปริมาณที่เป็นดีซี คือ

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_b \cdot a \cdot V_{term} \quad (2.46)$$

โดยที่  $n_b$  คือจำนวนบริดจ์ของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่ออนุกรมกัน และจะได้สมการของ  $V_d$  คือ

$$V_d = V_{d0} \cos \alpha - n_b \cdot \frac{3}{\pi} x_c \cdot I_d \quad (2.47)$$

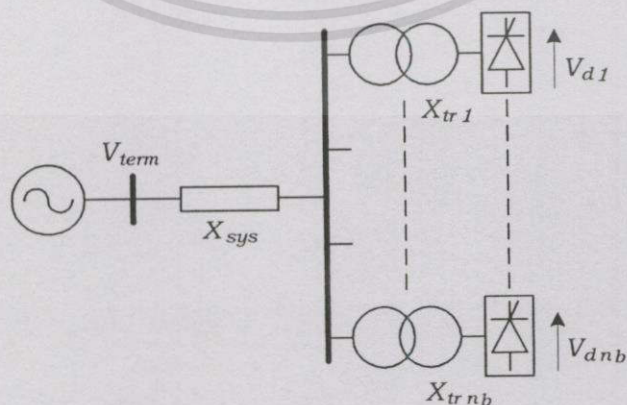
หรือจะได้

$$V_d = V_{d0} \cos \gamma - n_b \cdot \frac{3}{\pi} x_c \cdot I_d \quad (2.48)$$

เมื่อ  $x_c$  คือค่ารีแอคแตนซ์ในการสับเปลี่ยน (Commutation reactance) ของบริดจ์แบบ 6-พัลส์ โดยจะเป็นค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างจุด  $V_{term}$  กับบริดจ์ และสมการที่ (2.35) จะเปลี่ยนไป คือ

$$I_{LI} \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} n_b \cdot a \cdot I_d \quad (2.49)$$

และสำหรับค่า  $x_c$  ของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแบบหลายบริดจ์ [4] จากรูปที่ 2.15 จะแสดงในรูปที่ 2.17 โดยเป็นบริดจ์จำนวน  $n_b$  ต่ออนุกรมกันในด้านดีซี และต่อขนานกันในด้านเอชซี



รูปที่ 2.17 บริดจ์จำนวน  $n_b$  ต่ออนุกรมกันในด้านดีซี และต่อขนานกันในด้านเอชซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 ถ้าไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก (Harmonic filters) ต่ออยู่ที่บัส  $V_{term}$  จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่า  $x_c$  จากสมการที่ (2.14) ซึ่งจะต้องรวมเอาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายในระบบ ( $X_{sys}$ ) จากจุด  $V_{term}$  ถึงคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นจะได้ค่า  $x_{cj}$  ของบริดจ์  $j$  ใดๆ คือ

$$x_{cj} = X_{sys} + X_{trj} \quad (2.50)$$

โดยที่

$$X_{sys} = \frac{V_{term}^2}{\text{short-circuit MVA}} \quad (2.51)$$

ถ้ามีจำนวน  $n_b$  บริดจ์ ที่มีการเลื่อนเฟส (Phase shift) เหมือนกันและมีการสับเปลี่ยน (Commutate) ที่เวลาเดียวกัน สำหรับการต่ออนุกรมจำนวน  $n_b$  บริดจ์ บริดจ์สมมูล (Equivalent bridge) ของค่า  $x_c$  คือ

$$x_c(\text{series}) = n_b X_{sys} + X_{trj} \quad (2.52)$$

และถ้าบริดจ์ต่อขนานในด้านคิซี บริดจ์สมมูลของค่า  $x_c$  คือ

$$x_c(\text{parallel}) = X_{sys} + \frac{1}{n_b} X_{trj} \quad (2.53)$$

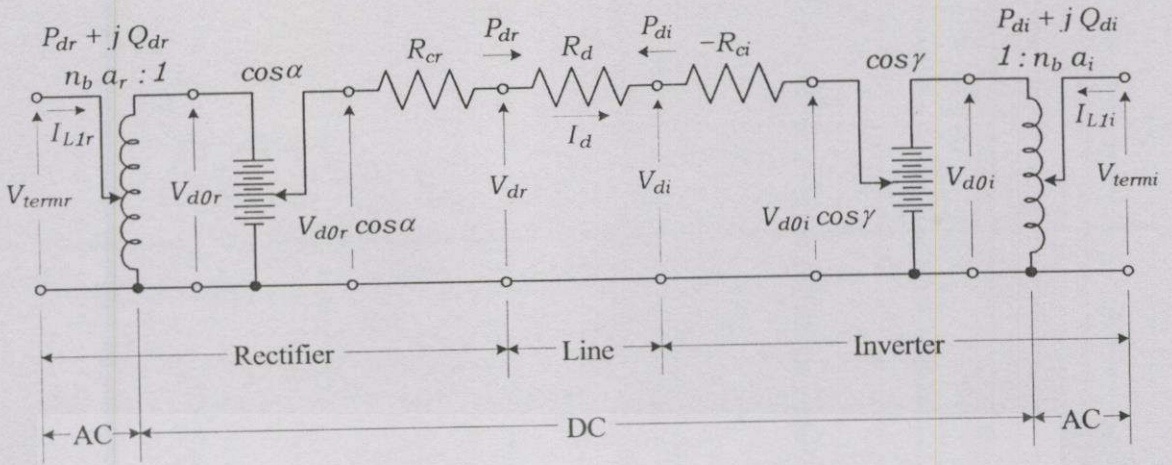
ถ้ามีการกรองอย่างสมบูรณ์แบบ (Perfect filtering) หรือมีหลายบริดจ์ที่ใช้หม้อแปลงที่แตกต่างกันในการเลื่อนเฟสของแรงดันในด้านเอซี จะกำหนดให้รูปคลื่นของแรงดันเอซีเป็นสัญญาณไซน์ซอซด์ และค่า  $X_{sys}$  ไม่มีผลในการสับเปลี่ยน ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการคิดค่า  $X_{sys}$

## 2.5 การควบคุมการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบ HVDC

ในการควบคุมการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบ HVDC ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งได้เป็น 5 ลักษณะ ของการควบคุม คือ

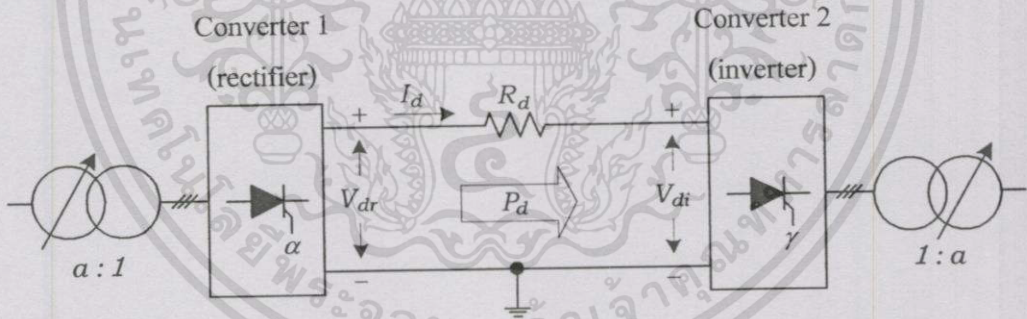
1. การควบคุมการปรับแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ คือ  $\alpha_r$  และ  $\alpha_i$
2. การควบคุมการปรับมุมนำกระแสของไทรสเตอร์ คือ มุม  $\alpha$  และมุม  $\gamma$
3. การควบคุมระดับของกระแสไฟคิซี คือ  $I_d$
4. การควบคุมระดับของแรงดันคิซี คือ  $V_{dr}$  และ  $V_{di}$
5. การควบคุมระดับของกำลังไฟฟ้า คือ  $P_{dr}$  และ  $P_{di}$

จากรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.12 จะได้ว่าวงจรสมมูลในสถานะอยู่ตัวของ HVDC link สองขั้วต่อ (Two-terminal DC link) [1] ที่รวมทั้งอัตราส่วนของหม้อแปลงและสายส่งคิซีแสดงในรูปที่ 2.18

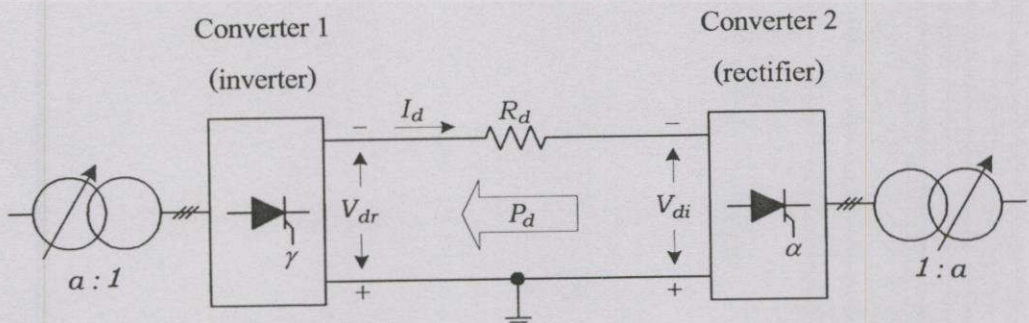


รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลในสถานะอยู่ตัวของระบบ HVDC สองขั้วต่อ

สำหรับการควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานที่ผ่านระบบ HVDC สามารถทำได้โดยการควบคุมมุมนำกระแสของไทรสเตอร์ ซึ่งกำลังไฟจะไหลจากด้านชุดคอนเวอร์เตอร์ที่มีสถานะเป็นเครื่องเรียงกระแส (ควบคุมมุม  $\alpha$  หรือทำการปรับมุมนำกระแสระหว่าง  $0^\circ - 90^\circ$ ) ผ่านสายส่งคิซีไปยังด้านชุดคอนเวอร์เตอร์ที่มีสถานะเป็นอินเวอร์เตอร์ (ควบคุมมุม  $\gamma$  หรือทำการปรับมุมนำกระแสระหว่าง  $90^\circ - 180^\circ$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 การไหลของกำลังไฟฟ้าไปหน้า (Forward Power Flow) โดยผ่านระบบ HVDC



รูปที่ 2.20 การไหลของกำลังไฟฟ้าย้อนกลับ (Reverse Power Flow) โดยผ่านระบบ HVDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.18 จะได้สมการของกระแสที่ไหลผ่านระบบ HVDC [6] คือ

$$I_d = \frac{V_{d0r} \cos \alpha - V_{d0i} \cos \gamma}{R_{cr} + R_d - R_{ci}} \quad (2.54)$$

หรือ

$$I_d = I_{dr} = I_{di} = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} \quad (2.55)$$

จะได้สมการของกำลังไฟฟ้าที่ด้านของเครื่องเรียงกระแส คือ

$$\begin{aligned} P_{dr} &= V_{dr} \cdot I_d \\ &= V_{dr} \left( \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} \right) \\ &= \frac{V_{dr}^2}{R_d} - \frac{V_{dr} \cdot V_{di}}{R_d} \end{aligned} \quad (2.56)$$

และจะได้สมการของกำลังไฟฟ้าที่ด้านของอินเวอร์เตอร์ คือ

$$\begin{aligned} P_{di} &= V_{di} \cdot I_d \\ &= V_{di} \left( \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} \right) \\ &= -\frac{V_{di}^2}{R_d} + \frac{V_{dr} \cdot V_{di}}{R_d} \end{aligned} \quad (2.57)$$

สำหรับค่าของกำลังไฟฟ้าที่ตรงกลางสายส่งคือ

$$\begin{aligned} P_{dm} &= \frac{P_{dr} + P_{di}}{2} \\ &= \frac{V_{dr}^2 - V_{di}^2}{2R_d} \end{aligned} \quad (2.58)$$

ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีจะต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ HVDC ด้วย ซึ่งการควบคุมการทำงานของระบบ HVDC จากการควบคุมทั้งห้าลักษณะดังกล่าวข้างต้นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์สี่ค่าในการควบคุมหนึ่งโหมดการทำงาน โดยจะแบ่งการควบคุมทั้งหมดออกได้เป็น 8 โหมดการทำงาน คือ

### 2.5.1 โหมดที่ 1 : การควบคุม $\alpha_r$ , $P_{dr}$ , $\gamma_i$ , $V_{di}$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 1 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $P_{dr}$ ,  $\gamma_i$  และ  $V_{di}$  ซึ่งการควบคุมในโหมดนี้จะเป็นการควบคุมที่ใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี ค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,

$V_{termi}$ ,  $V_{dr}$ ,  $I_d$ ,  $P_{di}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\alpha_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 โหมดที่ 2 : การควบคุม $\alpha_r$ $P_{dr}$ $\alpha_i$ $V_{di}$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 2 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $P_{dr}$ ,  $\alpha_i$  และ  $V_{di}$  ค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,  $V_{termi}$ ,  $V_{dr}$ ,  $I_d$ ,  $P_{di}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\gamma_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

### 2.5.3 โหมดที่ 3 : การควบคุม $\alpha_r$ $P_{dr}$ $\alpha_i$ $V_{di}$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 3 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $P_{dr}$ ,  $\alpha_i$  และ  $V_{di}$  ค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,  $V_{termi}$ ,  $V_{dr}$ ,  $I_d$ ,  $P_{di}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\gamma_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

### 2.5.4 โหมดที่ 4 : การควบคุม $\alpha_r$ $P_{dr}$ $\gamma_i$ $V_{di}$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 4 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $P_{dr}$ ,  $\gamma_i$  และ  $V_{di}$  ค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,  $V_{termi}$ ,  $V_{dr}$ ,  $I_d$ ,  $P_{di}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_i$ ,  $\alpha_r$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

### 2.5.5 โหมดที่ 5 : การควบคุม $\alpha_r$ $P_{dr}$ $\gamma_i$ $\alpha_i$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 5 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $P_{dr}$ ,  $\gamma_i$  และ  $\alpha_i$  ค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,  $V_{termi}$ ,  $V_{dr}$ ,  $V_{di}$ ,  $I_d$ ,  $P_{di}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

### 2.5.6 โหมดที่ 6 : การควบคุม $\alpha_r$ $P_{dr}$ $\alpha_r$ $\gamma_i$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 6 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $P_{dr}$ ,  $\alpha_r$  และ  $\gamma_i$  นั่นคือค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,  $V_{termi}$ ,  $V_{dr}$ ,  $V_{di}$ ,  $I_d$ ,  $P_{di}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

### 2.5.7 โหมดที่ 7 : การควบคุม $\alpha_r$ $I_d$ $\gamma_i$ $V_{di}$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 7 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $I_d$ ,  $\gamma_i$  และ  $V_{di}$  ค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,  $V_{termi}$ ,  $V_{dr}$ ,  $P_{dr}$ ,  $P_{di}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\alpha_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

### 2.5.8 โหมดที่ 8 : การควบคุม $\alpha_r$ $V_{dr}$ $\gamma_i$ $P_{di}$

สำหรับการควบคุมในโหมดที่ 8 จะทำการควบคุมค่าของ  $\alpha_r$ ,  $V_{dr}$ ,  $\gamma_i$  และ  $P_{di}$  ค่าของพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ที่ได้จากการรันโปรแกรม คือ ค่าของ  $V_{termr}$ ,  $V_{termi}$ ,  $V_{di}$ ,  $I_d$ ,  $P_{dr}$ ,  $Q_{dr}$ ,  $Q_{di}$ ,  $\alpha_i$ ,  $\alpha_r$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\mu_r$  และ  $\mu_i$

การทำงานของระบบ HVDC ทั้งแปดโหมดการทำงานดังกล่าวข้างต้นนี้ จะใช้ในการทดสอบเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือในวิธีการคำนวณ (Algorithms) และการจัดรูปแบบสมการจาโคเบียนเมตริกซ์ (AC-DC Jacobian matrix equation) ของโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลัง

ไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี ซึ่งสามารถที่จะนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สมการของฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC จะกำเนิดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ ( $\bar{V}_h$  และ  $\bar{I}_h$ ) ทั้งในด้านดีซีและเอซีตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการฮาร์โมนิก [1] ของคอนเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนพัลส์เท่ากับ  $p$  ที่ได้ทำการกำเนิดฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆออกมาทั้งในด้านดีซีและด้านเอซี คือ

$$h = p \cdot q \quad (2.59)$$

และ

$$h = p \cdot q \pm 1 \quad (2.60)$$

เมื่อ  $q$  เป็นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ของ HVDC โดยทั่วไปจะมีจำนวนพัลส์เท่ากับ 6-พัลส์ หรือ 12-พัลส์ ดังนั้นฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ

Pulse No.	DC Side	AC Side
$p$	$p \cdot q$	$p \cdot q \pm 1$
6	0, 6, 12, 18, 24, ...	1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ...
12	0, 12, 24, ...	1, 11, 13, 23, 25, ...

จากตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดที่ใช้ในการพิจารณาถึงอันดับ, ขนาด และมุมเฟสของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic harmonics) ของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6-พัลส์ คือ

1. แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นแรงดันสามเฟส, เป็นสัญญาณไซน์ซอยด์ (Sinusoidal), มีความสมดุล (Balanced) และมีลำดับเป็นบวก (Positive sequence)
2. กระแสไฟตรงมีค่าคงที่โดยปราศจากความพลัว (Without ripple) โดยถือว่าไม่มีแอกเตอร์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำไม่จำกัด ( $L_d = \infty$ )
3. ค่าความเหนี่ยวนำของการสับเปลี่ยน ( $L_c$ ) มีค่าเท่ากันทั้งสามเฟส

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะเท่านั้น

### 2.6.1 สมการของฮาร์โมนิกเอซีโดยไม่พิจารณามุมเหลื่อม

จากรูปที่ 2.16 จะได้สมการของกระแสที่ไหลเข้าไปยังคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC โดยขดลวดของหม้อแปลงต่อแบบ Y-Y และขดลวดของหม้อแปลงต่อแบบ Y- $\Delta$  คือ

$$i_{YY} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \cdot \left( \cos\theta - \frac{1}{5} \cos 5\theta + \frac{1}{7} \cos 7\theta - \frac{1}{11} \cos 11\theta + \frac{1}{13} \cos 13\theta - \frac{1}{17} \cos 17\theta + \frac{1}{19} \cos 19\theta - \dots \right) \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{Y1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \cdot \left( \cos\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta - \frac{1}{11} \cos 11\theta \right. \\ \left. + \frac{1}{13} \cos 13\theta + \frac{1}{17} \cos 17\theta - \frac{1}{19} \cos 19\theta - \dots \right) \quad (2.62)$$

นำสมการที่ (2.61) และ (2.62) มารวมกัน เมื่อต่อคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบบริดจ์ 12-พัลส์ จะได้สมการ คือ

$$i_{I2} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \cdot \left( \cos\theta - \frac{1}{11} \cos 11\theta + \frac{1}{13} \cos 13\theta - \frac{1}{23} \cos 23\theta + \frac{1}{25} \cos 25\theta - \dots \right) \quad (2.63)$$

จะได้ค่ากระแสประสิทธิผลหรือค่า RMS ซึ่งมีค่าเหมือนกับสมการที่ (2.36) คือ

$$I_I = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \\ = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2.64)$$

และค่ากระแสประสิทธิผลที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ คือ

$$I_h = \frac{I_I}{h} \quad (2.65)$$

### 2.6.2 สมการของฮาร์มอนิกเอชโดยทำการพิจารณามุมเคลื่อน

จากรูปที่ 2.16 เมื่อนำมุม  $\mu$  มาพิจารณาด้วย พบว่ารูปคลื่นของกระแสเอชจะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากยิ่งขึ้น และผลของการเกิดมุม  $\mu$  จะทำให้ขนาดของฮาร์มอนิกมีค่าลดลง สำหรับมุม  $\mu$  ที่มีค่าไม่เกิน  $60^\circ$  จะได้สมการของกระแสเอชฮาร์มอนิกส์ที่ออกมาจากบัสคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC โดยขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงค่ามุม  $\alpha$  และ  $\delta$  ของคอนเวอร์เตอร์ [1] คือ

$$\bar{I}_h = \left( \frac{I_I}{2h(\cos\alpha - \cos\delta)} \right) \cdot \left( \frac{e^{-j(h+1)\alpha} - e^{-j(h+1)\delta}}{h+1} - \frac{e^{-j(h-1)\alpha} - e^{-j(h-1)\delta}}{h-1} \right) \quad (2.66)$$

หรือ

$$\bar{I}_h = \left( \frac{\sqrt{6} I_d}{2\pi h(\cos\alpha - \cos\delta)} \right) \cdot \left( \frac{e^{-j(h+1)\alpha} - e^{-j(h+1)\delta}}{h+1} - \frac{e^{-j(h-1)\alpha} - e^{-j(h-1)\delta}}{h-1} \right) \quad (2.67)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดของ  $\bar{I}_h$  โดยไม่สนใจมุมเฟส จะได้สมการ คือ

$$I_h = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi h(\cos\alpha - \cos\delta)} \cdot \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos(2\alpha + \mu)} \quad (2.68)$$

โดยที่

$$A = \frac{\sin\left[(h-1)\frac{\mu}{2}\right]}{h-1} \quad (2.69)$$

$$B = \frac{\sin\left[(h+1)\frac{\mu}{2}\right]}{h+1} \quad (2.70)$$

และจะได้สมการของแรงดันดีซีฮาร์โมนิกส์ที่ DC link ของระบบ HVDC [1] คือ

$$\bar{V}_{dh} = \left( \frac{3\sqrt{2} \alpha V_{term}}{2\pi} \right) \cdot \left( \frac{e^{j(h+1)\alpha} + e^{j(h+1)\delta}}{h+1} - \frac{e^{j(h-1)\alpha} + e^{j(h-1)\delta}}{h-1} \right) \quad (2.71)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดของ  $\bar{V}_{dh}$  โดยไม่สนใจมุมเฟส จะได้สมการ คือ

$$V_{dh} = \frac{3\sqrt{2} \alpha V_{term}}{\pi} \cdot \sqrt{C^2 + D^2 - 2CD \cos(2\alpha + \mu)} \quad (2.72)$$

โดยที่

$$C = \frac{\cos\left[(h-1)\frac{\mu}{2}\right]}{h-1} \quad (2.73)$$

$$D = \frac{\cos\left[(h+1)\frac{\mu}{2}\right]}{h+1} \quad (2.74)$$

หรือจาก [7] จะได้

$$V_{dh} = \frac{V_{d0}}{\sqrt{2(h^2-1)}} \cdot \left\{ (h-1)^2 \cos^2\left[(h+1)\frac{\mu}{2}\right] + (h+1)^2 \cos^2\left[(h-1)\frac{\mu}{2}\right] - 2(h-1)(h+1) \cos\left[(h+1)\frac{\mu}{2}\right] \cos\left[(h-1)\frac{\mu}{2}\right] \cos(2\alpha + \mu) \right\}^{1/2} \quad (2.75)$$

เมื่อมุม  $\alpha = 0^\circ$  และมุม  $\mu = 0^\circ$  สมการที่ (2.75) จะมีขนาดของสมการลดลง คือ

$$V_{dh0} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{d0}}{h^2 - 1} \approx \frac{\sqrt{2} \cdot V_{d0}}{h^2} \quad (2.76)$$

และเมื่อมุม  $\alpha = 0^\circ$  และมุม  $\mu = 0^\circ$  จะได้

$$V_{dh} = \sqrt{2} \cdot V_{d0} \left( \frac{h}{h^2 - 1} \right) \approx \sqrt{2} \cdot V_{d0} \left( \frac{1}{h} \right) \quad (2.77)$$

จาก [8,9,10] จะได้ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC แบบบริดจ์ที่มีจำนวนพัลส์ต่างๆแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 กระแสฮาร์มอนิกสัณฐานลักษณะเอซึ่ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ในแต่ละจำนวนพัลส์

Harmonic order	Static power converter pulse number						Harmonic Current in percent of fundamental			
	6	12	18	24	30	36	Theoretical	$x_c = 0.12$ $\alpha = 30^\circ$	$x_c = 0.15$ $\alpha = 0^\circ$	$x_c = 0.15$ $\alpha = 32^\circ$
5	-						20.00	19.2	16.2	18.9
7	+						14.29	13.2	9.3	12.7
11	-	-					9.09	7.3	3.04	6.70
13	+	+					7.69	5.7	1.86	4.96
17	-		-				5.88	3.5	1.261	2.60
19	+		+				5.26	2.7	1.08	1.78
23	-	-		-			4.35	2.0	0.66	0.63
25	+	+		+			4.00	1.6	0.53	0.28
29	-				-		3.45	1.4	0.43	0.36
31	+				+		3.23	1.2	0.39	0.48
35	-	+	-			-	2.86	1.1	0.28	0.59
37	+	+	+			+	2.70	1.0	0.24	0.59
41	-						2.44	0.9	X	X
43	+						2.33	0.8	X	X
47	-	-		-			2.13	0.8	X	X
49	+	+		+			2.04	0.7	X	X
Phase order	3	6	9	12	15	18				
Phasor separation	120°	60°	40°	30°	24°	20°				

### 2.6.3 ลำดับเฟสของฮาร์มอนิก

สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลภายใต้สภาวะที่ไม่เป็นไซน์ซอซด์ จะได้สมการของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับ  $h^{\text{th}}$  ของแต่ละเฟส [11] คือ

$$V_{Ah} = \sqrt{2} V_h \sin (h\omega_0 t + \delta_h) \quad (2.78)$$

$$V_{Bh} = \sqrt{2} V_h \sin (h\omega_0 t - \frac{2\pi h}{3} + \delta_h) \quad (2.79)$$

$$V_{Ch} = \sqrt{2} V_h \sin (h\omega_0 t + \frac{2\pi h}{3} + \delta_h) \quad (2.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นลำดับเฟสของฮาร์โมนิกเอซีในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล [1] ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ขององค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence; +), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence; -) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence; 0) แสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งอันดับฮาร์โมนิกที่เน้นสีเข้มแสดงฮาร์โมนิกที่เป็นเลขคี่ (Odd harmonic)

ตารางที่ 2.3 ลำดับเฟสของเอซีฮาร์โมนิกในกรณีที่ระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล

Phase Sequence	Harmonic Order																	
	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	
+	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	
-	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	
0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	

และจะได้ลำดับเฟสของดีซีฮาร์โมนิกสัญลักษณ์ (Phase Sequence of DC Harmonics) แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลำดับเฟสของแรงดันดีซีฮาร์โมนิก

Sequence	Harmonic Order
0	6, 18, 30, ..., $12q + 6$
+	0, 12, 24, ..., $12q$

## 2.7 สรุป

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์โมนิกในระบบเอซี-ดีซี จะต้องทำความเข้าใจในทฤษฎีและพฤติกรรมของระบบ HVDC เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานความรู้ในการที่จะนำไปพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบดังกล่าว ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง โดยทำการรวบรวมมาจากแหล่งอ้างอิงต่างๆที่มีมาตรฐานตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้ และเรียงลำดับเรื่องราวของเนื้อหาตามความเหมาะสมในอันที่จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจหรือนักวิจัยรุ่นหลังได้ทำการศึกษาต่อไป สำหรับรายละเอียดเฉพาะเรื่องจะกล่าวถึงในบทต่อไปโดยนำเสนอควบคู่ไปกับวิธีการและขั้นตอนของการวิเคราะห์

## ทฤษฎีและการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี

### 3.1 บทนำ

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญมากที่จะนำไปใช้ในการวางแผนและออกแบบขยายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จะทำการขยายกำลังการผลิตในอนาคต ซึ่งจะต้องมีการกำหนดและตัดสินใจในเรื่องของการควบคุมระบบที่มีอยู่ให้ดีและมีความเหมาะสมมากที่สุด และนอกจากนี้ยังใช้ศึกษาสภาวะการทำงานทั้งในเวลาปกติและในเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดเพื่อสามารถวิเคราะห์และแก้ไขระบบได้ จึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์จากโปรแกรมเพาเวอร์โฟลว์เปรียบเสมือนเครื่องมือที่ช่วยให้มนุษย์สามารถตัดสินใจได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมของโหลดเกิดขึ้นภายในระบบควรจะมีการแก้ไขระบบอย่างไรเพื่อให้การผลิตและการส่งจ่ายไฟฟ้าสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้หมายถึงการเปลี่ยนแปลงหรือการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างปกติไม่ใช่การเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใด หรือการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดการลัดวงจรภายในระบบ และสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน เนื่องจากว่าในปัจจุบันแต่ละประเทศได้นำเอาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronics) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมโยงหรือควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพ, มีเสถียรภาพ และมีความน่าเชื่อถือของระบบมากยิ่งขึ้น รวมทั้งในประเทศไทยได้เริ่มมีการนำระบบ HVDC เข้ามาใช้ จึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบเอซี-ดีซีขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนในระบบดังกล่าว

### 3.2 การแปลงค่าต่อหน่วยของระบบเอซี-ดีซี

การวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปจะแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นค่าของกำลังไฟฟ้า (MVA), แรงดันไฟฟ้า (kV), กระแสไฟฟ้า (kA) และค่าอิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ ) ของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีความยุ่งยากในการคำนวณให้อยู่ในรูปแบบของค่าระบบต่อหน่วย (Per-unit system) เพื่อต้องการให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้นและสะดวกขึ้น ซึ่งในระบบเอซี-ดีซีก็จะทำการแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของทั้งระบบเอซีและระบบดีซีให้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ (Percent) หรือค่าต่อหน่วย [3,12,13] โดยก่อนที่จะหาค่าต่อหน่วยจะต้องมีการเลือกใช้ค่าฐาน (Base) ของการคำนวณในระบบเอซี-ดีซี ซึ่งค่าฐานของทั้งสองระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าฐานของระบบเอซีและระบบดีซี

A.C. (rms)	D.C.
$S_{ac,base}$	$P_{dc,base}$
$V_{ac,base}$	$V_{dc,base}$
$I_{ac,base} = \frac{S_{ac,base}}{\sqrt{3} V_{ac,base}}$	$I_{dc,base} = \frac{P_{dc,base}}{V_{dc,base}}$
$Z_{ac,base} = \frac{V_{ac,base}^2}{S_{ac,base}}$ $= \frac{V_{ac,base}}{\sqrt{3} I_{ac,base}}$	$R_{dc,base} = \frac{V_{dc,base}}{I_{dc,base}}$ $= \frac{V_{dc,base}^2}{P_{dc,base}}$

จากตารางที่ 3.1 จะพบว่าค่าฐานของระบบเอซีจะประกอบไปด้วยค่าของ  $S_{ac,base}$ ,  $V_{ac,base}$ ,  $I_{ac,base}$  และ  $Z_{ac,base}$  และค่าฐานของระบบดีซีจะประกอบไปด้วยค่าของ  $P_{dc,base}$ ,  $V_{dc,base}$ ,  $I_{dc,base}$  และ  $R_{dc,base}$

และจากตารางที่ 3.1 เมื่อระบบเอซีและระบบดีซีรวมอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังเดียวกัน ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าจะต้องเท่ากัน คือ  $S_{ac,base} = P_{dc,base}$  และค่าฐานของแรงดันไฟฟ้า ( $V_{base}$ ) ของระบบเอซี-ดีซี คือ  $\frac{V_{dc,base}}{V_{ac,base}} = v$  ซึ่งจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าฐานในระบบเอซีและระบบดีซี ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยที่  $n_b$  คือจำนวนบริดจ์ของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่ออนุกรมกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้  $n_b = 1$  เพื่อความสะดวกในการคำนวณ เพราะฉะนั้นจะไม่มี  $n_b$  ในสมการที่ใช้ในการคำนวณในหัวข้ออื่นๆ

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของค่าฐานในระบบเอซี-ดีซี

$(AC - DC)_{base}$
$P_{dc,base} = V_{dc,base} I_{dc,base} = S_{ac,base} = \sqrt{3} V_{ac,base} I_{ac,base}$
$V_{dc,base} = v V_{ac,base}$
$I_{dc,base} = \sqrt{3} I_{ac,base} / v = \left( \frac{\pi}{\sqrt{6} n_b} \right) I_{ac,base}$
$R_{dc,base} = v^2 Z_{ac,base} = \left( \frac{18 n_b^2}{\pi^2} \right) Z_{ac,base}$

ดังนั้นจากตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าฐานในระบบเอซี-ดีซี ซึ่งจะได้ค่าต่อหน่วยของระบบดีซีที่สัมพันธ์กับค่าฐานของระบบเอซี ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของค่าต่อหน่วยของระบบคี่ชื่อกับค่าฐานของระบบเอชซี

$(AC - DC)_{p.u.}$
$P_{d,p.u.} = \frac{P_d}{P_{d,base}} = \frac{P_d Z_{ac,base}}{V_{ac,base}^2}$ $= \frac{3 a^2 n_b^2 V_{term,p.u.}^2}{2\pi x_{c,p.u.}} (\cos^2 \alpha - \cos^2 \delta)$
$V_{d,p.u.} = \frac{V_d}{V_{dc,base}} = \frac{V_d}{v V_{ac,base}}$ $= \frac{3\sqrt{2} a n_b V_{term,p.u.}}{2\pi v} (\cos \alpha + \cos \delta)$
$I_{d,p.u.} = \frac{I_d}{I_{dc,base}} = \frac{I_d v}{\sqrt{3} I_{ac,base}} = \frac{I_d v Z_{ac,base}}{V_{ac,base}}$ $= \frac{\sqrt{2} a n_b V_{term,p.u.} v}{2 x_{c,p.u.}} (\cos \alpha - \cos \delta)$

### 3.3 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC transmission modeling) ที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ในระบบเอชซี-คี่ชื่ ซึ่งแสดงเป็นค่าเปอร์ยูนิตจะประกอบไปด้วย

#### 3.3.1 สายส่งไฟฟ้า

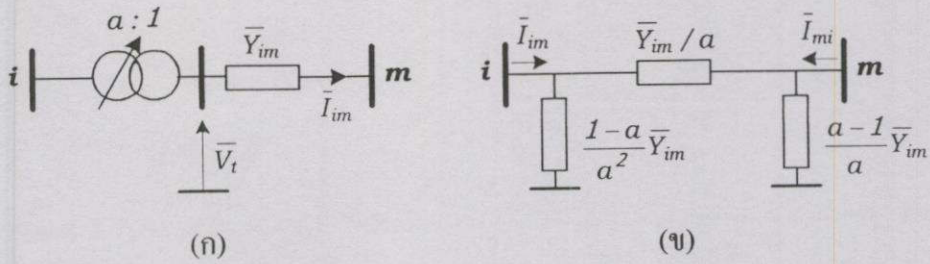
แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า (Transmission lines) [14] จะแบ่งชนิดตามระยะความยาวของสายส่ง ดังนี้

- สายส่งระยะสั้น (Short transmission lines) มีความยาวน้อยกว่า 80 กิโลเมตร (50 ไมล์)
- สายส่งระยะปานกลาง (Medium transmission lines) มีความยาวตั้งแต่ 80 กิโลเมตร (50 ไมล์) จนถึง 240 กิโลเมตร (150 ไมล์) โดยใช้วงจรสมมูลแบบ  $\pi$
- สายส่งระยะยาว (Long transmission lines) มีความยาวมากกว่า 240 กิโลเมตร (150 ไมล์) โดยใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed-parameter) ซึ่งมีความถูกต้องสูง ถึงแม้ว่าบางจุดประสงค์จะใช้พารามิเตอร์แบบเป็นก้อน (Lumped-parameter) ซึ่งสามารถใช้กับสายส่งที่มีความยาวไม่เกิน 320 กิโลเมตร (200 ไมล์) โดยใช้วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ซึ่งใช้วิธีการคำนวณที่อยู่ในรูปของสมการ hyperbolic

#### 3.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทป

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทป (Off-nominal Transformer Tap Settings) [4] ซึ่งเป็นหม้อแปลงในอุดมคติ (Ideal transformer) ที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ โดยมีอัตรา การเปลี่ยนแปลงของแทป (Transformation ratio) เป็น  $a : 1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแทป : (ก) ค่าเปอร์ยูนิตของ  $Y_{im}$  ซึ่งอยู่ตรงข้ามกับด้านที่เปลี่ยนแทป; (ข) วงจรเทียบเคียงเปอร์ยูนิต เมื่อ  $a$  เป็นค่าจริง

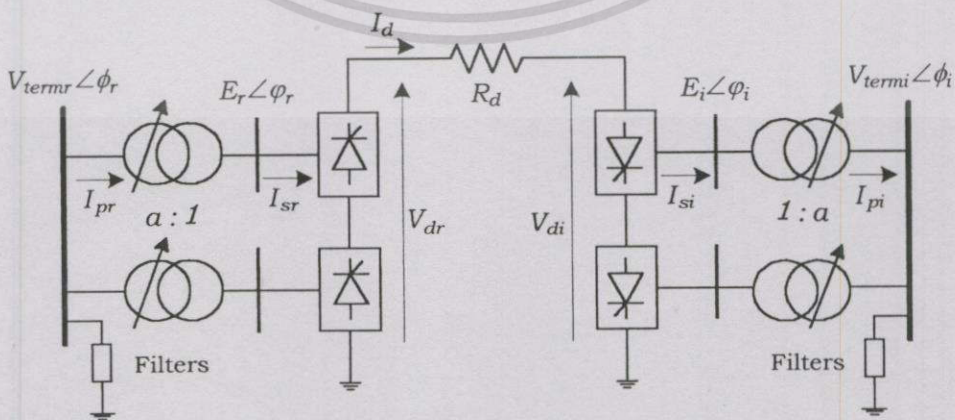
โดยจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่บัส  $i$  และ  $m$  คือ

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{im} \\ \bar{I}_{mi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{im} / |a|^2 & + \bar{Y}_{im} / a^* \\ -\bar{Y}_{im} / a & \bar{Y}_{im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_i \\ \bar{V}_m \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานในสถานะอยู่ตัว (Steady-state) และโหลดสมดุล (Balanced load) จะไม่มีความแตกต่างในการปรับค่าแทปสำหรับหม้อแปลงที่ต่อแบบ Y-Y หรือแบบ Y- $\Delta$  แต่จะมีการเลื่อนเฟส (Phase shift)  $\pm 30^\circ$  ระหว่างแรงดันเฟส (Phase voltages) และแรงดันไลน์ (Line voltages) ทางด้านชุดขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) กับทางด้านชุดขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) ซึ่งค่าแทปในรูปแบบเชิงซ้อน คือ  $a = |a|e^{\pm j30^\circ}$

### 3.4 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.18 จะได้แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC transmission modeling) ที่ใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบเอชวีดีซี โดยคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC เป็นแบบบริดจ์ 12-พัลส์ [15] ดังแสดงในรูปที่ 3.2

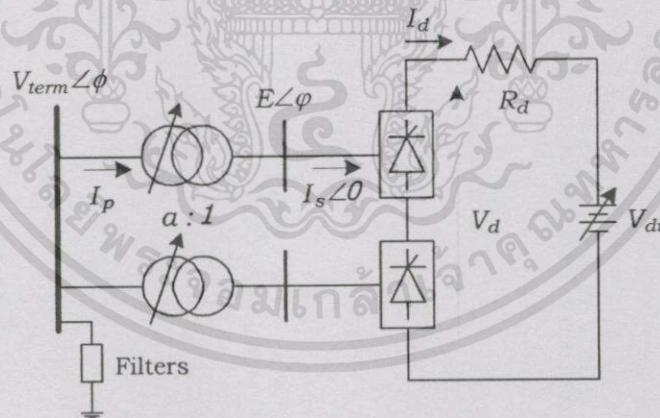


รูปที่ 3.2 แบบจำลองของระบบ HVDC ชนิดขั้วเดียว 12-พัลส์

จากรูปที่ 3.2 แบบจำลองของระบบ HVDC ในสภาวะการทำงานปกติ (Normal operation) ของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้

1. แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต้องสมดุล (Balanced phase) และเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ซอซอิดัล (Sinusoidal)
2. การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ต้องกำหนดแรงดันที่สมดุล
3. กระแสและแรงดัน ไฟตรงต้องเรียบ (Smooth)
4. หม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์ไม่มีการสูญเสียและไม่คิดแอดมิตแตนซ์ทำแม่เหล็ก (Magnetizing admittance)

ภายใต้สภาวะที่โหลดสมดุลบริดจ์ของคอนเวอร์เตอร์ที่บัสของระบบจะมีการทำงานอย่างอิสระโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะการต่อของหม้อแปลง ดังนั้นจึงสามารถที่จะแทนด้วยบริดจ์เดี่ยว (Single bridge) สำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส มาเป็นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ 1 เฟส และเนื่องจากว่าลักษณะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแบบเครื่องเรียงกระแสและคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแบบอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีรูปแบบของตัวอุปกรณ์และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณที่คล้ายกัน แต่จะแตกต่างกันที่ลักษณะการทำงานจึงสามารถที่จะพิจารณาเป็นแบบจำลองของวงจรสมมูลคอนเวอร์เตอร์เพียงด้านเดียวเพื่อใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลอง 1 เฟส ของวงจรสมมูลคอนเวอร์เตอร์ (มุม  $\phi$  และ  $\varphi$  อ้างอิงกับ  $I_s \angle 0$ )

โดยที่  $V_{term} \angle \phi$  คือ แรงดันที่บัสคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูล

$E \angle \varphi$  คือ ส่วนประกอบที่ความถี่หลักมูลของรูปคลื่นแรงดัน ที่บัสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

$I_p, I_s$  คือ ส่วนประกอบที่ความถี่หลักมูลของรูปคลื่นกระแส ที่ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ตามลำดับ

$a$  คือ อัตราส่วนแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ (Converter transformer)

$V_d$  คือ แรงดันเฉลี่ยของไฟฟ้ากระแสตรง

$I_d$  คือ กระแสไฟตรงของคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.3 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในระบบ [4] โดยจะได้สมการของกระแสไฟเอชี ( $I_p$  และ  $I_s$ ) ที่ไหลผ่านหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของกระแสไฟดีซี ( $I_d$ ) ของระบบ HVDC จากสมการที่ (2.27) และ (2.35) คือ

$$I_s \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (3.2)$$

$$I_s = B_t \sin \phi - B_t a V_{term} \sin \phi \quad (3.3)$$

$$I_{s,p.u.} = k \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{d,p.u.} \quad (3.4)$$

$$I_p = a I_s \quad (3.5)$$

$$I_d = \frac{a V_{term}}{\sqrt{2} x_c} [\cos \alpha - \cos \delta] \quad (3.6)$$

สำหรับสมการของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_{term}$ ) ที่บัสคอนเวอร์เตอร์ของระบบ โดยปรับปรุงจากสมการที่ (2.31) คือ

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} a V_{term} [\cos \alpha + \cos \delta] \quad (3.7)$$

$$V_d = k k_I a V_{term} \cos \phi \quad (3.8)$$

โดยที่

$$V_d I_d = E I_s \cos \phi \quad (3.9)$$

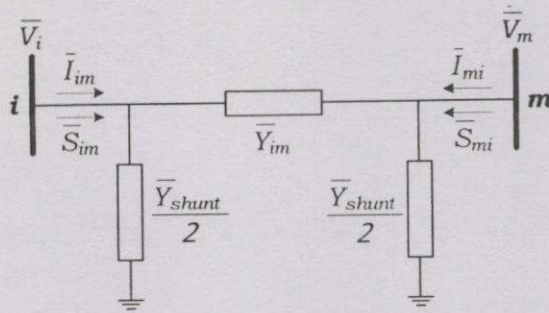
$$V_d I_d = V_{term} I_p \cos \phi \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.3) ค่า  $B_t$  คือค่าซัสเซปแตนซ์รั่วไหล (Leakage susceptance) ของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ และจากสมการที่ (3.7) ค่า  $k_I = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$

### 3.5 สมการของการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในระบบเอชี

ในการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง [14] ข้อมูลที่รับเข้ามาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นวงจรต่อเฟสและมีวงจรสมมูลเป็นแบบ  $\pi$  โดยที่ค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรม ( $\bar{Y}_{im}$ ) และค่าแอดมิตแตนซ์ของกระแสอัดประจุสาย ( $\bar{Y}_{shunt}$ ) (คือผลรวมของ Total charging Mvar ที่แรงดันปกติของระบบ 1.0 p.u.) แสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของสายส่งระหว่างบัส  $i$  และบัส  $m$  ใดๆของระบบ

จากรูปที่ 3.4 จะได้สมการของกระแสที่ไหลเข้าบัส  $i$  ใดๆของระบบ คือ

$$\bar{I}_i = \sum_{m=1}^N \bar{Y}_{im} \bar{V}_m \quad (3.11)$$

โดยที่ค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรม ( $\bar{Y}_{im}$ ) และแรงดัน ( $\bar{V}_i$ ) ที่บัส  $i$  ใดๆของระบบ คือ

$$\bar{Y}_{im} = |Y_{im}| \angle \theta_{im} \quad (3.12)$$

$$\bar{V}_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (3.13)$$

จะได้สมการแสดงค่าของกำลังไฟฟ้าที่บัส  $i$  ใดๆของระบบที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันและกระแส คือ

$$\bar{S}_i = P_i + j Q_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \quad (3.14)$$

$$\bar{S}_i^* = P_i - j Q_i = \bar{V}_i^* \bar{I}_i \quad (3.15)$$

โดยที่

$$P_i - j Q_i = \sum_{m=1}^N |Y_{im} V_i V_m| \angle (\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (3.16)$$

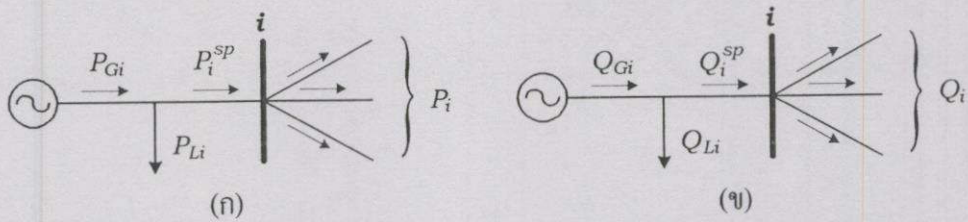
เมื่อค่า  $P_i$  และ  $Q_i$  คือค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้านี้ออกที่ฟลูทริที่บัส  $i$  ใดๆของระบบ เพราะฉะนั้นจะได้สมการกำลังไฟฟ้าในส่วนจริงและส่วนรีแอกทีฟ คือ

$$P_i = \sum_{m=1}^N |Y_{im} V_i V_m| \cos(\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (3.17)$$

$$Q_i = -\sum_{m=1}^N |Y_{im} V_i V_m| \sin(\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (3.18)$$

สมการที่ (3.17) และ (3.18) จะจัดให้อยู่ในรูปแบบเชิงขั้ว (Polar forms) ของสมการเพาเวอร์โพลาร์ เมื่อกำหนดให้  $P_{Gi}$  คือค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปยังบัส  $i$  และ  $P_{Li}$  คือค่ากำลังไฟฟ้าที่เอกซาร์นี้เป็นเอกซาร์ที่ส่งจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกซาร์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการของโหลดที่บัส  $i$  ซึ่งจะได้สมการกำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนดคือ  $P_i^{SP} = P_{Gi} - P_{Li}$  และในทำนองเดียวกันจะได้สมการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่กำหนดคือ  $Q_i^{SP} = Q_{Gi} - Q_{Li}$  แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 (ก) กำลังไฟฟ้าจริง และ (ข) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ที่บัส  $i$  ในการศึกษาเพาเวอร์ฟลว์

จากรูปที่ 3.5 (ก) กำหนดให้ค่าของ  $P_i$  คือ  $P_{i,calc}$  และจากรูปที่ 3.5 (ข) กำหนดให้ค่าของ  $Q_i$  คือ  $Q_{i,calc}$  ซึ่งจะได้ค่ามิสแมตช์ (Mismatch) ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ คือ

$$\Delta P_i = P_i^{SP} - P_{i,calc} = (P_{Gi} - P_{Li}) - P_{i,calc} \quad (3.19)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{SP} - Q_{i,calc} = (Q_{Gi} - Q_{Li}) - Q_{i,calc} \quad (3.20)$$

สำหรับค่าของ  $P_{i,calc}$  และ  $Q_{i,calc}$  จากสมการที่ (3.19) และ (3.20) จะได้มาจากสมการที่ (3.17) และ (3.18) ซึ่งเมื่อค่าของ  $\Delta P_i$  และ  $\Delta Q_i$  ที่บัส  $i$  เท่ากับศูนย์หรือใกล้เคียงกับศูนย์มากที่สุด ก็จะได้คำตอบของการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์

### 3.6 สมการของการคำนวณเพาเวอร์ฟลว์ในระบบดีซี

การคำนวณการโพล์ของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบ HVDC [4] จะได้ค่ามิสแมตช์ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสคอนเวอร์เตอร์ คือ

$$\Delta P_{term} = P_{term}^{SP} - P_{term,ac} - P_d \quad (3.21)$$

$$\Delta Q_{term} = Q_{term}^{SP} - Q_{term,ac} - Q_d \quad (3.22)$$

เมื่อ

$P_{term}^{SP}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนดโดยมีค่าเท่ากับ  $P_{Gi,term} - P_{Li,term}$

$Q_{term}^{SP}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่กำหนดโดยมีค่าเท่ากับ  $Q_{Gi,term} - Q_{Li,term}$

$P_{term,ac}, Q_{term,ac}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสุทธิที่บัสคอนเวอร์เตอร์  $i$  ใดๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.17) และ (3.18)

$P_d, Q_d$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสคอนเวอร์เตอร์  $i$  ใดๆ ที่ไหลเข้าสู่ระบบ HVDC

โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าจริง  $P_d$  และค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ  $Q_d$  ที่บัสคอนเวอร์เตอร์ [4,16] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P_d &= V_d \cdot I_d \\
 &= V_{term} \cdot k \cdot k_I \cdot a \cdot I_d \cos \phi \\
 &= \frac{3a^2 V_{term}^2}{2\pi \cdot x_c} (\cos^2 \alpha - \cos^2 \delta)
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

และจะได้

$$\begin{aligned}
 Q_d &= P \cdot \tan \phi \\
 &= V_{term} \cdot k \cdot k_I \cdot a \cdot I_d \sin \phi \\
 &= \frac{3a^2 V_{term}^2}{2\pi \cdot x_c} (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \delta \cdot \cos \delta + \delta - \alpha)
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

### 3.6.1 สมการเรซิดวล

ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี สมการมismatch (Mismatch equations) ที่ใช้ในการคำนวณในส่วนที่เป็นพารามิเตอร์ของระบบดีซีจะเรียกว่าสมการเรซิดวล (Residual equations) [4] โดยจะต้องทำการกำหนดสมการเรซิดวลขึ้นมา ซึ่งจำนวนของสมการเรซิดวลจะพิจารณาตามความเหมาะสมของระบบ โดยมีรูปแบบดังนี้

$$R_1 = V_d - V_d(a, V_{term}, \cos \phi) \tag{3.25}$$

$$R_2 = V_d - V_d(a, V_{term}, \cos \alpha, I_d, x_c) \tag{3.26}$$

$$R_3 = f(V_d, I_d) \tag{3.27}$$

$$R_4 = \text{control equation} \tag{3.28}$$

$$R_5 = \text{control equation} \tag{3.29}$$

และจะได้รูปแบบสมการของพารามิเตอร์ในระบบดีซี คือ

$$\vec{x} = [V_d, I_d, a, \cos \alpha, \phi]^T \tag{3.30}$$

สำหรับสมการที่ (3.25) และ (3.26) คือสมการ mismatch ของแรงดันไฟตรง ( $V_d$ ), สมการที่ (3.27) คือสมการในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไหลผ่าน HVDC link จะมีเพียงสมการเดียว และสมการที่ (3.28) และ (3.29) คือสมการควบคุม (Control equations) การรู้ค่าคำตอบของการคำนวณ และสำหรับสมการที่ (3.30) คือสมการของตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆในระบบดีซี โดยสมการที่ (3.25), (3.26), (3.28), (3.29) และ (3.30) จะมีจำนวนของสมการหรือจำนวนตัวแปรตามจำนวนกลุ่มของคอนเวอร์เตอร์ (Group of rectifier and inverter) ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ

### 3.6.2 สมการที่ใช้ในการควบคุมการรู้เข้าหาคำตอบ

สมการที่ใช้ในการควบคุมการรู้เข้าหาคำตอบของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี [4] ในแต่ละโหมคการทำงานในระบบ HVDC เช่น มีการเชื่อมต่อผ่านระบบ HVDC ระหว่างบัสสองบัสซึ่งมีสองกลุ่มคอนเวอร์เตอร์จะมีสมการควบคุม 4 สมการ และสมการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมสามารถที่จะกำหนดมาจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการส่งถ่ายพลังงานนั่นเอง โดยแสดงตัวอย่างของกลุ่มพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

- |                                     |                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. กำหนดแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ | $a - a^{SP} = 0$                      |
| 2. กำหนดค่าของแรงดันไฟตรง           | $V_d - V_d^{SP} = 0$                  |
| 3. กำหนดค่าของกระแสไฟตรง            | $I_d - I_d^{SP} = 0$                  |
| 4. กำหนดมุมนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์  | $\cos \alpha - \cos \alpha_{min} = 0$ |
| 5. กำหนดค่าของพลังงานที่ส่งถ่าย     | $V_d I_d - P_d^{SP} = 0$              |

ซึ่งในการเลือกใช้สมการควบคุม จะทำการพิจารณาจากโหมดในการทำงานของระบบ HVDC

### 3.7 ชนิดของบัส

การคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบเอซี-ดีซี จะต้องทราบชนิดของบัส (Load flow bus specifications) ก่อนเพื่อจะได้ทราบว่าบัสแต่ละชนิดมีพารามิเตอร์ใดบ้าง โดยทั่วไปพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละบัส  $i$  ประกอบไปด้วยตัวแปร 4 ตัว คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ( $|V_i|$ ), มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า ( $\angle \delta_i$ ), กำลังไฟฟ้าจริง ( $P_{Gi}$ ) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ( $Q_{Gi}$ ) โดยทั่วไปค่าตัวแปรในแต่ละบัสจะทราบค่าอยู่ 2 ค่า ส่วนอีก 2 ค่าที่เหลือจะหาได้จากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ โดยบัสในระบบเอซี-ดีซีแบ่งเป็น 5 ชนิด คือ

1. สแลคบัส (Slack bus, Swing bus, Infinite bus or reference bus) เป็นบัสที่มีขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าคงที่ซึ่งกำหนดให้เป็นมุมศูนย์โดยใช้บัสนี้เป็นบัสอ้างอิงที่มุมของบัสอื่นๆในระบบจะมาเทียบกับบัสนี้ ในทางปฏิบัติสำหรับบัสที่จะถือเป็นบัสอ้างอิงนี้หมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่ออยู่หรือเป็นระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ ซึ่งจะใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยต่อค่าความสูญเสีย (System losses) ไม่ทราบค่าที่เกิดขึ้นในระบบพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่สำหรับบัสนี้ คือ  $|V_i|$  และ  $\angle \delta_i$  ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ คือ  $P_{Gi}$  และ  $Q_{Gi}$
2. เจนบัส (Generator bus or voltage-controlled bus) เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่หรือเป็นบัสที่มีซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ต่ออยู่ ซึ่งบัสนี้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่โดยอาศัย AVR (Automatic Voltage Regulator) บัสนี้มี 2 ประเภทคือ เรียกเจนบัสว่า PV บัส โดยมีค่า  $|V_i|$ ,  $P_{Gi}$  คงที่ (สำหรับบัสที่มีซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ต่ออยู่  $P_{Gi} = 0$ ) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ คือ  $Q_{Gi}$  และ  $\angle \delta_i$  และ เรียกเจนบัสว่า PQ บัส โดยมีค่า  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$  คงที่ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ คือ  $|V_i|$  และ  $\angle \delta_i$
3. โหลดบัส (Load bus) เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ซึ่งทราบค่า  $P_{Li}$  และ  $Q_{Li}$  หรือบางครั้งเรียกว่า PQ บัส ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการคำนวณเพาเวอร์โพล์ คือ  $|V_i|$  และ  $\angle \delta_i$

4. HVDC โหลดบัส (HVDC load bus) เป็นบัสที่มีคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC และโหลดต่ออยู่ซึ่งทราบค่า  $P_{Li,term}$  และ  $Q_{Li,term}$  หรือบางครั้งเรียกว่า  $PQ_{term}$  บัส ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ คือ  $|V_{i,term}|$ ,  $\angle\delta_{i,term}$ ,  $P_d$ ,  $Q_d$  และ  $\bar{x}$

5. HVDC เจนบัส (HVDC generator bus or voltage-controlled bus) เป็นบัสที่มีคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ต่ออยู่ บัสนี้มี 2 ประเภทคือ  $PV_{term}$  บัส โดยมีค่า  $P_{Gi,term}$ ,  $|V_{i,term}|$  คงที่ (สำหรับบัสที่มีซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ต่ออยู่  $P_{Gi,term} = 0$ ) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ คือ  $Q_{Gi,term}$ ,  $\angle\delta_{i,term}$ ,  $P_{DCi}$ ,  $Q_{DCi}$  และ  $\bar{x}$ , สำหรับ  $PQ_{term}$  บัส ที่มีค่า  $P_{Gi,term}$ ,  $Q_{Gi,term}$  คงที่ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ คือ  $|V_{i,term}|$ ,  $\angle\delta_{i,term}$ ,  $P_d$ ,  $Q_d$  และ  $\bar{x}$

สำหรับชนิดของบัสที่ 1-3 แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยที่ค่า  $P$  และ  $Q$  จากตารางที่ 3.4 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่โพลาร์เข้าสู่ระบบหรือค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิที่บัส  $i$  ใดๆ ของระบบ ซึ่งก็คือค่า  $P_i$  และ  $Q_i$  จากรูปที่ 3.5 และสำหรับชนิดของบัสที่ 4 และ 5 เป็นบัสที่กำหนดขึ้นมาใหม่ที่ใช้สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น

ตารางที่ 3.4 การกำหนดคุณสมบัติของบัสในการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ [17]

Bustype	$P$	$Q$	$ V $	$\delta$	Comments
Load	✓	✓			Usual load representation
Generator or Synchronous condenser	✓		✓ when $Q^- < Q_G < Q^+$		Generator or synchronous condenser ( $P = 0$ ) with var limits $Q^-$ = minimum var limit $Q^+$ = maximum var limit
	✓	✓ when $Q_G < Q^-$ or $Q_G > Q^+$			$ V $ is held as long as $Q_G$ is within limit
Swing			✓	✓	"Swing bus" must adjust net power to hold voltage constant (essential for solution)

NOTES: 1. Quantities checked are the bus boundary conditions  
2.  $[P, \delta]$ ,  $[Q, |V|]$  and  $[Q, \delta]$  combinations are generally not used

### 3.8 การคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในระบบเอซี-ดีซี

วิธีที่ใช้การคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในระบบเอซี-ดีซีได้มีการพัฒนามาเป็นเวลานาน ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันสองวิธี คือวิธีซีควนเชียล (Sequential method) [18] และวิธียูนิไฟด์ (Unified method) [19] โดยวิธีซีควนเชียล เป็นวิธีที่ง่ายและสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วแต่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่อนแอ (Weak AC system) ส่วนวิธียูนิไฟด์ เป็นวิธีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีแรก และมีความรวดเร็วในการแก้ปัญหาคำตอบ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีความเหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่อนแอ อีกทั้งยังสามารถที่จะพัฒนาวิธีนี้ในการคำนวณระบบไฟฟ้าที่มี HVDC links หลายๆ บัส (Multiterminal DC; MTDC) [3,6] ได้อีกด้วย แต่่ววิธียูนิไฟด์จะมีปัญหาในเรื่องของ ill-condition เนื่องจากว่าเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี Fast-Decoupled method และเมื่อนำไปพัฒนาการคำนวณการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสที่มีโหลดต่ออยู่ หรือระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสที่มีชิงโครนัสคอนเดนเซอร์ต่ออยู่ จะพบว่ามีปัญหาในเรื่องของการแก้ปัญหาคำตอบ จึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) [13,16] โดยทำการปรับปรุงสมการจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrix equation) และสมการเรซิดวลให้มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ระบบดังกล่าว ซึ่งจะได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการคำนวณในแต่ละวิธีให้เห็น และได้ตั้งชื่อวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ว่า “วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน : Unified-Newton-Raphson method” โดยจะได้นำเสนอคั้งต่อไปนี้

### 3.8.1 วิธีซีเควนเซียล

การคำนวณเพาเวอร์โพลว์ในระบบเอช-ดีซีโดยวิธีซีเควนเซียลได้รับการพัฒนามาจากวิธี Fast-Decoupled method โดยมีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกัน ซึ่งค่าของเมตริกซ์  $[B']$  และ  $[B'']$  มีค่าเหมือนกันกับวิธี Fast-Decoupled method เพียงแต่วิธีนี้จะเพิ่มสมการในส่วนของระบบดีซีขึ้นมา ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่จัดรูปแบบการคำนวณได้ง่ายกว่าวิธีอื่นๆ ดังแสดงสมการ คือ

$$[\Delta \bar{P} / \bar{V}] = [B'] [\Delta \theta] \quad (3.31)$$

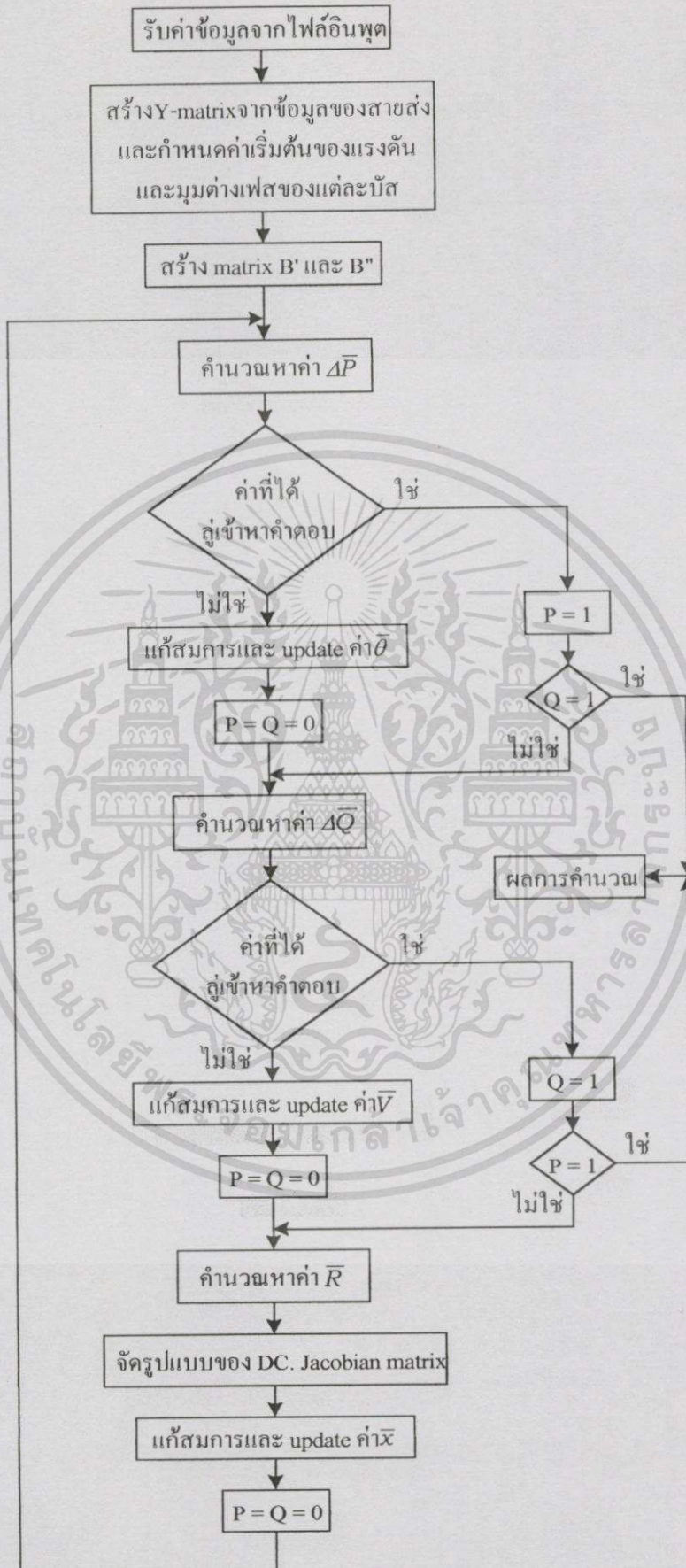
$$[\Delta \bar{Q} / \bar{V}] = [B''] [\Delta \bar{V}] \quad (3.32)$$

$$[\bar{R}] = [A] [\Delta \bar{x}] \quad (3.33)$$

ในการคำนวณตามลำดับในแต่ละรอบ (Iteration sequence) จะเรียงลำดับการคำนวณเป็น  $P, Q, DC$  ดังแสดงขั้นตอนการคำนวณในรูปที่ 3.6 ซึ่งอธิบายขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้

1. ทำการคำนวณ  $\Delta \bar{P} / \bar{V}$  โดยคำนวณตามสมการที่ (3.25) และปรับปรุงค่า  $\theta$
2. ทำการคำนวณ  $\Delta \bar{Q} / \bar{V}$  โดยคำนวณตามสมการที่ (3.26) และปรับปรุงค่า  $\bar{V}$
3. ทำการคำนวณสมการเรซิดวล ( $\bar{R}$ ) โดยคำนวณตามสมการที่ (3.27) และปรับปรุงค่า  $\bar{x}$
4. กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

จากขั้นตอนการคำนวณของวิธีซีเควนเซียลจะพบว่าในการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบ จะทำการตรวจสอบเฉพาะค่าของ  $\Delta \bar{P}$  และค่าของ  $\Delta \bar{Q}$  เท่านั้นในหนึ่งรอบของการคำนวณ



รูปที่ 3.6 แผนผังโปรแกรมการคำนวณโดยวิธีซีแควนเซียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.2 วิธียูนิไฟด์

การคำนวณเพาเวอร์โพลวในระบบเบซี-ดีซีโดยวิธียูนิไฟด์ได้รับการพัฒนามาจากวิธี Fast-Decoupled method เช่นเดียวกับวิธีเคเวนเจียล แต่ว่าวิธีนี้จะเพิ่มสมการในส่วนของระบบดีซีขึ้นมา โดยจะทำการคำนวณทั้งในส่วนของ  $P$  ซึ่งจะเรียกว่า PDC และทำการคำนวณในส่วนของ  $Q$  ซึ่ง จะเรียกว่า QDC โดยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีเคเวนเจียลเนื่องจากว่าได้ทำการเพิ่ม เมตริกซ์ย่อยในสมการจาโคเบียน (Jacobian submatrices) คือ

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta \bar{P} / \bar{V} \\ \hline \Delta P_{term} / V_{term} \\ \hline \bar{R} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline B' & \\ \hline & AA' \\ \hline & A \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \bar{\theta} \\ \hline \Delta \theta_{term} \\ \hline \Delta \bar{x} \\ \hline \end{array} \quad (3.34)$$

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta \bar{Q} / \bar{V} \\ \hline \Delta Q_{term} / V_{term} \\ \hline \bar{R} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline B'' & \\ \hline & B''_{ii} \quad AA'' \\ \hline & BB'' \quad A \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \bar{V} \\ \hline \Delta V_{term} \\ \hline \Delta \bar{x} \\ \hline \end{array} \quad (3.35)$$

สำหรับเมตริกซ์ย่อยในสมการจาโคเบียนเมตริกซ์จากสมการที่ (3.34) และ (3.35) ช่องว่างใน สมการมีสมาชิกเป็นศูนย์โดยที่เมตริกซ์  $[B']$  และ  $[B'']$  จะมีค่าคงที่เหมือนกับสมการจาโคเบียน เมตริกซ์ของวิธี Fast-Decoupled Power Flow และสำหรับเมตริกซ์ย่อยอื่นๆจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตาม วิธีการคำนวณแบบทำซ้ำ (Iteration method) ซึ่งสมาชิกของ AC-DC Jacobian matrices คือ

$$[A] = \partial \bar{R} / \partial \bar{x} \quad (3.36)$$

$$[AA'] = [\partial P_d / \partial \bar{x}] / V_{term} \quad (3.37)$$

$$[AA''] = [\partial Q_d / \partial \bar{x}] / V_{term} \quad (3.38)$$

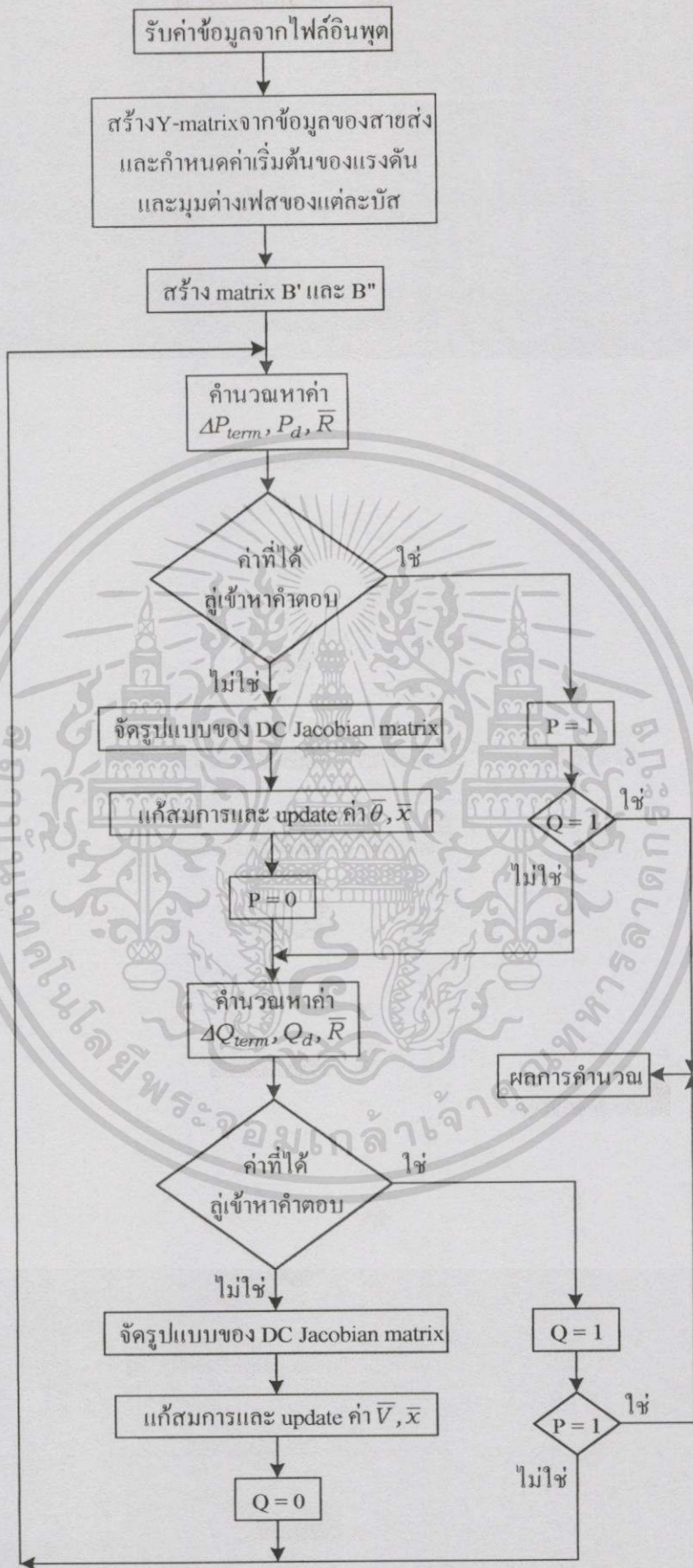
$$[BB''] = \partial \bar{R} / \partial V_{term} \quad (3.39)$$

$$[B''_{ii}] = [[\partial Q_{term} / \partial V_{term}] + (\partial Q_d / \partial V_{term})] / V_{term} \quad (3.40)$$

ขั้นตอนของการคำนวณแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งอธิบายขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้

1. ทำการคำนวณค่ามิสแมตซ์ ( $\Delta \bar{P} / \bar{V}$ ), ค่า  $P_d$  และ  $\bar{R}$  โดยคำนวณตามสมการที่ (3.34) และทำการอินเวอร์สเมตริกซ์เพื่อปรับปรุงค่า  $\bar{\theta}$  และ  $\bar{x}$
2. ทำการคำนวณค่ามิสแมตซ์ ( $\Delta \bar{Q} / \bar{V}$ ), ค่า  $Q_d$  และ  $\bar{R}$  โดยคำนวณตามสมการที่ (3.35) และทำการอินเวอร์สเมตริกซ์เพื่อปรับปรุงค่า  $\bar{V}$  และ  $\bar{x}$
3. กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

จากขั้นตอนการคำนวณของวิธียูนิไฟด์จะพบว่าในการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบจะทำการตรวจสอบค่าของ  $\Delta \bar{P}$  พร้อมกับ  $\bar{R}$  และค่าของ  $\Delta \bar{Q}$  พร้อมกับ  $\bar{R}$  ในหนึ่งรอบของการคำนวณ



รูปที่ 3.7 แผนผังโปรแกรมการคำนวณโดยวิธีนิวตันไฟฟ้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.3 วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

การคำนวณเพาเวอร์โพลว์ในระบบเอซี-ดีซีโดยวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน เป็นวิธีที่ผู้เขียนได้พัฒนาขึ้นมาจากวิธียูนิไฟด์ในหัวข้อที่ 3.8.2 ซึ่งวิธีนี้จะนำสมการที่ (3.34) และ (3.35) มารวมกันในรูปแบบการคำนวณของวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยจะทำการคำนวณพร้อมกันทั้งในส่วนของ  $P$ ,  $Q$  และ  $R$  ซึ่งจะทำให้วิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณที่มีความน่าเชื่อถือและมีจำนวนรอบในการคำนวณน้อย

$$\begin{array}{c} \Delta \bar{P} \\ \Delta P_{term} \\ \Delta \bar{Q} \\ \Delta Q_{term} \\ \bar{R} \end{array} = \begin{array}{c} H \quad N \\ J \quad L \\ B \quad A \end{array} \begin{array}{c} A' \\ A'' \\ A \end{array} \begin{array}{c} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \theta_{term} \\ \Delta \bar{V} / \bar{V} \\ \Delta V_{term} / V_{term} \\ \Delta \bar{x} \end{array} \tag{3.41}$$

จากสมการที่ (3.41) เรียกสมการนี้ว่าสมการ AC-DC Power Flow ซึ่งช่องว่างใน AC-DC Jacobian matrix มีสมาชิกเป็นศูนย์ โดยที่เมตริกซ์  $[H]$ ,  $[N]$ ,  $[J]$  และ  $[L]$  จะมีค่าเหมือนกับสมการ Jacobian matrix ของวิธี Newton-Raphson Power Flow ถ้าห้บเมตริกซ์ย่อยอื่นๆจะมีสมาชิก คือ

$$[A] = \partial \bar{R} / \partial \bar{x} \tag{3.42}$$

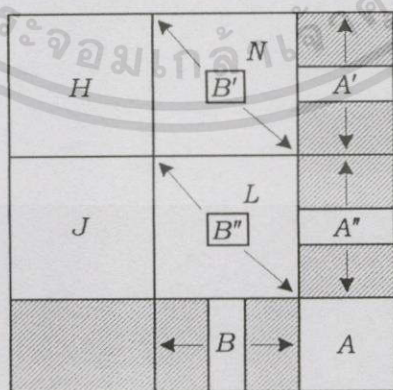
$$[A'] = \partial P_d / \partial \bar{x} \tag{3.43}$$

$$[A''] = \partial Q_d / \partial \bar{x} \tag{3.44}$$

$$[B] = V_{term} \partial \bar{R} / \partial V_{term} \tag{3.45}$$

$$[B'] = [V_{term} \partial P_{term} / \partial V_{term}] + [V_{term} \partial P_d / \partial V_{term}] \tag{3.46}$$

$$[B''] = [V_{term} \partial Q_{term} / \partial V_{term}] + [V_{term} \partial Q_d / \partial V_{term}] \tag{3.47}$$



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเมตริกซ์ย่อย  $[A']$ ,  $[A'']$ ,  $[B]$ ,  $[B']$  และ  $[B'']$

และจากสมการที่ (3.41) เมื่อพิจารณาเฉพาะ AC-DC Jacobian matrix จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเมตริกซ์ย่อย  $[A']$ ,  $[A'']$ ,  $[B]$ ,  $[B']$  และ  $[B'']$  ตามตำแหน่งของ  $\Delta P_{term}$  และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta Q_{term}$  สำหรับเมตริกซ์ย่อย  $[A']$  และ  $[A'']$  จะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง, เมตริกซ์ย่อย  $[B]$  จะเคลื่อนที่ในแนวนอน และเมตริกซ์ย่อย  $[B']$  กับ  $[B'']$  จะเคลื่อนที่ในแนวทแยง ดังแสดงในรูปที่ 3.8

สำหรับเมตริกซ์ย่อย  $[A']$  สามารถแบ่งออกได้เป็นเมตริกซ์  $[A'_r]$  และ  $[A'_i]$ , เมตริกซ์ย่อย  $[A'']$  สามารถแบ่งออกได้เป็นเมตริกซ์  $[A''_r]$  และ  $[A''_i]$ , เมตริกซ์ย่อย  $[B]$  สามารถแบ่งออกได้เป็นเมตริกซ์  $[B_r]$  และ  $[B_i]$ , เมตริกซ์ย่อย  $[B']$  สามารถแบ่งออกได้เป็นเมตริกซ์  $[B'_r]$  และ  $[B'_i]$  และ เมตริกซ์ย่อย  $[B'']$  สามารถแบ่งออกได้เป็นเมตริกซ์  $[B''_r]$  และ  $[B''_i]$  สำหรับตัวห้อย  $r$  และ  $i$  คือ พารามิเตอร์ของเครื่องเรียงกระแส (Rectifier) และ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ตามลำดับ

จากสมการที่ (3.41) และรูปที่ 3.8 สามารถแสดงให้เห็นถึงการจัดตำแหน่งของเมตริกซ์ย่อยต่างๆ ในสมการ AC-DC Power Flow เมื่อกำหนดให้บัสคอนเวอร์เตอร์อยู่ที่บัสที่สองและบัสสุดท้ายของระบบที่ทำการวิเคราะห์ (กำหนดให้บัสที่หนึ่งเป็นสแลคบัส) ดังแสดงในสมการที่ (3.48) คือ

$\Delta P_{termr}$		$B'_r$		$A'_r$	$\Delta \theta_{termr}$
$\Delta \bar{P}$	$H$		$N$		$\Delta \bar{\theta}$
$\Delta P_{termi}$				$B'_i$ $A'_i$	$\Delta \theta_{termi}$
$\Delta Q_{termr}$		$B''_r$		$A''_r$	$\Delta V_{termr} / V_{termr}$
$\Delta \bar{Q}$	$J$		$L$		$\Delta \bar{V} / \bar{V}$
$\Delta Q_{termi}$				$B''_i$ $A''_i$	$\Delta V_{termi} / V_{termi}$
$\bar{R}$		$B_r$	$B_i$	$A$	$\Delta \bar{x}$

(3.48)

จากสมการที่ (3.25) - (3.29) จะทำการกำหนดสมการเรขาคณิต  $\bar{R}$  เพื่อใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ในระบบเอช-ดีซีโดยวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ดังต่อไปนี้

$$R_1 = V_{dr} - \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} a_r V_{termr} (\cos \alpha_r + \cos \delta_r) \tag{3.49}$$

$$R_2 = V_{di} - \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} a_i V_{termi} (\cos \alpha_i + \cos \delta_i) \tag{3.50}$$

$$R_3 = V_{dr} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r V_{termr} \cos \alpha_r + \frac{3}{\pi} I_d x_{cr} \tag{3.51}$$

$$R_4 = V_{di} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i V_{termi} \cos \alpha_i + \frac{3}{\pi} I_d x_{ci} \tag{3.52}$$

$$R_5 = V_{dr} + V_{di} - I_d R_d \tag{3.53}$$

$$R_6 = \cos \alpha_r - \cos \alpha_r^{sp} \tag{3.54}$$

$$R_7 = V_{dr} I_d - P_{dr}^{sp} \tag{3.55}$$

$$R_8 = \cos \delta_i - \cos \delta_i^{sp} \tag{3.56}$$

$$R_9 = V_{di} - V_{di}^{sp} \tag{3.57}$$

โดยที่  $\bar{R} = [R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9]^T$  (3.58)

และจากสมการที่ (3.30) กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$\bar{x} = [V_{dr}, V_{di}, I_d, a_r, a_i, \cos \alpha_r, \cos \delta_r, \cos \alpha_i, \cos \delta_i]^T \quad (3.59)$$

จากสมการที่ (3.48) เมตริกซ์  $[A]$  ถูกเรียกว่า D.C. Jacobian matrix ซึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของสมการเรขาคณิตจากสมการที่ (3.49)-(3.57) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของพารามิเตอร์ที่อยู่ในสมการที่ (3.59) คือ

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_1 & 0 & C_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & B_1 & 0 & 0 & D_1 & D_1 \\ 1 & 0 & k_3 x_{cr} & A_2 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & k_3 x_{ci} & 0 & B_2 & 0 & 0 & D_2 & 0 \\ 1 & 1 & -R_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ I_d & 0 & V_{dr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสมการที่ (3.60) คือ

$$A_1 = -k_2 V_{termr} (\cos \alpha_r + \cos \delta_r) \quad (3.61)$$

$$A_2 = -k_1 V_{termr} \cos \alpha_r \quad (3.62)$$

$$B_1 = -k_2 V_{termi} (\cos \alpha_i + \cos \delta_i) \quad (3.63)$$

$$B_2 = -k_1 V_{termi} \cos \alpha_i \quad (3.64)$$

$$C_1 = -k_2 a_r V_{termr} \quad (3.65)$$

$$C_2 = -k_1 a_r V_{termr} \quad (3.66)$$

$$D_1 = -k_2 a_i V_{termi} \quad (3.67)$$

$$D_2 = -k_1 a_i V_{termi} \quad (3.68)$$

เมื่อกำหนดให้  $k_2 = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi}$  และ  $k_3 = \frac{3}{\pi}$

จะได้เมตริกซ์  $[A']$  และ  $[A'']$  ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของสมการเรขาคณิตจากสมการที่ (3.23) และสมการที่ (3.24) ตามลำดับ เทียบกับการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของพารามิเตอร์ที่อยู่ในสมการที่ (3.59) คือ

$$[A'] = \begin{bmatrix} A'_r \\ A'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2P_{dr}/a_r & 0 & A_3 & A_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2P_{di}/a_i & 0 & 0 & A_5 & A_6 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

$$[A''] = \begin{bmatrix} A''_r \\ A''_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2Q_{dr}/a_r & 0 & B_3 & B_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2Q_{di}/a_i & 0 & 0 & B_5 & B_6 \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

โดยที่

$$A_3 = \frac{k_3 a_r^2 V_{termr}^2}{x_{cr}} \cos \alpha_r \quad (3.71)$$

$$A_4 = \frac{-k_3 a_r^2 V_{termr}^2}{x_{cr}} \cos \delta_r \quad (3.72)$$

$$A_5 = \frac{k_3 a_i^2 V_{termi}^2}{x_{ci}} \cos \alpha_i \quad (3.73)$$

$$A_6 = \frac{-k_3 a_i^2 V_{termi}^2}{x_{ci}} \cos \delta_i \quad (3.74)$$

$$B_3 = \frac{k_3 a_r^2 V_{termr}^2}{2x_{cr}} \sin \alpha_r \quad (3.75)$$

$$B_4 = \frac{-k_3 a_r^2 V_{termr}^2}{2x_{cr}} \sin \delta_r \quad (3.76)$$

$$B_5 = \frac{k_3 a_i^2 V_{termi}^2}{2x_{ci}} \sin \alpha_i \quad (3.77)$$

$$B_6 = \frac{-k_3 a_i^2 V_{termi}^2}{2x_{ci}} \sin \delta_i \quad (3.78)$$

จะได้เมตริกซ์  $[B]$  ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของสมการเรขาคณิตจากสมการที่ (3.49)-(3.57) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของแรงดัน  $V_{term}$  คือ

$$[B] = [B_r \quad B_i] = \begin{bmatrix} a_r A_1 & 0 \\ 0 & a_i B_1 \\ a_r A_2 & 0 \\ 0 & a_i B_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

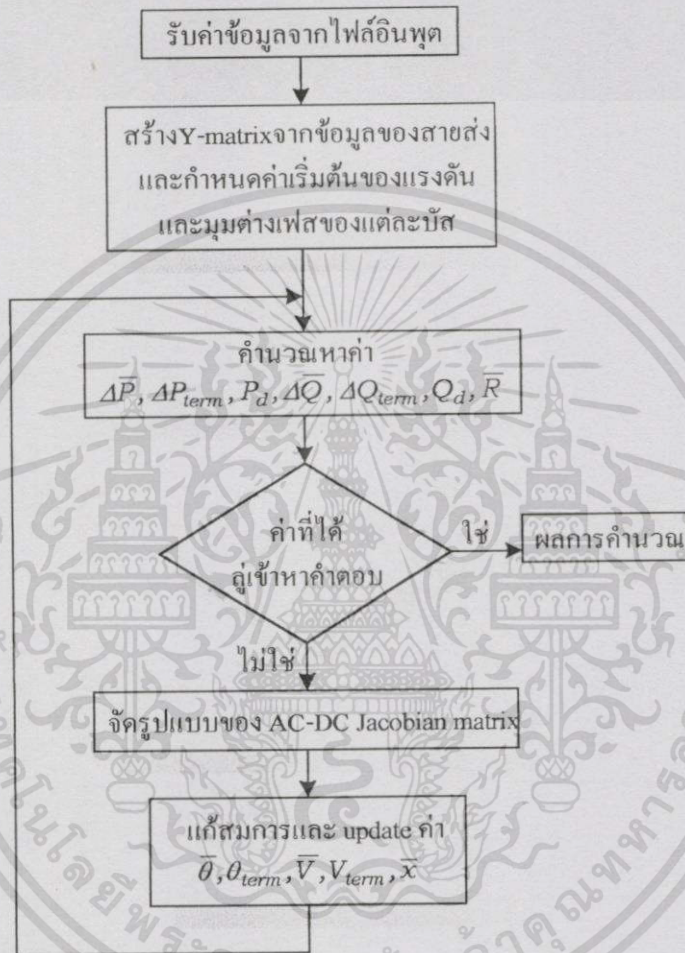
และจะได้เมตริกซ์  $[B']$  และ  $[B'']$  ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของสมการเรขาคณิตจากสมการที่ (3.23) และสมการที่ (3.24) ตามลำดับ เทียบกับการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของ  $V_{term}$  คือ

$$[B'] = \begin{bmatrix} B'_r & 0 \\ 0 & B'_i \end{bmatrix} = \frac{V_{term}}{\partial V_{term}} \partial \begin{bmatrix} P_{termr} & 0 \\ 0 & P_{termi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2P_{dr} & 0 \\ 0 & 2P_{di} \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[B''] = \begin{bmatrix} B_r' & 0 \\ 0 & B_i' \end{bmatrix} = \frac{V_{term}}{\partial V_{term}} \partial \begin{bmatrix} Q_{termr} & 0 \\ 0 & Q_{termi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2Q_{dr} & 0 \\ 0 & 2Q_{di} \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

จากสมการที่ (3.60) – (3.81) จะนำไปแทนใน AC-DC Jacobian matrix ของสมการ AC-DC Power Flow โดยวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนผังโปรแกรมการคำนวณโดยวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

จากรูปที่ 3.9 สามารถอธิบายขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้

1. ทำการคำนวณค่ามิตเมตซ์  $\Delta \bar{P}$ ,  $\Delta P_{term}$ ,  $\Delta \bar{Q}$ ,  $\Delta Q_{term}$  ค่า  $P_d$ ,  $Q_d$  และ  $\bar{R}$  โดยคำนวณตามสมการที่ (3.48)
  2. ทำการอินเวอร์สเมตริกซ์เพื่อปรับปรุงค่า  $\bar{V}$ ,  $\bar{\theta}$  และ  $\bar{x}$  แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 1
- จากขั้นตอนการคำนวณของวิธีนี้จะพบว่า ในการตรวจสอบการคู่เข้าของคำตอบจะทำการตรวจสอบทั้งค่าของ  $\Delta \bar{P}$ ,  $\Delta \bar{Q}$  และค่าของ  $\bar{R}$  พร้อมกันในหนึ่งรอบของการคำนวณ

### 3.9 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการแปลงค่าต่อหน่วยของระบบเอช-ดีซี, แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ, แบบจำลองของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, สมการของการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในระบบเอช-ดีซี, ชนิดของบัส, การคำนวณเพาเวอร์โพลาร์ในระบบเอช-ดีซีโดยใช้วิธีซีแควนเชียล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน และการทดสอบโปรแกรม เพื่อนำมาพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์ AC-DC Power Flow ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AC-DC Power Flow จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมต่างๆของระบบเมื่อไม่มีและมีการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC โดยสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการผลิตและการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก, การวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดัน และการทำออปติมัลเพาเวอร์โพลาร์ในระบบเอช-ดีซีได้ต่อไป



## ทฤษฎีและการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี

### 4.1 บทนำ

การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง มีความสำคัญมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าติดตั้งอยู่ในระบบ เช่น Thyristor controlled series capacitor (TCSC), Static synchronous compensator (STATCOM), Unified power flow controller (UPFC), Flexible AC Transmission Systems (FACTS) และ High Voltage Direct Current (HVDC) อุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนป้องกันหรือทำการลดทอนระดับของฮาร์มอนิกให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความเหมาะสมต่อระบบโดยรวม และเนื่องจากว่าในปัจจุบันนี้ระบบไฟฟ้ากำลังของแต่ละประเทศได้มีการเชื่อมต่อระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างสถานีควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีระยะทางห่างกันมากๆ หรือทำการเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความแตกต่างกันในด้านของความถี่ใช้งาน หรือแตกต่างกันในด้านของสภาวะการทำงานของระบบ แต่จะพบว่าคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC เหล่านี้มันเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบ ซึ่งไม่สามารถที่จะทำนายได้ว่าสถานีควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทุกๆ สถานีในระบบจะมีปริมาณของฮาร์มอนิกแพร่กระจายอยู่มากน้อยเพียงใด แม้ว่าจะทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกแล้วก็ตาม ดังนั้นในการที่จะลดปริมาณของฮาร์มอนิกในระบบลง จะต้องทำการวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่และทำการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก ซึ่งเมื่อทราบปริมาณและทิศทาง การไหลของฮาร์มอนิกในระบบก็สามารถวางแผนหาวิธีป้องกันปัญหาจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้

### 4.2 ทฤษฎีของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Harmonic) [20] เกิดจากอุปกรณ์ที่ไม่เชิงเส้น (Non-linear devices) ทั้งชนิดหนึ่งเฟสและชนิดสามเฟสที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันและ/หรือกระแสฮาร์มอนิก ทำให้เกิดการไหลของฮาร์มอนิก (Harmonic Power Flow) จากแหล่งกำเนิดเหล่านี้เข้าไปรบกวนในระบบจนทำให้เกิดความเพี้ยน (Distortion) ของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ซึ่งผลที่ตามมาคือจะทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเกิดความเพี้ยน โดยในการพิจารณาถึงปริมาณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบ จะต้องทำการพิจารณาทั้งขนาดและมุมเฟสของสัญญาณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับที่เกิดขึ้น

#### 4.2.1 ลักษณะของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบของสัญญาณต่างๆที่มีความถี่แตกต่างกันไปจากความถี่หลักมูล (Fundamental frequency) โดยสามารถแบ่งฮาร์มอนิกออกเป็นลักษณะต่างๆ คือ

1. Harmonic  $f = h \cdot f_1$  เมื่อ  $h$  คือค่าของจำนวนเต็ม integer  $> 0$
2. Interharmonic  $f \neq h \cdot f_1$  เมื่อ  $h$  คือค่าของจำนวนเต็ม integer  $> 0$
3. Sub-harmonic  $f > 0 \text{ Hz}$  และ  $f < f_1$

เมื่อ  $f_1$  คือความถี่หลักมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง (50 Hz หรือ 60 Hz)

#### 4.2.2 ปริมาณทางไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นไซน์ซออยด์

จากรูปแบบของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) สำหรับฟังก์ชันที่เป็นสัญญาณรายคาบ (Periodic function) คือ

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\} \quad (4.1)$$

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\omega_0 = 2\pi/T$ ,  $c_0 = a_0/2$ ,  $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$  และ  $\phi_h = \tan^{-1}(a_h/b_h)$

ในการพิจารณาถึงปริมาณของฮาร์มอนิกในสถานะอยู่ตัว (Steady state) จะได้ค่าชั่วขณะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นไซน์ซออยด์ (Nonsinusoidal situations) [11] โดยมีรูปแบบ คือ

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (4.3)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) เพื่อความสะดวกจะไม่พิจารณาเทอมในส่วนที่เป็นคี่ซี,  $V_h$  และ  $I_h$  เป็นค่า RMS ของฮาร์มอนิกอันดับที่  $h^{\text{th}}$  ของแรงดันและกระแสตามลำดับ และจะได้สมการที่แสดงเป็นค่า RMS ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวม คือ

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (4.5)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (4.6)$$

สำหรับในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะมีค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงระดับปริมาณของฮาร์มอนิกที่พิจารณา ซึ่งเรียกว่า ค่าดัชนีฮาร์มอนิก (Harmonic indices) โดยประกอบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion; Distortion Factor) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกทั้งหมดของกระแสและแรงดัน

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \% \quad (4.8)$$

ดรชชนี้ใช้ในการวัดรูปคลื่นที่เป็นคาบ (Periodic waveform) ที่ประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกส์ทำให้รูปคลื่นเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ (Perfect sine wave) และสำหรับรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ที่ความถี่หลักมูล ค่า  $THD$  มีค่าเท่ากับศูนย์

2. ค่าความเพี้ยนเชิงความต้องการทั้งหมด (Total Demand Distortion) ซึ่งก็คือค่าความเพี้ยนเชิงความต้องการทั้งหมดของกระแส

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2}}{I_L} \cdot 100 \% \quad (4.9)$$

เมื่อ  $I_L$  คือค่ากระแสสูงสุดที่ความต้องการของโหลด (ในช่วงเวลาความต้องการในทุกๆ 15 หรือ 30 นาที) ที่ความถี่หลักมูลที่จุดต่อร่วม (Point of common coupling; PCC) ซึ่งจะมีข้อแนะนำอยู่ในมาตรฐาน [9]

3. ค่าตัวประกอบค่ายอด (Crest factor) คือดรชชนี้ที่บ่งบอกถึงลักษณะค่ายอด (Peak) ต่อค่าประสิทธิผล (RMS) ของสัญญาณแรงดันหรือกระแส

$$\text{crest factor} = \frac{\text{peak value}}{\text{effective value}} \quad (4.10)$$

ยกตัวอย่าง ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีฮาร์โมนิก (Fundamental voltage) ค่าตัวประกอบค่ายอดจะมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{2}$  หรือเท่ากับ 1.4142 ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบค่ายอดน้อยกว่า 1.4142 จะบ่งบอกได้ว่าค่ายอดรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบปลายแบน (Flat-topped) และในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบค่ายอดมากกว่า 1.4142 จะบ่งบอกได้ว่าค่ายอดรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบปลายแหลม (Pointy)

### 4.2.3 สมการของกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาถึงค่าของกำลังไฟฟ้าในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง [11] ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ  $S$  คือ

$$S = \sqrt{\left(\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2\right)\left(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2\right)} = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (4.11)$$

ค่าของกำลังไฟฟ้าจริง  $P$  ช่วงขณะ คือ

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (4.12)$$

และค่าของกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยในคาบเวลา  $T$  ของค่า  $p(t)$  คือ

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (4.13)$$

เมื่อแทนสมการที่ (4.3) และ (4.4) ในสมการที่ (4.12) จะได้ค่าของกำลังไฟฟ้าจริง  $P$  คือ

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\delta_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (4.14)$$

สำหรับค่าของกำลังไฟฟ้าเสมือน  $Q$  โดยคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกส์ คือ

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\delta_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.11), (4.14) และ (4.15) จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นไซนูซอยด์ คือ

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4.16)$$

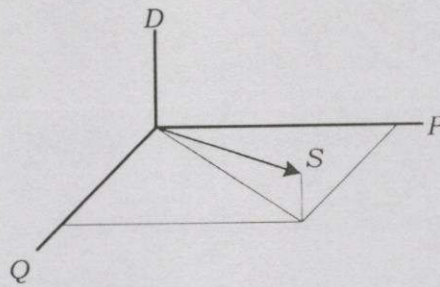
จากสมการที่ (4.16) ค่า  $D$  คือผลคูณของแรงดันและกระแสในแต่ละส่วนของความถี่ที่แตกต่างกันในสมการที่ (4.3) และ (4.4) ซึ่งจะได้ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในเทอมของความเพี้ยนโวลท์แอมแปร์ (Distortion volt-amperes) คือ

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (4.17)$$

ความสัมพันธ์ของค่า  $S$ ,  $P$ ,  $Q$  และ  $D$  ในรูปของเวกเตอร์สามมิติแสดงในรูปที่ 4.1 โดยที่ค่าของ  $P$  และ  $Q$  เป็นองค์ประกอบของค่า  $S$  ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกส์ และ  $D$  เป็นองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นมาของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์ [11,21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้า

#### 4.2.4 สมการของค่าตัวประกอบกำลัง

แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear loads) นอกจากจะทำให้เกิดความเพี้ยนของกำลังไฟฟ้าและก่อให้เกิดกำลังสูญเสีย (Power losses) ขึ้นในระบบแล้วยังทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน [11,22] ซึ่งจากเดิมค่าตัวประกอบกำลังจริง (True power factor;  $pf_{true}$ ) ในสถานะไซน์ซออยด์ (Sinusoidal situations) จะได้จาก

$$pf_{true} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \quad (4.18)$$

$$pf_{true} = pf_{disp} = \frac{P_I}{\sqrt{P_I^2 + Q_I^2}} = \cos(\delta_I - \theta_I) \quad (4.19)$$

เมื่อ  $pf_{disp}$  คือค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด (Displacement power factor) และ  $(\delta_I - \theta_I)$  คือค่ามุมตัวประกอบกำลัง (Power factor angle) ดังนั้นในสถานะไซน์ซออยด์จะมีค่าตัวประกอบกำลังเพียงค่าเดียวเพราะว่าค่าตัวประกอบกำลังจริงมีค่าเท่ากับค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด และเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลัง ในสถานะที่ไม่เป็นไซน์ซออยด์ ถ้าแทนสมการที่ (4.5) เข้าไปในสมการที่ (4.7) และแทนสมการที่ (4.6) เข้าไปในสมการที่ (4.8) จะได้

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \quad (4.20)$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2} \quad (4.21)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (4.20) และ (4.21) เข้าไปในสมการที่ (4.18) จะได้ค่าตัวประกอบกำลังจริงทั้งในสถานะไซน์ซออยด์และในสถานะที่ไม่เป็นไซน์ซออยด์ คือ

$$pf_{true} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ (4.22) จะประกอบไปด้วยสองส่วน คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$pf_{true} = \frac{P}{V_1 I_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (4.23)$$

และเมื่อกำหนดให้

1. ค่า  $P$  ในส่วนที่เป็นฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่าค่า  $P_1$  จะได้  $P \approx P_1$
  2.  $THD_V$  มีค่าน้อยกว่า 10 % จากสมการที่ (4.20) จะได้  $V_{rms} \approx V_1$
- เพราะฉะนั้นสมการที่ (4.23) มีค่าตัวประกอบกำลังจริงประมาณ ได้ดังนี้

$$pf_{true} \approx \frac{P_1}{V_1 I_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (4.24)$$

$$= pf_{disp} \cdot pf_{dist}$$

เมื่อ  $pf_{dist}$  คือค่าตัวประกอบกำลังเชิงความเพี้ยน (Distortion power factor) และเนื่องจากว่าค่า  $pf_{dist}$  มีค่าไม่เกินหนึ่ง จากสมการที่ (4.24) แสดงค่าตัวประกอบกำลังจริงในสถานะที่ไม่เป็นไซนูซอยด์ ดังนั้นจะได้

$$pf_{true} \leq pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (4.25)$$

#### 4.3 แบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ใช้สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage networks) ของ CIGRE Working Group 36-05 [23], ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกระหว่างระบบเอชของ BPA กับสถานีไฟฟ้าย่อย Celilo HVDC Substation [24], ใช้ในการศึกษาการแพร่กระจายของฮาร์มอนิกจากระบบ HVDC เข้าสู่ระบบเอชของประเทศนิวซีแลนด์ [25], CIGRE Joint Task Force 36.05.02/14.03.03 นำเสนอแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง [26] ต่อมาทาง CIGRE Working Group CC02 (CIGRE 36.05/CIGRE 2) ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆขึ้นมาใหม่ [27] และในปัจจุบันทางสมาคม IEEE Power Engineering Society Harmonics Working Group [11] ได้นำเสนอแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า (Distribution System) โดยมีพื้นฐานมาจากทางสมาคม CIGRE และงานวิจัยของนักวิจัยหลายๆท่าน

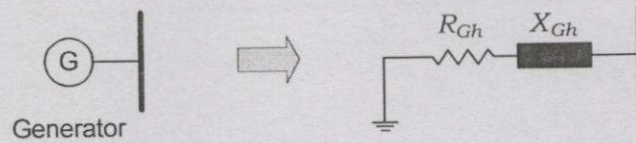
สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้แบบจำลองของ CIGRE WG CC02 (CIGRE 36.05/CIGRE 2) สำหรับอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, สายส่งไฟฟ้า, โหลด และ คาปาซิเตอร์ และสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้แบบจำลองของ CIGRE JTF 36.05.02/14.03.03 โดยที่กำหนดให้ระบบอยู่ในภาวะสมดุล ดังนั้นจึงคิดค่าต่างๆเป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สำหรับแบบจำลองฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) จะประกอบไปด้วยตัวต้านทาน  $R$  ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ที่ความถี่ฮาร์โมนิก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะพิจารณาอยู่ในรูปของ Subtransient reactance  $X_d''$  และตัวต้านทานต่ออนุกรมกัน จะได้สมการดังนี้

$$R_I = 0.1 X_d'' \quad (4.26)$$

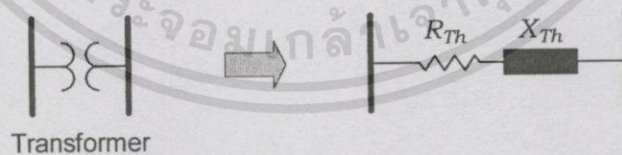
$$X_{Gh} = h X_d'' \quad (4.27)$$

และคำนึงถึงค่า Skin effect จะได้สมการเป็น

$$R_{Gh} = \sqrt{h} R_I \quad (4.28)$$

### 4.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับแบบจำลองฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) จะประกอบไปด้วยตัวต้านทาน  $R$  ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลองฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

จะได้สมการดังนี้

$$R_{Th} = R_t (a_0 + a_1 h^b + a_2 h^2) \quad (4.29)$$

$$X_{Th} = h X_t \quad (4.30)$$

เมื่อ  $R_t$  คือ Transformer's short-circuit resistance

$X_t$  คือ Transformer's short-circuit reactance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

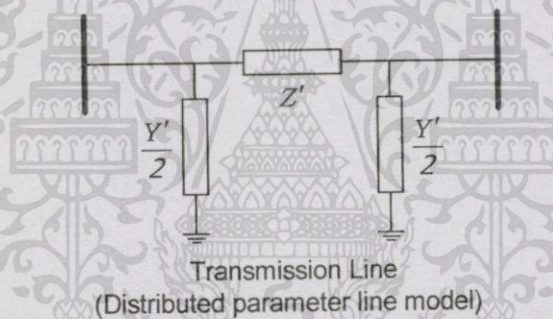
ค่าคงที่ในสมการที่ (4.29) และ (4.30) แสดงในตารางที่ 4.1 โดยที่  $(a_0 + a_1 + a_2) = 1.00$

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของแฟกเตอร์ในสมการที่ (4.29) และ (4.30)

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

### 4.3.3 สายส่งไฟฟ้า

สำหรับแบบจำลองฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า (Line or cable) จะใช้รูปแบบของสายส่งไฟฟ้าระยะไกลที่อยู่ในรูปวงจรมูลแบบ  $\pi$  ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แบบจำลองฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า

โดยที่  $Z = R_h + jh X_1$  (4.31)

$$Y = jh\omega C \quad (4.32)$$

$$Z' = \frac{Z \sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \quad (4.33)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y \tanh \frac{\sqrt{YZ}}{2}}{\sqrt{YZ}} \quad (4.34)$$

คำนึงถึง Skin effect, ความยาวของสาย  $l$  (km) ได้จาก  $X_1 \approx 0.4 \Omega / km$  สำหรับสายที่เป็น overhead line หรือ จาก  $X_1 \approx 0.1 \Omega / km$  สำหรับสายที่เป็น cable line และจะได้ค่าความต้านทานของสายส่งไฟฟ้าคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{dc} = \frac{R_1 - 0.004398 \ell}{0.938} \quad (4.35)$$

$$x = 0.3545 \cdot \sqrt{\frac{h}{R_{dc} / \ell}} \quad (4.36)$$

สำหรับ  $x \leq 2.4$  :  $R_h = R_{dc}(0.035x^2 + 0.938)$  (4.37)

สำหรับ  $x > 2.4$  :  $R_h = R_{dc}(0.35x + 0.3)$  (4.38)

เมื่อ  $R$  คือ ค่าความต้านทานของสายส่งไฟฟ้า

$X$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งไฟฟ้า

$C$  คือ ค่าเก็บประจุของสายส่งไฟฟ้า

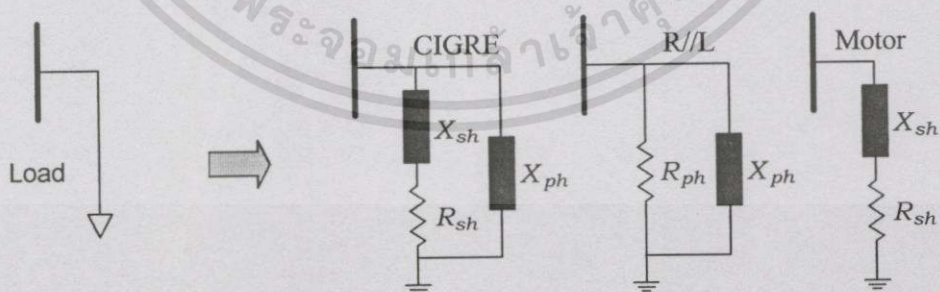
สำหรับแบบจำลองของสายส่งไฟฟ้าในระบบจำหน่าย (Distribution Lines and Cable) จะใช้ตามแบบจำลองของ [11] โดยมีสมการดังนี้

สำหรับ overhead line :  $R_h = R \left( 1 + \frac{0.646h^2}{192 + 0.518h^2} \right)$  (4.39)

สำหรับ cable line :  $R_h = R (0.187 + 0.532\sqrt{h})$  (4.40)

#### 4.3.4 โหลด

สำหรับแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของโหลด (Load) ซึ่งรูปแบบจำลองของโหลดจะแบ่งออกเป็นหลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และมีรายละเอียดของการพิจารณาดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 แบบจำลองฮาร์มอนิกของโหลด

- เมื่อโหลดประกอบด้วยส่วนที่เป็นค่าความต้านทาน (Resistive part) และส่วนที่เคลื่อนไหว (Motive part) โดยเกิดฮาร์มอนิกส์ที่อยู่ระหว่างฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ถึง 20 ในระบบจะใช้วงจร CIGRE โดยสมการที่ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sh} = \frac{V^2}{P_I} \quad (4.41)$$

$$X_{sh} = 0.073 h R_{sh} \quad (4.42)$$

$$X_{ph} = \frac{h R_{sh}}{6.7 \tan \varphi_1 - 0.74} \quad (4.43)$$

เมื่อ  $V$  คือ แรงดันปกติของระบบ

$P_I$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟต่ำสุดของโหลด (ที่ความถี่หลักมูล) ภายใต้แรงดัน  $V$  ปกติของระบบ

$Q_I$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลด (ที่ความถี่หลักมูล) ภายใต้แรงดัน  $V$  ปกติของระบบ โดยที่  $\tan \varphi_1 = Q_I / P_I$

2. เมื่อโหลดประกอบด้วยส่วนที่เป็นค่าความต้านทานและส่วนที่เคลื่อนไหว โดยเกิดฮาร์มอนิกส์ น้อยกว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และมากกว่าฮาร์มอนิก ลำดับที่ 20 ในระบบจะใช้วงจร R/L โดยสมการที่ได้คือ

$$R_{ph} = \frac{V^2}{P_I} \quad (4.44)$$

$$X_{ph} = h \frac{V^2}{Q_I} \quad (4.45)$$

3. เมื่อเป็น โหลดมอเตอร์

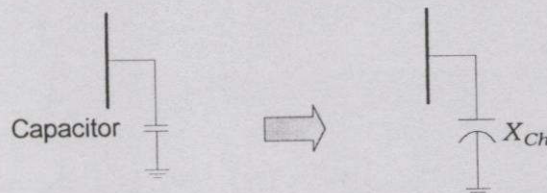
$$X_I = \frac{V^2}{S_{start}} \quad (4.46)$$

$$R_I = X_I / 3 \quad (\text{เมื่อใช้กับ } \cos \phi_{start} = 0.32) \quad (4.47)$$

โดยที่  $R = \sqrt{h} R_I$  (คำนึงถึง Skin effect เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

#### 4.3.5 คาปาซิเตอร์

วงจรสมมูลของคาปาซิเตอร์ (Capacitor) สามารถแทนได้ด้วยค่าคาปาซิตีฟรีแอกแตนซ์ โดยไม่คิดค่าความต้านทาน แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้

$$X_{Ch} = \frac{1}{j\omega C} \quad (4.48)$$

#### 4.3.6 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซีกำหนดให้พิจารณาเฉพาะคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC เท่านั้น ซึ่งจะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic current source) ในระบบโดยที่ไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ นั่นคือคิดเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในอุดมคติ และกำเนิดเฉพาะฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic harmonic) ของคอนเวอร์เตอร์ จากสมการที่ (2.67) หรือ (2.68) ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แบบจำลองฮาร์มอนิกของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก

### 4.4 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี

สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี จะทำการพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่อด้วยระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงหนึ่งสายส่ง นั่นคือจะมีคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC ทั้งเครื่องเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์อย่างละหนึ่งชุดเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก โดยจะทำการวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่ (Frequency Scan Analysis), การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก (Harmonic Power Flow Analysis) และเครื่องกรองฮาร์มอนิก (Harmonic Filters) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 การวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่

เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังมีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบ จะต้องทำการวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่ที่จุดต่อร่วม (Point of common coupling : PCC) จากแบบจำลองฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบในหัวข้อที่ 4.3 เมื่อทำการสร้างเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์  $[Y_h]$  ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ จะได้ค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์  $[Z_h]$  ของระบบ คือ

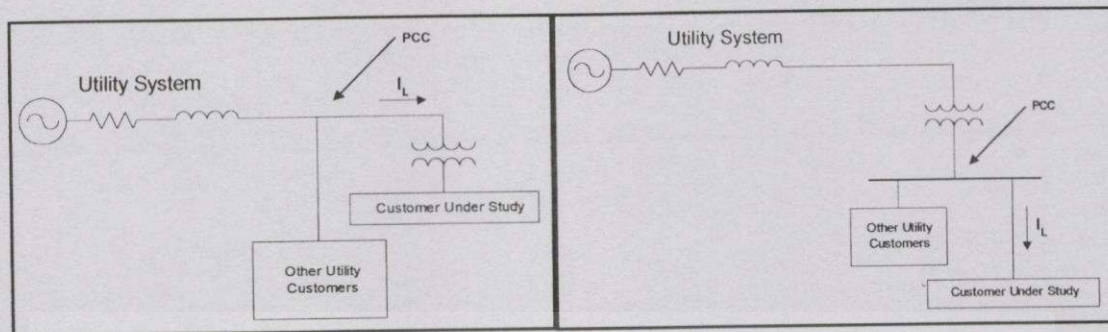
$$Z_h = Y_h^{-1} \quad (4.49)$$

โดยที่  $Z_h(i, i)$  คือ Driving point impedance ; bus  $i = j$

$Z_h(i, j)$  คือ Transfer impedance ; bus  $i \neq j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

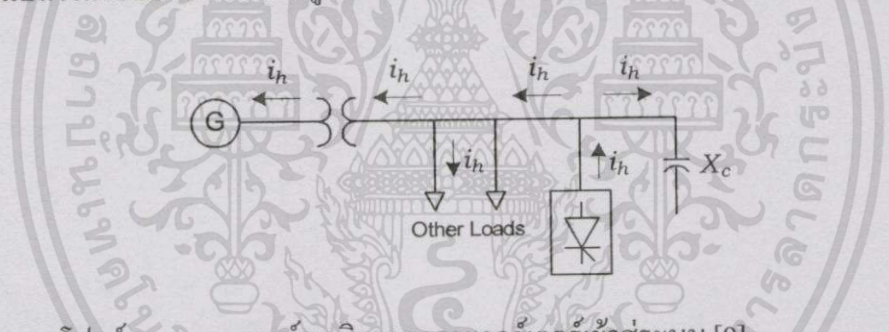
สำหรับการเลือกจุดต่อร่วมที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ในระบบ แสดงดังรูปที่ 4.8



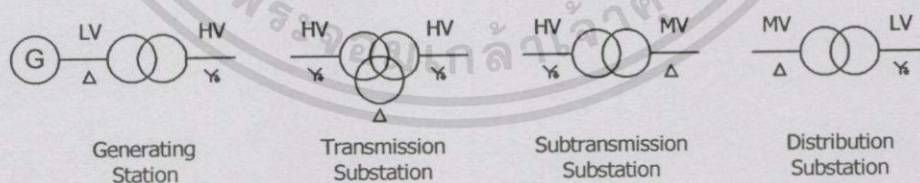
รูปที่ 4.8 การเลือกจุดต่อร่วม PCC ระหว่างการไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟ ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

#### 4.4.2 การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก

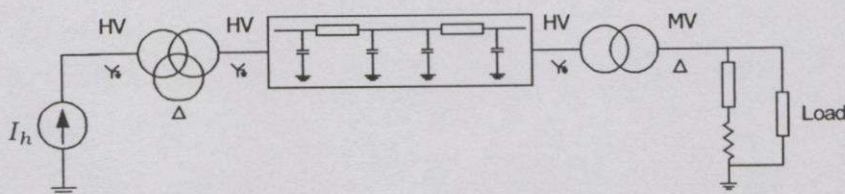
การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี จะทำการวิเคราะห์โดยทำการอัดฉีดกระแสฮาร์มอนิกที่สมดุล (Balanced current injection) เข้าสู่ระบบเอช-ดีซีซึ่งได้พิจารณาการต่อของหม้อแปลงในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 - 4.11 โดยอาศัยสมการพื้นฐานในสมการที่ 4.50 [20]



รูปที่ 4.9 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบ [9]



รูปที่ 4.10 การต่อของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 4.11 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบโดยพิจารณาการต่อของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} I_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{jj} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{jn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{nj} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

ในการคำนวณการไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซีจะต้องทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีก่อน เพื่อที่จะทราบค่าของแรงดัน, ค่าของกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัส และค่าของพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ HVDC แล้วนำค่าต่างๆเหล่านี้ไปคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกส์จากสมการที่ (2.66) หรือ (2.67) ต่อมาจึงทำการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซีต่อไป ซึ่งจะได้ค่าของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่บัสต่างๆ คือ

$$[V'_h] = [Y_h]^{-1} [I'_h] \quad (4.51)$$

$$[V''_h] = [Y_h]^{-1} [I''_h] \quad (4.52)$$

เมื่อ  $V'_h$  คือแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นเครื่องเรียงกระแส และ  $V''_h$  คือแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะได้สมการของแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งในระบบเอซี-ดีซีโดยอาศัยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของการวางซ้อน (Superposition) คือ

$$[V_h] = [V'_h] + [V''_h] \quad (4.53)$$

ก่อนที่จะทำการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี จะต้องทำการแปลงค่ามุมเฟส (Phase angle) ของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.66) หรือ (2.67) ซึ่งมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากสมการที่ (2.66) หรือ (2.67) จะเป็นมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ประกอบกันขึ้นมารวมกับกระแสความถี่หลักมูลเป็นกระแสเอซีที่ไหลเข้าสู่บัสคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC แต่เมื่อต้องการทำการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีโดยใช้วิธีการอัปเดตกระแสฮาร์มอนิกส์จากคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองของระบบ HVDC [11] จะมีสมการที่ใช้ในการคำนวณมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ คือ

$$\theta_h = \theta_{h-spec} + h(\theta_1 - \theta_{1-spec}) \quad (4.54)$$

เมื่อ  $\theta_1$  คือ มุมเฟสของกระแสที่ได้จากการคำนวณเอซี-ดีซีเพาเวอร์โพลาร์,  $\theta_{1-spec}$  คือ มุมเฟสของกระแสที่ความถี่หลักมูลของระบบ HVDC และ  $\theta_{h-spec}$  คือ มุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.66) หรือ (2.67)

ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี จะมีพื้นฐานของสมการที่มาจาก การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี โดยข้อมูลที่รับเข้ามาจะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของ พารามิเตอร์ต่างๆ แต่จะทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ในทุกอันดับของฮาร์โมนิกที่ทำการ พิจารณา และจากสมการที่ (3.11) – (3.18) ในหัวข้อที่ 3.5 จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณการ ไหลของกำลังไฟฟ้าและฮาร์โมนิก ดังนี้

- สมการของค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรมฮาร์โมนิกที่บัส  $i$  ใดๆของระบบ คือ

$$\bar{Y}_{im}^k = |Y_{im}^k| \angle \theta_{im}^k \quad (4.55)$$

- สมการของค่าแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกที่บัส  $i$  ใดๆของระบบ คือ

$$\bar{V}_i^k = |V_i^k| \angle \delta_i^k = |V_i^k| (\cos \delta_i^k + j \sin \delta_i^k) \quad (4.56)$$

$$\bar{I}_i^k = \sum_{m=1}^N \bar{Y}_{im}^k \bar{V}_m^k \quad (4.57)$$

- สมการแสดงค่าของกำลังไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่บัส  $i$  ใดๆของระบบที่มีความสัมพันธ์กับ แรงดันและกระแสฮาร์โมนิกจากสมการที่ (4.56) และ (4.57) คือ

$$\bar{S}_i^k = \bar{V}_i^k \cdot \bar{I}_i^{k*} \quad (4.58)$$

หรือจะได้

$$\bar{S}_i^{k*} = \bar{V}_i^{k*} \cdot \bar{I}_i^k \quad (4.59)$$

เมื่อค่า  $P_i^k$  และ  $Q_i^k$  คือค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสุทธฮาร์โมนิกที่บัส  $i$  ใดๆของระบบ ซึ่งจะได้สมการกำลังไฟฟ้าในส่วนจริงและส่วนรีแอกทีฟฮาร์โมนิก คือ

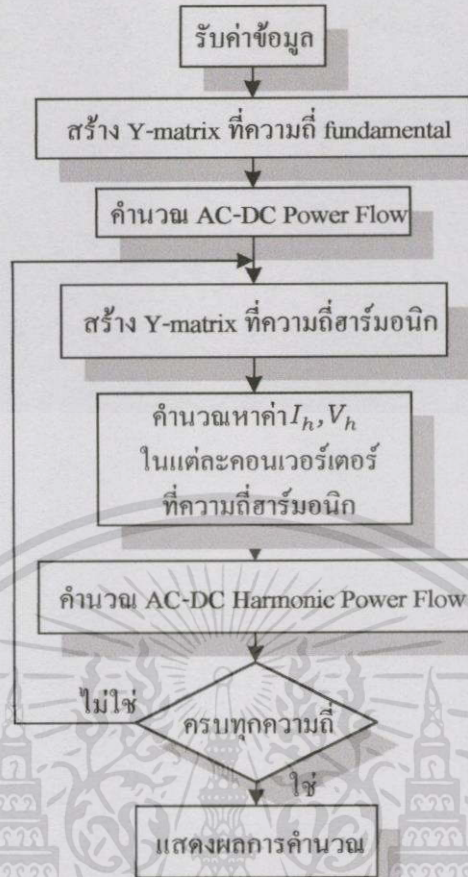
$$P_i^k = \sum_{m=1}^N |Y_{im}^k V_i^k V_m^k| \cos(\theta_{im}^k + \delta_m^k - \delta_i^k) \quad (4.60)$$

$$Q_i^k = -\sum_{m=1}^N |Y_{im}^k V_i^k V_m^k| \sin(\theta_{im}^k + \delta_m^k - \delta_i^k) \quad (4.61)$$

เมื่อ  $k$  คืออันดับของฮาร์โมนิกที่พิจารณา

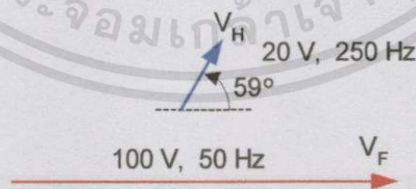
จากสมการที่ (4.55) – (4.61) จะนำไปใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและฮาร์ มอนิกในระบบเอซี-ดีซี โดยขั้นตอนของการคำนวณการไหลของฮาร์โมนิกในระบบเอซี-ดีซี แสดงดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ขั้นตอนของการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี

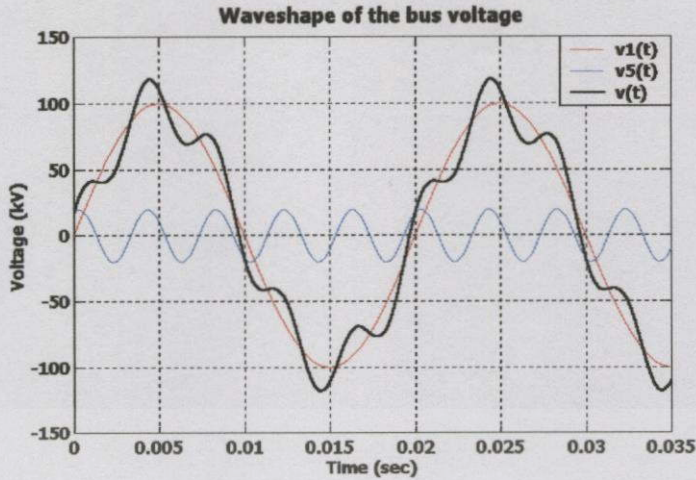
ในการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในระบบ จะต้องทำการพิจารณามุมเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ดังแสดงตัวอย่างของการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.13 – 4.16



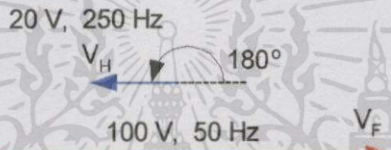
รูปที่ 4.13 เวกเตอร์ของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 ที่มีมุมเริ่มต้น  $59^\circ$

จากรูปที่ 4.13 ในกรณีที่พิจารณาว่าแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกที่ 5 เข้ามาครบถ้วน ซึ่งแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 มีขนาด 20 V, ความถี่ 250 Hz และมีมุมเริ่มต้นที่  $59^\circ$  และสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล มีขนาด 100 V, ความถี่ 50 Hz โดยมีมุมเริ่มต้นที่  $0^\circ$  จะได้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟารวม แสดงในรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

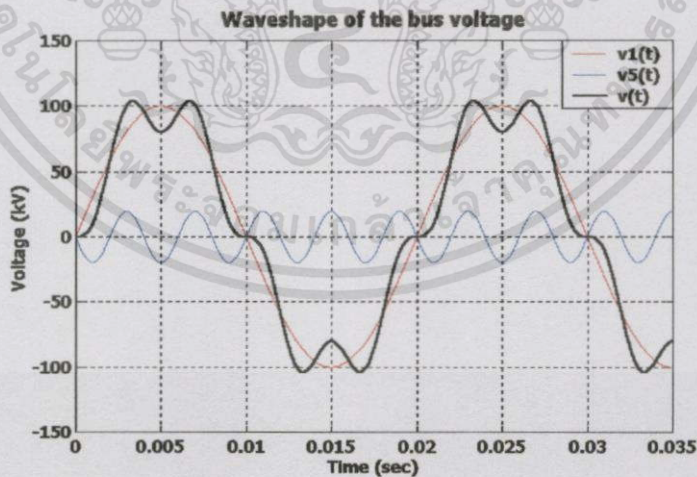


รูปที่ 4.14 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกที่ 5 เข้ามารบกวน



รูปที่ 4.15 เวกเตอร์ของแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 ที่มีมุมเริ่มต้น  $180^\circ$

และถ้าแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 มีมุมเริ่มต้นที่  $180^\circ$  จะได้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ารวมแสดง  
ในรูปที่ 4.16



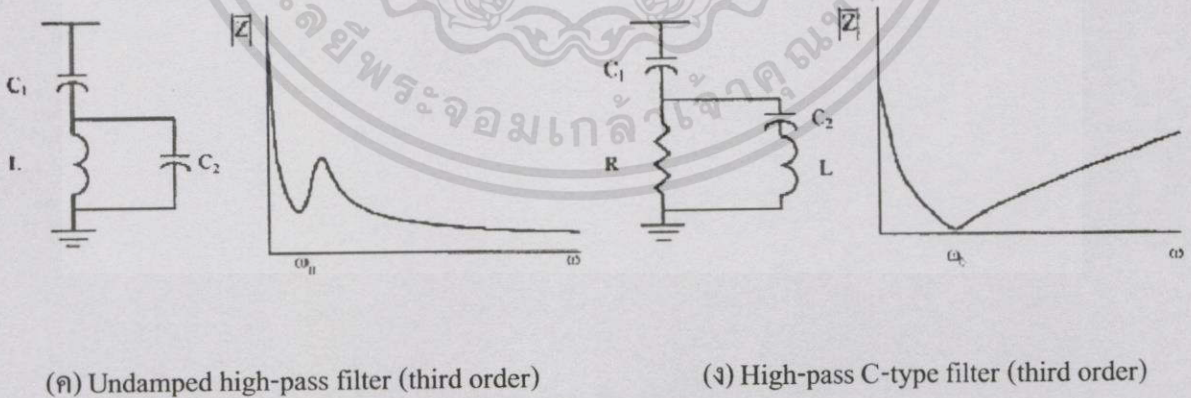
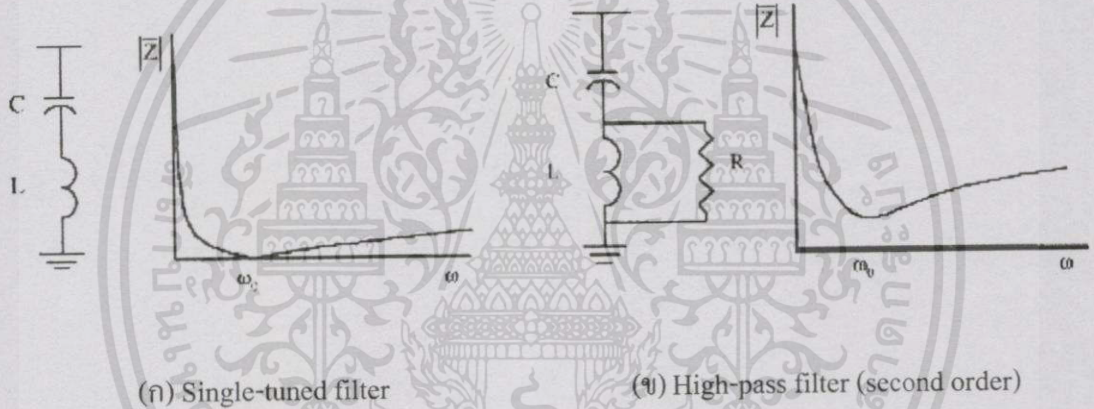
รูปที่ 4.16 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกที่ 5 เข้ามารบกวน โดยมีมุมเริ่มต้นของฮาร์มอนิกที่ 5 ที่  $180^\circ$

จากรูปที่ 4.14 และ 4.16 แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของมุมเฟสของฮาร์มอนิกส์ ในการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4.3 เครื่องกรองฮาร์มอนิก

ในการลด (Mitigation) ปริมาณของฮาร์มอนิกที่ใช้ในระบบ HVDC หรือใช้กันในระบบของการไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมก็คือการกรอง (Filtering) ซึ่งเครื่องกรองฮาร์มอนิกโดยพื้นฐานจะมีอยู่สองชนิดคือเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบอนุกรม (Series filters) และเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนาน (Shunt filters) ซึ่งเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนานจะมีกระแสไหลผ่านตัวมันเพียงบางส่วนเมื่อเทียบกับเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบอนุกรมจะต้องรับกระแสไหลได้เต็มที่ ดังนั้นราคาในการลงทุนของเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบอนุกรมจึงสูงกว่าเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนาน นอกจากนี้เครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนานยังสามารถใช้เป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ความถี่หลักมูลได้ จึงมีผลทำให้เครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนานมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนานชนิดต่างๆ [17] แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนานชนิดต่างๆที่ใช้ในการลดปริมาณของฮาร์มอนิก

สำหรับสมการที่ใช้ในการออกแบบเครื่องกรองฮาร์มอนิกแบบขนานชนิดจูนความถี่เดียว (Single-Tuned shunt filter) ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC ต่ออนุกรมกัน [1] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (4.62)$$

โดยที่

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.63)$$

$$X_C = \frac{V_I^2}{Q_C} \quad (4.64)$$

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (4.65)$$

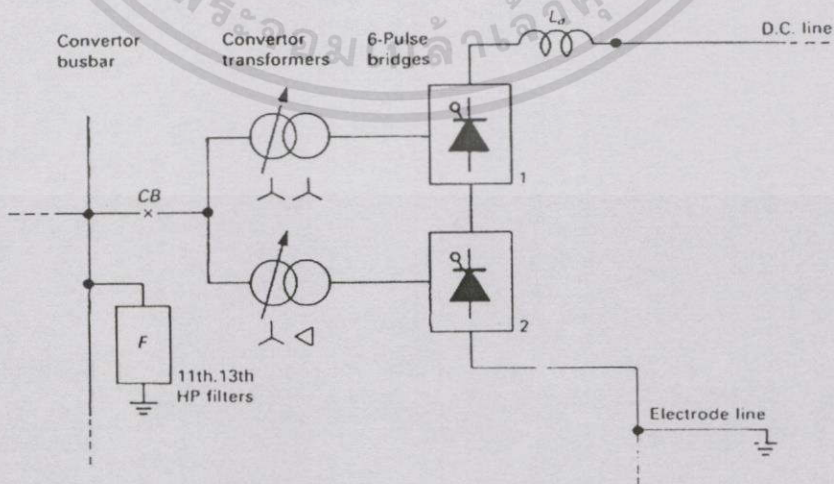
$$C = \frac{B_I}{2\pi f_1} \quad (4.66)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f_1 h)^2 C} \quad (4.67)$$

$$R = \frac{\sqrt{L/C}}{Q} \quad (4.68)$$

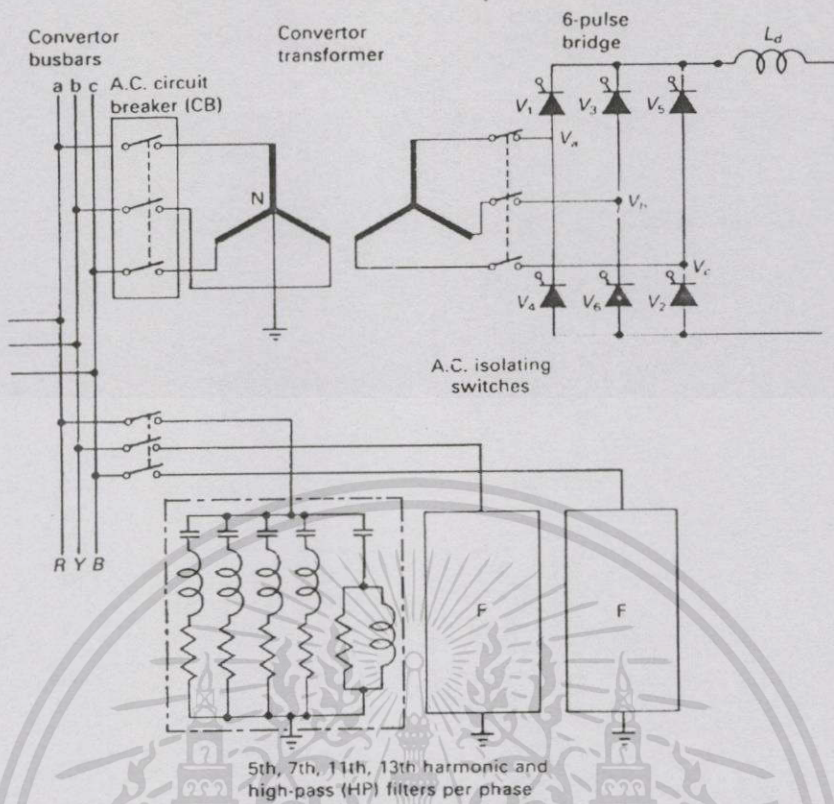
- เมื่อ  $f_n$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการกรอง  
 $X_C$  คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของเครื่องกรองฮาร์มอนิก  
 $X_L$  คือ ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของเครื่องกรองฮาร์มอนิก  
 $C$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของเครื่องกรองฮาร์มอนิกและตัวจ่ายกำลังรีแอกทีฟ  
 $B_I$  คือ ค่าซัสเซปแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ความถี่หลักมูล  
 $L$  คือ ค่าอินดักแตนซ์ของเครื่องกรองฮาร์มอนิก  
 $V_I$  คือ ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก  
 $Q_C$  คือ ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของตัวคาปาซิเตอร์  
 $R$  คือ ค่าความต้านทานที่ใช้ในการออกแบบความคม (Sharpness) ของการกรอง  
 $Q$  คือ แฟกเตอร์คุณภาพ (Quality factor) หรือความคมของเครื่องกรองฮาร์มอนิก

สำหรับค่า  $Q$  ยิ่งสูงจะเป็นการบ่งบอกถึงกำลังสูญเสียน้อย และรูปที่ 4.18 - 4.20 แสดงลักษณะทั่วไปของการจัดเรียงกลุ่มของเครื่องกรองฮาร์มอนิกและคาปาซิเตอร์ [2]

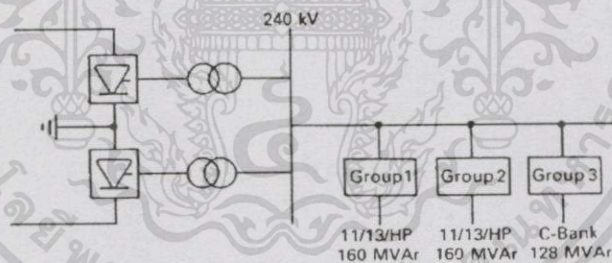


รูปที่ 4.18 ลักษณะทั่วไปของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12-พัลส์

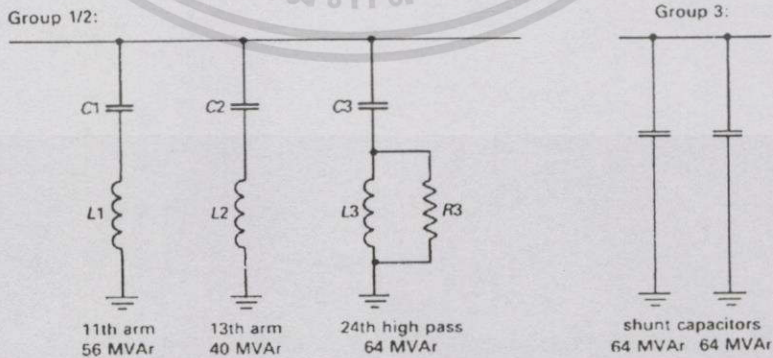
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ลักษณะการจัดเรียงเครื่องกรองฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6-พัลส์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 ลักษณะทั่วไปของเครื่องกรองฮาร์มอนิก ที่ 1,000 MW Converter Station

(ก) Single line diagram

(ข) รายละเอียดของกลุ่ม Filter และ Capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก

ในการประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic distortion evaluation) จะมีหลักเกณฑ์ที่ใช้ประเมินคือ ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแส (Current distortion limits) โดยครรชนี่ที่ใช้กำหนด ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแส คือความต้องการความเพี้ยนรวม (Total demand distortion : TDD) และขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดัน (Voltage distortion limits) ซึ่งครรชนี่ที่ใช้กำหนด คือค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกรวม (Total harmonic voltage distortion : THD) โดยมาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. มาตรฐานที่ใช้กับการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า : มาตรฐานประเภทนี้จะควบคุมแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบไฟฟ้าและกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าสร้างป้อนเข้าไปในระบบไฟฟ้า
2. มาตรฐานที่ใช้กับผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า : มาตรฐานประเภทนี้จะควบคุมปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

มาตรฐานที่ใช้กับการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าของต่างประเทศ เช่น IEEE Std. 519-1992, G. 5/3-1976, AS 2279.2-1991, IEC 1000-2-2-1990, IEC 1000-2-4-1994, GB/T 14549-93, prEN 50160:1993 และ JEAG97202-1995 ซึ่งมีอยู่ 5 ฉบับที่กำหนดค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบ และมีอยู่ 7 ฉบับที่กำหนดค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกที่การไฟฟ้าจะต้องควบคุมไม่ให้เกินค่าที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการกำหนดค่ากระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกของมาตรฐานต่างๆ

มาตรฐาน	กระแสฮาร์มอนิก	แรงดันฮาร์มอนิก (% of $V_L$ )
1. IEEE Std. 519	TDD (% of $I_L$ ) $I_h$ (% of $I_L$ )	THD and $V_h$
2. G.5/3	$I_h$ (Arms)	THD and $V_h$
3. AS 2279.2	kVA of Converter	THD and $V_h$
4. IEC 1000-2-2	-	THD and $V_h$
5. IEC 1000-2-4	-	THD and $V_h$
6. GB/T 14549	$I_h$ (Arms)	THD and $V_h$
7. PrEN 50160	-	THD and $V_h$
8. JEAG 9702	$I_h$ (mA/kW Load)	NA

สำหรับตัวอย่างของมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 [9] ได้แสดงในตารางที่ 4.3 – 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกในระบบจำหน่าย (120 V ถึง 69 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
$I_{sc} / I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

\*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc} / I_L$

where

$I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC

$I_L$  = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

ตารางที่ 4.4 ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกในระบบส่งจ่ายย่อย (69.001 kV ถึง 161 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
$I_{sc} / I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

\*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc} / I_L$

where

$I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC

$I_L$  = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

ตารางที่ 4.5 ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่าย (มากกว่า 161 kV)

$I_{sc} / I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)					TDD
	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

\*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc} / I_L$

where

$I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC

$I_L$  = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

ตารางที่ 4.6 ขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0 % THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

สำหรับประเทศไทยมีมาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิก คือ PRC-PQG-01 / 1998 ซึ่งกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม [28] จากคณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยเกิดจากความร่วมมือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม \*

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	อันดับฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม (A rms)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6	
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1	
22, 24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1	
115 and above	5	4	3	4	5	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

\* : ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

ตารางที่ 4.8 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ให้บริการรายใดๆที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก รวมของแรงดัน (%)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน แต่ละอันดับ (%)	
		อันดับสี่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11, 12, 22 and 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

#### 4.6 สรุป

ในการศึกษาและวิเคราะห์ถึงปริมาณของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบเอช-ดีซี จะต้องทำการสแกนความถี่เพื่อพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของระบบที่จุด PCC สำหรับใช้ในการประเมินถึงพฤติกรรมของระบบที่มีผลต่อความถี่ที่เกิดขึ้น ณ จุด PCC หรือจุดที่ทำการพิจารณา เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องกรองฮาร์มอนิก และสำหรับการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบ จะนำไปใช้ในการวางแผนและการควบคุมปริมาณของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจากอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก โดยจะทราบถึงปริมาณและทิศทางการไหลของฮาร์มอนิกเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องกรองฮาร์มอนิกให้มีความเหมาะสมต่อระบบโดยรวม โดยคำนึงถึงปริมาณของฮาร์มอนิกตามมาตรฐานข้อกำหนดต่างๆ

## ระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการศึกษาและผลการวิเคราะห์

### 5.1 บทนำ

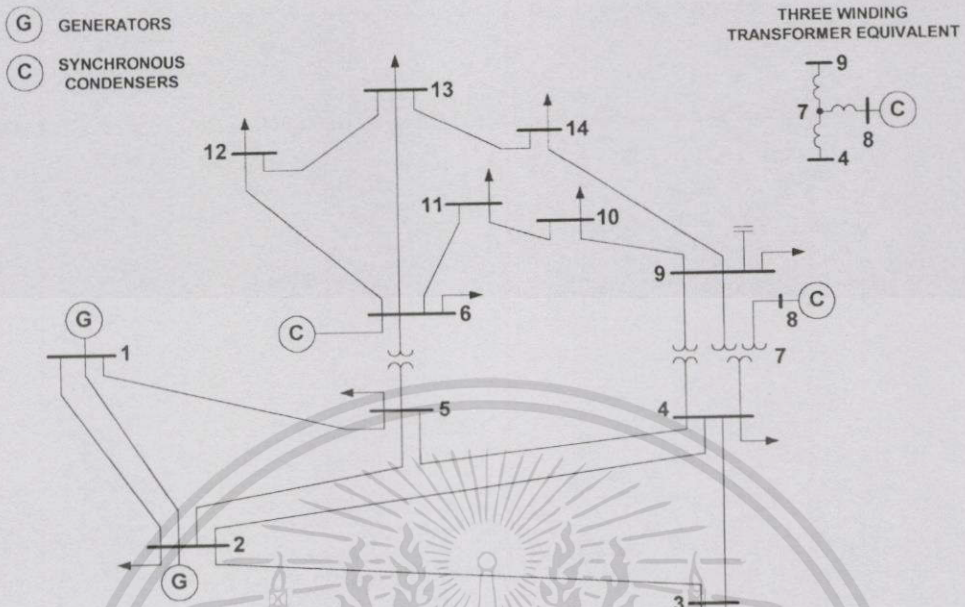
การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอชไอจะใช้ทดสอบกับระบบ IEEE 14 บัส 30 บัส 57 บัส และ 118 บัส โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันเปรียบเทียบกับวิธีฟาส-ดีคัปเปิล สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอชไอจะทำการคำนวณโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันเปรียบเทียบกับวิธีซีเวนเซิลและวิธียูนิไฟด์โดยทำการทดสอบกับระบบต่างๆ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ระบบทดสอบ 14 บัสโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันซึ่งระบบที่ทำการวิเคราะห์จะแสดงถึงพฤติกรรมของระบบเมื่อระบบได้ทำการการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสชนิดต่างๆ

สำหรับการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอชไอ จะทำการวิเคราะห์กับระบบทดสอบของ IEEE 14 บัส ที่ทำการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส ซึ่งการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอชไอ [29,30] ที่มีคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์โดยส่วนมากคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC จะเป็นโหนดในระบบโดยทำการเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC กับโหนดบัสใดๆในระบบเท่านั้นซึ่งไม่ได้กระทำตัวเป็นสายส่งที่ทำการส่งถ่ายพลังงานในระบบ และสำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์มอนิกส์ในระบบเอชไอจริง โดยใช้ระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส ต่อร่วมกับระบบทดสอบภาคเหนือของประเทศไทย 4 บัส ที่กำหนดขึ้นโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันร่วมกับการอัปเดตกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ ซึ่งจากการวิเคราะห์นี้จะทำให้สามารถทราบถึงพฤติกรรมต่างๆของระบบและทำให้ทราบถึงปริมาณของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC โดยก่อนที่จะนำโปรแกรมต่างๆเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์กับระบบทดสอบต่างๆ จะต้องทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่เขียนขึ้น

### 5.2 การทดสอบโปรแกรมเพาเวอร์โฟลว์เทียบกับ IEEE standard

ในการทดสอบโปรแกรม AC Power Flow เทียบกับ IEEE standard โดยที่ข้อมูลของระบบทดสอบ IEEE standard สามารถหาได้จากเว็บไซต์ <http://www.washington.cc.edu> หรือหาได้จาก [32] ซึ่งการทดสอบนี้จะเป็พื้นฐานที่ดีในการตรวจสอบความถูกต้องในการเขียนโปรแกรมการคำนวณ และใช้ในการที่จะนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยโปรแกรม AC Power Flow ได้ทำการพัฒนามาจาก [31] ซึ่งจะใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) และวิธีฟาส-ดีคัปเปิล (Fast-Decoupled method) ทำการทดสอบกับระบบต่างๆดังนี้

5.2.1 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส



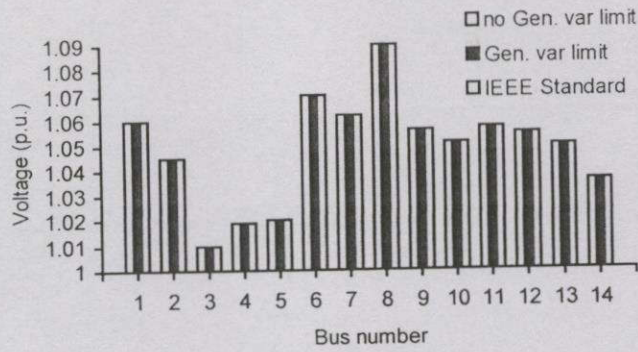
รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

ตารางที่ 5.1 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 14 บัส โดยไม่นับถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

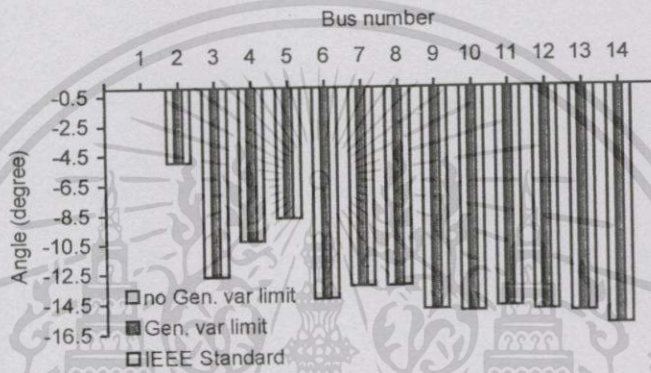
Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	0.55	3	21,704	0.33	4	3	20,176
0.001	0.55	3	21,704	0.33	4	4	20,176
0.0001	0.88	4	21,768	0.39	5	5	20,240

ตารางที่ 5.2 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 14 บัส โดยไม่นับถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	0.66	3	22,072	0.38	4	3	20,280
0.001	0.66	3	22,072	0.38	4	4	20,280
0.0001	0.71	4	22,136	0.49	5	5	20,344

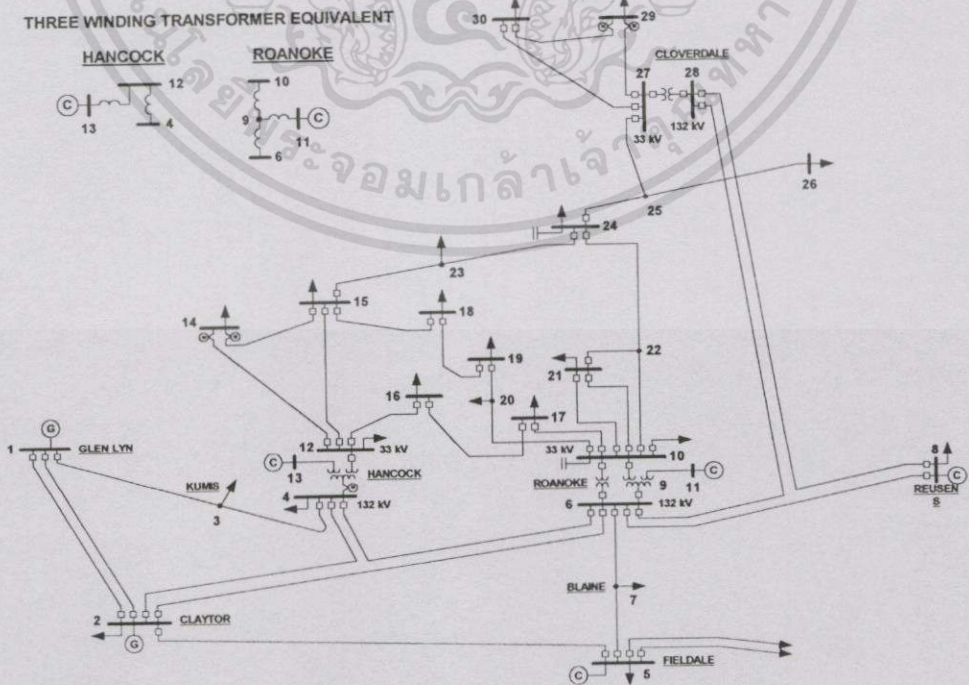


รูปที่ 5.2 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 14 บัส (แสดงบัสอยู่ที่บัส 1)



รูปที่ 5.3 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 14 บัส (มุมอ้างอิงที่  $0^\circ$ )

5.2.2 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 5.4 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

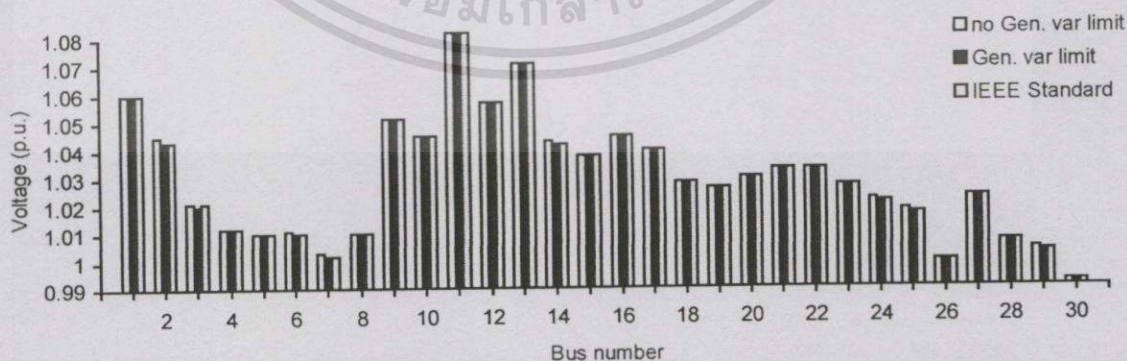
ตารางที่ 5.3 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 30 บัส โดยไม่คำนึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	2.37	3	78,728	0.93	3	3	68,136
0.001	2.37	3	78,728	0.99	4	4	68,200
0.0001	3.08	4	78,792	1.93	6	4	68,328

ตารางที่ 5.4 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 30 บัส โดยคำนึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

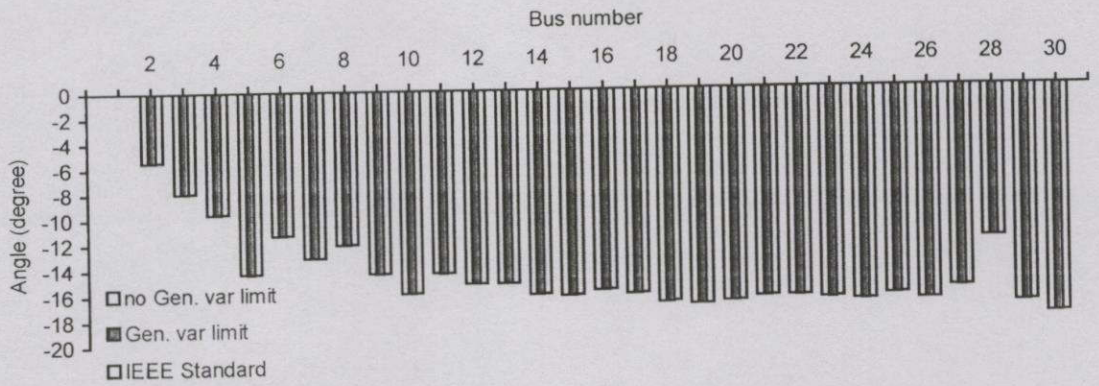
Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	6.92	7	80,504	1.92	5	4	68,792
0.001	6.92	7	80,504	2.20	7	7	68,920
0.0001	6.92	7	80,504	2.91	8	8	68,984

โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่พิกัดสูงสุด (High Gen. var limit)



รูปที่ 5.5 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 30 บัส (แสดงบัสอยู่ที่บัส 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 30 บัส (มุมอ้างอิงที่ 0°)

ตารางที่ 5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE 30 บัส ที่คำนวณจากโปรแกรมโดยทำการพิจารณาและไม่พิจารณาพิคคของกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลของ IEEE Standard

Bus	$P_G$ (MW)			$Q_G$ (MVAR)		
	IEEE Standard	No Gen. var limit	Gen. var limit	IEEE Standard	No Gen. var limit	Gen. var limit
1	260.2	260.9501	261.0322	-16.1	-20.3796	-16.1039
2	40.0	40.0000	40.0000	50.0	57.0655	50.0000
5	0.0	0.0	0.0	37.0	35.6612	37.0911
8	0.0	0.0	0.0	37.3	36.1711	37.5127
11	0.0	0.0	0.0	16.2	16.0726	16.2468
13	0.0	0.0	0.0	10.6	10.3424	10.6086

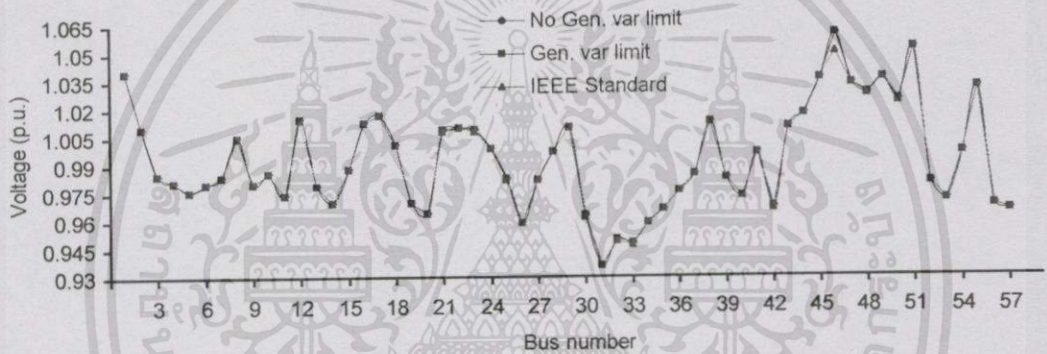
5.2.3 ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

ตารางที่ 5.6 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 57 บัส โดยไม่คำนึงถึงพิคคของกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

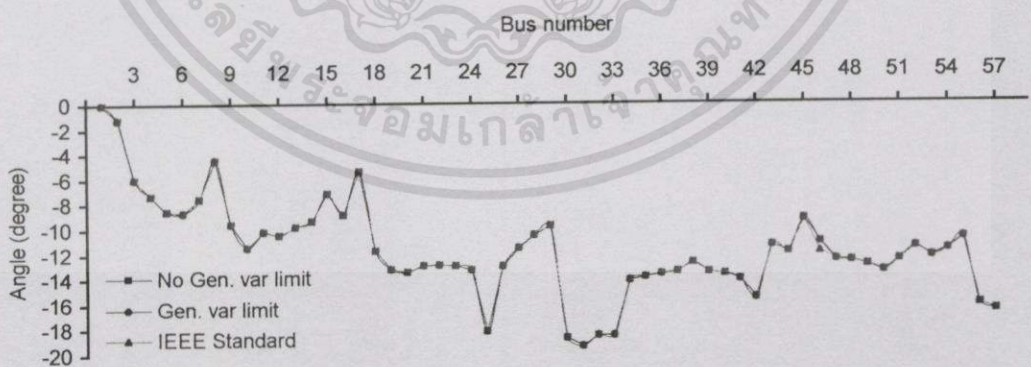
Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	7.58	3	257,920	3.79	4	3	214,168
0.001	7.86	4	257,984	4.23	5	4	214,232
0.0001	7.86	4	257,984	4.67	6	5	214,296

ตารางที่ 5.7 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 57 บัส โดยคำนึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	7.69	3	259,024	3.79	4	3	214,304
0.001	8.07	4	259,088	4.28	5	4	214,368
0.0001	8.07	4	259,088	4.78	6	5	214,432



รูปที่ 5.7 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 57 บัส (แสดงคับสอยู่ที่บัส 1)



รูปที่ 5.8 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 57 บัส (มุมอ้างอิงที่  $0^\circ$ )

### 5.2.4 ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

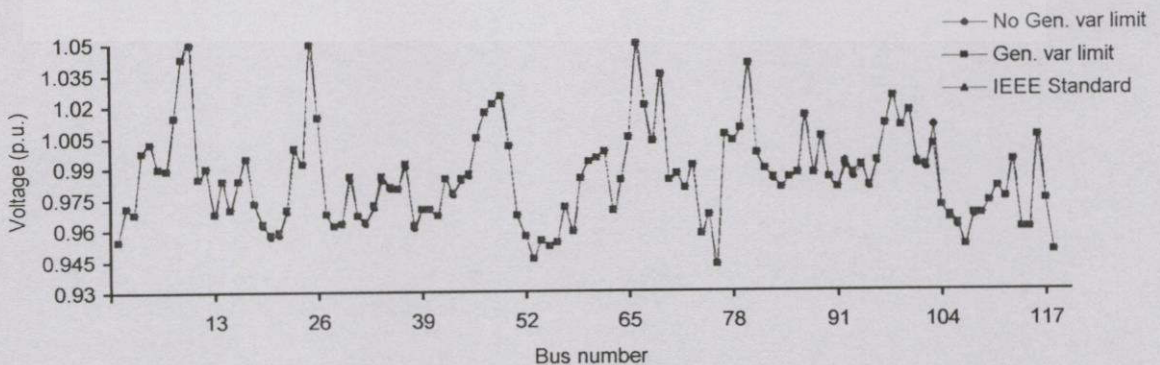
ตารางที่ 5.8 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 118 บัส โดยไม่คำนึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	44.10	4	899,152	19.61	7	7	781,872
0.001	44.10	4	899,152	27.79	10	10	782,064
0.0001	45.26	5	899,216	36.25	13	13	782,256

ตารางที่ 5.9 ค่าของเวลา, จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 118 บัส โดยคำนึงถึงพิกัดของกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

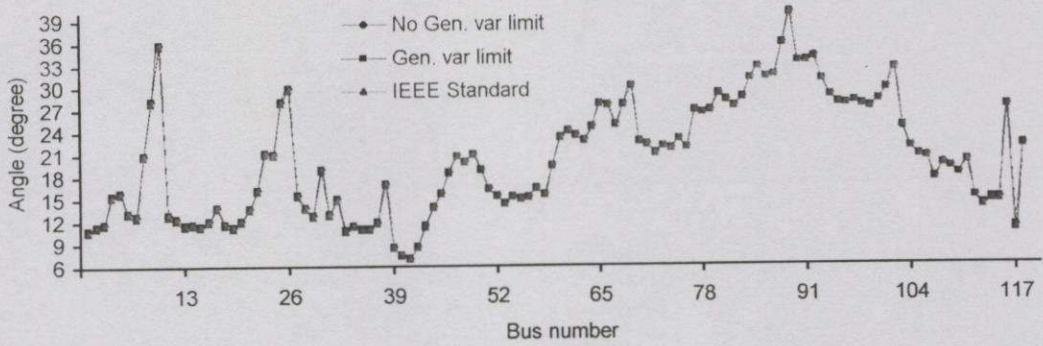
Mismatch	Newton-Raphson			Fast-Decoupled			
	Time (sec)	Iterations	Memory (bytes)	Time (sec)	Iterations		Memory (bytes)
					P	Q	
0.01	129.18	8	920,376	42.46	11	11	789,544
0.001	81.07	7	920,312	42.46	11	11	789,544
0.0001	130.23	9	920,440	80.42	19	19	790,056

โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 103 จ่ายกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟที่พิกัดสูงสุด (High Gen. var limit) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 19, 32, 34, 92 และบัส 105 จ่ายกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟที่พิกัดต่ำสุด (Low Gen. var limit)

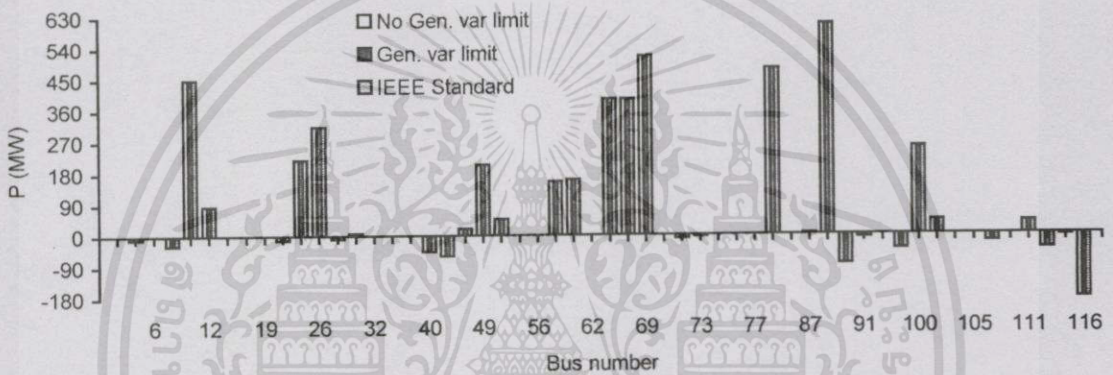


รูปที่ 5.9 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส (แสดงบัสอยู่ที่บัส 69)

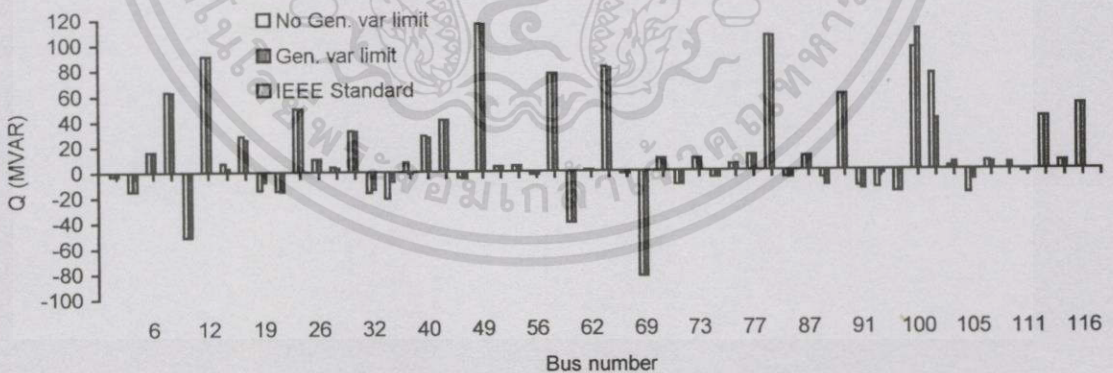
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส (มุมอ้างอิงที่  $30^\circ$ )



รูปที่ 5.11 ค่ากำลังไฟฟ้างจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เจนบัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส



รูปที่ 5.12 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เจนบัสต่างๆของระบบ IEEE 118 บัส (IEEE Standard ไม่ได้แสดงผลของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบค่าจำนวนรอบของวิธี Newton-Raphson และ วิธี Fast-Decoupled ของระบบ IEEE 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส โดยพิจารณาและไม่พิจารณา พิกัดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ค่ามิตแมตซ์ 0.001

Test Systems	Iterations of no Gen. var limit			Iterations of Gen. var limit		
	Newton-Raphson	Fast-Decoupled		Newton-Raphson	Fast-Decoupled	
		P	Q		P	Q
IEEE 14 bus	3	4	4	3	4	4
IEEE 30 bus	3	4	4	7	7	7
IEEE 57 bus	4	5	4	4	5	4
IEEE 118 bus	4	10	10	7	11	11

จากการทดสอบโปรแกรม AC Power Flow เทียบกับ IEEE Standard เมื่อทำการคำนวณ โดยพิจารณาและไม่พิจารณาพิกัดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะพบว่าระบบ IEEE 14 บัส และ IEEE 57 บัส ค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวที่อยู่ในระบบดังกล่าวจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอยู่ในพิกัด สำหรับระบบ IEEE 30 บัส และ IEEE 118 บัส จะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวที่จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากกว่าหรือน้อยกว่าพิกัด ซึ่งจะทำให้ค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณมีค่าแตกต่างกัน และสำหรับผลที่ได้จาก IEEE Standard จะทำการพิจารณาขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นั่นคือ

$$Q_{min} \leq Q_G \leq Q_{max} \quad (5.1)$$

ถ้า  $Q_G < Q_{min}$  จะกำหนดให้  $Q_G = Q_{min}$  และถ้า  $Q_G > Q_{max}$  จะกำหนดให้  $Q_G = Q_{max}$

### 5.3 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์

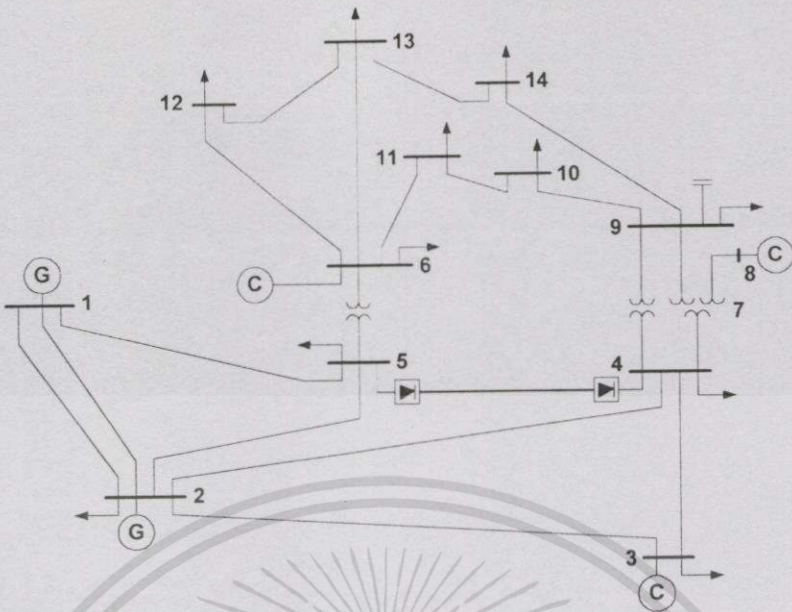
ในการทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow จะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $\bar{x}$  ของระบบดีซี (Initial conditions for D.C. system) โดยกำหนดให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ( $\cos \phi$ ) ที่บัสคอนเวอร์เตอร์ของระบบเอช-ดีซีมีค่าเท่ากับ 0.9,  $V_{term} = 1.0 \angle 0^\circ$  p.u.,  $V_{dr} = 1.0$  p.u.,  $V_{di} = -1.0$  p.u.,  $I_d = 1.0$  p.u.,  $a_r = 1.0$ ,  $a_i = 1.0$ ,  $\alpha_{min} = 5.0^\circ$  และ  $\gamma_{min} = 5.0^\circ$  ซึ่งใช้ค่าเริ่มต้นเหล่านี้ในทุกกรณีของการควบคุมการทำงานของระบบ HVDC สำหรับใช้ในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ในระบบเอช-ดีซี โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นหัวข้อย่อยต่างๆดังนี้

#### 5.3.1 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์เทียบกับ IEE AC-DC 14 บัส

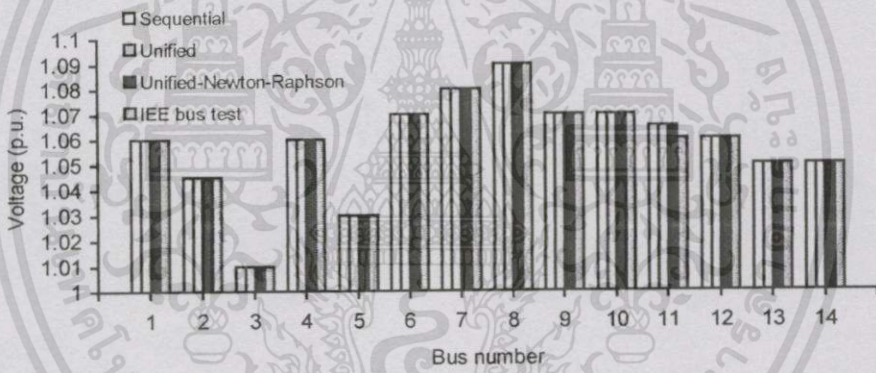
ระบบที่ใช้การทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow เทียบกับ IEE AC-DC 14 bus test จาก [18] แสดงในรูปที่ 5.15 โดยจะทำการพิจารณาที่ค่าของแรงดันที่บัสเมื่อทำการคำนวณด้วยวิธีซีแกนเชิล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

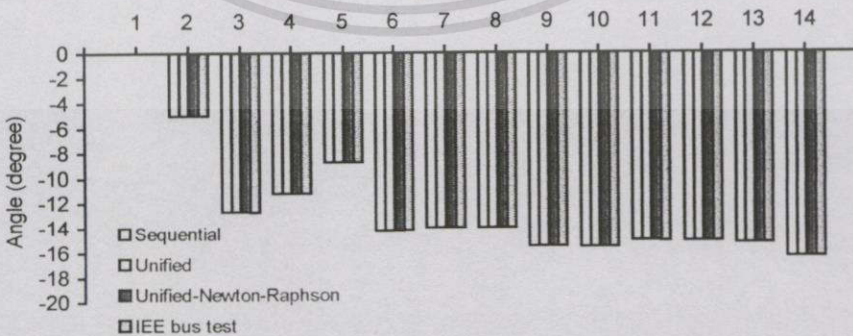
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 ระบบทดสอบ IEE AC-DC 14 บัส



รูปที่ 5.14 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEE AC-DC 14 บัส



รูปที่ 5.15 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบ IEE AC-DC 14 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow เทียบกับ IEE AC-DC 14 bus test จะพบว่าค่าของแรงดันที่บัสต่างๆจากการคำนวณด้วยวิธีสี่แควนเซี่ยล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก IEE bus test

### 5.3.2 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์เทียบกับระบบเอช-ดีซี 14 บัส

การทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow เทียบกับ AC-DC 14 bus test จะพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของระบบ HVDC ซึ่งก็คือค่า  $V_{term}$ ,  $\phi$ ,  $\alpha$ ,  $V_d$ ,  $I_d$ ,  $P_d$ ,  $Q_d$ ,  $\alpha$  และ  $\mu$  ของทั้งด้านเครื่องเรียงกระแสและด้านที่เป็นอินเวอร์เตอร์ โดยทำการคำนวณด้วยวิธีสี่แควนเซี่ยล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก [4]

ตารางที่ 5.11 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดีซีของระบบ AC-DC 14 บัส

Parameter	Reference [4]		Sequential method		Unified method		Unified-Newton-Raphson method	
	Rectifier	Inverter	Rectifier	Inverter	Rectifier	Inverter	Rectifier	Inverter
Bus number	5	4	5	4	5	4	5	4
$V_{term}$ (p.u.)	1.032	1.061	1.032	1.061	1.032	1.061	1.032	1.061
$\phi$ (degree)	17.778	16.054	17.784	16.001	17.784	16.001	17.166	15.739
$\alpha$	0.972	0.931	0.9724	0.9359	0.9723	0.9356	0.9719	0.9354
$V_d$ (V)	129.022	128.87	129.02	128.87	129.02	128.87	129.02	128.87
$I_d$ (A)	454.2		454.2		454.2		454.2	
$P_d$ (MW)	58.60	58.31	58.6000	58.5311	58.6000	58.5311	58.6000	58.5311
$Q_d$ (MVAR)	18.79	16.78	18.7973	16.7900	18.7965	16.7849	18.1019	16.4948
$\alpha$ (degree)	7.0	159.67	7.0	159.672	7.0	159.669	7.0	159.669
$\mu$ (degree)	17.32	10.33	17.233	10.328	17.233	10.331	17.233	10.331

### 5.3.3 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โพลว์ โดยทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

การทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส จะทำการทดสอบกับระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนามาจากระบบ IEEE 14 บัส, IEEE 30 บัส, IEEE 57 บัส และ IEEE 118 บัส ตามลำดับโดยนำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC เข้ามาแทนสายส่งเอชหนึ่งสายส่งของระบบดังกล่าวซึ่งจะทำการทดสอบหาจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณทั้งหมดโดยทำการเปรียบเทียบการคำนวณของแต่ละวิธี คือวิธีสี่แควนเซี่ยล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน สำหรับข้อมูลของระบบ HVDC ที่ใช้ในการทดสอบของระบบเอช-ดีซี 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

118 บัส จะใช้ข้อมูลจากภาคผนวก ก. ตารางที่ ผ.5.1 โดยทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าของ AC-DC busbar, DC link resistance และ DC link power ตามความเหมาะสมของระบบ และในการทดสอบระบบดังกล่าวนี้ไม่ได้ทำการพิจารณาพิภคค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 5.3.3.1 ระบบทดสอบเอซี-ดีซี 14 บัส

สำหรับระบบทดสอบเอซี-ดีซี 14 บัส จะทำการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัส 4 และ บัส 5 ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 61.7 MW และมีค่าความต้านทานของสายส่งดีซีเท่ากับ 0.01335 p.u. ซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอซี-ดีซี 14 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์

Mismatch	Sequential method			Unified method			Unified-Newton-Raphson method		
	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)
0.01	5	0.55	22,780	4	0.99	28,726	4	1.42	30,252
0.001	5	0.55	22,780	5	1.21	28,862	5	1.87	30,388
0.0001	7	0.77	23,052	6	1.37	28,998	6	2.25	30,524

### 5.3.3.2 ระบบทดสอบเอซี-ดีซี 30 บัส

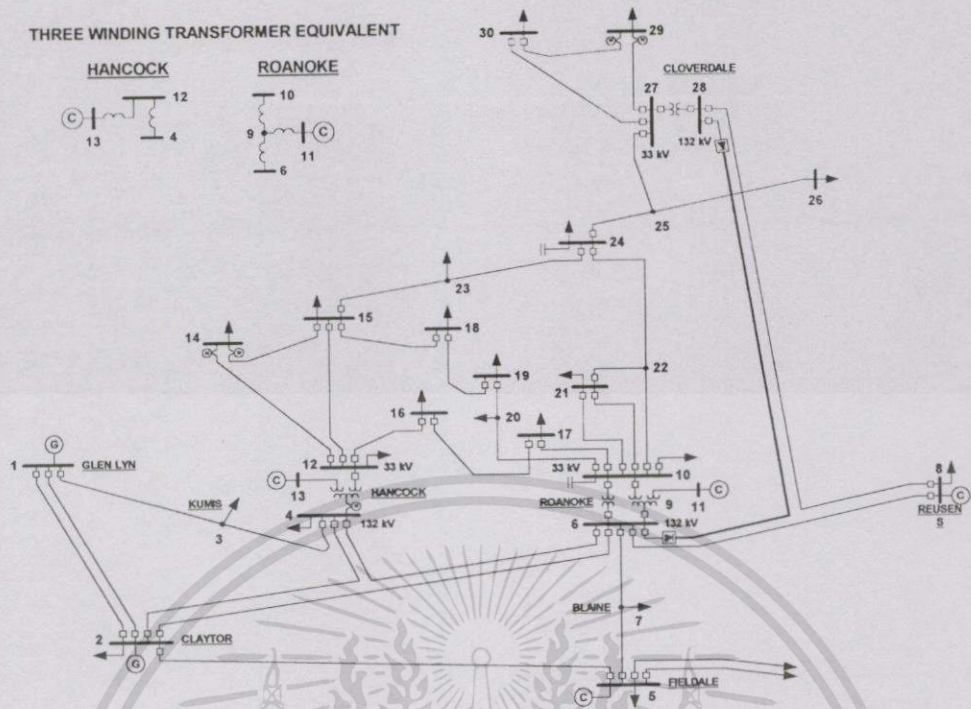
สำหรับระบบทดสอบเอซี-ดีซี 30 บัส จะทำการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัส 6 และ บัส 28 แทนเข้าไปในระบบ IEEE 30 บัส ในรูปที่ 5.16 ซึ่งที่บัส 6 จะมีเครื่องเรียงกระแสต่ออยู่ และที่บัส 28 จะมีอินเวอร์เตอร์ต่ออยู่ โดยมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 18.6867 MW และมีค่าความต้านทานของสายส่งดีซีเท่ากับ 0.0169 p.u. ซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอซี-ดีซี 30 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์

Mismatch	Sequential method			Unified method			Unified-Newton-Raphson method		
	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)
0.01	5	1.98	71,804	4	1.76	91,550	4	4.51	105,596
0.001	6	2.09	71,940	6	3.02	91,822	5	5.66	105,732
0.0001	7	2.31	72,076	7	3.24	91,958	5	5.66	105,732

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับโครงการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ในทางที่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ระบบทดสอบเอชวี-ดีซี 30 บัส

### 5.3.3.3 ระบบทดสอบเอชวี-ดีซี 57 บัส

สำหรับระบบทดสอบเอชวี-ดีซี 57 บัส จะทำการเชื่อมต่อกับระบบ HVDC ระหว่างบัส 4 และ บัส 5 แทนเข้าไปในระบบ IEEE 57 บัส ซึ่งที่บัส 4 จะมีเครื่องเรียงกระแสต่ออยู่ และที่บัส 5 จะมีอินเวอร์เตอร์ต่ออยู่ โดยมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 13.7971 MW และมีค่าความต้านทานของสายส่งดีซีเท่ากับ 0.0625 p.u. ซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอชวี-ดีซี 57 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์

Mismatch	Sequential method			Unified method			Unified-Newton-Raphson method		
	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)
0.01	5	4.51	218,476	4	5.33	279,606	4	13.68	342,548
0.001	6	5.54	218,612	5	6.59	279,742	5	14.39	342,684
0.0001	7	6.27	218,748	6	7.96	279,878	5	14.39	342,684

### 5.3.3.4 ระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 118 บัส

สำหรับระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 118 บัส จะทำการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC link ระหว่าง บัส 3 และ บัส 5 แทนเข้าไปในระบบ IEEE 118 บัส ซึ่งที่บัส 3 จะมีอินเวอร์เตอร์ต่ออยู่ และที่บัส 5 จะมีเครื่องเรียงกระแสต่ออยู่ โดยมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 69.349 MW และมีค่าความต้านทานของสายส่งดีซีเท่ากับ 0.0241 p.u. ซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.15

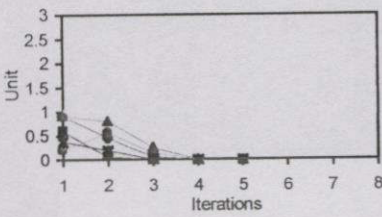
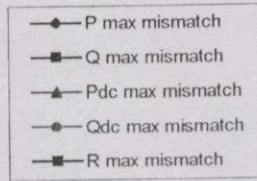
ตารางที่ 5.15 จำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 118 บัส ตามการเปลี่ยนแปลงของค่ามิตแมตซ์

Mismatch	Sequential method			Unified method			Unified-Newton-Raphson method		
	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)	Iterations	Time (sec.)	Memory (bytes)
0.01	5	20.76	788,052	5	25.05	957,310	4	38.67	1,084,356
0.001	8	35.37	788,460	8	27.79	957,718	5	46.96	1,084,492
0.0001	11	37.84	788,868	11	49.81	958,126	5	46.96	1,084,492

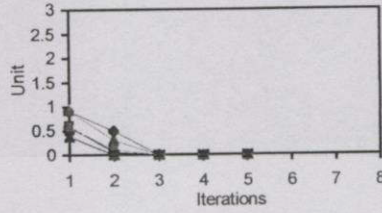
จากการทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส ซึ่งทำการทดสอบกับระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส โดยวิธีเคเวนเชียล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน พบว่าเมื่อพิจารณาถึงค่าของจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณ วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันจะใช้จำนวนรอบน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาถึงค่าของเวลาที่ใช้ในการคำนวณและจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ วิธีเคเวนเชียลจะใช้เวลาและจำนวนหน่วยความจำน้อยที่สุด

ตารางที่ 5.16 การเปรียบเทียบค่าจำนวนรอบของวิธีเคเวนเชียล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส ที่ค่ามิตแมตซ์ 0.001

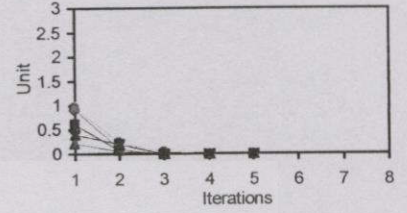
Test Systems	Sequential method	Unified method	Unified-Newton-Raphson method
14 bus	5	5	5
30 bus	6	6	5
57 bus	6	5	5
118 bus	8	8	5



(ก) วิธีซีเควนเชียบล

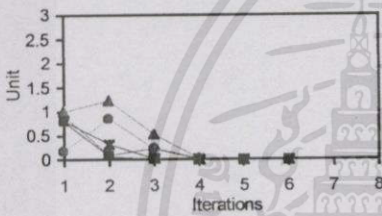


(ข) วิธียูนิไฟด์

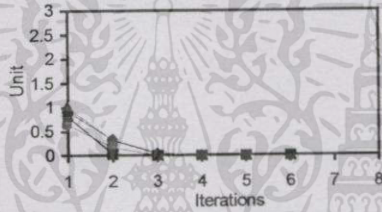


(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

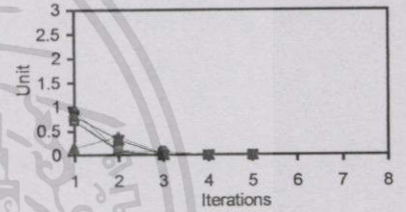
รูปที่ 5.17 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอซี-ดีซี 14 บิต ในแต่ละวิธี



(ก) วิธีซีเควนเชียบล

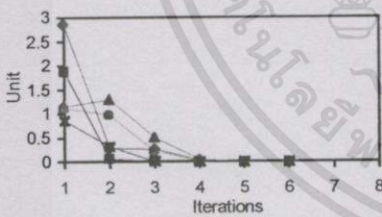


(ข) วิธียูนิไฟด์

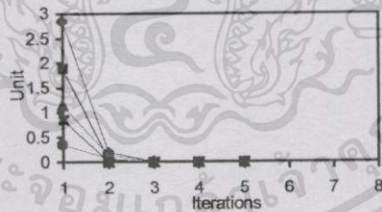


(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

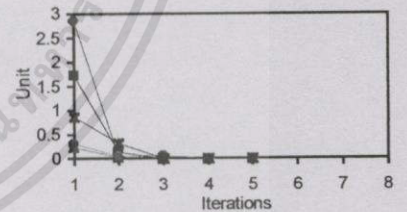
รูปที่ 5.18 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอซี-ดีซี 30 บิต ในแต่ละวิธี



(ก) วิธีซีเควนเชียบล

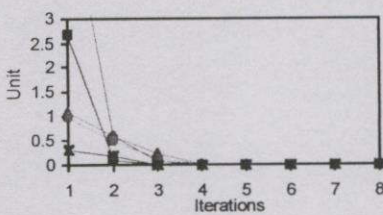


(ข) วิธียูนิไฟด์

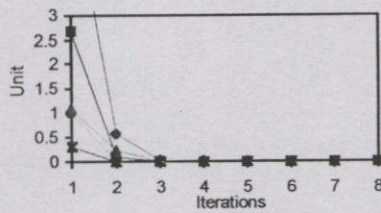


(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

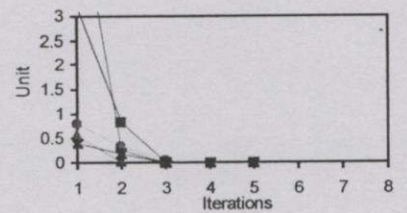
รูปที่ 5.19 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอซี-ดีซี 57 บิต ในแต่ละวิธี



(ก) วิธีซีเควนเชียบล



(ข) วิธียูนิไฟด์



(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

รูปที่ 5.20 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอซี-ดีซี 118 บิต ในแต่ละวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปที่ 5.20 (ก) (ข) และ (ค) ค่ามิสแมตซ์สูงสุดจะมีค่าประมาณ 5.9 ซึ่งอยู่นอกเหนือกรอบของกราฟ เพื่อให้ดูง่ายขึ้นในการเปรียบเทียบค่ามิสแมตซ์ต่างๆในรูปที่ 5.20 กับค่ามิสแมตซ์ต่างๆที่อยู่ในรูปที่ 5.17 – 5.19 จึงได้ทำการลดค่าของแกนตั้งในรูปที่ 5.20 ลงให้เท่ากับรูปอื่นๆ ซึ่งจากรูปที่ 5.17 – 5.20 พบว่าการเข้าสู่หาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส โดยวิธีซีแควนเซียลมีการแกว่งมากกว่าวิธียูนิไฟด์และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ซึ่งทำให้ความน่าเชื่อถือของวิธีการคำนวณโดยวิธีซีแควนเซียลน้อยกว่าวิธีอื่นๆในการทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

#### 5.3.4 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โฟลว์ โดยทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส

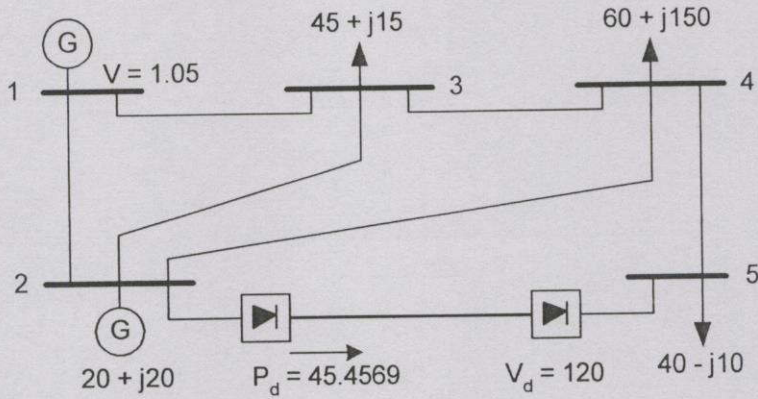
สำหรับการทดสอบ โปรแกรม AC-DC Power Flow โดยทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส จะทำการทดสอบกับระบบเอช-ดีซี 5 บัส และระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 รายละเอียดของระบบทดสอบเอช-ดีซี 5 บัส และระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส

Test Systems	HVDC link	
	From bus	To bus
5 bus	2 (HVDC Gen. bus) fixed $P_{Gi,term}, Q_{Gi,term}$	5 (HVDC load bus)
14 bus	2 (HVDC Gen. bus) fixed $P_{Gi,term},  V_{i,term} $	4 (HVDC load bus)

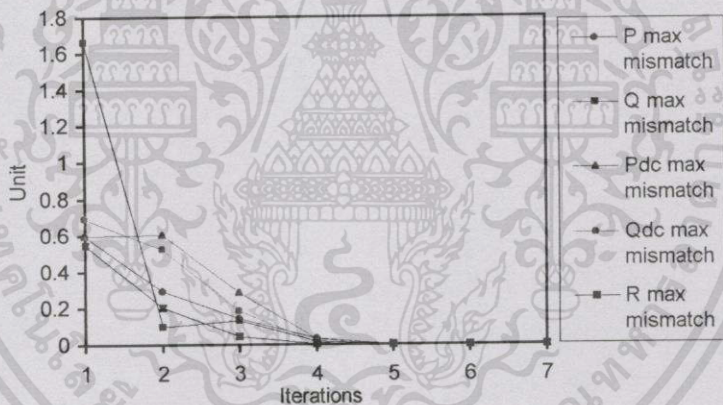
##### 5.3.4.1 เมื่อเจนบัสเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ $P_G$ และ $Q_G$

ระบบทดสอบเอช-ดีซี 5 บัส นี้จะถูกแทนที่ด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 5 ซึ่งบัสที่ 2 เป็น HVDC เจนบัส จาก [12] โดยเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $P_{Gi,term}$  และ ค่าของ  $Q_{Gi,term}$  ส่วนบัสที่ 5 เป็น HVDC โหนดบัส โดยกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC ที่บัส 2 เป็นเครื่องเรียงกระแส และคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC ที่บัส 5 เป็นอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.21 และข้อมูลของระบบ HVDC link แสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ผ.5.2

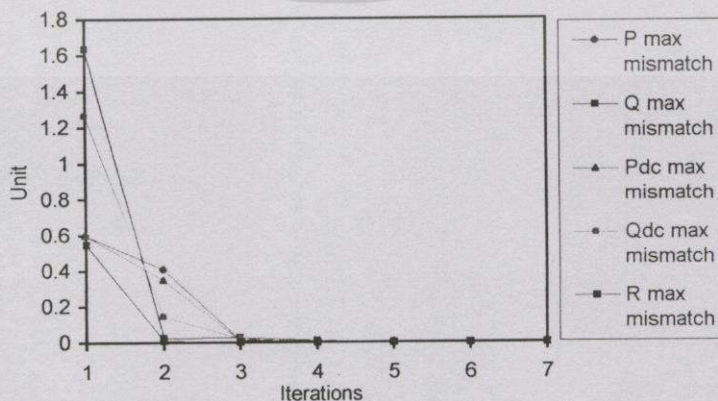


รูปที่ 5.21 ระบบทดสอบเอซี-ดีซี 5 บัส

การทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow ของระบบเอซี-ดีซี 5 บัส จะทำการวิเคราะห์ โดยทำการเปรียบเทียบค่ามismatch ในการหาค่าตอบของวิธีเคเวนเชียด, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน โดยมีค่ามismatch ไม่เกิน 0.001 แสดงในรูปที่ 5.22, 5.23 และ 5.24 ตามลำดับ

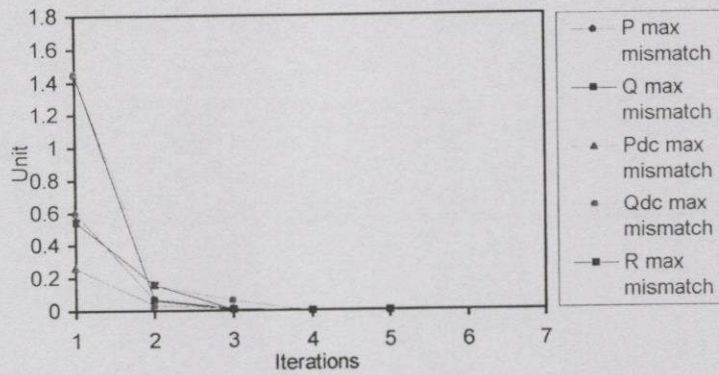


รูปที่ 5.22 การหาค่าคำตอบของวิธีเคเวนเชียด ของระบบเอซี-ดีซี 5 บัส



รูปที่ 5.23 การหาค่าคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของระบบเอซี-ดีซี 5 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของระบบเอชอี-ดีซี 5 บัส

จากรูปที่ 5.22 เมื่อทำการคำนวณ โดยใช้วิธีซีแควนเชียล จะพบว่าการลู่เข้าหาคำตอบเกิดการแกว่งมากที่สุดในส่วนของค่า Pdc max mismatch ในรอบที่ 2 ของการคำนวณ, ในรอบที่ 3 ของค่า Q max mismatch และในรอบที่ 6 และรอบที่ 7 ของค่า R max mismatch โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 7 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 0.22 วินาที, จากรูปที่ 5.23 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธียูนิไฟด์ จะพบว่าการลู่เข้าหาคำตอบเกิดการแกว่งมากที่สุดในส่วนของค่า Q max mismatch ในรอบที่ 3 ของการคำนวณ โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 7 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 0.66 วินาที และจากรูปที่ 5.24 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันจะไม่เกิดการแกว่งในการลู่เข้าหาคำตอบ และใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมดน้อยที่สุดคือจำนวน 5 รอบ เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 0.44 วินาที

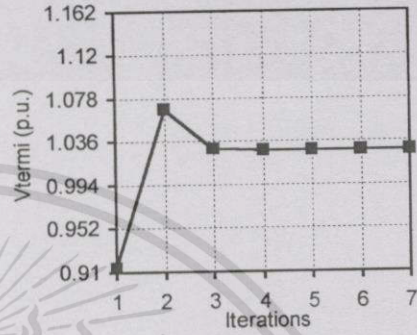
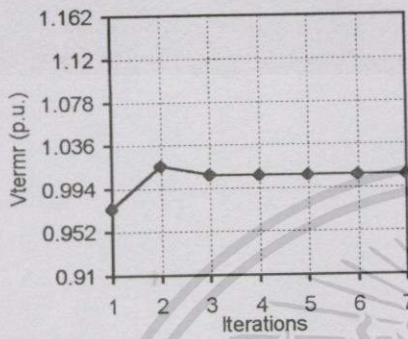
ตารางที่ 5.18 ค่าของจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด

	Sequential method	Unified method	Unified -Newton-Raphson method
Iterations	7	7	5
Run time (s)	0.22	0.66	0.44

ตารางที่ 5.19 ค่าของจำนวนรอบในการคำนวณในแต่ละค่ามิสแมตช์ที่พิจารณา

Mismatch	Sequential method	Unified method	Unified -Newton-Raphson method
P max mismatch	7	7	5
Q max mismatch	6	6	4
Pdc max mismatch	6	6	4
Qdc max mismatch	6	5	4
R max mismatch	5	4	5

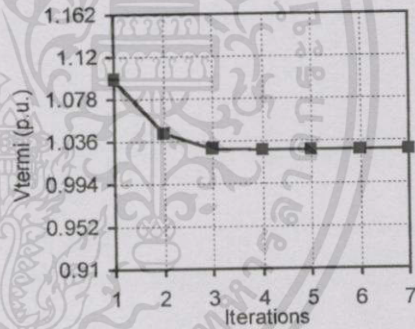
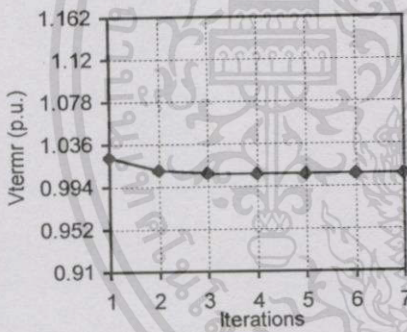
- เมื่อ P max mismatch คือ ค่า  $\Delta P$  สูงสุดในแต่ละรอบของการคำนวณ
- Q max mismatch คือ ค่า  $\Delta Q$  สูงสุดในแต่ละรอบของการคำนวณ
- Pdc max mismatch คือ ค่า  $\Delta P_{term}$  สูงสุดในแต่ละรอบของการคำนวณ
- Qdc max mismatch คือ ค่า  $\Delta Q_{term}$  สูงสุดในแต่ละรอบของการคำนวณ
- R max mismatch คือ ค่า  $R$  สูงสุดในแต่ละรอบของการคำนวณ



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 เริ่มคงที่ในรอบที่ 4

(ข) แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เริ่มคงที่ในรอบที่ 5

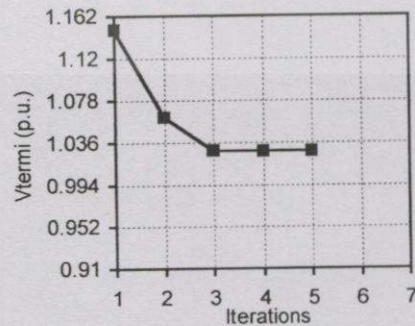
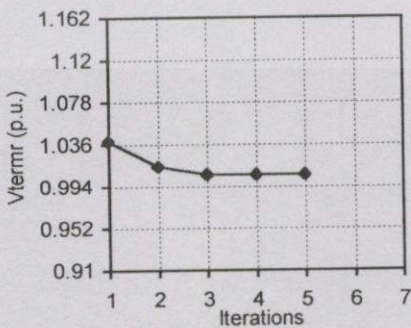
รูปที่ 5.25 การดูเข้าหาค่าตอบของวิธีซีเวนเซิลด์ ของแรงดัน  $V_{term}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 เริ่มคงที่ในรอบที่ 5

(ข) แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เริ่มคงที่ในรอบที่ 6

รูปที่ 5.26 การดูเข้าหาค่าตอบของวิธียูนิไฟด์ ของแรงดัน  $V_{term}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 เริ่มคงที่ในรอบที่ 4

(ข) แรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เริ่มคงที่ในรอบที่ 4

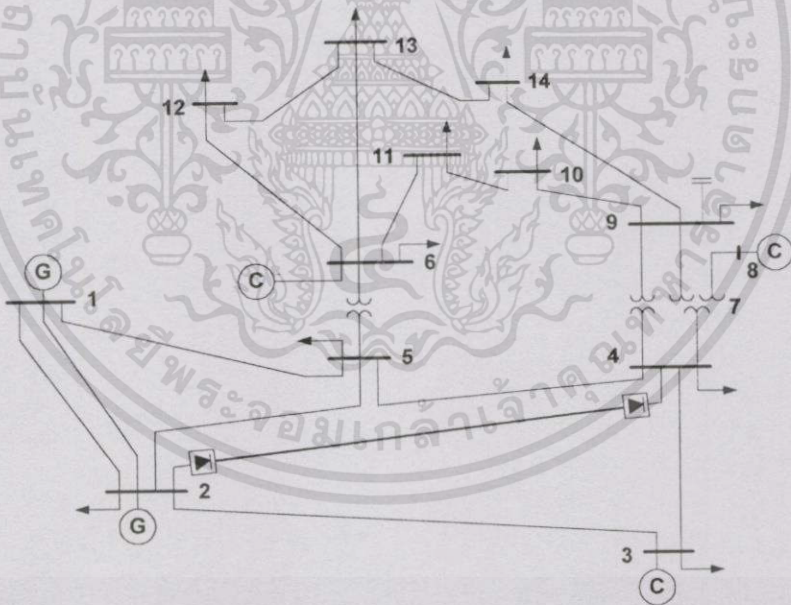
รูปที่ 5.27 การดูเข้าหาค่าตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของแรงดัน  $V_{term}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.25 - 5.27 แสดงให้เห็นการลู่เข้าหาคำตอบในแต่ละวิธีการคำนวณของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 ซึ่งเป็นบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยมีเครื่องเรียงกระแสต่ออยู่ และบัส 5 ซึ่งเป็นบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยมีอินเวอร์เตอร์ต่ออยู่ พบว่าการลู่เข้าหาคำตอบของค่าแรงดันไฟฟ้าของวิธีซีเวนเซิลมีการแกว่งในระหว่างรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ของการคำนวณ ซึ่งที่บัส 2 จะได้ค่าของคำตอบในการคำนวณรอบที่ 4 และที่บัส 5 จะได้ค่าของคำตอบในการคำนวณรอบที่ 5 และสำหรับวิธียูนิไฟด์จะได้อค่าของแรงดันที่บัส 2 ในการคำนวณรอบที่ 5 และที่บัส 5 จะได้อค่าของคำตอบในการคำนวณรอบที่ 6 และสำหรับวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันจะได้อค่าของแรงดันที่บัส 2 และแรงดันที่บัส 5 ในการคำนวณรอบที่ 4 ซึ่งค่าของแรงดันที่บัส 2 และที่บัส 5 มีค่าเท่ากับ 1.0069 p.u. และ 1.0275 p.u. ตามลำดับ การลู่เข้าหาคำตอบของทั้งวิธียูนิไฟด์และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน มีความคล้ายคลึงกัน

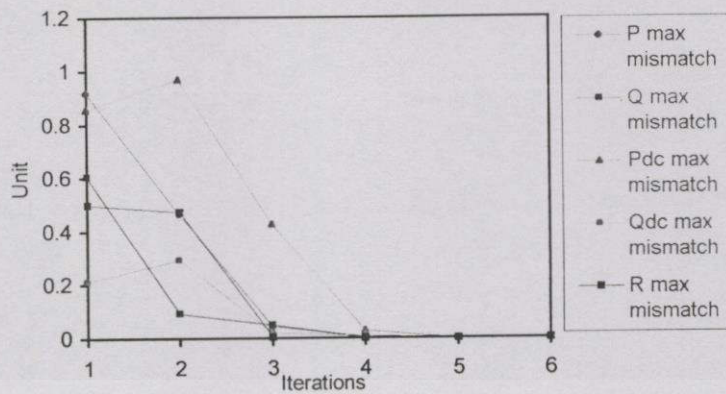
#### 5.3.4.2 เมื่อเจนนบัสเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ $P_G$ และ $|V|$

ระบบทดสอบของ IEEE 14 บัส จะถูกแทนที่ด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 4 ซึ่งบัสที่ 2 เป็น HVDC เจนนบัส โดยเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $P_{G_i,term}$  และ ค่าของ  $|V_{i,term}|$  ส่วนบัสที่ 4 เป็น HVDC โหลดบัส ดังแสดงในรูปที่ 5.28

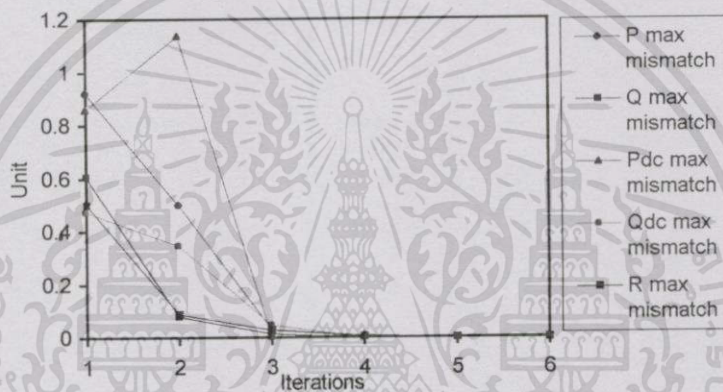


รูปที่ 5.28 ระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 4

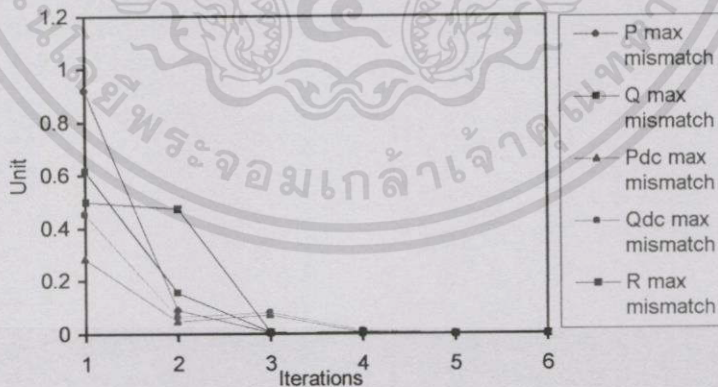
โดยข้อมูลต่างๆของระบบ HVDC ที่ใช้ในการทดสอบของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 4 แสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ผ.5.3



รูปที่ 5.29 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีไล่ควมเชี่ยล ของระบบเอซี-ดีซี 14 บิต



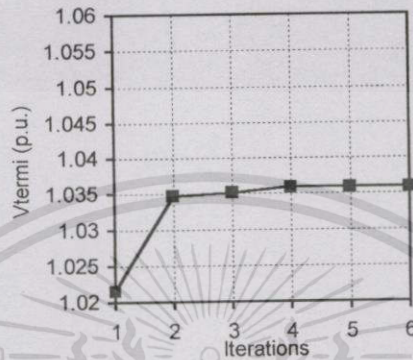
รูปที่ 5.30 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของระบบเอซี-ดีซี 14 บิต



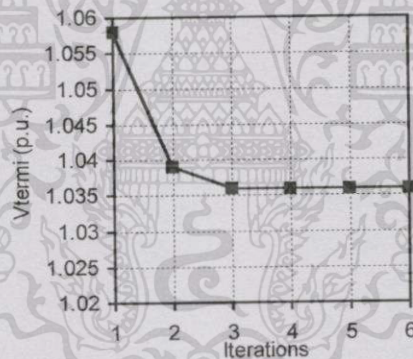
รูปที่ 5.31 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของระบบเอซี-ดีซี 14 บิต

จากรูปที่ 5.29 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธีไล่ควมเชี่ยล การลู่เข้าหาคำตอบเกิดการแกว่งใน ส่วนของค่า Pdc max mismatch, Qdc max mismatch และ R max mismatch โดยใช้จำนวนรอบใน การคำนวณทั้งหมด 6 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 0.66 วินาที, จากรูปที่ 5.30 เมื่อทำการคำนวณ โดยใช้วิธียูนิไฟด์ การลู่เข้าหาคำตอบเกิดการแกว่งมากที่สุดในส่วน of ค่า Pdc max mismatch ใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

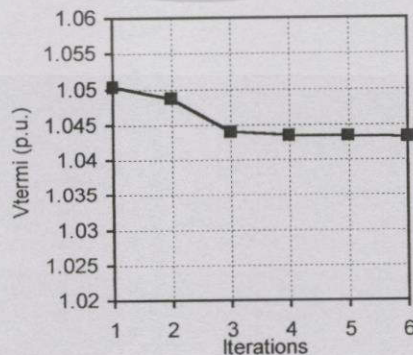
รอบที่ 2 ของการคำนวณ ใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 6 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 1.48 วินาที และจากรูปที่ 5.31 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันจะเกิดการแกว่งในการหาค่าคำตอบในส่วนของคุณค่า R max mismatch และใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 6 รอบเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 2.09 วินาที



รูปที่ 5.32 การหาค่าคำตอบของวิธีเคาน์เตอร์แรงดันของแรงดันบัส 4



รูปที่ 5.33 การหาค่าคำตอบของวิธียูนิไฟด์ของแรงดันบัส 4



รูปที่ 5.34 การหาค่าคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันของแรงดันบัส 4

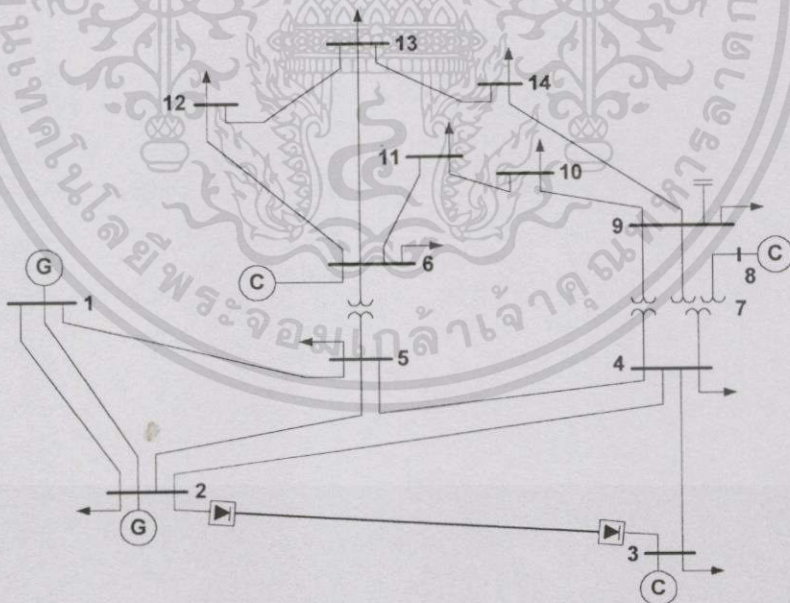
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.32 - 5.34 แสดงให้เห็นการถูเข้าหาคำตอบในแต่ละวิธีการคำนวณของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 ซึ่งเป็น HVDC โหลดบัสโดยมีอินเวอร์เตอร์ต่ออยู่ สำหรับวิธีเชิงเวกเตอร์จะได้ค่าของแรงดันที่บัส 4 ในการคำนวณรอบที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0359 p.u. สำหรับวิธียูนิไฟด์จะได้ค่าของแรงดันที่บัส 4 ในการคำนวณรอบที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0359 p.u. และสำหรับวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันจะได้ค่าของแรงดันที่บัส 4 ในการคำนวณรอบที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0433 p.u.

การถูเข้าหาคำตอบของทั้งวิธียูนิไฟด์และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน มีความคล้ายคลึงกัน โดยในรอบที่ 1 ของการคำนวณค่าของแรงดันจะเริ่มต้นที่ค่าสูงแล้วจึงถูเข้าหาคำตอบ ซึ่งแตกต่างจากวิธีเชิงเวกเตอร์ โดยในรอบที่ 1 ของการคำนวณค่าของแรงดันจะเริ่มต้นจากค่าต่ำแล้วจึงถูเข้าหาคำตอบ สำหรับบัสที่ 2 ซึ่งเป็น HVDC เจนบัสจะไม่แสดงการถูเข้าหาคำตอบของแรงดันที่บัส เนื่องจากว่าบัสนี้เป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของแรงดัน โดยมีค่าของแรงดันคงที่เท่ากับ 1.045 p.u.

### 5.3.5 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์ฟลว์ โดยทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส

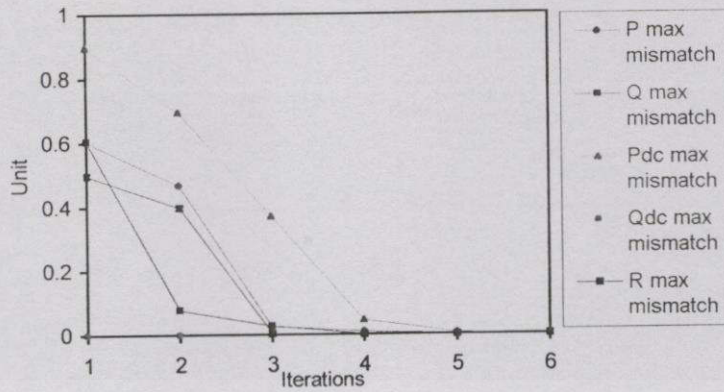
ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส จะถูกแทนที่ด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3 ซึ่งบัสที่ 2 เป็น HVDC เจนบัส โดยเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $P_{G_i,term}$  และ ค่าของ  $|V_{i,term}|$  ส่วนบัสที่ 3 เป็น HVDC เจนบัส โดยเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $|V_{i,term}|$  ดังแสดงในรูปที่ 5.35



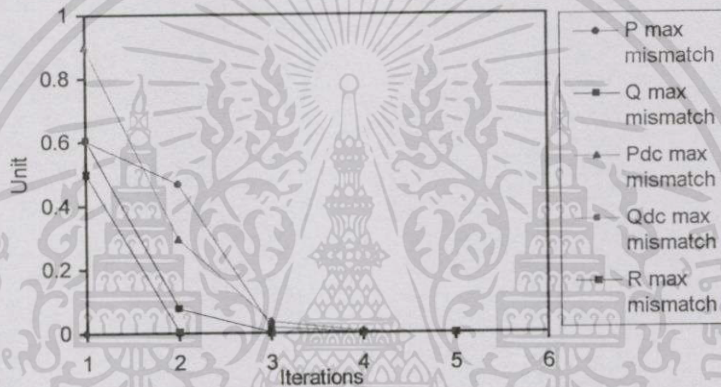
รูปที่ 5.35 ระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3

โดยข้อมูลต่างๆของระบบ HVDC ที่ใช้ในการทดสอบของระบบเอช-ดีซี 14 บัส จะเหมือนกับข้อมูลของระบบ 14 บัส ในหัวข้อ 5.3.4 จากภาคผนวก ก. ตารางที่ ผ.5.3 แต่จะเปลี่ยนแปลงค่า  $P_d$  ที่บัส 2 มีค่าเท่ากับ 73.1881 MW และ  $R_d$  มีค่าเท่ากับ 0.04699 p.u.

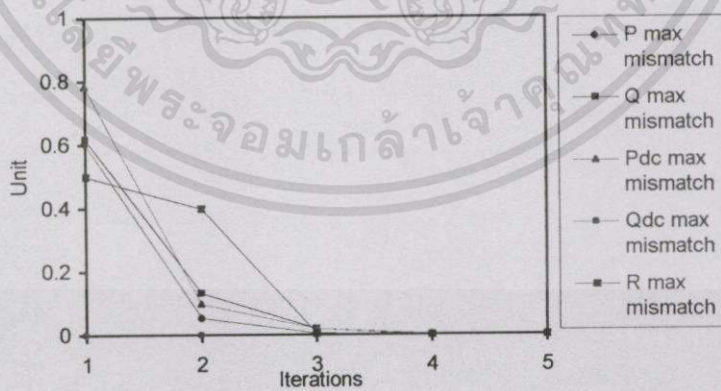
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีซีเวนเซียด ของระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส



รูปที่ 5.37 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์ ของระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส



รูปที่ 5.38 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ของระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส

จากรูปที่ 5.36 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธีซีเวนเซียด การลู่เข้าหาคำตอบเกิดการแกว่งใน ส่วนของค่า P max mismatch และ R max mismatch โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 6 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 0.77 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.37 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธียูนิไฟด์ การลู่เข้าหาคำตอบเกิดการแกว่งมากที่สุดในส่วนของค่า P max mismatch ในรอบที่ 2 ของการคำนวณ โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 5 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 0.93 วินาที

จากรูปที่ 5.38 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันจะเกิดการแกว่งในการลู่เข้าหาคำตอบในส่วนของค่า R max mismatch ในรอบที่ 2 ของการคำนวณและใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 5 รอบเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 1.76 วินาที

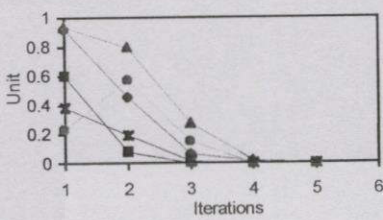
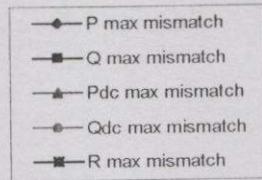
### 5.3.6 การทดสอบโปรแกรมเอช-ดีซีเพาเวอร์โฟลว์ เมื่อทำการพิจารณาการควบคุมของระบบ HVDC

การทดสอบโปรแกรม AC-DC Power Flow เมื่อทำการพิจารณาการควบคุมของระบบ HVDC จะใช้กับระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในหัวข้อที่ 5.3.3 โดยทำการเปรียบเทียบจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละแบบของการควบคุมในระบบ HVDC ของวิธีซีเคเวนเชี่ยล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ที่มีค่ามีสแอมต์ซ์ไม่เกิน 0.001 ซึ่งแสดงผลการทดสอบของจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณในตารางที่ 5.20

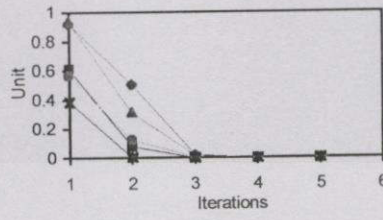
ตารางที่ 5.20 ค่าของจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของทั้ง 8 โหมคของการควบคุม

Case specification	Sequential method		Unified method		Unified-Newton-Raphson method	
	Iterations	Time (s)	Iterations	Time (s)	Iterations	Time (s)
1 $\alpha_r P_{dr} \gamma_i V_{di}$	5	0.44	5	0.82	5	1.26
2 $\alpha_r P_{dr} a_i V_{di}$	6	0.55	5	0.82	5	1.26
3 $a_r P_{dr} a_i V_{di}$	6	0.55	5	0.82	5	1.26
4 $a_r P_{dr} \gamma_i V_{di}$	6	0.55	5	0.82	5	1.26
5 $a_r P_{dr} \gamma_i a_i$	6	0.55	5	0.82	5	1.26
6 $a_r P_{dr} \alpha_r \gamma_i$	5	0.44	5	0.82	5	1.26
7 $\alpha_r I_d \gamma_i V_{di}$	5	0.44	5	0.82	4	0.99
8 $\alpha_r V_{dr} \gamma_i P_{di}$	6	0.55	5	0.82	5	1.26

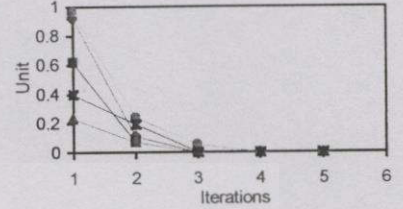
จากตารางที่ 5.20 จะพบว่าวิธีซีเคเวนเชี่ยลใช้จำนวนรอบทั้งหมดในการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5.625 รอบ และใช้เวลาทั้งหมดในการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.5088 วินาที, วิธียูนิไฟด์ใช้จำนวนรอบทั้งหมดในการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5 รอบและใช้เวลาทั้งหมดในการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 วินาที และสำหรับวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสันใช้จำนวนรอบทั้งหมดในการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.875 รอบ และใช้เวลาทั้งหมดในการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.2263 วินาที



(ก) วิธีซีเควนเซี่ยล

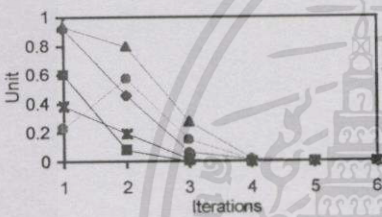


(ข) วิธียูนิไฟด์

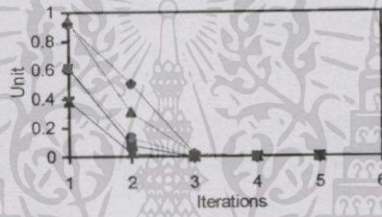


(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

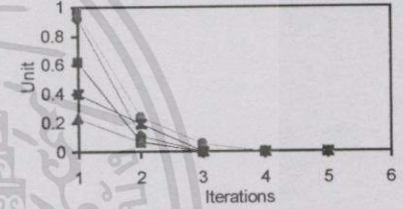
รูปที่ 5.39 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 1



(ก) วิธีซีเควนเซี่ยล

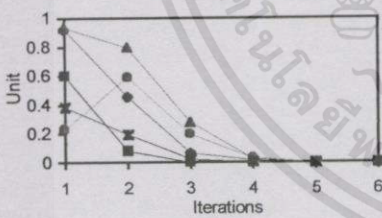


(ข) วิธียูนิไฟด์

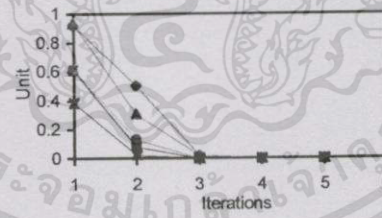


(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

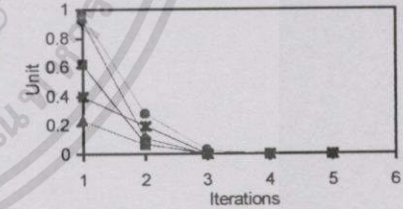
รูปที่ 5.40 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 2



(ก) วิธีซีเควนเซี่ยล

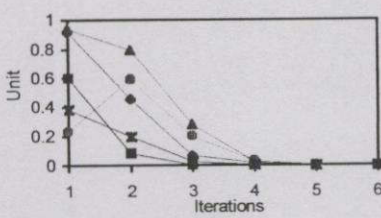


(ข) วิธียูนิไฟด์

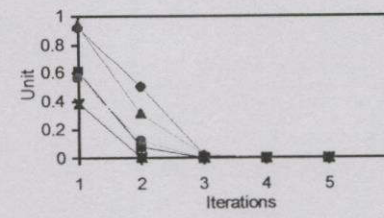


(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

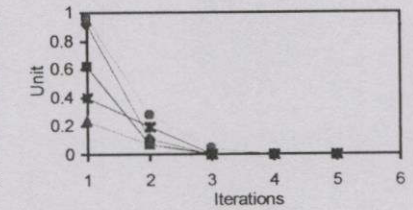
รูปที่ 5.41 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 3



(ก) วิธีซีเควนเซี่ยล



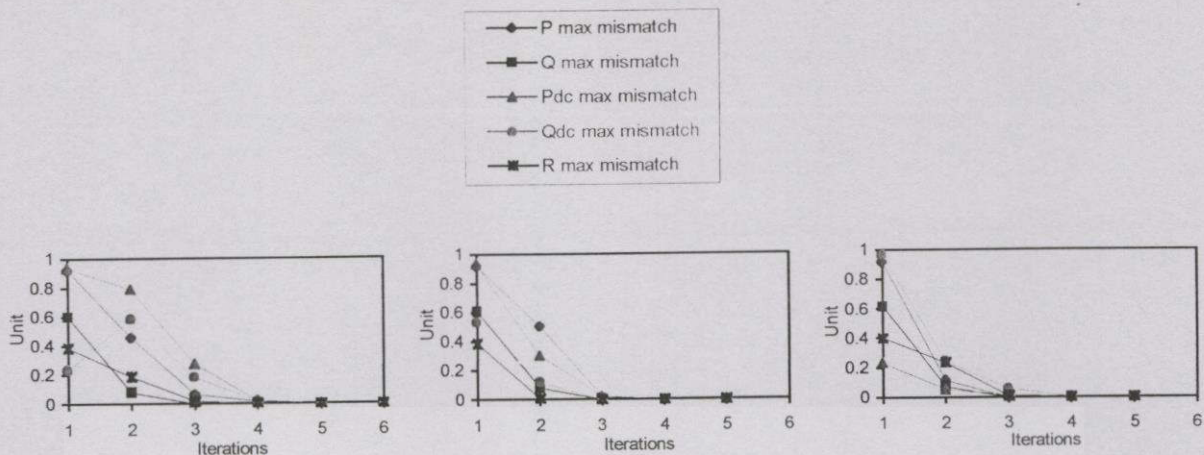
(ข) วิธียูนิไฟด์



(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

รูปที่ 5.42 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

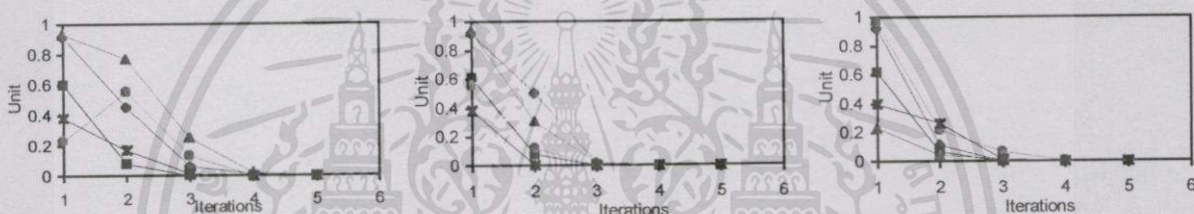


(ก) วิธีซีแควนเซียล

(ข) วิธียูนิไฟด์

(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

รูปที่ 5.43 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 5

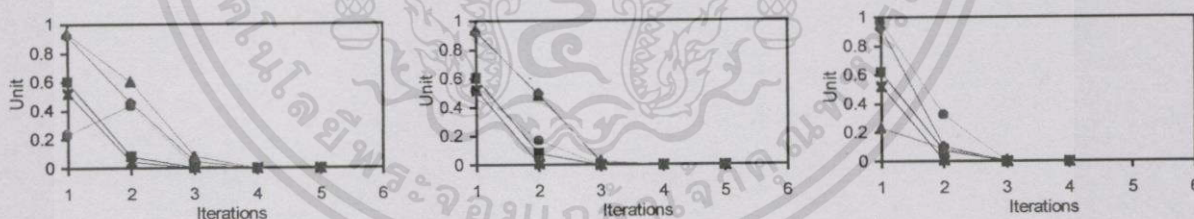


(ก) วิธีซีแควนเซียล

(ข) วิธียูนิไฟด์

(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

รูปที่ 5.44 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 6

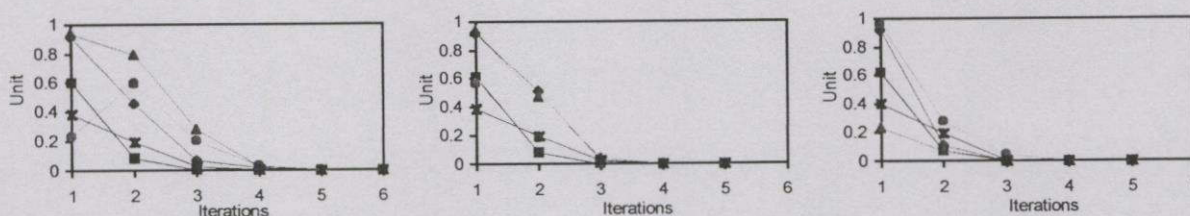


(ก) วิธีซีแควนเซียล

(ข) วิธียูนิไฟด์

(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

รูปที่ 5.45 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 7



(ก) วิธีซีแควนเซียล

(ข) วิธียูนิไฟด์

(ค) วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน

รูปที่ 5.46 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส ในแต่ละวิธี ของโหมดที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี

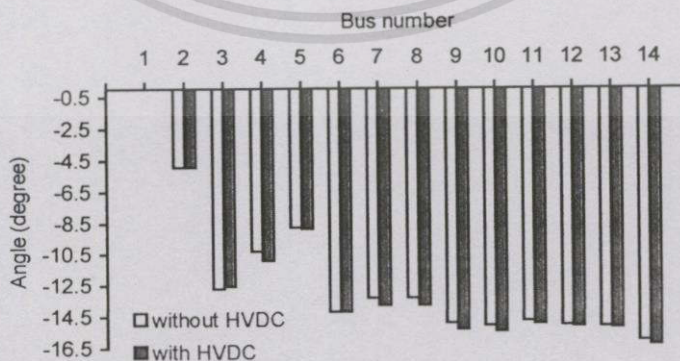
ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีจะทำการวิเคราะห์กับระบบเอซี-ดีซี 14 บัส โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 หัวข้อ คือ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส, การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส, การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส และการวิเคราะห์โดยรวมของระบบ HVDC

### 5.4.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส จะได้ค่าของแรงดันที่บัส ดังแสดงในรูปที่ 5.47 และ 5.48

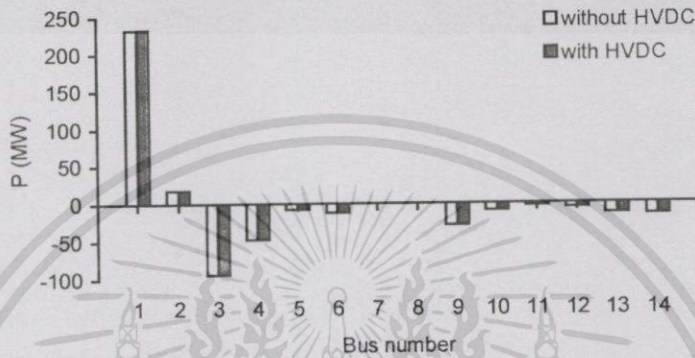


รูปที่ 5.47 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

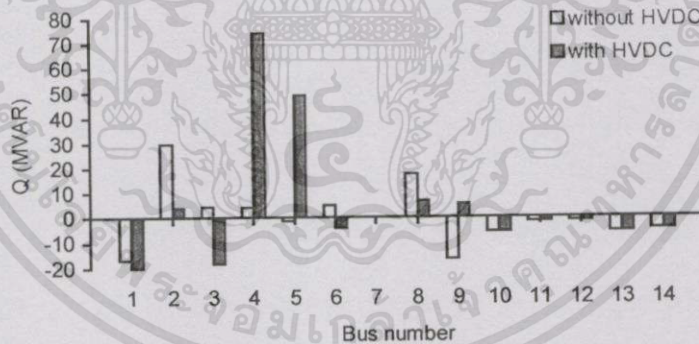


รูปที่ 5.48 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

จากการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีและมีระบบ HVDC ค่าของแรงดันที่บัสจะมีการเปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 5.47 และ 5.48 ซึ่งจากรูปที่ 5.47 จะพบว่าภายหลังจากการติดตั้งระบบ HVDC ค่าขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆจะมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะที่บัส 4 ก่อนติดตั้ง ค่าแรงดันที่ บัส 4 เท่ากับ 1.019 p.u. และหลังจากติดตั้งค่าแรงดันที่บัส 4 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.057 p.u. สำหรับรูปที่ 5.48 ภายหลังจากการติดตั้งระบบ HVDC ค่ามุมของแรงดันที่บัสต่างๆจะมีค่าลดลง



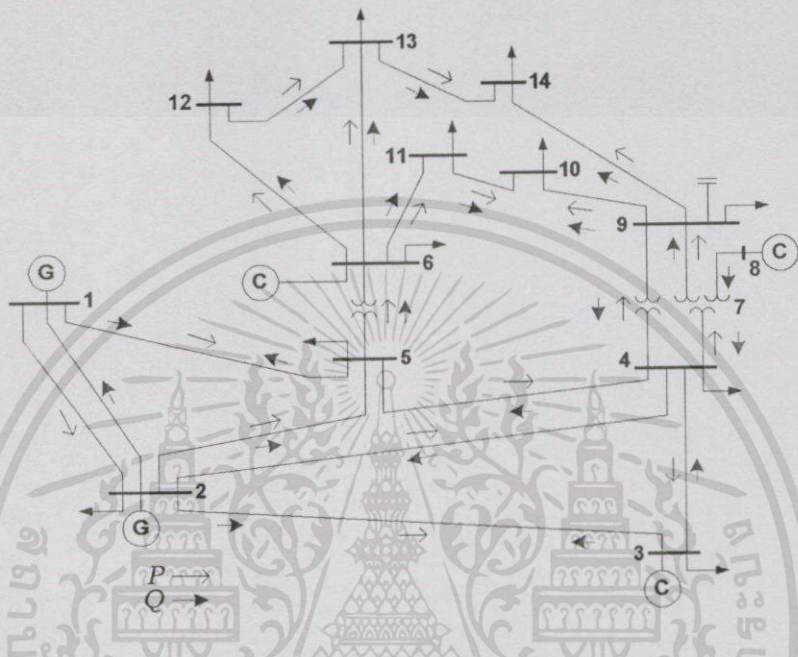
รูปที่ 5.49 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส



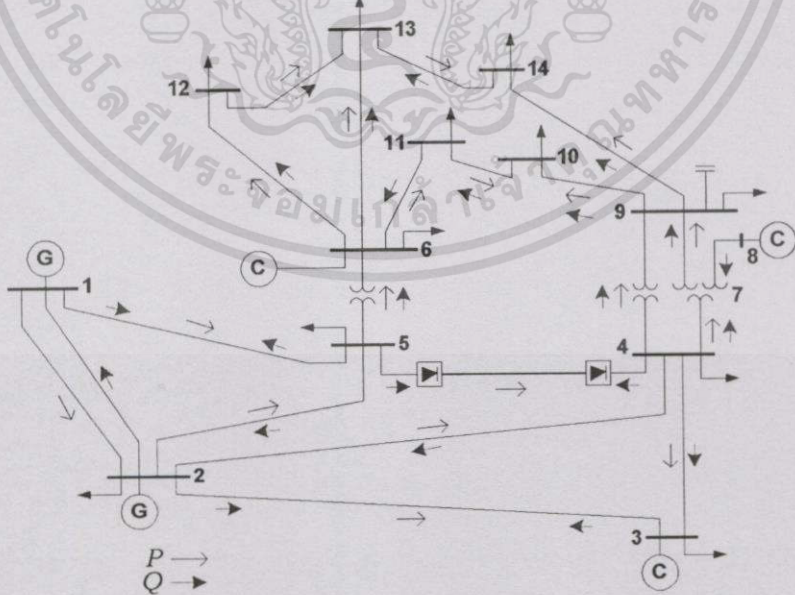
รูปที่ 5.50 ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

จากรูปที่ 5.49 และรูปที่ 5.50 ค่าของ  $P$  ในระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และทิศทางการไหลของ  $P$  จะมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับเมื่อไม่มีหรือมีระบบ HVDC ส่วนค่า  $Q$  ในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากทั้งขนาดและทิศทางการไหล เนื่องจากว่าเมื่อทำการติดตั้งระบบ HVDC เข้าไปในระบบระหว่างบัส 4 กับบัส 5 ก็จะทำให้การติดตั้งฟิวเจอร์ที่บัสเหล่านี้ด้วยซึ่งจะจ่ายค่า  $Q$  ให้กับคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC แต่เนื่องจากว่าฟิวเจอร์เหล่านี้จ่ายค่า  $Q$  ลงที่ โดยไม่มีการควบคุมจึงทำให้  $Q$  ที่เหลือจะไปช่วยจ่ายให้กับบัสอื่นๆในระบบซึ่งจะทำให้ทั้งขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทิศทางการไหลของ  $Q$  เปลี่ยนไป และยังมีผลทำให้ระดับของแรงดันที่บัสต่างๆมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่า  $P$  และ  $Q$  ที่บัสต่างๆในระบบมีค่าเป็นบวกแสดงถึงค่า  $P$  หรือ  $Q$  ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่ามากกว่าที่รับเข้ามาและเป็นลบแสดงถึงค่า  $P$  หรือ  $Q$  ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่าน้อยกว่าที่รับเข้ามา สำหรับทิศทางการไหลของกำลังไฟแสดงในรูปที่ 5.51 และรูปที่ 5.52



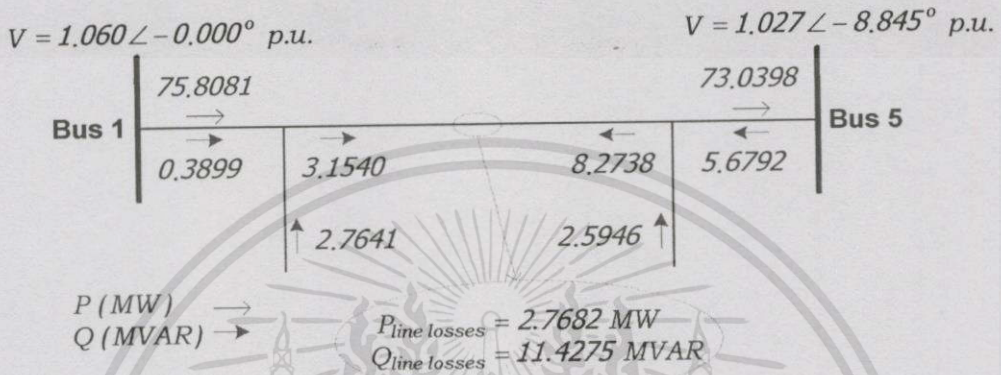
รูปที่ 5.51 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 บัส



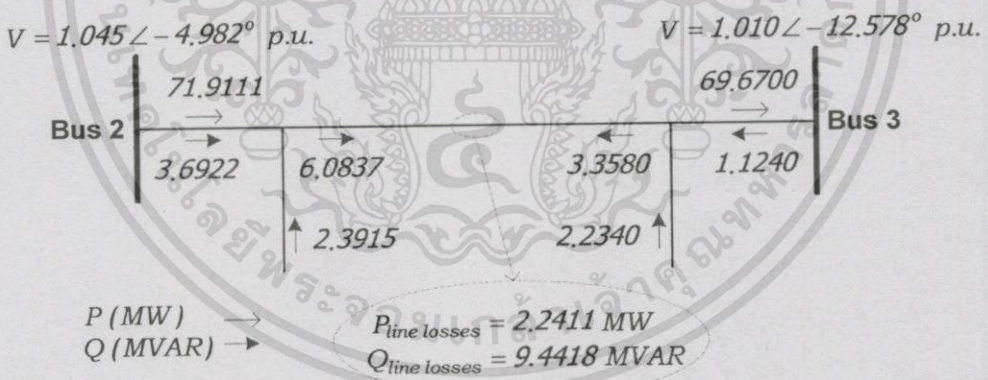
รูปที่ 5.52 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอชวีดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปที่ 5.51 แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 บัส และรูปที่ 5.52 แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส พบว่าทิศทางการไหลของพลังงาน โดยเฉพาะทิศทางการไหลของ Q ระหว่างบัสที่ 2-5, บัสที่ 3-4, บัสที่ 4-5, บัสที่ 4-7, บัสที่ 4-9, บัสที่ 6-11, บัสที่ 10-11 และบัสที่ 13-14 จะเปลี่ยนไป

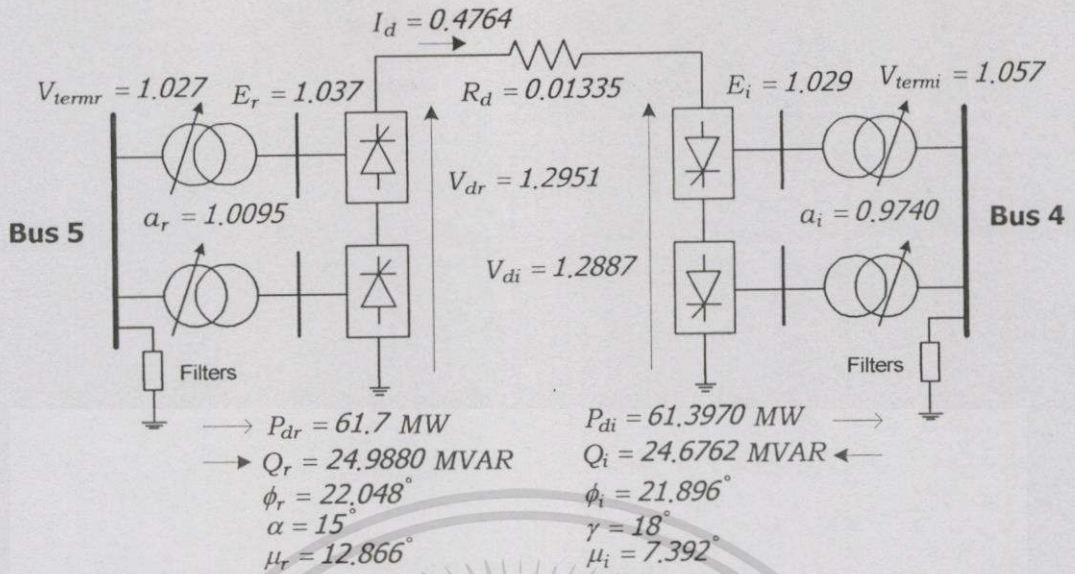


รูปที่ 5.53 การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 กับบัส 5 ของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

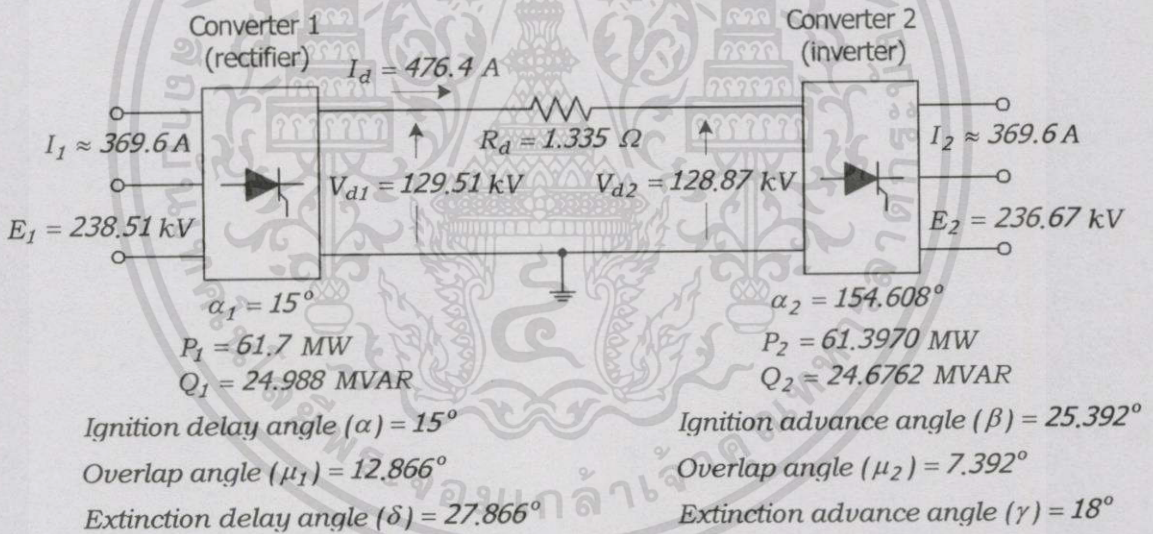


รูปที่ 5.54 การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 2 กับบัส 3 ของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

รูปที่ 5.53 และรูปที่ 5.54 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 กับบัส 5 และบัส 2 กับบัส 3 ของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส ตามลำดับ เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส เนื่องจากว่าทิศทางการไหลของ Q จะไหลจากทั้งสองบัสที่เชื่อมต่อกันอยู่เข้ามา เกิดเป็นความสูญเสียของกำลังไฟฟ้านี้ที่กึ่งกลางสายส่ง ซึ่งเกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้นเหมือนกับการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 บัส จากรูปที่ 5.52



รูปที่ 5.55 การโพล์ของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 4 กับบัส 5 ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

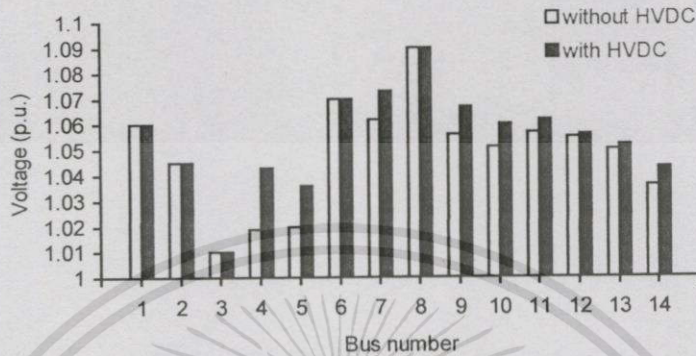


รูปที่ 5.56 การโพล์ของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 4 กับบัส 5 โดยทำการแปลงเป็นค่าจริง ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส

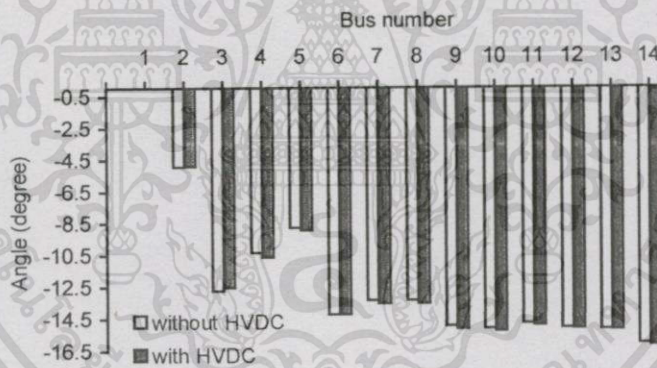
รูปที่ 5.55 และรูปที่ 5.56 แสดงการโพล์ของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 4 กับบัส 5 ของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับโหนดบัส โดยรูปที่ 5.55 จะแสดงเป็นค่าต่อหน่วยและรูปที่ 5.56 จะแสดงเป็นค่าจริง สำหรับทิศทางการโพล์ของ P จะโพล์จากบัสที่ 5 ไปยังบัสที่ 4 และทิศทางการโพล์ของ Q จะโพล์จากบัสเข้าไปยังคอนเวอร์เตอร์ในแต่ละด้านของระบบ HVDC เนื่องจากว่าคอนเวอร์เตอร์จะดูดซับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ [1]

#### 5.4.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส

เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส จะได้ค่าของแรงดันที่บัส ดังแสดงในรูปที่ 5.57 และ 5.58

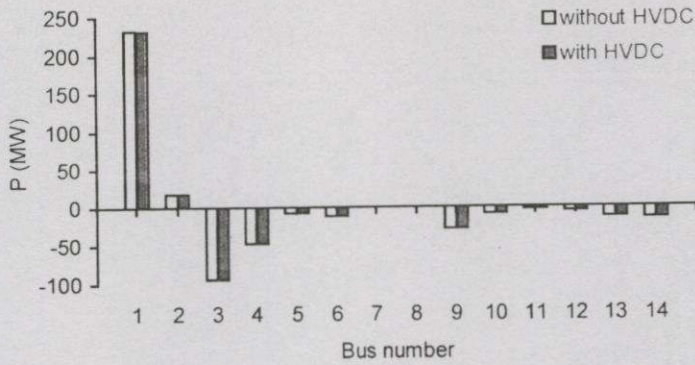


รูปที่ 5.57 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส

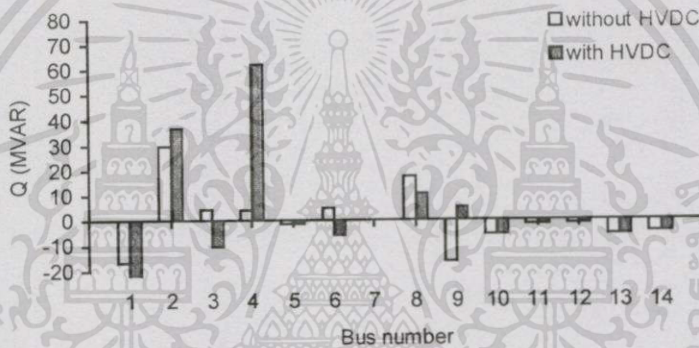


รูปที่ 5.58 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส

จากการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีและมีระบบ HVDC ค่าของแรงดันที่บัสจะมีการเปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 5.57 และ 5.58 ซึ่งจากรูปที่ 5.57 จะพบว่าภายหลังจากการติดตั้งระบบ HVDC ค่าขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆจะมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะที่บัส 4 ก่อนติดตั้ง ค่าแรงดันที่บัส 4 เท่ากับ 1.019 p.u. และหลังจากติดตั้งค่าแรงดันที่บัส 4 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.043 p.u. สำหรับรูปที่ 5.58 ภายหลังจากการติดตั้งระบบ HVDC โดยส่วนมากค่ามุมของแรงดันที่บัสต่างๆจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย



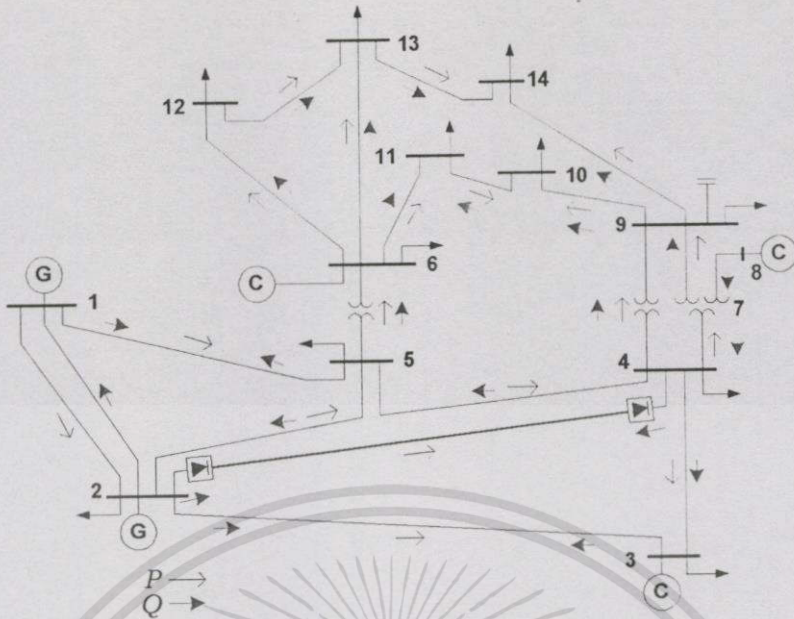
รูปที่ 5.59 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส



รูปที่ 5.60 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส

จากรูปที่ 5.59 และรูปที่ 5.60 ค่าของ  $P$  ในระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และทิศทางการไหลของ  $P$  จะมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับเมื่อไม่มีหรือมีระบบ HVDC ส่วนค่า  $Q$  ในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากทั้งขนาดและทิศทางการไหล ซึ่งมีผลทำให้ระดับของแรงดันที่บัสต่างๆมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่า  $P$  และ  $Q$  ที่บัสต่างๆในระบบมีค่าเป็นบวกแสดงถึงค่า  $P$  หรือ  $Q$  ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่ามากกว่าที่รับเข้ามาและเป็นลบแสดงถึงค่า  $P$  หรือ  $Q$  ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่าน้อยกว่าที่รับเข้ามา

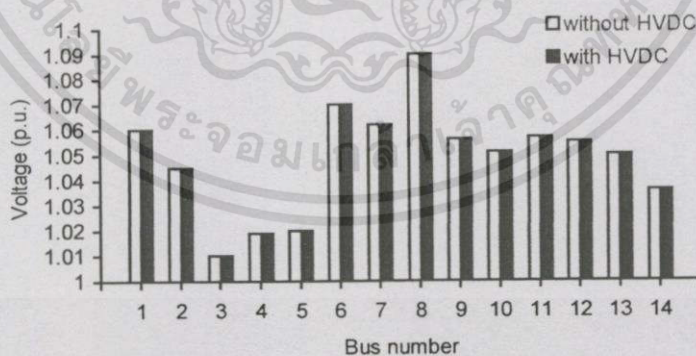
สำหรับรูปที่ 5.61 แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส พบว่าทิศทางการไหลของพลังงาน โดยเฉพาะทิศทางการไหลของ  $Q$  ระหว่างบัสที่ 2-4, บัสที่ 2-5, บัสที่ 3-4, บัสที่ 4-9 และ บัสที่ 10-11 จะมีทิศทางเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.61 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหนดบัสกับเจนบัส

#### 5.4.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส

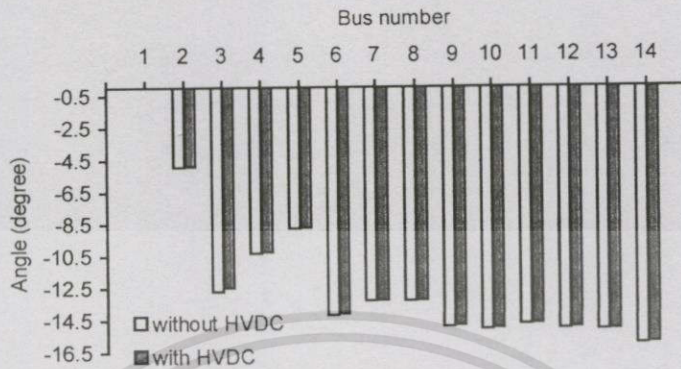
เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส จะได้ค่าของแรงดันที่บัส ดังแสดงในรูปที่ 5.62 และ 5.63



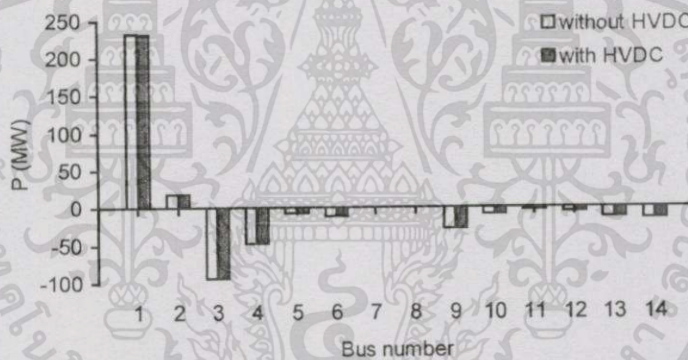
รูปที่ 5.62 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส

จากการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีและมีระบบ HVDC ค่าขนาดของแรงดันที่บัสจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 5.62 เนื่องจากได้ทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัสซึ่งเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าขนาดของแรงดัน จึงทำให้ขนาดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

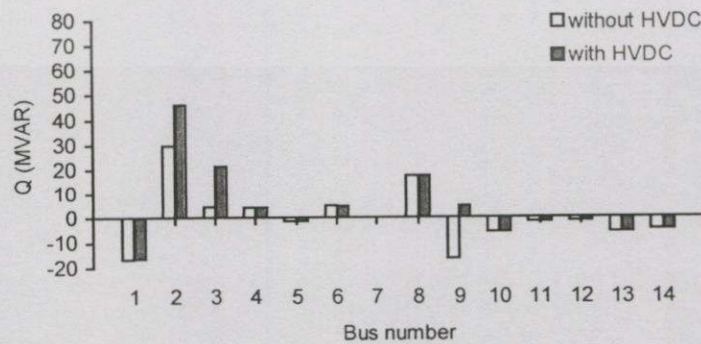
แรงดันที่บัสต่างๆในระบบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และรูปที่ 5.63 จะพบว่าภายหลังจากการติดตั้งระบบ HVDC ค่ามุมของแรงดันที่บัสต่างๆจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 5.63 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส



รูปที่ 5.64 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส



รูปที่ 5.65 ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.64 และรูปที่ 5.65 ค่าของ  $P$  ในระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และทิศทางการไหลของ  $P$  จะมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับเมื่อไม่มีหรือมีระบบ HVDC ส่วนค่า  $Q$  ในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางการไหล

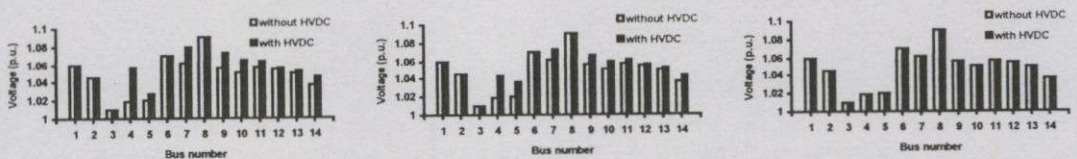
สำหรับรูปที่ 5.66 แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส พบว่าทิศทางการไหลของพลังงานมีทิศทางเหมือนกับระบบ IEEE 14 บัส นั่นคือมีทิศทางเหมือนเดิม



รูปที่ 5.66 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส

#### 5.4.4 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีโดยรวม

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.4.1 – 5.4.3 เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกัน สามารถแสดงในรูปที่ 5.67 – 5.71 ดังนี้



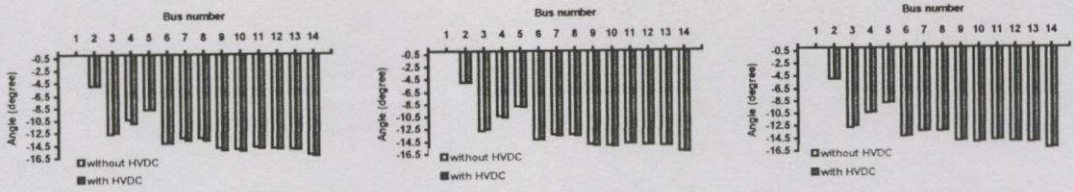
(ก) โหลดบัส-โหลดบัส

(ข) โหลดบัส-เจนบัส

(ค) เจนบัส-เจนบัส

รูปที่ 5.67 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ

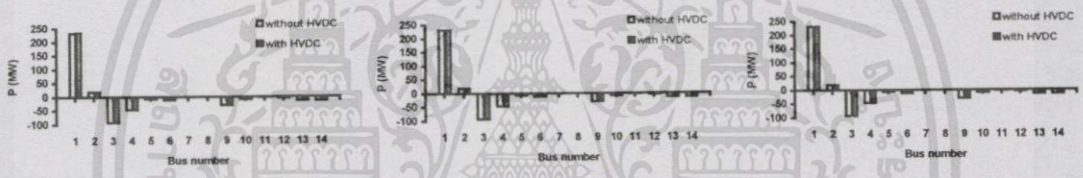
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โหลดบัส-โหลดบัส      (ข) โหลดบัส-เจนบัส      (ค) เจนบัส-เจนบัส

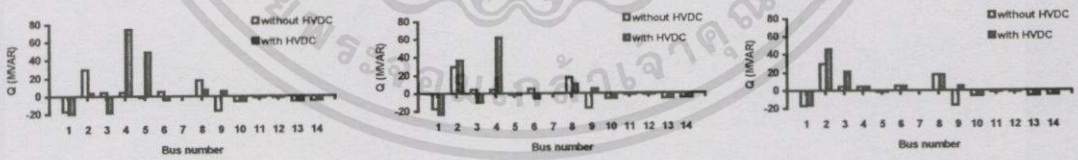
รูปที่ 5.68 ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ

รูปที่ 5.67 แสดงค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ พบว่าค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างเจนบัสกับเจนบัส สำหรับรูปที่ 5.68 แสดงค่ามุมของแรงดันไฟฟ้า พบว่าค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆมีค่าเปลี่ยนแปลงดังรูป



(ก) โหลดบัส-โหลดบัส      (ข) โหลดบัส-เจนบัส      (ค) เจนบัส-เจนบัส

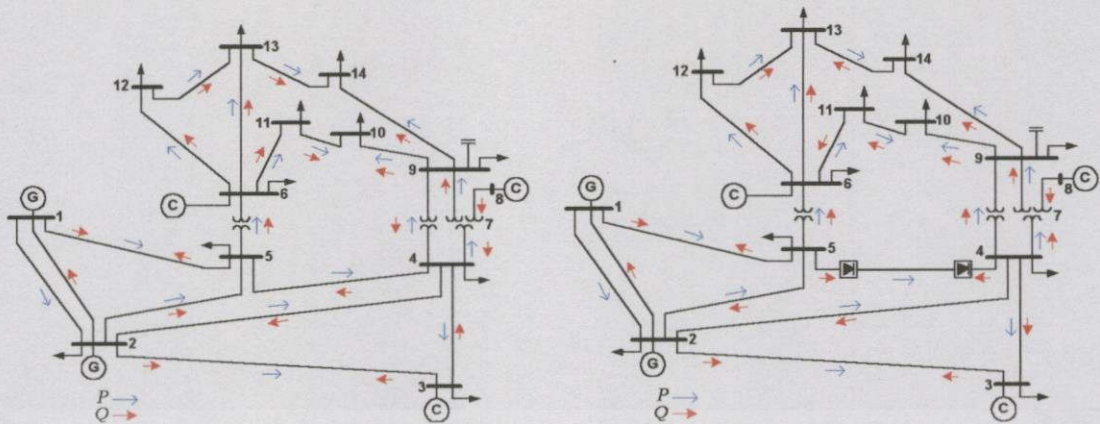
รูปที่ 5.69 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ



(ก) โหลดบัส-โหลดบัส      (ข) โหลดบัส-เจนบัส      (ค) เจนบัส-เจนบัส

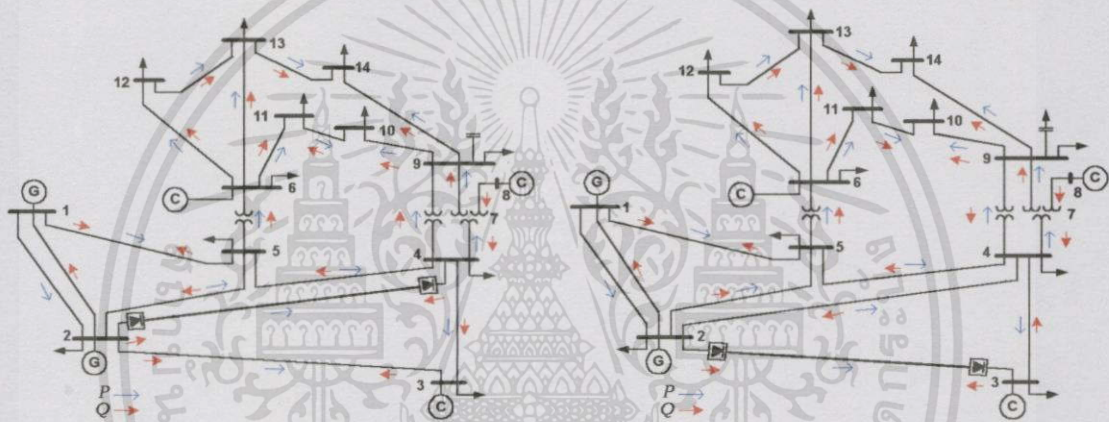
รูปที่ 5.70 ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ

รูปที่ 5.69 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบเอช-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย สำหรับรูปที่ 5.70 แสดงค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสต่างๆ พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงมากโดยเฉพาะเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหลดบัสกับโหลดบัส



(ก) ระบบ IEEE 14 บัส

(ข) ระบบเอซี-ดีซี 14 บัส (โหลดบัส-โหลดบัส)



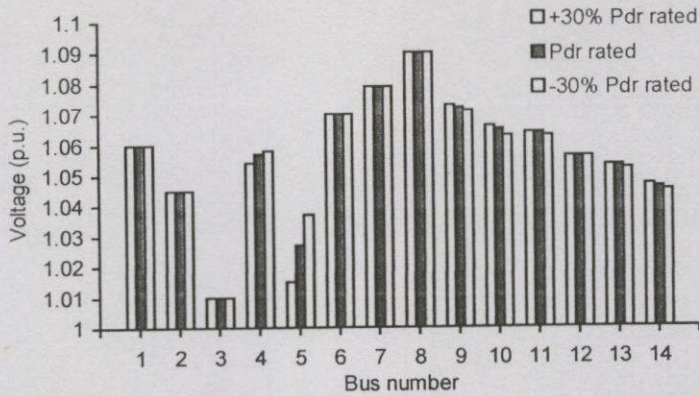
(ค) ระบบเอซี-ดีซี 14 บัส (โหลดบัส-เจนบัส)

(ง) ระบบเอซี-ดีซี 14 บัส (เจนบัส-เจนบัส)

รูปที่ 5.71 การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ เทียบกับระบบ IEEE 14 บัส

รูปที่ 5.71 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบเอซี-ดีซี 14 บัส เมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างบัสประเภทต่างๆ เทียบกับระบบ IEEE 14 บัส พบว่าทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC ระหว่างโหลดบัสกับโหลดบัส

เมื่อทำการเพิ่มและลดพิกัดของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ HVDC  $\pm 30\%$  โดยที่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆคงที่จะทำให้แรงดันที่บัส 4 และ บัส 5 ลดลง แต่ว่าจะมีผลทำให้แรงดันที่บัส 9, 10, 11, 13 และบัส 14 มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.72

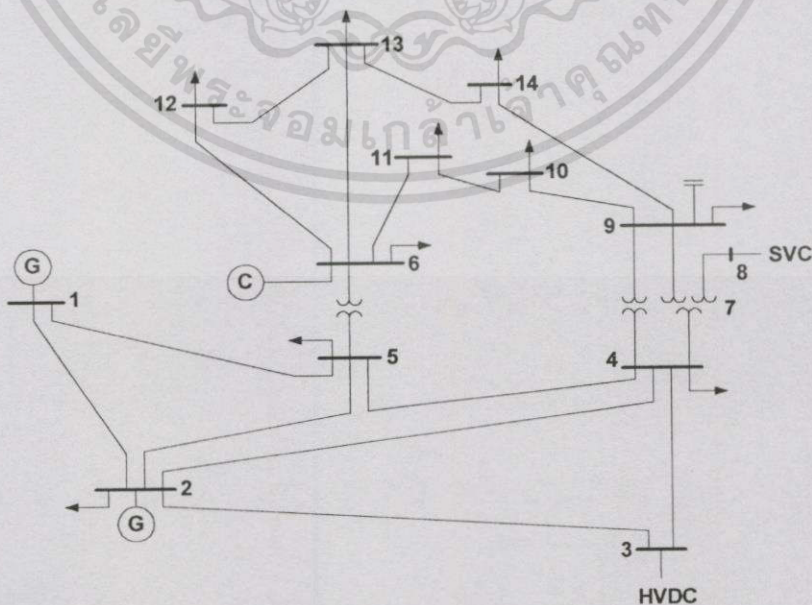


รูปที่ 5.72 ระดับของแรงดันที่พิกัดต่างๆของระบบ HVDC

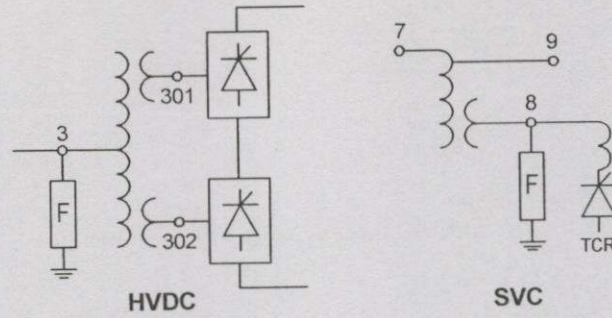
### 5.5 การทดสอบโปรแกรมการสแกนความถี่ด้วยระบบทดสอบ IEEE

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรม Frequency Scan Analysis (FSA) ขึ้นมา โดยอาศัยแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งจะได้ทำการทดสอบกับระบบของ IEEE TF 14 บัส [29] ที่ปรับปรุงมาจาก [30] โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่บัส 3 และบัส 8 ซึ่งที่บัส 3 จะเป็นจุดเชื่อมต่อกับระบบ HVDC 12-พัลส์ ที่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่ 11 ต่ออยู่ และที่บัส 8 จะทำการติดตั้ง Static Var Compensator (SVC) ที่ประกอบไปด้วย Thyristor-Controlled Reactor (TCR) และเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่ 2, 5, 7, 11 ดังแสดงในรูปที่ 5.73 และ 5.74

ในการคำนวณจะทำการสแกนความถี่ที่บัส 3 และบัส 8 โดยให้ HVDC ที่บัส 3 และ SVC ที่บัส 8 เป็นโหลด เพราะฉะนั้นในขั้นตอนของการสแกนความถี่จะทำการเปิดวงจรอุปกรณ์ดังกล่าว

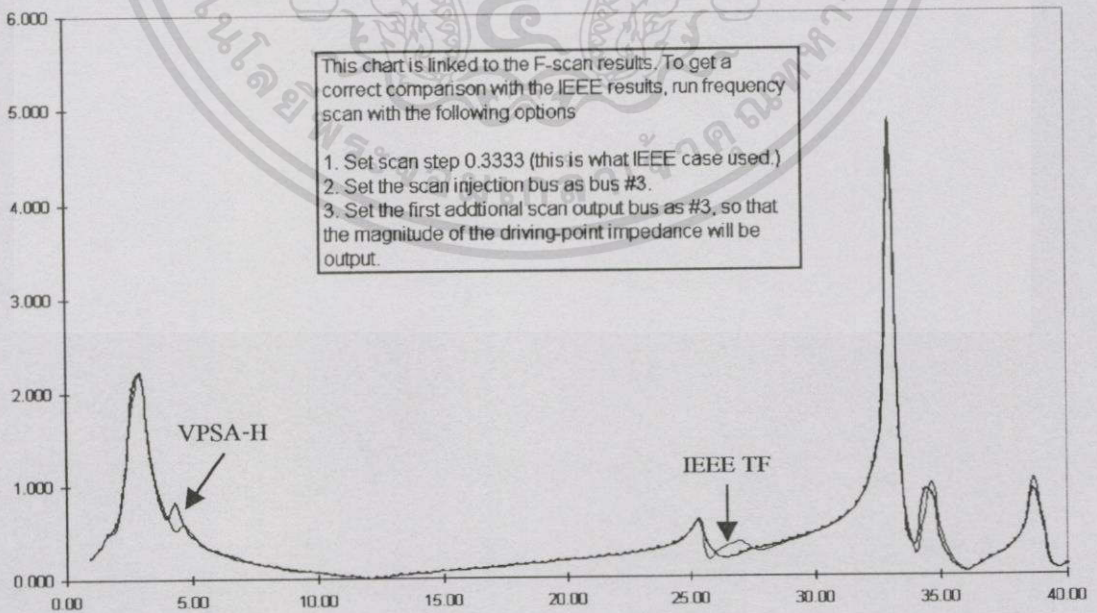


รูปที่ 5.73 ระบบทดสอบ 14 บัส ที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรม Frequency Scan Analysis



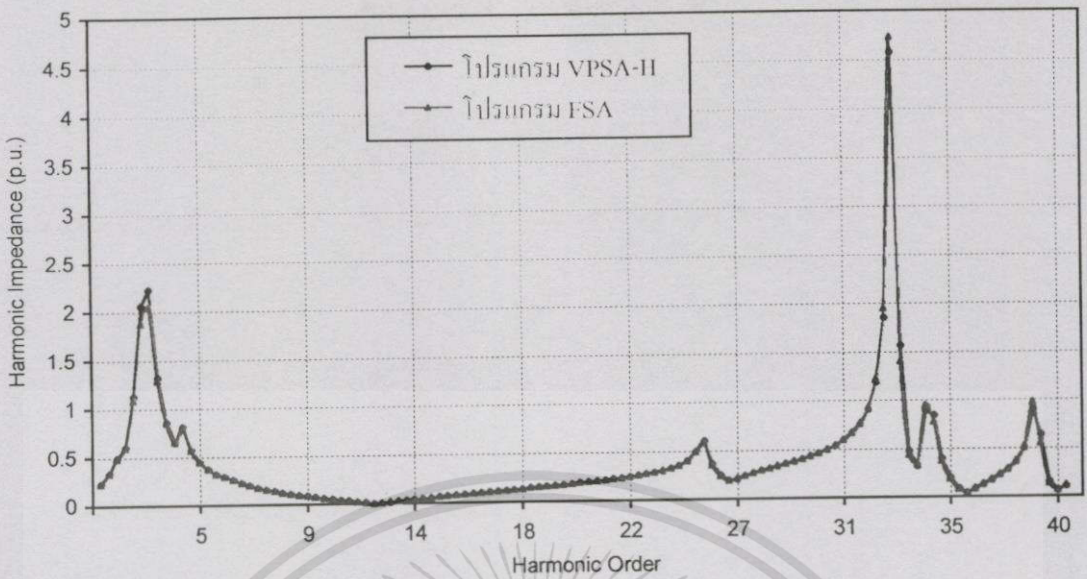
รูปที่ 5.74 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบทดสอบ 14 บัส จากรูปที่ 5.73

ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม FSA จะทำการทดสอบกับโปรแกรม Visual PSA-H Version 3.2 ของบริษัท Power Softech International (PSI) ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตซอฟต์แวร์ของประเทศแคนาดา โดยผู้ที่สนใจสามารถที่จะค้นหาโปรแกรมตัวอย่าง (Demo program) ได้จากเว็บไซต์ <http://home.istar.ca/~powersi/> สำหรับโปรแกรม Visual PSA-H ได้ทำการทดสอบความถูกต้องกับโปรแกรม EMTP และได้ทดสอบกับระบบทดสอบ (Case studies) ของ IEEE Harmonics Modeling and Simulation Task Force [30] ดังแสดงในรูปที่ 5.75 ซึ่งโปรแกรม Visual PSA-H ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาตามข้อกำหนดและข้อเสนอแนะจาก IEEE Harmonics Modeling and Simulation Task Force [30] และ IEEE 519 Working Group [9] โดยการทดสอบนี้จะเป็นพื้นฐานที่ดีในการตรวจสอบความถูกต้องในการเขียนโปรแกรมการคำนวณ Frequency Scan Analysis และใช้ในการที่จะนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรม Harmonic Power Flow และ AC-DC Harmonic Power Flow ได้ต่อไป



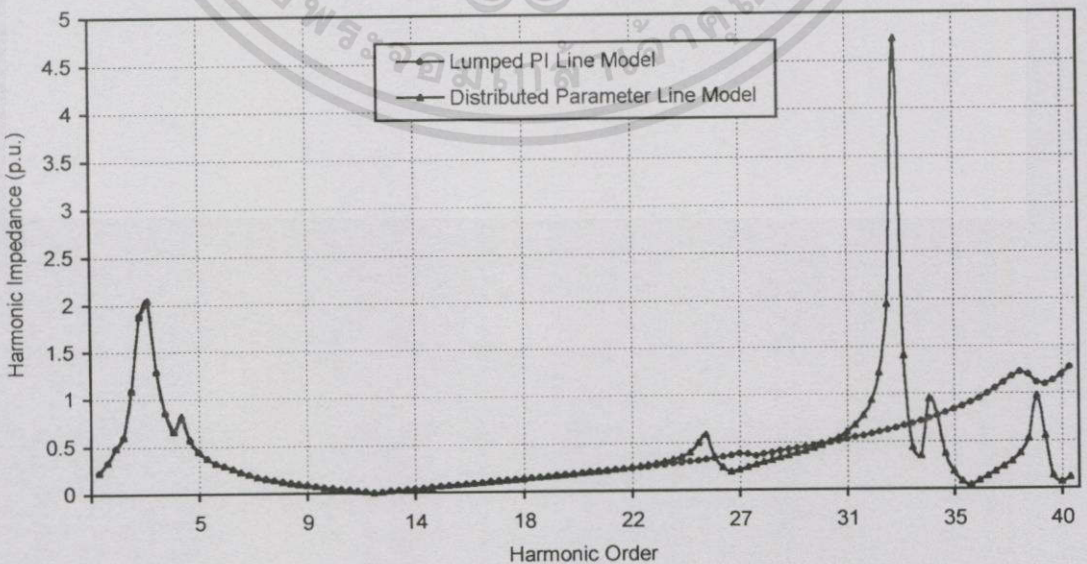
รูปที่ 5.75 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 3 ระหว่าง VPSA-H กับ IEEE TF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



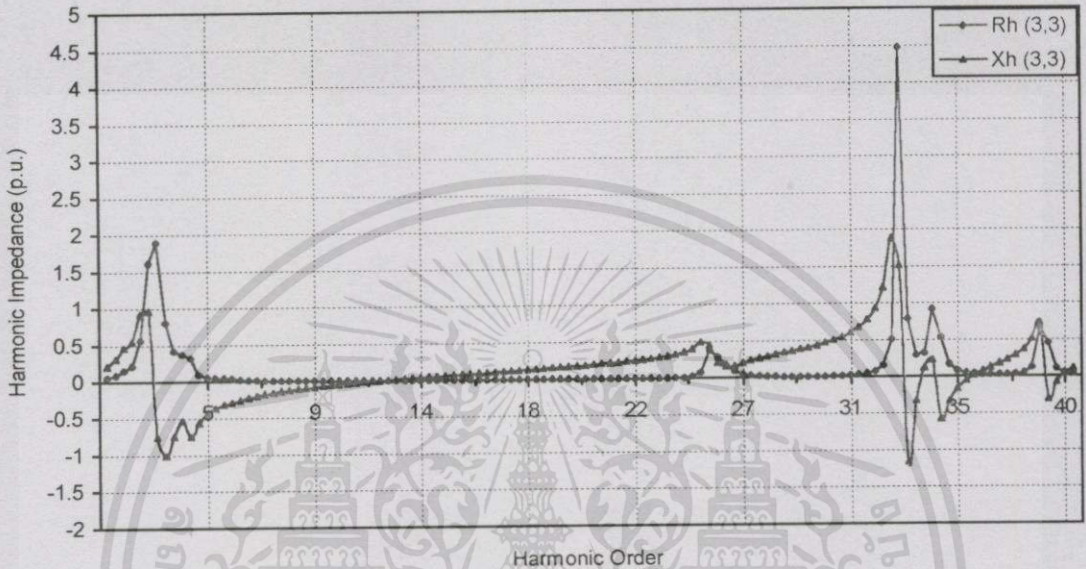
รูปที่ 5.76 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 3 ระหว่างโปรแกรม FSA กับ VPSA-H

จากรูปที่ 5.76 แสดงการรันโปรแกรม FSA ที่ผู้เขียนได้พัฒนาขึ้นมา เทียบกับโปรแกรม Visual PSA-H โดยทำการสแกนความถี่ที่บัส 3 (Driving point impedance) ตั้งแต่ความถี่ของฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 จนถึงฮาร์โมนิกอันดับที่ 40 โดยทำการเพิ่มความถี่ของฮาร์โมนิกทีละ 0.3333 จะพบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม FSA มีค่าใกล้เคียงกับโปรแกรม Visual PSA-H จากการทดสอบดังกล่าวข้างต้นจะใช้แบบจำลองของสายส่งที่เป็นสายส่งแบบ PI โดยทำการคำนวณแบบสายส่งระยะไกล (Distributed parameter line model) และเมื่อทำการเปรียบเทียบการเลือกใช้แบบจำลองของสายส่งแบบ Distributed parameter line model กับสายส่งแบบ PI (Lumped PI line model) จะพบว่าแบบจำลองของสายส่งแบบ Distributed parameter line model มีค่าที่ถูกต้องกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.77

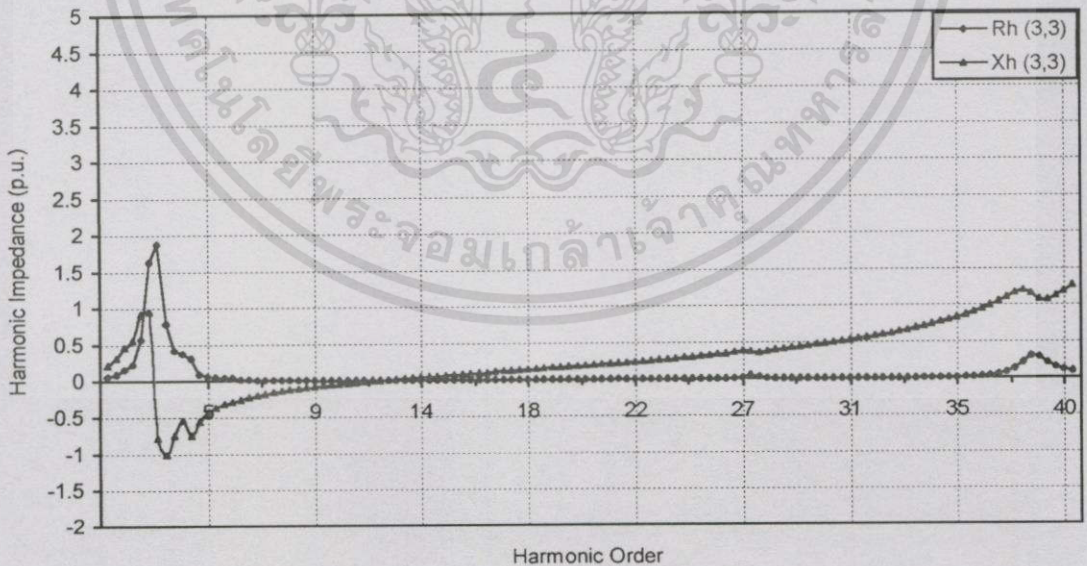


รูปที่ 5.77 การเปรียบเทียบการเลือกใช้แบบจำลองของสายส่ง ด้วยโปรแกรม FSA ที่พัฒนาขึ้นมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.77 ค่าที่อยู่ในแกนตั้งเป็นค่า Harmonic impedance ( $Z_h$ ) จากการคำนวณของโปรแกรม FSA และเมื่อรันโปรแกรม FSA โดยให้แสดงเป็นค่า Harmonic resistance ( $R_h$ ) และค่า Harmonic reactance ( $X_h$ ) ของการใช้แบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ของสายส่งแบบต่างๆจะพบว่าค่าของ  $X_h$  มีค่าเปลี่ยนแปลงทั้งในช่วงบวกและช่วงลบ ดังแสดงในรูปที่ 5.78 และ 5.79



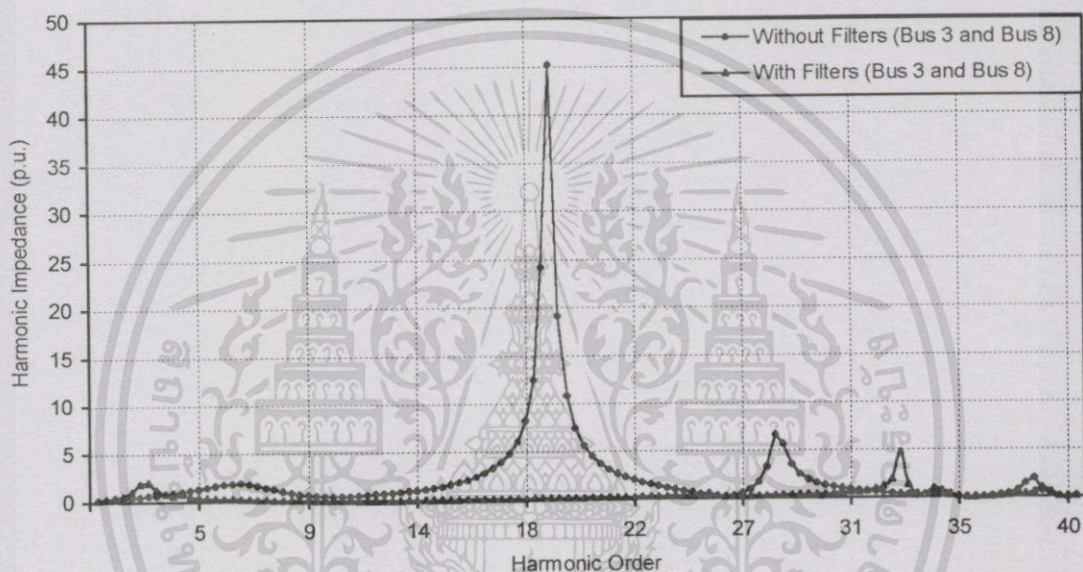
รูปที่ 5.78 ค่า  $R_h$  และ  $X_h$  ของสายส่งแบบ Distributed parameter line model



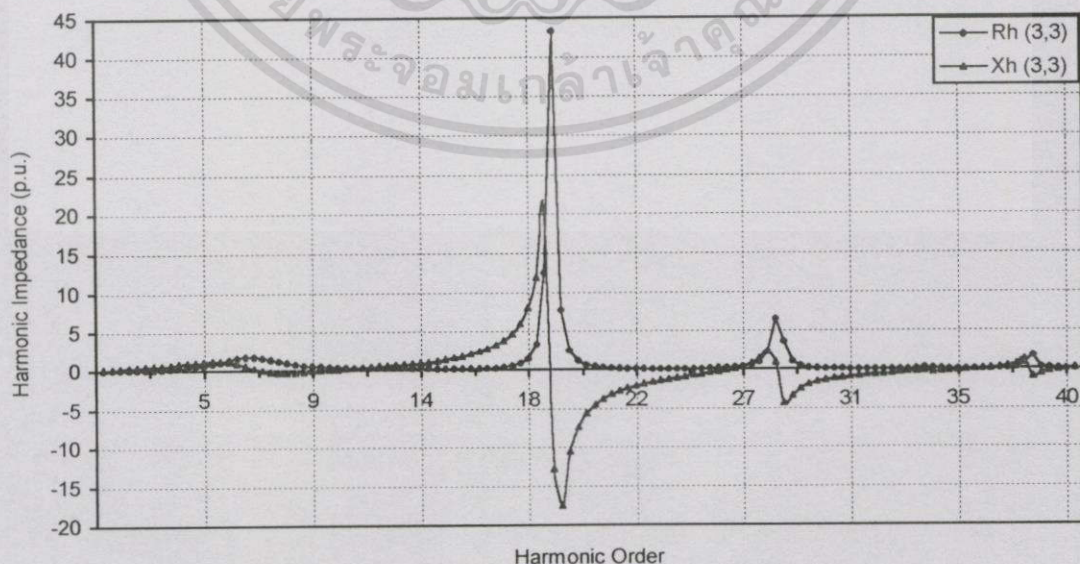
รูปที่ 5.79 ค่า  $R_h$  และ  $X_h$  ของสายส่งแบบ Lumped PI line model

ซึ่งจากรูปที่ 5.77 – 5.79 จะพบว่าที่บัส 3 จะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 3.00, 4.67, 25.33, 33.00, 34.67 และ 38.67 โดยความถี่หลักมูลของระบบทดสอบคือความถี่ 60 Hz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำโปรแกรม FSA มาวิเคราะห์ระบบ โดยรูปที่ 5.80 จะแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งและไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก โดยเมื่อไม่ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 3 และบัส 8 จะพบว่าเกิดการเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 19.00, 28.00 และ 38.33 ซึ่งผลของการเกิดเรโซแนนซ์นี้จะทำให้อิมพีแดนซ์ที่บัส 3 มีค่าสูง และมีผลทำให้ปริมาณของฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC เข้าไปรบกวนรูปคลื่นสัญญาณต่างๆในระบบเอซีมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่ 19.00 เป็นฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุด และสำหรับรูปที่ 5.81 จะแสดงการสแกนความถี่ที่บัส 3 ของค่า  $R_h$  และ  $X_h$  เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิกติดตั้งอยู่

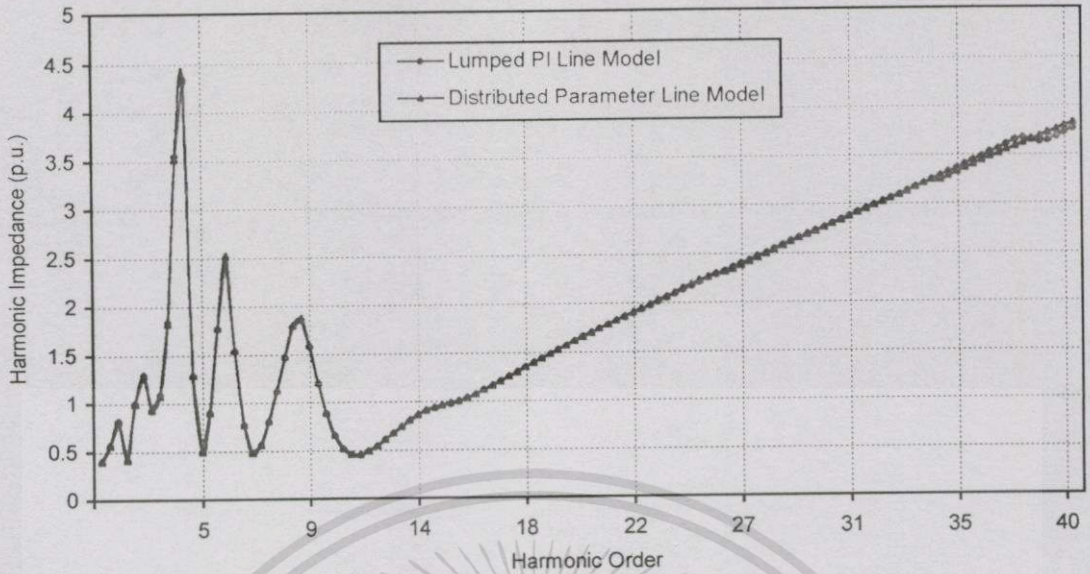


รูปที่ 5.80 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 3 เมื่อระบบมีและไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก



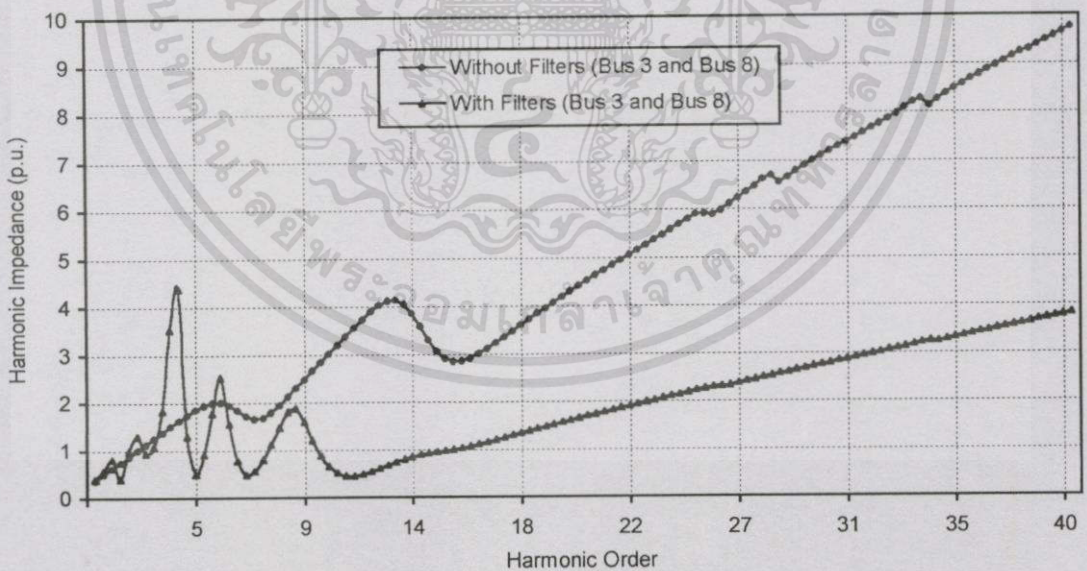
รูปที่ 5.81 ค่า  $R_h$  และ  $X_h$  จากการสแกนความถี่ที่บัส 3 เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.82 การเปรียบเทียบการเลือกใช้แบบจำลองของสายส่ง เมื่อสแกนความถี่ที่บัส 8

จากรูปที่ 5.82 เมื่อทำการสแกนความถี่ที่บัส 8 โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการเลือกใช้แบบจำลองของสายส่งแบบ Distributed parameter line model กับสายส่งแบบ Lumped PI line model จะพบว่าแบบจำลองของสายส่งทั้งสองแบบให้ค่า Harmonic impedance ใกล้เคียงกัน

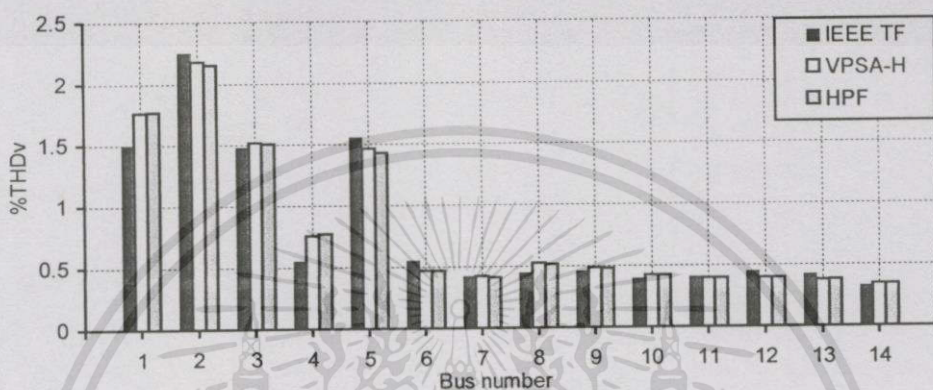


รูปที่ 5.83 การเปรียบเทียบการสแกนความถี่ที่บัส 8 เมื่อระบบมีและไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 5.83 ได้ทำการสแกนความถี่ที่บัส 8 โดยเมื่อไม่ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 3 และบัส 8 จะพบว่าการเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกต่างๆ ให้ผลกระทบต่อค่าของ Harmonic impedance ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับการสแกนความถี่ที่บัส 3

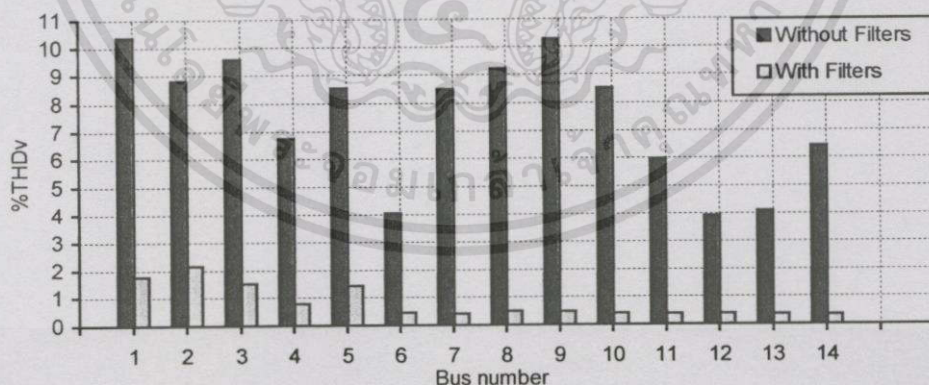
## 5.6 การทดสอบโปรแกรมการไหลของฮาร์มอนิกด้วยระบบทดสอบ IEEE

ในการทดสอบโปรแกรม Harmonic Power Flow (HPF) ที่ได้ทำการเขียนโปรแกรมขึ้นมา จะทำการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE TF 14 บัส จากรูปที่ 5.73 โดยมีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกคือ คอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC และ SVC จากรูปที่ 5.74 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบสำหรับค่าของ %THD ของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในระบบ แสดงดังรูปที่ 5.84



รูปที่ 5.84 การเปรียบเทียบการรัน โปรแกรม HPF เทียบกับโปรแกรม VPSA-H และ IEEE TF

จากรูปที่ 5.84 จะพบว่าค่า %THD ของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆจากการรันโปรแกรม HPF เทียบกับโปรแกรม VPSA-H และ IEEE TF มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการพิจารณาการติดตั้งและไม่ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 3 และบัส 8 แสดงให้เห็นความแตกต่างดังรูปที่ 5.85

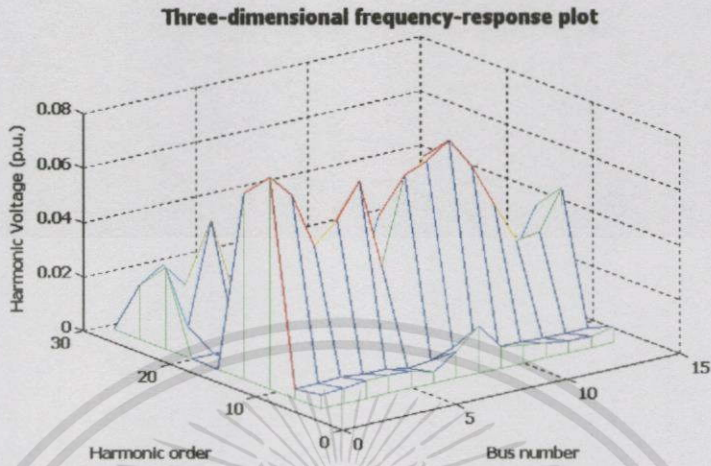


รูปที่ 5.85 การเปรียบเทียบการรัน โปรแกรม HPF เมื่อระบบมีและไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก

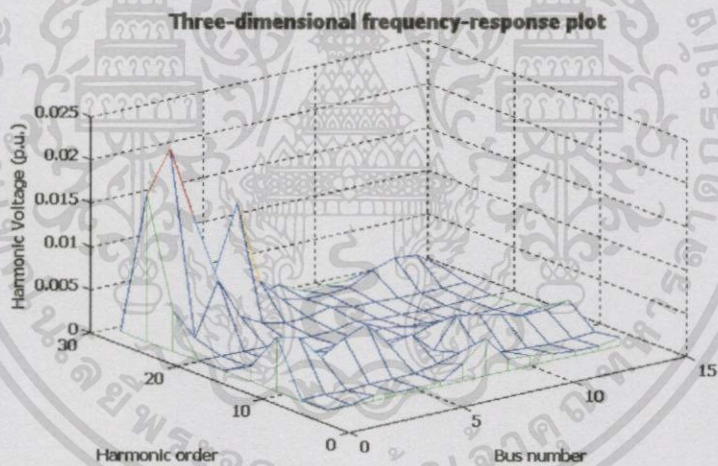
จากรูปที่ 5.85 จะพบว่าเมื่อไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 3 และบัส 8 ปริมาณของฮาร์มอนิกที่บ่งชี้จากครรขนิของ %THDv มีค่ามากเกินไปกว่ามาตรฐาน IEEE Std. 519 ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.6 ทุกบัส และเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก ค่า %THDv ที่บัสต่างๆจะมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานยกเว้นที่บัส 1, บัส 2 และบัส 3 มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาถึงค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่บัสต่างๆในระบบ เมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งหรือทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก แสดงในรูปที่ 5.86 และ 5.87 ตามลำดับ



รูปที่ 5.86 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบ ไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก



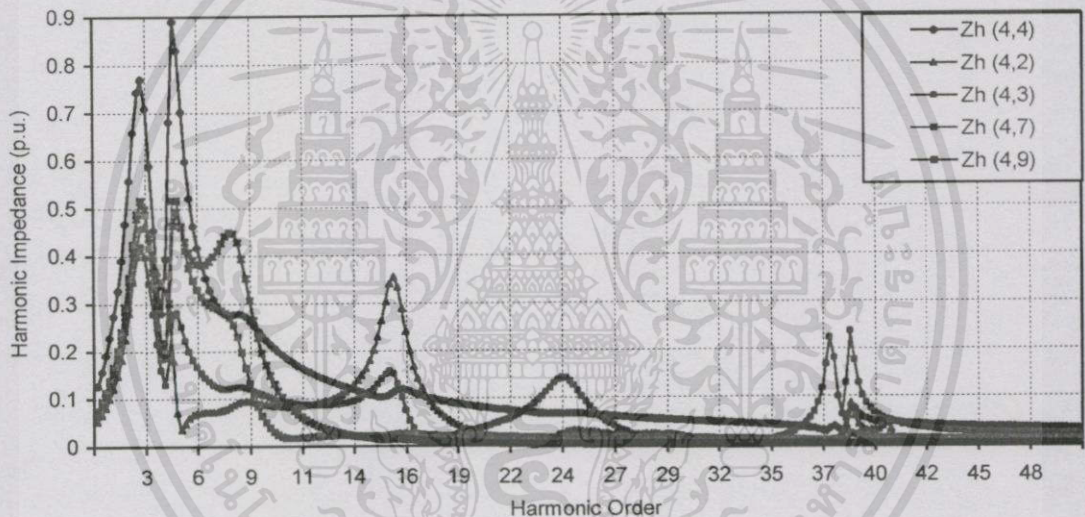
รูปที่ 5.87 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 5.87 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 3 และบัส 8 ทำให้ขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 2, 5, 7 และ 11 ที่บัสต่างๆมีค่าลดลง แต่จากรูปที่ 5.85 จะพบว่าค่า %THD<sub>v</sub> ที่บัส 2 ยังคงมีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐาน IEEE Std. 519 (ที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 161.001 kV ขึ้นไปมีขีดจำกัดของ %THD<sub>v</sub> อยู่ที่ 1.5 %) ก็เนื่องจากว่ามีผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกอันดับสูงๆ

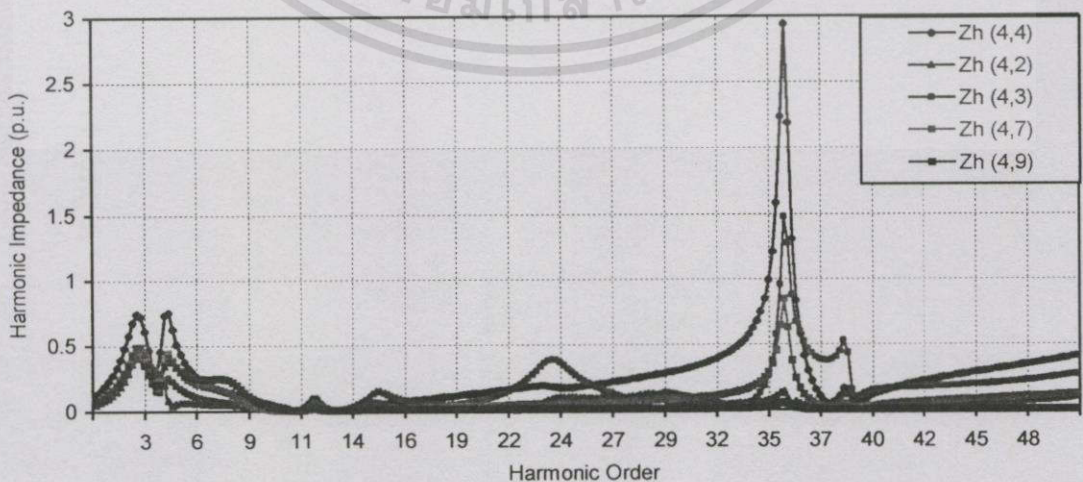
ดังนั้นในการวางแผนการควบคุมปริมาณของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบสามารถที่จะใช้โปรแกรม HPF ทำการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

## 5.7 การวิเคราะห์การโพล์ของกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี

ในการวิเคราะห์นี้จะทำการพัฒนาโปรแกรมขึ้นมาจากโปรแกรม HPF ในหัวข้อที่ 5.2 และโปรแกรม Unified-Newton-Raphson ในหัวข้อที่ 3.8.3 โดยเรียกโปรแกรมนี้ว่า “โปรแกรม AC-DC HPF” ซึ่งจะทำการวิเคราะห์กับระบบทดสอบ IEE AC-DC 14 บัส จากรูปที่ 5.13 โดยมีข้อมูลของระบบแสดงในภาคผนวก ข. โดยในขั้นแรกจะทำการวิเคราะห์การสแกนความถี่ที่บัส 4 และบัส 5 ด้วยโปรแกรม FSA ในกรณีที่ไม่ได้ทำการติดตั้งและติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัสดังกล่าว สำหรับกรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกจะทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่บัส 4 และบัส 5 เพื่อเป็นตัวจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองของระบบ HVDC ซึ่งจะทำให้การสแกนตั้งแต่ความถี่ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 จนถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 50 โดยทำการเพิ่มความถี่ของฮาร์มอนิกทีละ 0.2 ดังแสดงในรูปที่ 5.88 ถึงรูปที่ 5.91



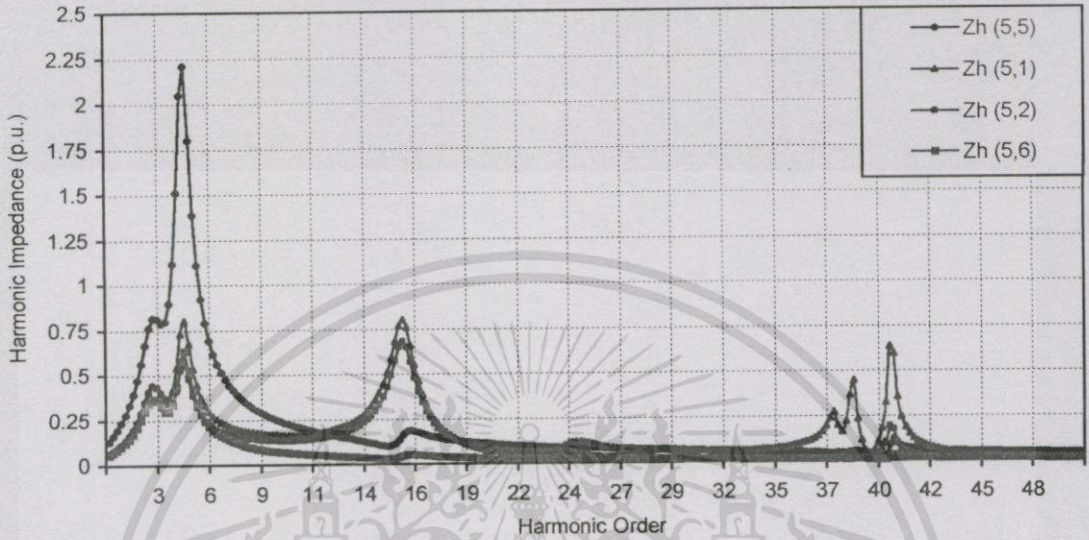
รูปที่ 5.88 การสแกนความถี่ที่บัส 4 เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก



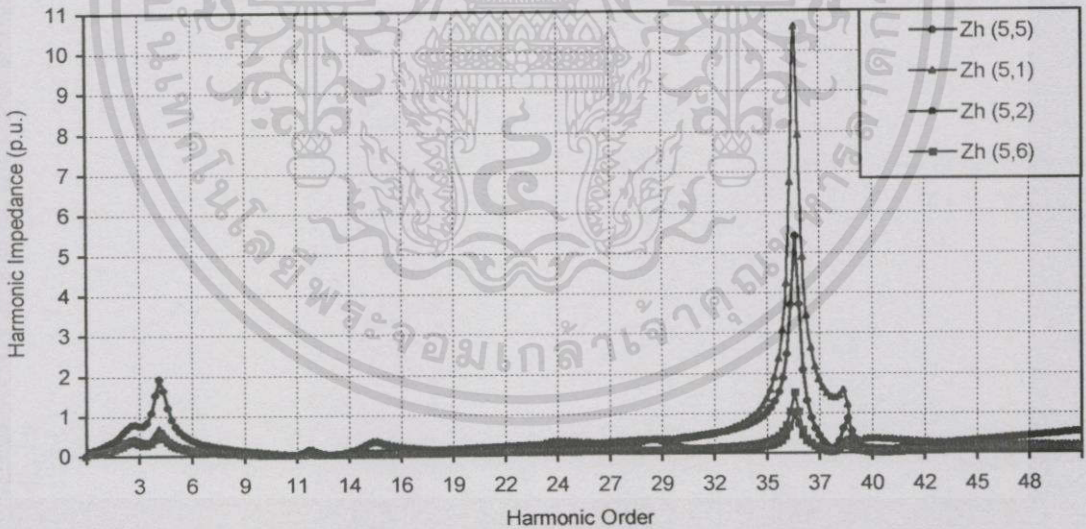
รูปที่ 5.89 การสแกนความถี่ที่บัส 4 เมื่อระบบติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.88 และรูปที่ 5.89 พบว่าเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 4 จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 35.4 ซึ่งจะทำให้ปริมาณของฮาร์มอนิกที่ 35.4 เข้าไปรบกวนในระบบมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการที่ไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



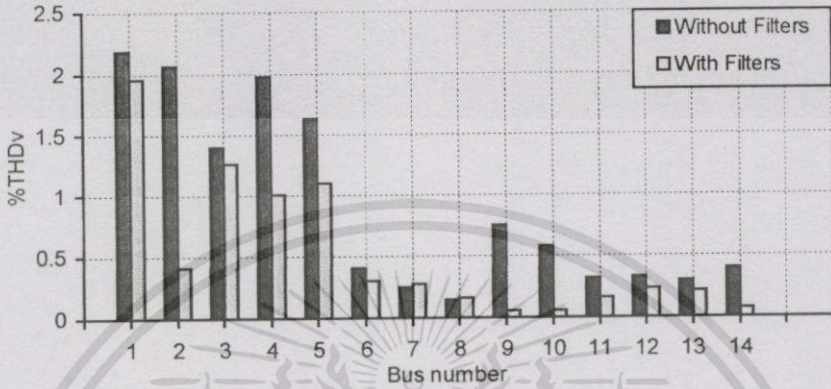
รูปที่ 5.90 การสแกนความถี่ที่บัส 5 เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.91 การสแกนความถี่ที่บัส 5 เมื่อระบบติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 5.90 และรูปที่ 5.91 พบว่าเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 5 จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 36 โดยฮาร์มอนิกที่ 36 จะไหลผ่านทางสายส่งที่เชื่อมต่อจากบัส 5 ไปยังบัส 1 ซึ่งจะทำให้ฮาร์มอนิกที่ 36 เข้าไปรบกวนในระบบมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการที่ไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

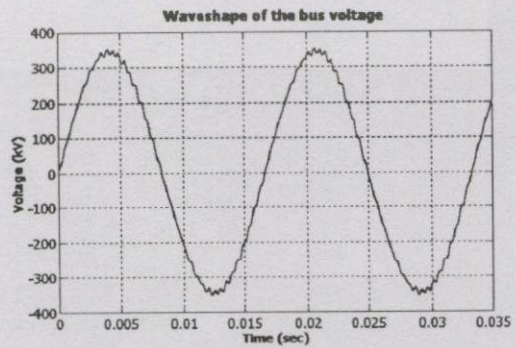
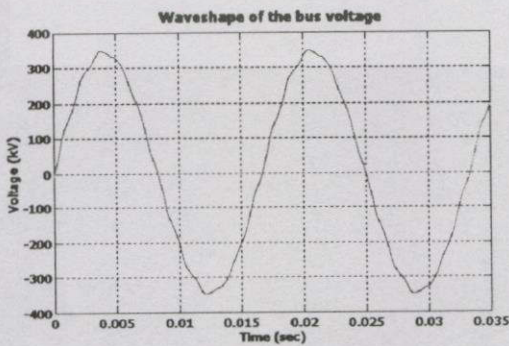
เมื่อทำการพิจารณาค่าของ %THDv ระหว่างการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกและการไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก จะพบว่าในขณะที่ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก ค่า %THDv ที่บัส 1, บัส 2, บัส 4 และบัส 5 มีค่าเกินมาตรฐาน IEEE Std. 519 และหลังจากทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก ค่า %THDv ที่บัส 1 ยังคงมีค่าเกินมาตรฐาน IEEE Std. 519 ดังแสดงในรูปที่ 5.92



รูปที่ 5.92 การเปรียบเทียบผลของการรัน โปรแกรม AC-DC HPF เมื่อระบบมีและไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิก ของระบบทดสอบ IEE AC-DC 14 บัส



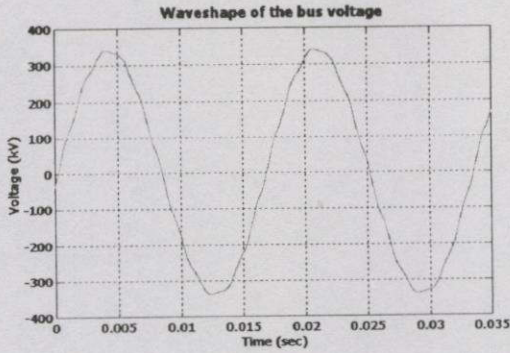
รูปที่ 5.93 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ เมื่อพิจารณาและไม่พิจารณาฮาร์มอนิก



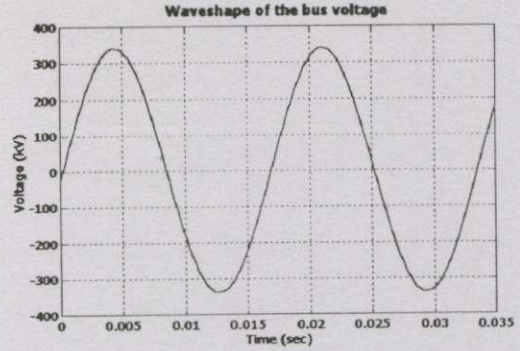
(ก) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 1 (No filters)

(ข) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 1 (With filters)

รูปที่ 5.94 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

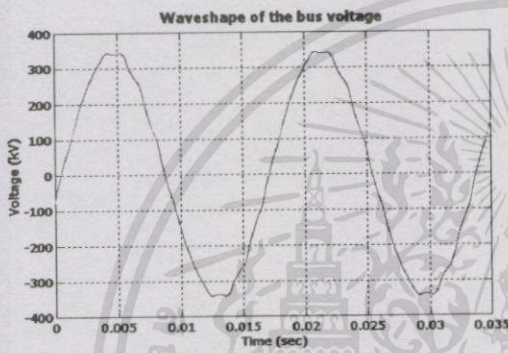


(ก) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 2 (No filters)

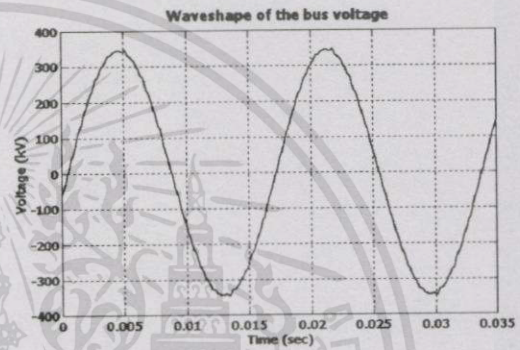


(ข) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 2 (With filters)

รูปที่ 5.95 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters

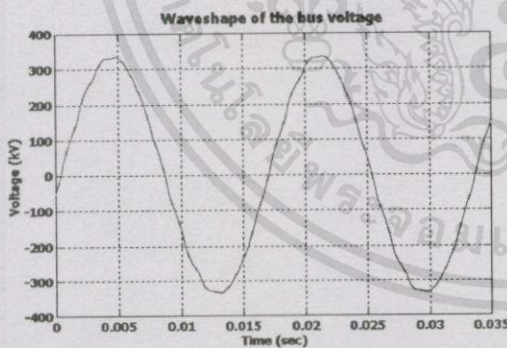


(ก) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 4 (No filters)

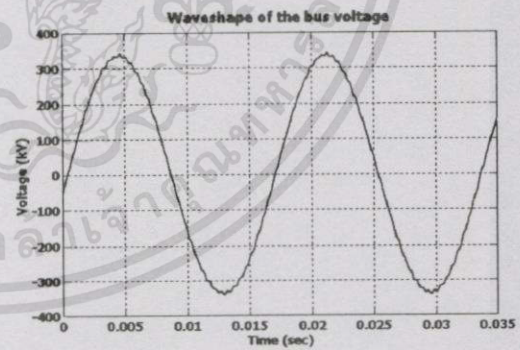


(ข) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 4 (With filters)

รูปที่ 5.96 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 4 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters



(ก) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 5 (No filters)



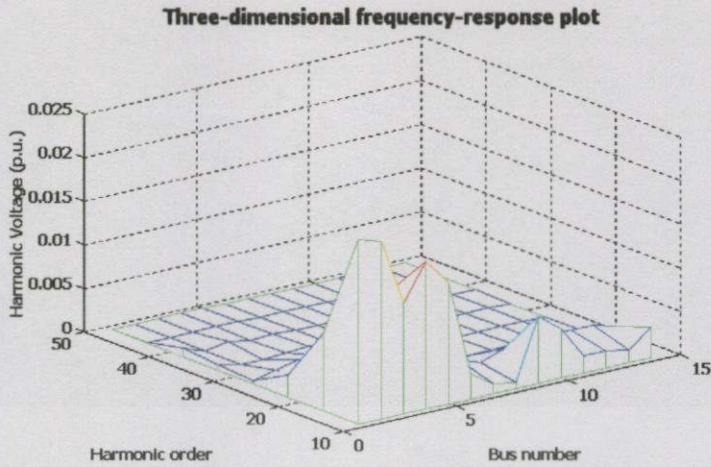
(ข) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 5 (With filters)

รูปที่ 5.97 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters

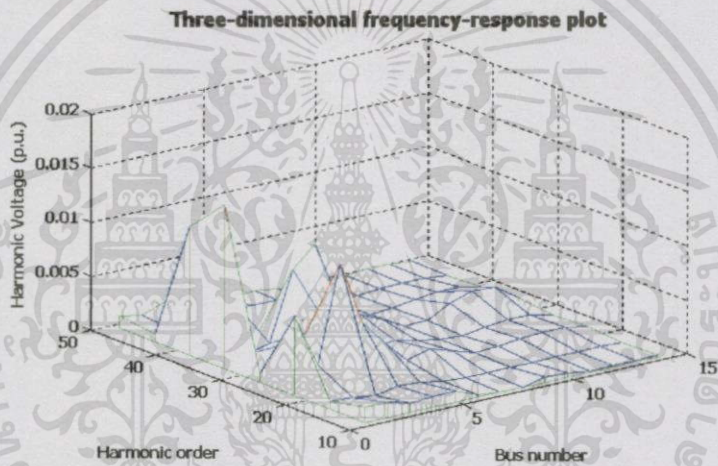
จากรูปที่ 5.94 ถึงรูปที่ 5.97 แสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1, บัส 2, บัส 4 และบัส 5 เมื่อระบบไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก (ซึ่งบัสดังกล่าวเป็นบัสที่มีค่า %THD<sub>v</sub> เกินกว่ามาตรฐานกำหนด จากรูปที่ 5.92) และเมื่อติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

และเมื่อทำการพิจารณาค่าของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ในขณะที่ระบบไม่ทำการติดตั้งและทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.98 ถึงรูปที่ 5.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



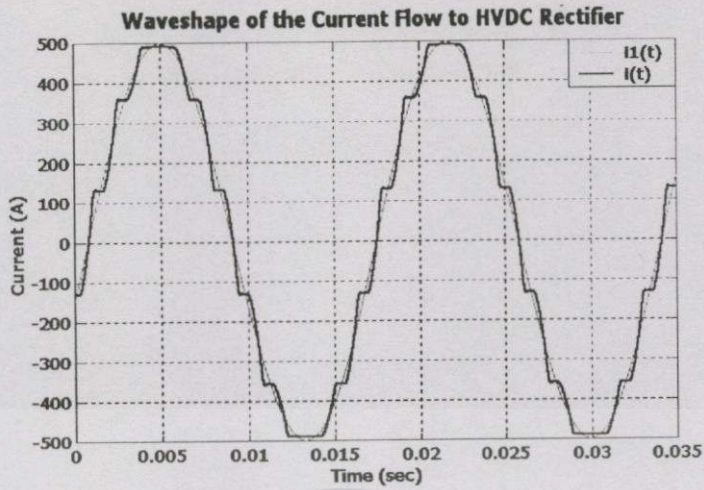
รูปที่ 5.98 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์โมนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบ ไม่มีเครื่องกรองฮาร์โมนิก



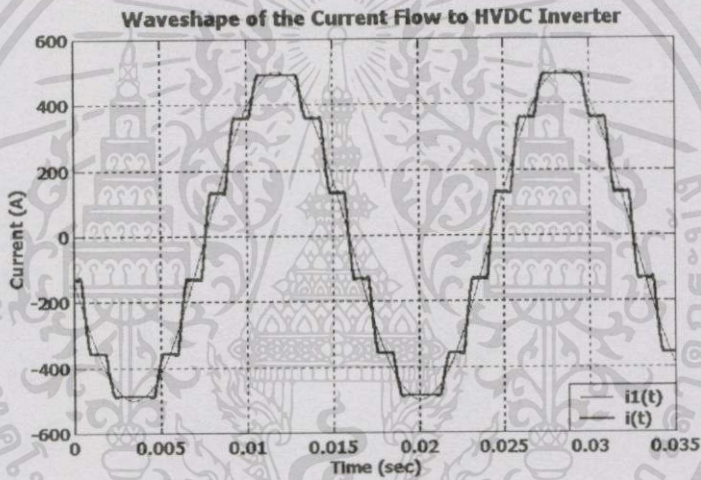
รูปที่ 5.99 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์โมนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบ ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์โมนิก

จากรูปที่ 5.98 ถึงรูปที่ 5.99 พบว่าค่าขนาดของแรงดันฮาร์โมนิกอันดับที่ 2, 5, 7 และ 11 มีค่าลดลง แต่ว่าจะมีผลทำให้ระบบเกิดการเรโซแนนซ์ที่ฮาร์โมนิกอันดับสูงๆ ซึ่งก็คือฮาร์โมนิกที่ 35 และฮาร์โมนิกที่ 37 ซึ่งสอดคล้องกับวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่จากรูปที่ 5.88 – 5.91 โดยมีผลทำให้ค่า %THD<sub>v</sub> ที่บัส 1 ยังคงมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด สำหรับค่าขนาดของแรงดันฮาร์โมนิกที่ 35 และ ฮาร์โมนิกที่ 37 มีค่าเท่ากับ 0.0152 p.u. และ 0.0118 p.u. ตามลำดับ

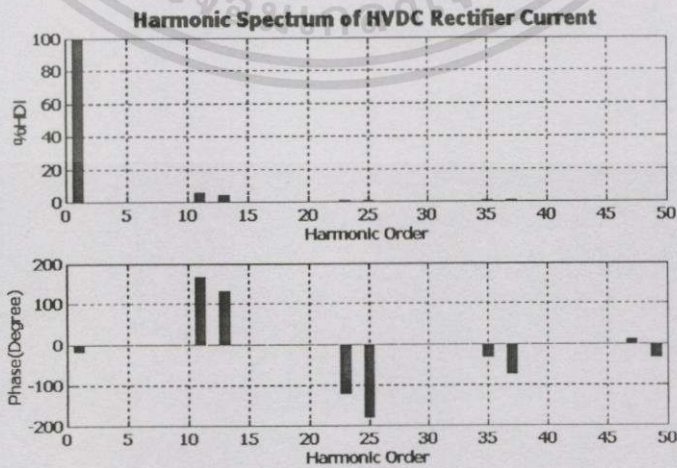
เมื่อทำการพิจารณารูปคลื่นของกระแสเอชทีที่ไหลเข้าไปยังเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC และรูปคลื่นของกระแสเอชทีที่ไหลเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC โดยคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC ดังกล่าวเป็นแบบ 12-พัลส์ ขั้วเดียว (Monopolar) จะแสดงในรูปที่ 5.100 – 5.101 ซึ่งรูปคลื่นของกระแสนี้จะประกอบไปด้วยกระแสที่ความถี่หลักมูลและกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกคุณลักษณะซึ่งก็คือฮาร์โมนิกที่ 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47 และ 49 ตามลำดับ โดยแสดงสเปกตรัมของกระแสดังกล่าวทั้งขนาดและมุมเฟสในรูปที่ 5.102 – 5.103



รูปที่ 5.100 รูปคลื่นของกระแสซึ่ที่ไหลเข้าไปยังเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC

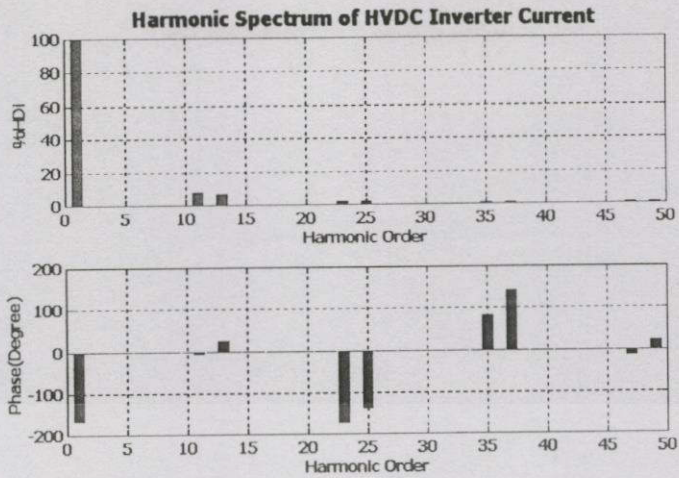


รูปที่ 5.101 รูปคลื่นของกระแสซึ่ที่ไหลเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC



รูปที่ 5.102 สเปกตรัมของกระแสซึ่ที่ไหลเข้าไปยังเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.103 สเปกตรัมของกระแสเอชทีไอแอลเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC

ตารางที่ 5.21 ผลการโพล์ของกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกจากการรันโปรแกรม AC-DC HPF เทียบกับการรันโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยใช้วิธี Unified-Newton-Raphson

ผลการโพล์ของกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกในระบบทดสอบ IEE AC-DC 14 บัส  
(PF คือ โปรแกรม AC-DC Power Flow และ HPF คือ โปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow)

Bus	P (MW)		Q (MVAR)		D (MVA)		S (MVA)	
	PF	HPF	PF	HPF	PF	HPF	PF	HPF
	1	233.0734	233.0734	-22.8144	-22.8144	-	4.6850	234.1874
2	18.3000	18.3000	-2.0827	-2.0827	-	0.5799	18.4181	18.4273
3	-94.2000	-94.2000	-21.2625	-21.2625	-	1.4262	96.5698	96.5804
4	-47.8000	-47.8000	75.2831	75.2411	-	15.4688	89.1761	90.4729
5	-7.6000	-7.6000	49.7284	49.6978	-	10.9122	50.3058	51.4461
6	-11.2000	-11.2000	-7.8543	-7.8543	-	0.2852	13.6795	13.6825
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	0.2156	0.0000	0.2156
8	0.0000	0.0000	5.5109	5.5109	-	0.0638	5.5109	5.5113
9	-29.5000	-29.5000	5.3292	5.3293	-	0.1676	29.9775	29.9780
10	-9.0000	-9.0000	-5.8000	-5.8000	-	0.0717	10.7070	10.7072
11	-3.5000	-3.5000	-1.8000	-1.8000	-	0.0632	3.9357	3.9362
12	-6.1000	-6.1000	-1.6000	-1.6000	-	0.0810	6.3063	6.3069
13	-13.5000	-13.5000	-5.8000	-5.8000	-	0.1335	14.6932	14.6938
14	-14.9000	-14.9000	-5.0000	-5.0000	-	0.0293	15.7166	15.7166

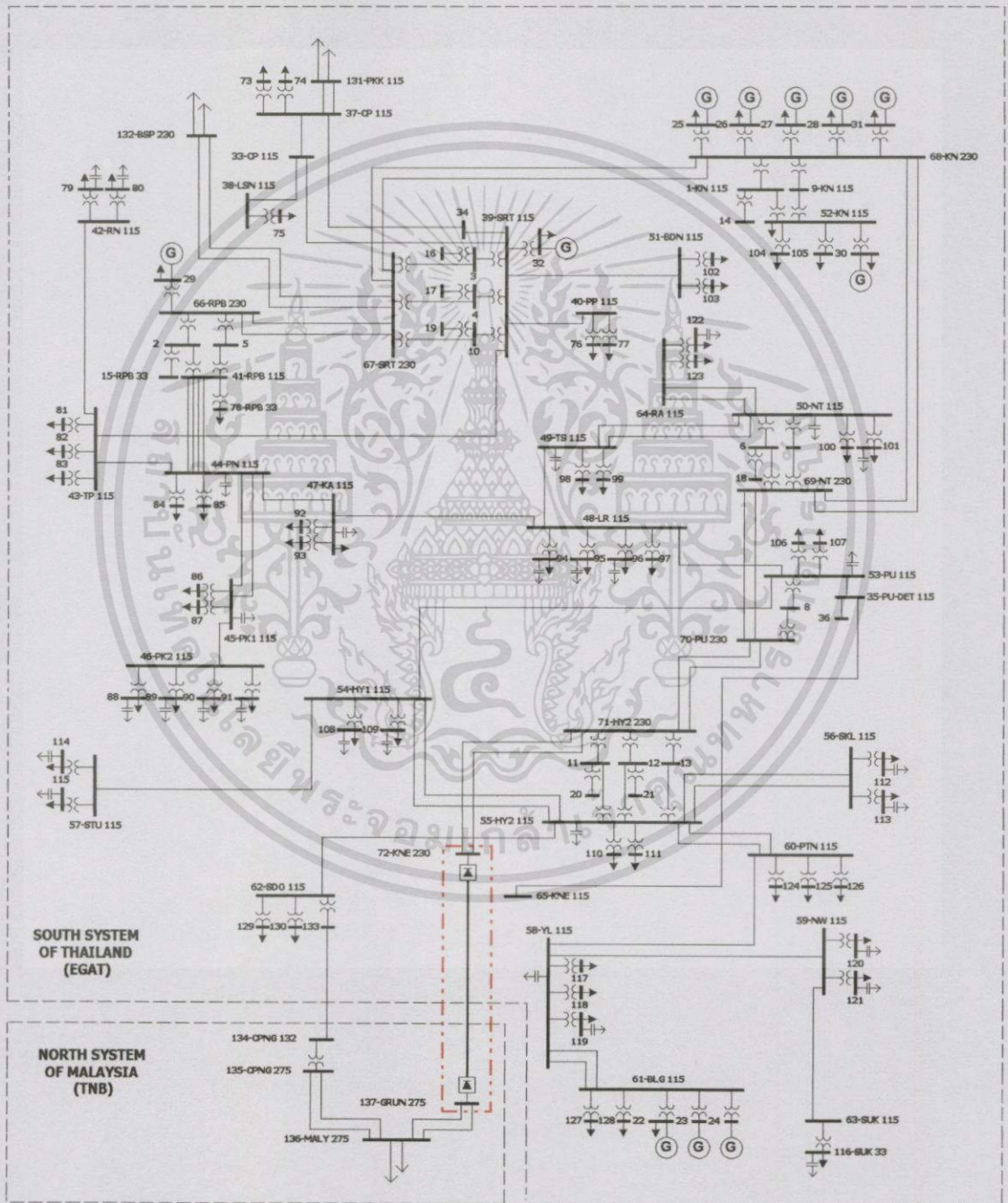
จากตารางที่ 5.21 แสดงผลการโพล์ของกำลังไฟฟ้าและการโพล์ฮาร์มอนิก จากการรันโปรแกรม AC-DC HPF เทียบกับการรันโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยจะพบว่าเมื่อทำการพิจารณาผลของฮาร์มอนิกเข้าไปด้วยในการคำนวณเพาเวอร์โพล์ในระบบเอช-ดีซี จะทำให้ปริมาณการโพล์ของกำลังไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนไปโดยเฉพาะค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.8 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังภาคใต้ของประเทศไทย

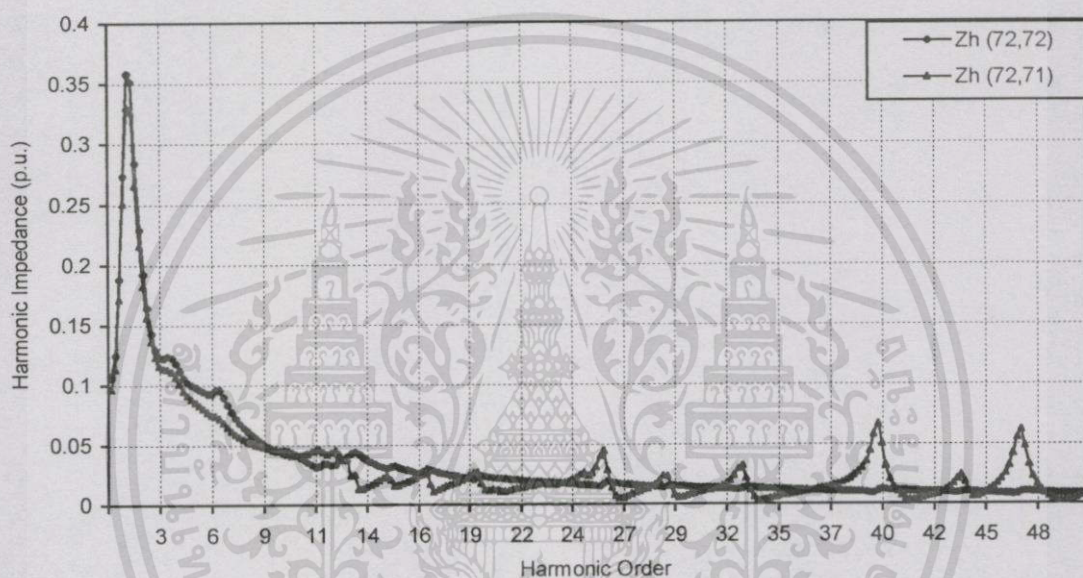
การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจริงจะใช้ระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส (EGAT) ต่อกับระบบทดสอบภาคเหนือของประเทสมาเลเซีย 4 บัส (TNB) ที่กำหนดขึ้น โดยทำการจำลองในสภาวะที่บัส 137 ของประเทสมาเลเซียส่งกำลังไฟฟ้าที่พิกัด 300 MW ผ่านระบบ HVDC มายังบัส 72 ของประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 5.104 โดยมีข้อมูลในภาคผนวก ก.



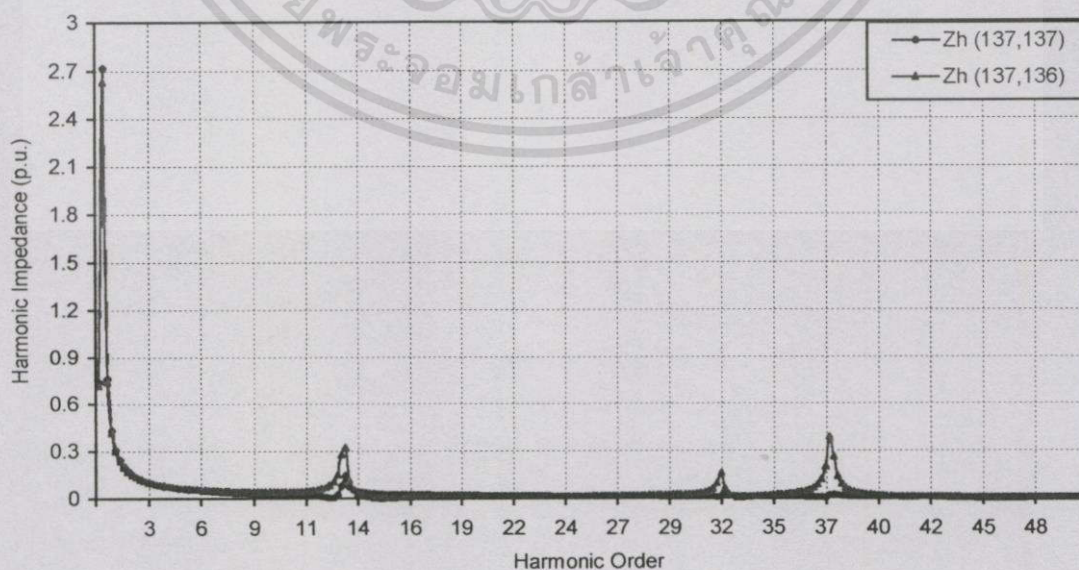
รูปที่ 5.104 ระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส ต่อกับระบบทดสอบภาคเหนือของประเทสมาเลเซีย 4 บัส ที่กำหนดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ในขั้นแรกจะทำการวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่ที่บัส 72 และบัส 137 โดยบัส 72 เป็นบัสที่มีอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC ติดตั้งอยู่ และบัส 137 เป็นบัสที่มีเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC ติดตั้งอยู่ ซึ่งจะทำการสแกนตั้งแต่ความถี่ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 จนถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 50 โดยทำการเพิ่มความถี่ของฮาร์มอนิกทีละ 0.2 ดังแสดงในรูปที่ 5.105 ถึงรูปที่ 5.112 ซึ่งจะทำให้การพิจารณาในขณะที่ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 กับเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่ 11 และ 13 แบบขนานชนิดจูนความถี่เดี่ยว (Single-Tuned shunt filters) ที่บัส 72 และบัส 137



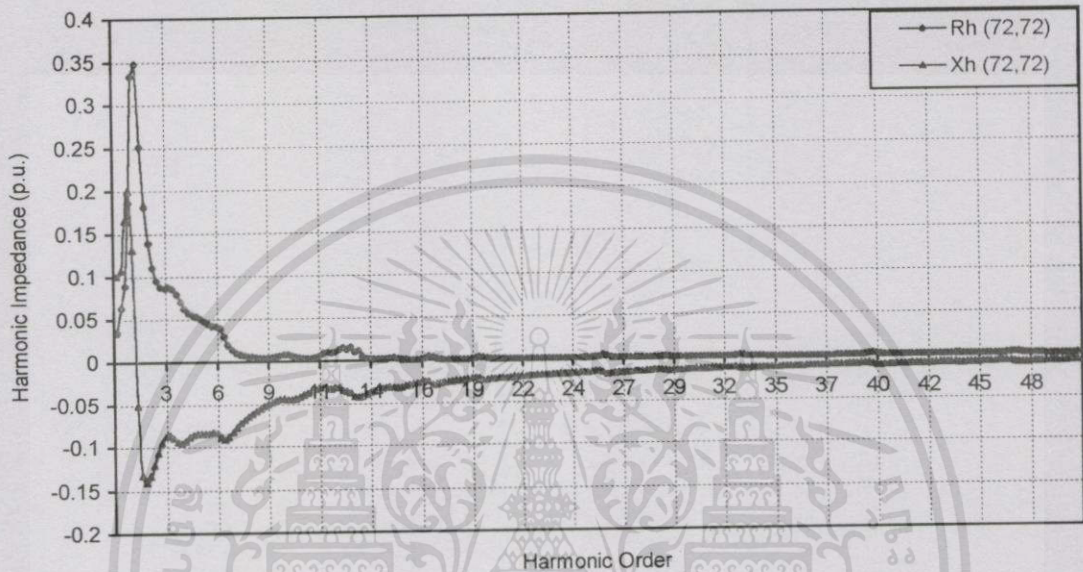
รูปที่ 5.105 การสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



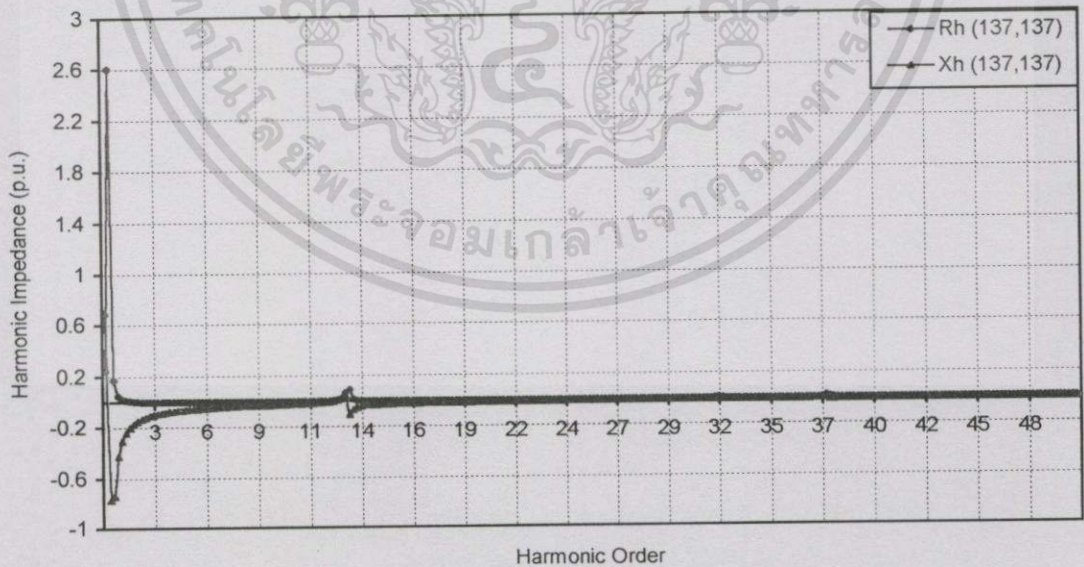
รูปที่ 5.106 การสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.105 และรูปที่ 5.106 พบว่าเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุดที่ฮาร์มอนิกที่ 1.8 โดยมีค่าเท่ากับ 0.3583 p.u. และฮาร์มอนิกที่ 1.2 โดยมีค่าเท่ากับ 2.7171 p.u ตามลำดับ และสำหรับรูปที่ 5.107 ถึงรูปที่ 5.108 จะแสดงการสแกนความถี่ที่บัส 72 และบัส 137 ของค่า  $R_h$  และ  $X_h$  เมื่อระบบไม่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิกติดตั้งอยู่



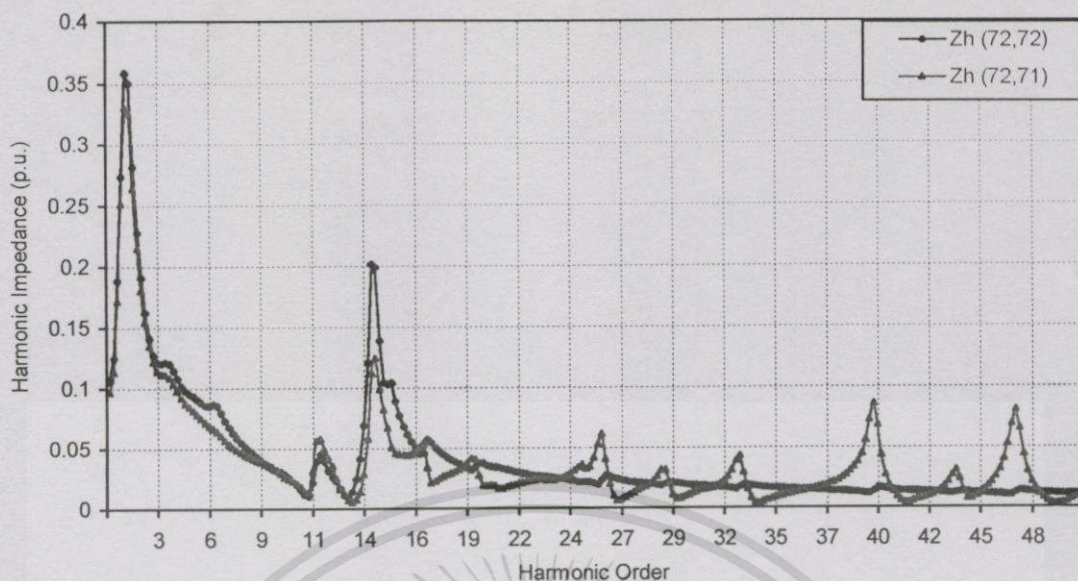
รูปที่ 5.107 ค่า  $R_h$  และ  $X_h$  จากการสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



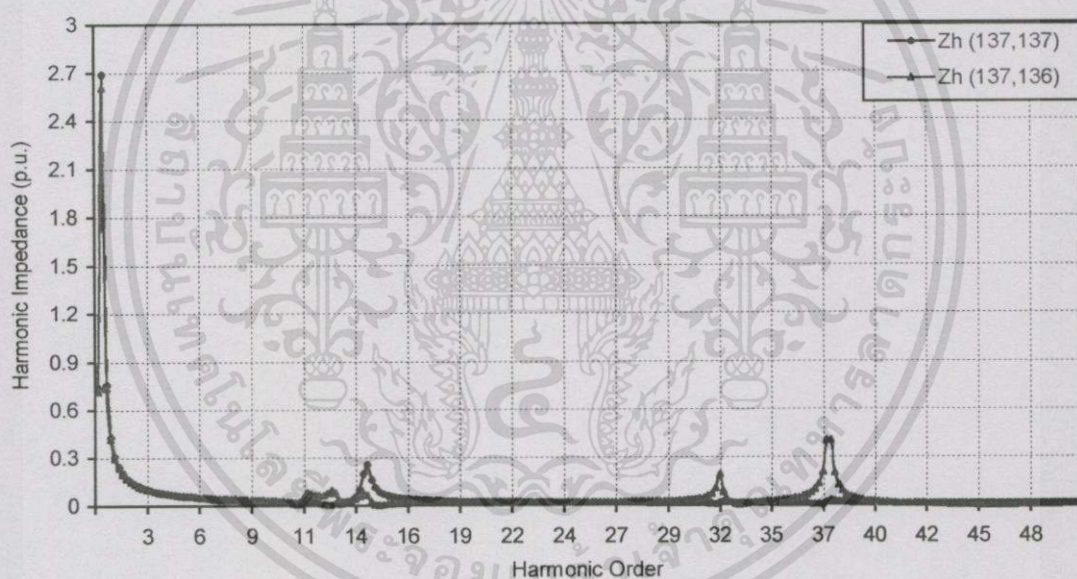
รูปที่ 5.108 ค่า  $R_h$  และ  $X_h$  จากการสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบไม่ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 5.107 ถึงรูปที่ 5.108 พบว่าค่า  $R_h$  มีผลต่อขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิก  $Z_h$  มากกว่าค่าของ  $X_h$  ณ จุดที่ทำการสแกนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



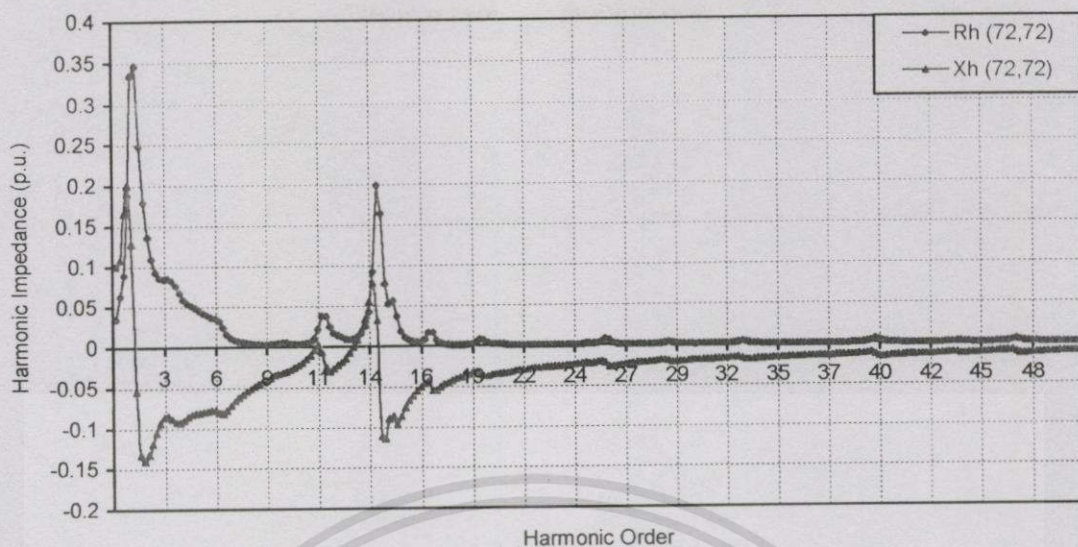
รูปที่ 5.109 การสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



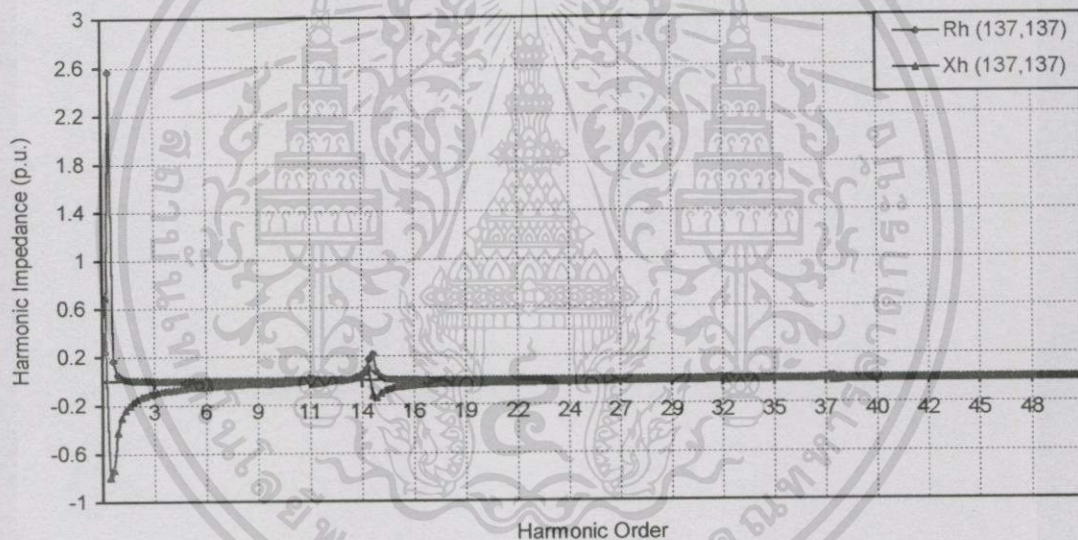
รูปที่ 5.110 การสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 5.109 และรูปที่ 5.110 พบว่าเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุดที่ฮาร์มอนิกที่ 1.8 โดยมีค่าเท่ากับ 0.3587 p.u. และฮาร์มอนิกที่ 1.2 โดยมีค่าเท่ากับ 2.6891 p.u. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 แต่ว่าจากรูปที่ 5.110 จะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 14.2 โดยมีค่าเท่ากับ 0.2010 p.u. ซึ่งมีขนาดของอิมพีแดนซ์รองลงมา และสำหรับรูปที่ 5.111 ถึงรูปที่ 5.112 จะแสดงการสแกนความถี่ที่บัส 72 และบัส 137 ของค่า  $R_h$  และ  $X_h$  เมื่อระบบมีเครื่องกรองฮาร์มอนิกติดตั้งอยู่ ซึ่งจะพบว่าค่า  $R_h$  มีผลต่อขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิก  $Z_h$  มากกว่าค่าของ  $X_h$  ณ จุดที่ทำการสแกนความถี่

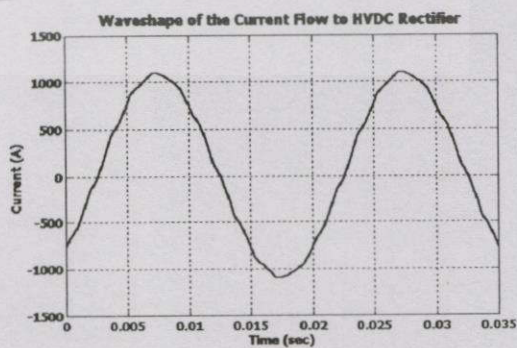
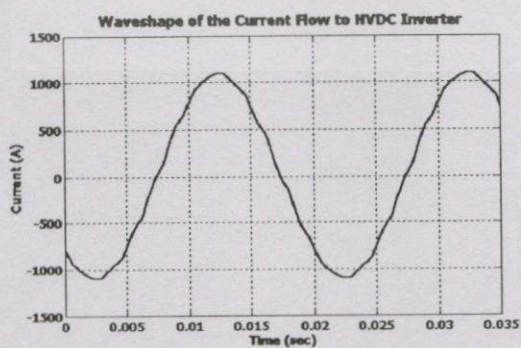
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.111 ค่า  $R_h$  และ  $X_h$  จากการสแกนความถี่ที่บัส 72 เมื่อระบบได้ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



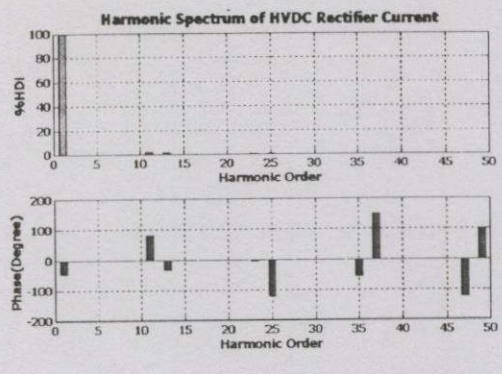
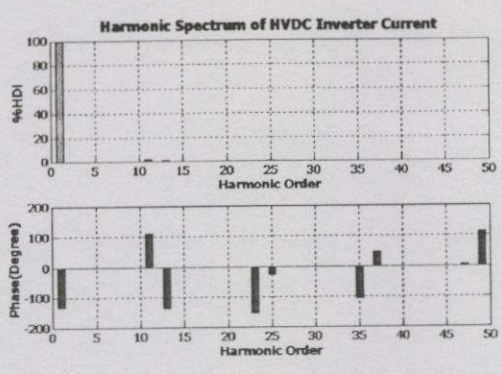
รูปที่ 5.112 ค่า  $R_h$  และ  $X_h$  จากการสแกนความถี่ที่บัส 137 เมื่อระบบได้ติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



(ก) รูปคลื่นของกระแสที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์ (ข) รูปคลื่นของกระแสที่ไหลเข้าเครื่องเรียงกระแส

รูปที่ 5.113 รูปคลื่นของกระแสที่ไหลเข้าสู่อินเวอร์เตอร์และเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

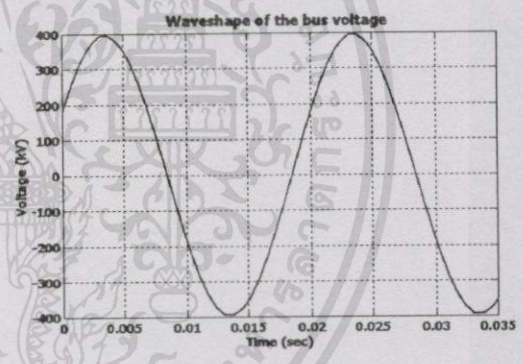
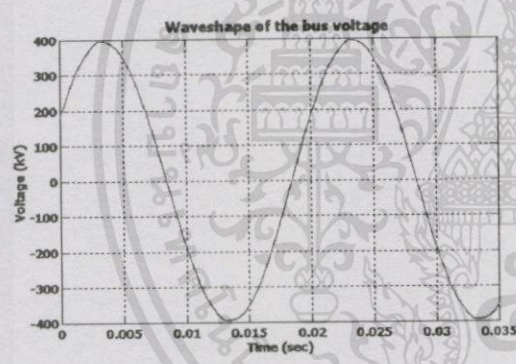


(ก) สเปกตรัมของกระแสที่อินเวอร์เตอร์

(ข) สเปกตรัมของกระแสที่เครื่องเรียงกระแส

รูปที่ 5.114 สเปกตรัมของกระแสที่ไหลไปยังอินเวอร์เตอร์และเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC

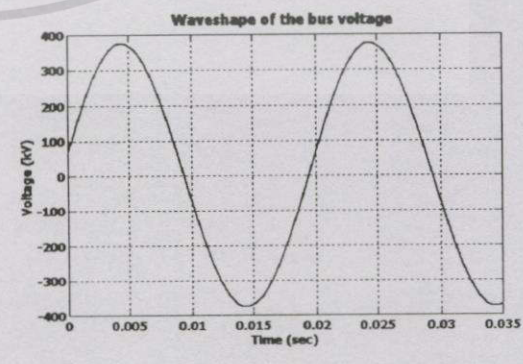
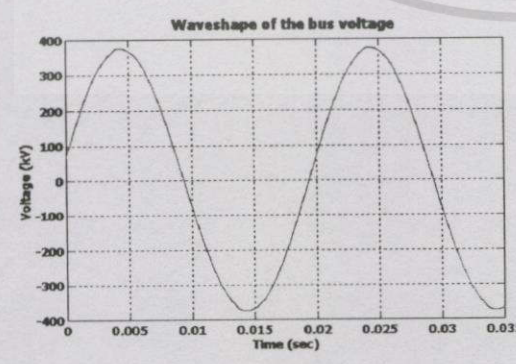
จากรูปที่ 5.113 – 5.114 แสดงถึงรูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสซึ่ไหลเข้าสู่อินเวอร์เตอร์และเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC โดยจะพบว่ารูปคลื่นของกระแสซึ่ไหลมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มาก อันเนื่องมาจากว่าปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกมีค่าน้อยมาก



(ก) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 72 (No filters)

(ข) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 72 (With filters)

รูปที่ 5.115 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 72 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters



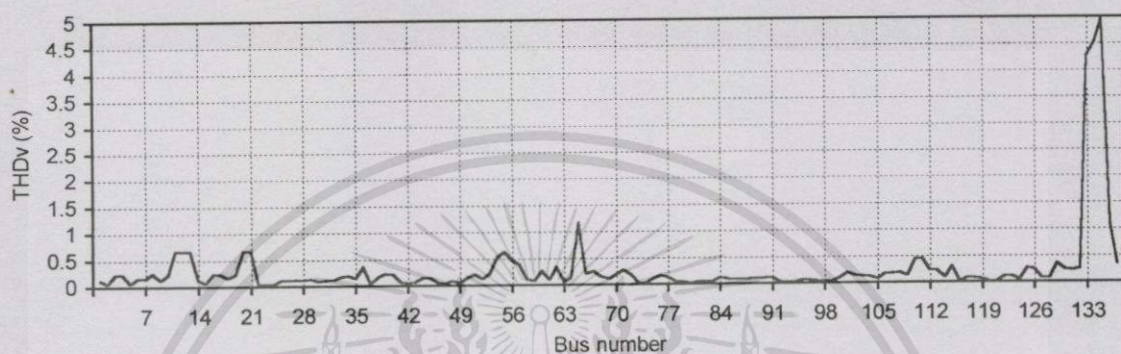
(ก) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 137 (No filters)

(ข) รูปคลื่นของแรงดันที่บัส 137 (With filters)

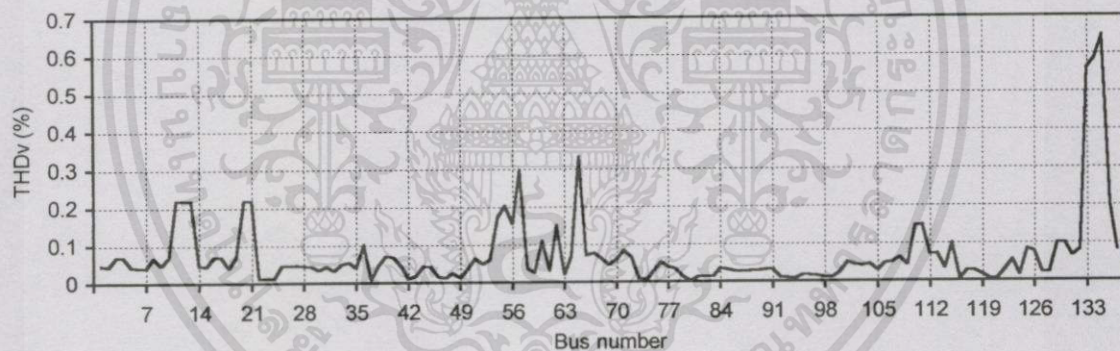
รูปที่ 5.116 การเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 137 เมื่อระบบมีและไม่มี Filters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.115 – 5.116 แสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 72 และบัส 137 เมื่อไม่ทำการติดตั้งและเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกในระบบ จะพบว่ารูปคลื่นของแรงดันที่บัสดังกล่าวมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกันมาก และมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มาก สำหรับรูปที่ 5.117 – 5.118 แสดงค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆ เมื่อระบบไม่ได้ทำการติดตั้งและทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



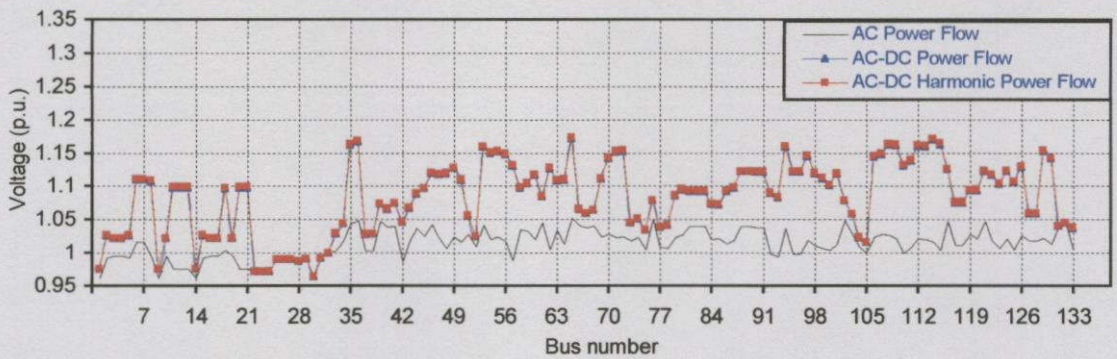
รูปที่ 5.117 ค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆ เมื่อระบบไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



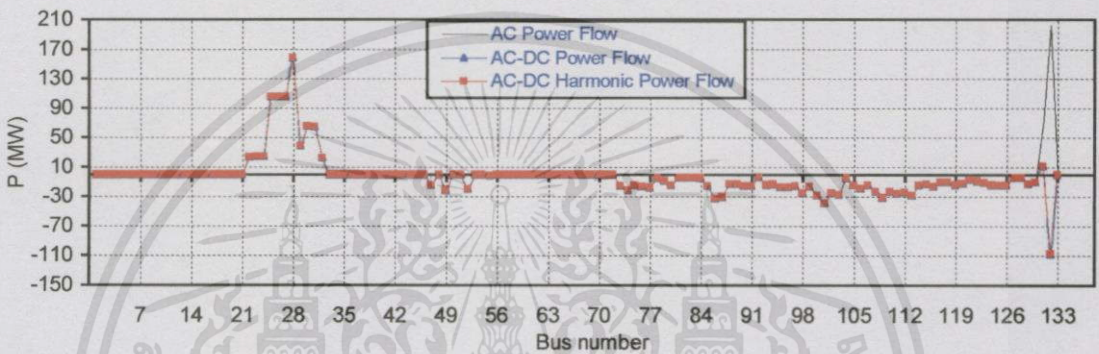
รูปที่ 5.118 ค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆ เมื่อระบบได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 5.117 พบว่าเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกจะมีเพียงบัส 133 ถึงบัส 135 เท่านั้นที่มีค่า %THD ของแรงดันเกินมาตรฐาน IEEE Std. 519 โดยมีค่าเท่ากับ 4.2641 p.u., 4.5310 p.u. และ 4.9634 p.u. ตามลำดับ และจากรูปที่ 5.118 เมื่อได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกก็จะไม่มีบัสใดที่มีค่า %THD ของแรงดันเกินมาตรฐาน IEEE Std. 519 ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถที่จะทำการวางแผนการควบคุมปริมาณของฮาร์มอนิกให้อยู่ในขีดจำกัดตามมาตรฐานและคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกได้โดยคำนึงถึงความเหมาะสมโดยรวมของระบบ สำหรับรูปที่ 5.119 – 5.121 แสดงถึงค่าขนาดของแรงดัน, ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส โดยทำการรันด้วยโปรแกรม AC Power Flow, AC-DC Power Flow และ AC-DC Harmonic Power Flow

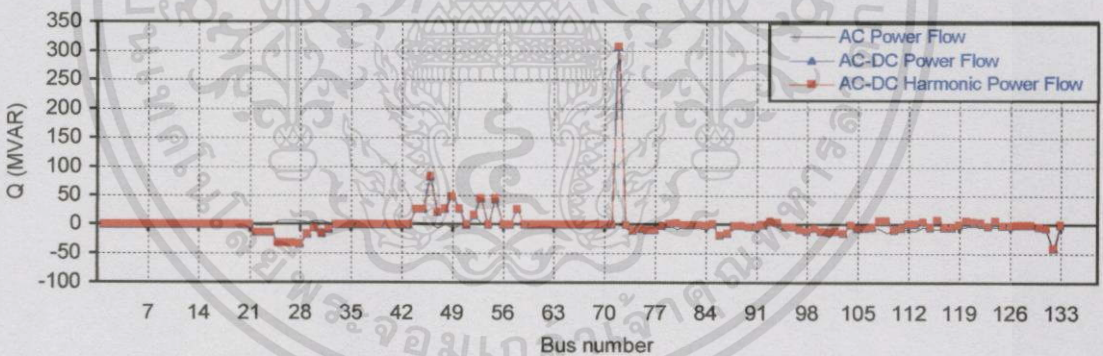
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.119 ค่าขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส



รูปที่ 5.120 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส

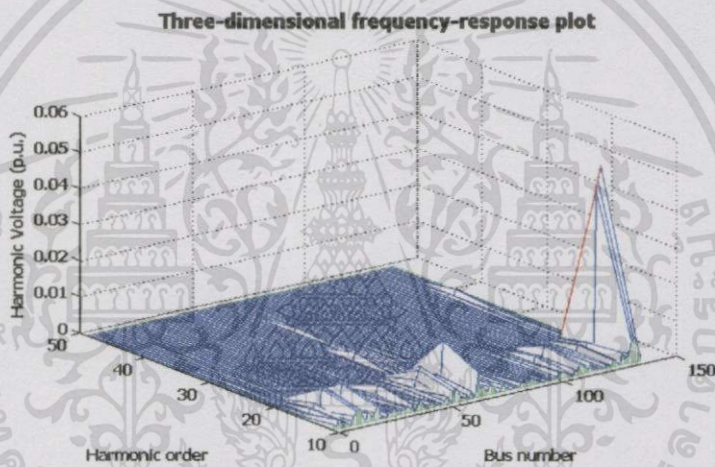


รูปที่ 5.121 ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส

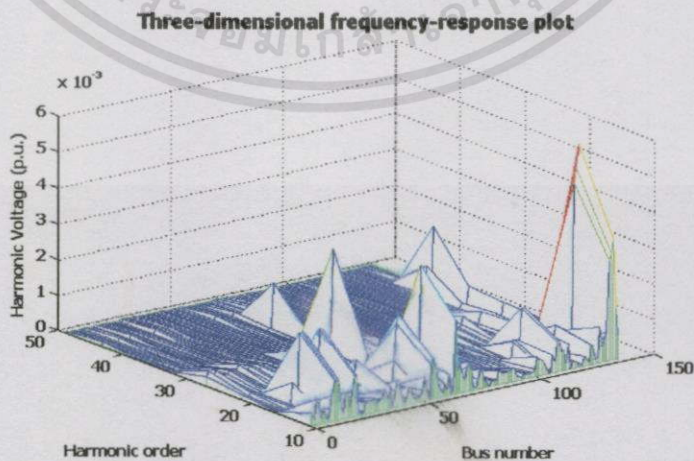
จากรูปที่ 5.119 – 5.121 จะพบว่าเมื่อมีระบบ HVDC เข้ามาทำการติดตั้งโดยทำการเชื่อมต่อระหว่างบัส 72 (KNE 230) ของประเทศไทยกับบัส 137 (GRUN 275) ของประเทศมาเลเซียจะทำให้ระดับของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆในระบบของประเทศไทยโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการณ์โพล์ของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในระบบนั่นเอง และสำหรับพฤติกรรมการณ์โพล์ของค่ากำลังไฟฟ้าจริงพบว่ามีค่าคงที่ทั้งขนาดและทิศทางเกือบทุกบัส ยกเว้นที่บัส 131 (PKK 115) และบัส 132 (BSP 230) ที่ทั้งทิศทางและขนาดของค่ากำลังไฟฟ้าจริงเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่บัสดังกล่าวนี้เป็นผลดีต่อระบบโดยรวมอันเนื่องมาจากค่ากำลังไฟฟ้าจริงจากรูป 5.120 ก่อนทำการติดตั้งระบบ HVDC ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 131 มีค่าเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ 74.3969 MW และที่บัส 132 มีค่าเท่ากับ 201.92 MW และภายหลังทำการติดตั้งระบบ HVDC ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 131 มีค่าเท่ากับ 11.0209 MW และที่บัส 132 มีค่าเท่ากับ -107.2068 MW ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆในระบบเป็นบวกแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่ามากกว่าที่รับเข้ามา และค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่บัสต่างๆในระบบเป็นลบแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่าน้อยกว่าที่รับเข้ามา นั้นแสดงว่าที่บัส 131 รับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายมาจากภาคกลางของประเทศไทยน้อยลง และที่บัส 132 มีพลังงานไฟฟ้าที่มาจากบัส 67 (SRT 230) โพลาร์ไปยังบัส 132 เข้าสู่ระบบไฟฟ้าทางภาคกลางของประเทศไทย จึงทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังภาคใต้ของประเทศไทยมีพลังงานไฟฟ้าใช้พอเพียงในช่วง Peak load รูปที่ 5.122 แสดงค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส เมื่อระบบไม่ได้ทำการติดตั้งและติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.122 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส เมื่อระบบ ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.123 ค่าขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆของระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส เมื่อระบบ ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.9 สรุป

ในการวิเคราะห์การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์มอนิกในระบบ เอช-ดีซี จะต้องทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาเทียบกับบทความจากวารสาร IEEE, IEE ที่เป็น Journal ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องจากผู้เชี่ยวชาญในด้านสาขานั้นแล้ว หรือทำการเทียบกับโปรแกรมที่บริษัทต่างๆ ได้ทำการผลิตขึ้นมาโดยเป็นโปรแกรมที่มีความน่าเชื่อถือ สำหรับโปรแกรมที่ได้เขียนขึ้นมานี้มี 3 โปรแกรมโดยประกอบไปด้วย โปรแกรม AC-DC Power Flow โดยใช้วิธีซีเวนเชิล, วิธียูนิไฟด์ และวิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ซึ่งทดสอบความถูกต้องกับวารสาร IEE; โปรแกรม Frequency Scan Analysis (FSA) ซึ่งทดสอบความถูกต้องกับวารสาร IEEE (IEEE TF) และทดสอบความถูกต้องกับโปรแกรม Visual PSA-H และสุดท้ายคือ โปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow (AC-DC HPF) ได้ทำการทดสอบความถูกต้องในส่วนของการคำนวณ AC Harmonic Power Flow (HPF) กับวารสาร IEEE (IEEE TF) และโปรแกรม Visual PSA-H (โปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow ทำการพัฒนามาจาก HPF)

สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดจากตารางต่างๆ จะทำการจับเวลาเฉพาะภายในช่วงของการวนรอบ (Iterations) ของการคำนวณจนค่ามิตเมตซ์ต่างๆมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ และได้ค่าของคำตอบออกมาเท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการรับค่าข้อมูลจากไฟล์อินพุต, การสร้าง Y-matrix จากข้อมูลของสายส่ง, การกำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมต่างเฟสของแรงดันแต่ละบัส หรือการสร้างเมตริกซ์  $B'$  และ  $B''$  และการแสดงผลของการคำนวณ

สำหรับผลของการทดสอบโปรแกรมทั้งหมดที่แสดงในบทนี้ ได้ทำการรันโปรแกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ CPU Pentium 166 MHz, EDO RAM 80 MB, ระบบปฏิบัติการ Windows 98 SE โดยใช้โปรแกรม Delphi 5.0 ทำการเขียนโปรแกรมการรับค่าข้อมูลอินพุต และใช้โปรแกรม MATLAB 5.3.1 ทำการเขียนโปรแกรมในส่วนของการคำนวณและจับเวลาของการคำนวณพร้อมทั้งการแสดงผล

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากจุดมุ่งหมายที่ได้กำหนดไว้สำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอแบบจำลองของการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและสมการเรขาคณิต ในการนำไปใช้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง หรือเรียกว่าการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี (AC-DC Power Flow) ที่มีคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบโมโนโพลาร์ซีลิงก์ 12-พัลส์ (12-pulse monopolar dc link) โดยทำการเชื่อมโยงในสายส่งเดียวระหว่างบัสสองบัสใดๆในระบบ ซึ่งมีการควบคุมปริมาณการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ และการปรับแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะการทำงานปกติและโหลดสมดุล แล้วทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อมีและไม่มีการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ และสำหรับการศึกษาและการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี จะนำเสนอในเรื่องของสมการที่ใช้ในการคำนวณ, แบบจำลองอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง, สมการของกำลังไฟฟ้า, การสแกนความถี่เพื่อบ่งบอกพฤติกรรมของระบบเอซี-ดีซีที่มีผลเกิดจากฮาร์มอนิกส์ และวิธีการคำนวณหาการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดี เพื่อหาระดับความเพี้ยนของแรงดันและกระแสโดยตรวจสอบระดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในขีดจำกัดของฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้หรือไม่ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อไม่ได้ติดตั้งและทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิก โดยสามารถสรุปผลของการวิเคราะห์และการทดสอบของโปรแกรมกับระบบทดสอบต่างๆได้ดังนี้

### 6.1 การเขียนโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี

ในขั้นต้นได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) และวิธีฟาส-ดีคัปเปิล (Fast-Decoupled method) โดยทำการพัฒนาโปรแกรมจาก [31] เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี โดยได้ทำการทดสอบความถูกต้องกับระบบทดสอบของ IEEE 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส และ 118 บัส [32] ซึ่งได้ผลของการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ

ต่อมาได้ทำการเขียนโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี โดยพัฒนาโปรแกรมมาจากวิธีฟาส-ดีคัปเปิล ซึ่งก็คือโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยใช้วิธีซีเควน

เชียล และวิธียูนิไฟด์ตามลำดับ แล้วจึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมจากวิธียูนิไฟด์โดยอาศัยทฤษฎีการเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณของวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับสมการเรซิดวลมาพัฒนาเป็นโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีโดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน ที่มีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพของการคำนวณดีกว่า โดยได้ทำการทดสอบความถูกต้องกับวารสาร IEE [18,19] และจาก [4] โดยผู้เขียนคือคนเดียวกัน ซึ่งจากการศึกษาและวิเคราะห์พบว่าโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยใช้วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน สามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณและการวางแผนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีบางส่วนทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี

วิธีการคำนวณ	ความแม่นยำของคำตอบ	การคู่เข้าหาค่าตอบ	จำนวนรอบของการคำนวณ	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ
วิธีซีแควนเชียล	ดี	พอใช้	ดี	ดีมาก
วิธียูนิไฟด์	ดีมาก	ดี	ดี	ดี
วิธียูนิไฟด์-นิวตัน-ราฟสัน	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดี

## 6.2 การเขียนโปรแกรมการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี

ในขั้นต้นได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์โดยทำการเขียนโปรแกรม Frequency Scan Analysis (FSA) โดยอาศัยแบบจำลองอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า โดยทำการทดสอบความถูกต้องกับวารสาร IEEE [29] และทำการทดสอบความถูกต้องกับโปรแกรม Visual PSA-H ที่ใช้ระบบทดสอบของ IEEE TF 14 บัส [29] ที่ปรับปรุงมาจาก [30] โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่บัส 3 และบัส 8 ซึ่งที่บัส 3 จะเป็นจุดเชื่อมต่อกับระบบ HVDC 12-พัลส์ ที่มีเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่ 11 ต่ออยู่ และที่บัส 8 จะทำการติดตั้ง Static Var Compensator (SVC) ที่ประกอบไปด้วย Thyristor-Controlled Reactor (TCR) และเครื่องกรองฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ซึ่งผลของการทดสอบพบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม FSA มีค่าใกล้เคียงกับวารสาร IEEE และโปรแกรม Visual PSA-H

ต่อมาได้ทำการเขียนโปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow (AC-DC HPF) โดยทำการทดสอบความถูกต้องในส่วนของการคำนวณ AC Harmonic Power Flow (HPF) กับวารสาร IEEE (IEEE TF) [29] และโปรแกรม Visual PSA-H ซึ่งโปรแกรม AC-DC Harmonic Power Flow จะทำการพัฒนามาจากโปรแกรม HPF ซึ่งจะพบว่าค่า %THD ของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆจากการรันโปรแกรม HPF เทียบกับโปรแกรม VPSA-H และ IEEE TF มีค่าใกล้เคียงกัน

### 6.3 การนำโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี ไปใช้วิเคราะห์กับระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังจริงจะใช้ระบบทดสอบภาคใต้ของประเทศไทย 133 บัส (EGAT) ต่อกับระบบทดสอบภาคเหนือของประเทศไทย 4 บัส (TNB) ที่กำหนดขึ้น โดยทำการจำลองในสถานะที่บัส 137 ของประเทศไทยส่งกำลังไฟฟ้าที่พิกัด 300 MW ผ่านระบบ HVDCมายังบัส 72 ของประเทศไทย การวิเคราะห์ในขั้นแรกจะทำการวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่ที่บัส 72 และบัส 137 โดยบัส 72 เป็นบัสที่มีอินเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC ติดตั้งอยู่และบัส 137 เป็นบัสที่มีเครื่องเรียงกระแสของระบบ HVDC ติดตั้งอยู่ ซึ่งจะทำการสแกนตั้งแต่ความถี่ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 จนถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 50 โดยทำการเพิ่มความถี่ของฮาร์มอนิกทีละ 0.2 โดยทำการพิจารณาในขณะที่ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 กับเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่ 11 และ 13 แบบขนานชนิดจูนความถี่เดียว (Single-Tuned shunt filters) ที่บัส 72 และบัส 137 โดยผลของการวิเคราะห์พบว่าเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุดที่ฮาร์มอนิกที่ 1.8 โดยมีค่าเท่ากับ 0.3583 p.u. และฮาร์มอนิกที่ 1.2 โดยมีค่าเท่ากับ 2.7171 p.u ตามลำดับ และพบว่าเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุดที่ฮาร์มอนิกที่ 1.8 โดยมีค่าเท่ากับ 0.3587 p.u. และฮาร์มอนิกที่ 1.2 โดยมีค่าเท่ากับ 2.6891 p.u ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกที่บัส 72 และบัส 137 โดยค่าความต้านทาน  $R_h$  มีผลต่อขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิก  $Z_h$  มากกว่าค่ารีแอคแตนซ์  $X_h$  ณ จุดที่ทำการสแกนความถี่ของระบบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 72 และบัส 137 เมื่อไม่ทำการติดตั้งและเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกในระบบ จะพบว่ารูปคลื่นของแรงดันที่บัสดังกล่าวมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกันมาก โดยมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มาก และเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกจะมีเพียงบัส 133 ถึงบัส 135 เท่านั้นที่มีค่า %THD ของแรงดันเกินมาตรฐาน IEEE Std. 519 โดยมีค่าเท่ากับ 4.2641 p.u., 4.5310 p.u. และ 4.9634 p.u. ตามลำดับ และเมื่อได้ทำการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกก็จะไม่มีบัสใดที่มีค่า %THD ของแรงดันเกินมาตรฐาน IEEE Std. 519 ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถที่จะทำการวางแผนการควบคุมปริมาณของฮาร์มอนิกให้อยู่ในขีดจำกัดตามมาตรฐานและคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งเครื่องกรองฮาร์มอนิกได้โดยคำนึงถึงความเหมาะสมโดยรวมของระบบ

## 6.4 ข้อเสนอแนะ

ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี จะต้องทำการวิเคราะห์ตามข้อกำหนดของโปรแกรม โดยในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ :

- 1) แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต้องสมดุล (Balanced phase) และเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal)
- 2) การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ต้องกำเนิดแรงดันที่สมดุล
- 3) กระแสและแรงดันไฟตรงต้องเรียบ (Smooth)
- 4) หม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์ไม่มีการสูญเสียและไม่เกิดแอดมิตแตนซ์ทำแม่เหล็ก (Magnetizing admittance)
- 5) การกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $\bar{x}$  ของระบบดีซี (Initial conditions for D.C. system) จะต้องมีความเหมาะสม โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ( $\cos \phi$ ) ที่บัสคอนเวอร์เตอร์ของระบบเอช-ดีซีมีค่าเท่ากับ 0.9,  $V_{term} = 1.0 \angle 0^\circ$  p.u.,  $V_{dr} = 1.0$  p.u.,  $V_{di} = -1.0$  p.u.,  $I_d = 1.0$  p.u.,  $a_r = 1.0$ ,  $a_i = 1.0$ ,  $\alpha_{min} = 5.0^\circ$  และ  $\gamma_{min} = 5.0^\circ$  ซึ่งใช้ค่าเริ่มต้นเหล่านี้ในทุกกรณีของการควบคุมการทำงานของระบบ HVDC สำหรับใช้ในการคำนวณเพาเวอร์ไหลในระบบเอช-ดีซี
- 6) ค่าเปอร์ยูนิตของค่าแรงดันไฟตรงของระบบ HVDC ต้องมีค่าใกล้เคียง 1 p.u. นั่นคือมีค่าอยู่ในช่วง  $0 < x < 2$  เช่นระบบ HVDC ทำการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 250 kV นั่นคือค่าฐานของแรงดันไฟตรง ( $kV_{BASE}$ ) ต้องมีค่าเท่ากับ 200 kV ซึ่งจะทำให้ค่าเปอร์ยูนิตของค่าแรงดันไฟตรงมีค่าเท่ากับ 1.25 p.u. และสำหรับค่าฐานของกำลังไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ทั้งระบบเอช-ดีซี คือมีค่าเท่ากับ 100 MVA หรือ 100 MW

และสำหรับการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี จะต้องทำการวิเคราะห์ตามข้อกำหนดของโปรแกรม โดยในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ :

- 1) แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีความสมดุลของสัญญาณไซน์ของแรงดันฮาร์มอนิกส์
- 2) ไม่มีการกระเพื่อมของกระแสไฟตรง  $I_d$
- 3) มุมเหลื่อม (Overlap angle) ไม่เกิน  $60^\circ$
- 4) หม้อแปลงในระบบไม่เกิดการอิ่มตัว, ไม่ค้ำเนินถึงเวกเตอร์รูป (ค้ำเนินถึงลักษณะการต่อเท่านั้น)และไม่กระทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในระบบ
- 5) คอนเวอร์เตอร์ 12-พัลส์ จะกำเนิดเฉพาะฮาร์มอนิกส์คู่คี่ลักษณะ คือฮาร์มอนิกส์ที่ 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47 และ 49 ตามลำดับ
- 6) การวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่ ถ้าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกถูกพิจารณาว่าเป็นโหลดในระบบ ในขั้นตอนของการสแกนความถี่จะต้องทำการเปิดวงจรอุปกรณ์ดังกล่าว

## 6.5 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป

จากผลของการศึกษาและการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี, โปรแกรมการวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่ และโปรแกรมการคำนวณการไหลของฮาร์โมนิกในระบบเอช-ดีซี ทั้งหมดจะต้องทำการศึกษาภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต้องสมดุล, การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ต้องกำเนิดแรงดันที่สมดุล, กระแสและแรงดันไฟตรงต้องเรียบ, หม้อแปลงในระบบไม่เกิดการอิ่มตัว, คอนเวอร์เตอร์ 12-พัลส์จะกำเนิดเฉพาะฮาร์โมนิกสี่คูณลักษณะ, ไม่คำนึงถึงเวกเตอร์กรุป (คำนึงถึงลักษณะการต่อเท่านั้น) และหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไม่กระทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกสี่ในระบบ

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นเพื่อที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์กับระบบไฟฟ้ากำลังจริงได้นั้น ต้องทำการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไปโดยได้นำเสนอโครงการต่างๆดังนี้

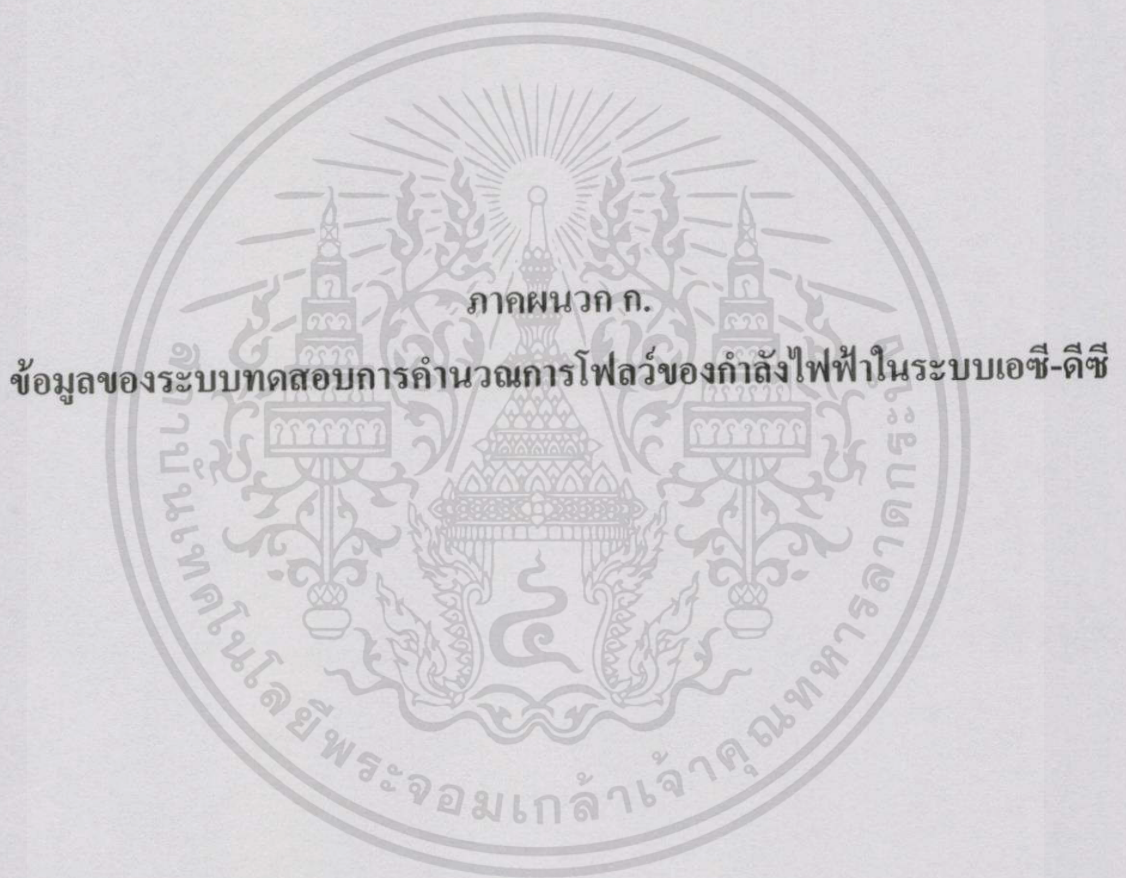
- 1) ทำการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี (Voltage Stability) ซึ่งจากการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้พบว่า การทำการเชื่อมโยงการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้พฤติกรรมการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีผลทำให้ค่าของแรงดันที่บัสต่างๆในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง และถ้ามีอุปกรณ์ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าอื่นๆติดตั้งอยู่ในระบบ เช่น Thyristor controlled series capacitor (TCSC), Static synchronous compensator (STATCOM), Unified power flow controller (UPFC) และ Flexible AC Transmission Systems (FACTS) ก็จะทำให้พฤติกรรมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลง
- 2) จากการที่มีอุปกรณ์ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าอื่นๆดังกล่าวข้างต้น ติดตั้งอยู่ในระบบจะทำให้ฮาร์โมนิกในระบบมีปริมาณมากขึ้น อีกทั้งในระบบเดิมก็มีแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกอื่นๆที่ไม่ได้ทำการพิจารณา เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบเมื่อเกิดการอิ่มตัว, เครื่องเชื่อมหรือเตาหลอมโลหะที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆ หรืออุปกรณ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงอุปกรณ์แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกต่างๆเหล่านี้
- 3) ในสภาวะจริงของระบบไฟฟ้ากำลังจะมีความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ซึ่งจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกอันดับต่างๆขึ้นในระบบจากสภาวะนี้ เช่น อันดับของฮาร์โมนิกที่ไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม (Interharmonic) หรือฮาร์โมนิกที่มีอันดับน้อยกว่าความถี่หลักมูล 50/60 Hz (Sub-harmonic) และอาจจะเกิดฮาร์โมนิกที่มีอันดับเป็นเลขคู่ (Even harmonic) ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกเป็นแบบสามเฟส

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Edward W. Kimbark. **Direct Current Transmission Vol. 1.** New York : John Wiley&Sons, Inc. 1971.
- [2] J. Arrillaga. **High Voltage Direct Current Transmission.** London : Peter Peregrinus, Ltd. 1988.
- [3] P. Kundur. **Power System Stability and Control.** New York : McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [4] J. Arrillaga, C. P. Arnold and B. J. Harker. **Computer Modelling of Electrical Power System.** London : John Wiley & Sons, Ltd. 1983.
- [5] Rice D. E. "A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Current." IEEE Trans. Industry Applications., vol. 30, no. 2, March/April 1994. pp. 294-304.
- [6] S. Rao. **EHV-AC, HVDC Transmission & Distribution Engineering.** 3rd Ed. Delhi : Khanna Publishers. 1999.
- [7] J. Arrillaga, B. Smith. **AC-DC Power System Analysis.** London : The Institute of Electrical Engineers. 1998.
- [8] T. J. E. Miller. **Reactive Power Control in Electric Systems.** New York : John Wiley&Sons, Inc. 1982.
- [9] IEEE Std 519-1992. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.** New York : IEEE, Inc. 1993.
- [10] Gerald T. Heydt. **Electric Power Quality.** 2nd Ed. Chelsea : Stars in a Circle Publications. 1994.
- [11] IEEE Power Engineering Society. "Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation." IEEE Inc., 1998.
- [12] W. Song, G. T. Heydt. "The Integration of HVDC Subsystems into the Harmonic Power Flow Algorithm." IEEE Trans. Power Apparatus and System., vol. PAS-103, no. 8, August 1984. pp. 1953-1961.
- [13] D. J. Tylavsky, F. C. Trutt. "The Newton-Raphson Load Flow Applied to AC/DC Systems with Commutation Impedance." IEEE Trans. Industry Applications., vol. IA-19, no. 6, November/December 1983. pp. 940-948.

- [14] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr. **Power System Analysis**. Singapore : McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [15] J. Arrillaga, C. P. Arnold, J. R. Camacho and S. Sankar. "AC-DC Load Flow with Unit-Connected Generator-Converter Infeeds." *IEEE Trans. Power Systems.*, vol. 8, no. 2, 1993. pp. 701-706.
- [16] D. A. Braunagel, L. A. Kraft and J. L. Whyson. "Inclusion of DC Converter and Transmission Equations Directly in a Newton Power Flow." *IEEE Trans. Power Apparatus and System.*, vol. PAS-95, no. 1, January/February 1976. pp. 76-88.
- [17] IEEE Std 399-1997. **IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis**. New York : IEEE, Inc. 1998.
- [18] H. Sato, J. Arrillaga. "Improved Load-Flow Techniques for Integrated A.C.-D.C. Systems." *Proc. IEE.*, vol. 116, no. 4, April 1969. pp. 525-532.
- [19] J. Arrillaga, P. Bodger. "Integration of H.V.D.C. Links with Fast-Decoupled Load-Flow Solutions." *Proc. IEE.*, vol. 124, no. 5, May 1977. pp. 463-468.
- [20] J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger. **Power System Harmonics**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1985.
- [21] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan and H. Wayne Beaty. **Electrical Power Systems Quality**. New York : McGraw-Hill, Inc. 1996.
- [22] William M. Grady, Robert J. Gilleskie. "Harmonics and how they relate to Power Factor." *Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93).*, November 1993. pp. 1-8.
- [23] Working Group 36-05. "Harmonic, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network." *ELECTRA.*, no. 77, July 1981. pp. 35-54.
- [24] G. D. Breuer, J. H. Chow, G. Addis, R. H. Lasseter and J. J. Vithayathil. "HVDC-AC Harmonic Interaction, Part 1 & 2." *IEEE Trans. Power Apparatus and System.*, vol. PAS-101, no. 3, March 1982. pp. 701-718.
- [25] T. J. Densem, P. S. Bodger and J. Arrillaga. "Three Phase Transmission System Modelling for Harmonic Penetration Studies." *IEEE Trans. Power Apparatus and System.*, vol. PAS-103, no. 2, February 1984. pp. 310-317.
- [26] Joint Task Force 36.05.02 / 14.03.03. "AC System Modelling for AC Filter Design an Overview of Impedance Modelling." *ELECTRA.*, no. 164, February 1996. pp. 133-151.

- [27] Working Group CC02. "Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance." ELECTRA., no.167, August 1996. pp. 97-131.
- [28] "PRC-PQG-01 / 1998 : ข้อกำหนดคกฏเกณฑ์สำร่มนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม." คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง และ การไฟฟ้าภูมิภาค, 2541.
- [29] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. "Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation." IEEE Trans. on Power Delivery., vol. 14, no. 2, April 1999, pp. 579-587.
- [30] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part 1 & 2." IEEE Trans. on Power Delivery., vol. 11, no. 1, January 1996, pp. 452-474.
- [31] Hadi Saadat. **Power System Analysis**. Singapore : WCB McGraw-Hill, Inc. 1999.
- [32] Freris, A. M. Sasson. "Investigation of the load-flow problem." Proc. IEE., 1968. 115 (10). pp. 1459-1470.
- [33] "การบรรยายเรื่องสายส่งระบบกระแสตรง 300 kV. EGAT. - TNB." EGAT. - TNB. Stage II Interconnection Project (300 / 600 MW.).
- [34] "Switching and Transmission Line Diagram." Equipment and Power System Diagram Section., Transmission System Operation Planning Department, System Control Operation Division, March 1999.



ตารางที่ ผ.5.1 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส

	Rectifier	Inverter
A.C.-D.C. busbar	Bus 5	Bus 4
D.C. voltage base (kV)	100	100
Transformer reactance (p.u.)	0.126	0.0728
Commutation reactance (p.u.)	0.126	0.0728
Filter admittance (p.u.)	0.478	0.629
D.C. link resistance (p.u.)	0.01335	
D.C. link power (MW)	61.7	-
Firing angle (deg)	15	-
Extinction angle (deg)	-	18
Converter d.c. voltage (kV)	-	128.87

โดยที่  $P_{dc,base} = 100 \text{ MW}$

ตารางที่ ผ.5.2 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 5 บัส

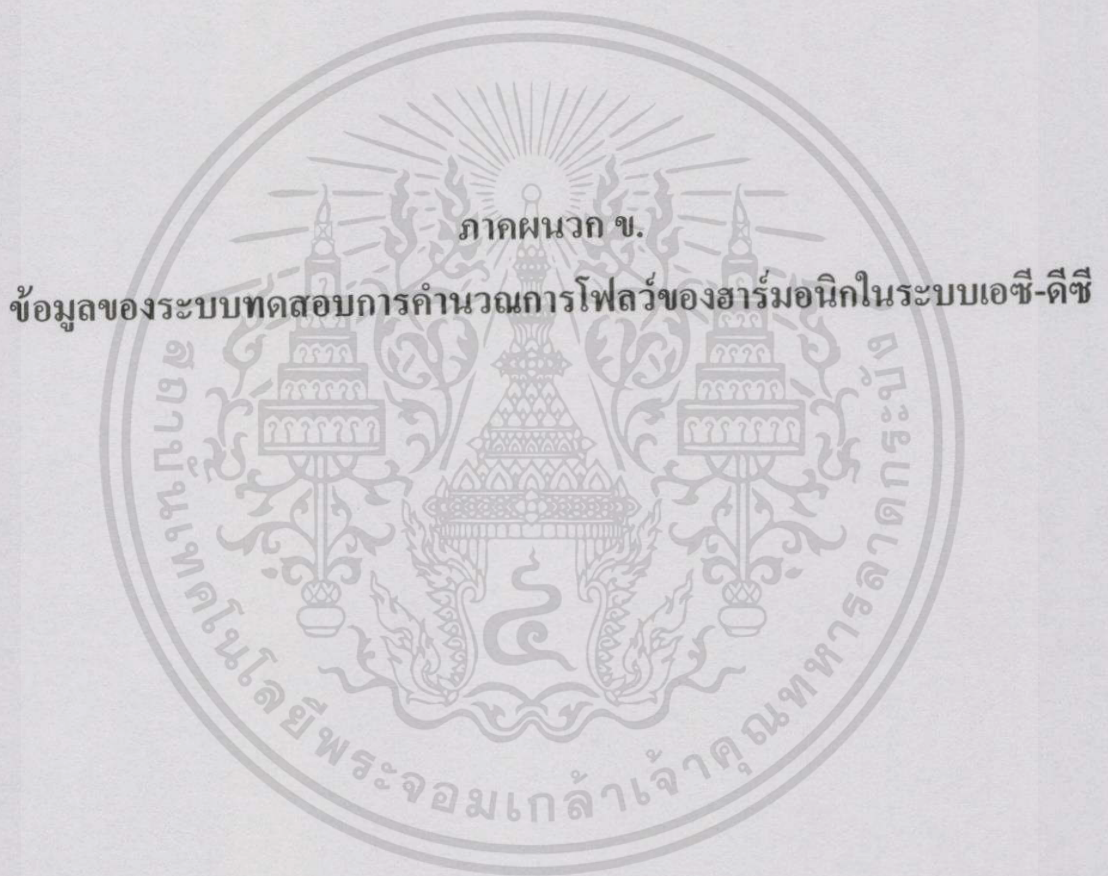
	Rectifier	Inverter
A.C.-D.C. busbar	Bus 2	Bus 5
Transformer reactance (p.u.)	0.0584	0.0601
Commutation reactance (p.u.)	0.0584	0.0601
Filter admittance (p.u.)	0.4541	0.5976
D.C. link resistance (p.u.)	0.04	
D.C. link power (MW)	45.4569	-
Firing angle (deg)	29.10	-
Extinction advance angle (deg)	-	155.51
Converter d.c. voltage (kV)	-	120

โดยที่  $P_{dc,base} = 100 \text{ MW}$  และ  $V_{dc,base} = 100 \text{ kV}$

ตารางที่ ผ.5.3 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส เมื่อเจนบัสเป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $P_G$  และ  $|V|$

	Rectifier	Inverter
A.C.-D.C. busbar	Bus 2	Bus 4
Transformer reactance (p.u.)	0.1071	0.0619
Commutation reactance (p.u.)	0.1071	0.0619
Filter admittance (p.u.)	0.4063	0.5347
D.C. link resistance (p.u.)	0.05811	
D.C. link power (MW)	56.1381	-
Firing angle (deg)	7	-
Extinction advance angle (deg)	-	160
Converter d.c. voltage (kV)	-	150

โดยที่  $P_{dc,base} = 100 \text{ MW}$  และ  $V_{dc,base} = 100 \text{ kV}$



ตารางที่ ผ.5.4 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส

Bus	Nominal Voltage (kV)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAR)
1	230	0	0
2	230	21.7	12.7
3	230	94.2	19
4	230	47.8	-3.9
5	230	7.6	1.6
6	115	11.2	7.5
7	230	0	0
8	13.8	0	0
9	115	29.5	16.6
10	115	9	5.8
11	115	3	1.8
12	115	6	1.6
13	115	13.5	5.8
14	115	14.9	5

ตารางที่ ผ.5.5 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี 14 บัส

No.	Bus	Bus type	Voltage setting (p.u.)	$P_G$ (MW)	$Q_{G,min}$ (MVAR)	$Q_{G,max}$ (MVAR)	$X_d''$ (p.u.)
1	1	Slack	$1.060 \angle 0^\circ$	-	-	-	0.250
2	2	PV	1.045	40.000	-40.000	50.000	0.250
3	3	PV	1.010	0	0	40.000	0.250
4	6	PV	1.070	0	-6.000	24.000	0.250
5	8	PV	1.090	0	-6.000	24.000	0.250

ตารางที่ ผ.5.6 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส

No.	Branch type	Left bus	Right bus	$R_l$ (p.u.)	$X_l$ (p.u.)	$B_l$ (p.u.)	Tap (p.u.)	Distance (km)
1	Line	1	2	0.01938	0.05917	0.05280	-	1.0
2	Line	1	5	0.05403	0.22304	0.04920	-	1.0
3	Line	2	3	0.04699	0.19797	0.04380	-	1.0
4	Line	2	4	0.05811	0.17632	0.03740	-	1.0
5	Line	2	5	0.05695	0.17388	0.03400	-	1.0
6	Line	3	4	0.06701	0.17103	0.03460	-	1.0
7	Xfmr (Y-Y)	4	7	0	0.20912	0	0.97800	1.0
8	Xfmr (Y-Y)	4	9	0	0.55618	0	0.96900	1.0
9	Xfmr (Y-Y)	5	6	0	0.25202	0	0.93200	1.0
10	Line	6	11	0.09498	0.19890	0	-	1.0
11	Line	6	12	0.12291	0.25581	0	-	1.0
12	Line	6	13	0.06615	0.13027	0	-	1.0
13	Xfmr (Y-Δ)	7	8	0	0.17615	0	1.0	1.0
14	Xfmr (Y-Y)	7	9	0	0.11001	0	1.0	1.0
15	Line	9	10	0.03181	0.08450	0	-	1.0
16	Line	9	14	0.12711	0.27038	0	-	1.0
17	Line	10	11	0.08205	0.19207	0	-	1.0
18	Line	12	13	0.22092	0.19988	0	-	1.0
19	Line	13	14	0.17093	0.34802	0	-	1.0

ตารางที่ ผ.5.7 ข้อมูลของคาปาซิเตอร์คงที่ ในระบบทดสอบเอช-ดีซี 14 บัส

Bus number	Susceptance* (p.u.)
9	0.1900

\*ค่าชัศพลแดนซ์เปอร์ยูนิตที่  $100 \text{ MVA}_{\text{Base}}$

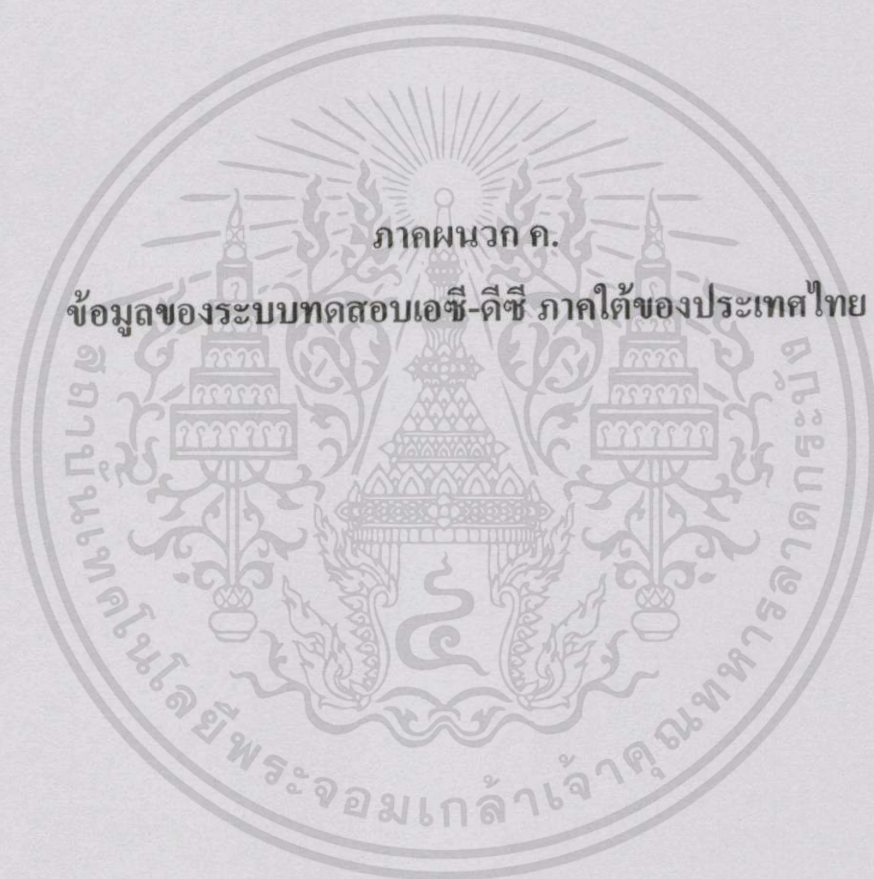
ตารางที่ ผ.5.8 ข้อมูลของเครื่องกรองฮาร์มอนิก ในระบบทดสอบเอชวีดี-ดีซี 14 บัส

Bus	Harmonic	$R$ (p.u.)	$L$ (p.u.)	$C$ (p.u.)
4	11	0.00964	$6.97048 \times 10^{-5}$	$8.34237 \times 10^{-4}$
	13	0.00815	$4.99070 \times 10^{-5}$	$8.34237 \times 10^{-4}$
5	11	0.01268	$9.17246 \times 10^{-5}$	$6.33967 \times 10^{-4}$
	13	0.01073	$6.56726 \times 10^{-5}$	$6.33967 \times 10^{-4}$

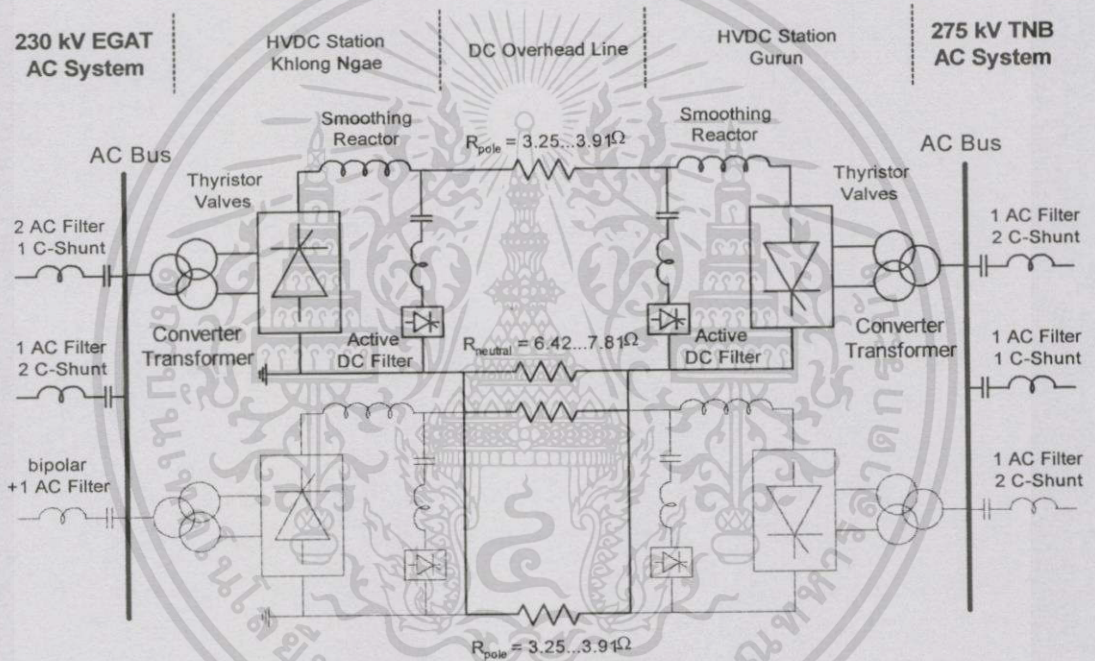
ตารางที่ ผ.5.9 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอชวีดี-ดีซี 14 บัส

	Rectifier	Inverter
A.C.-D.C. busbar	Bus 5	Bus 4
D.C. voltage base (kV)	100	100
Transformer reactance (p.u.)	0.126	0.0728
Commutation reactance (p.u.)	0.126	0.0728
Filter admittance (p.u.)	0.478	0.629
D.C. link resistance (p.u.)	0.01335	
D.C. link power (MW)	58.6	-
Firing angle (deg)	7	-
Extinction angle (deg)	-	10
Converter d.c. voltage (kV)	-	128.87

โดยที่ ระบบมีความถี่หลักมูลที่ 60 Hz และ  $P_{dc,base} = 100$  MW



กฟผ. (EGAT) และ การไฟฟ้ามาเลเซีย (TNB) ได้ลงนามในสัญญาแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าระหว่าง ไทย-มาเลเซีย ตามโครงการระบบส่งไฟฟ้าเชื่อมโยงไทย-มาเลเซีย ระยะที่ 1 เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2521 โดยเริ่มเชื่อมโยงด้วยระบบส่ง 115/132 kV. วงจรเดียว ระหว่างสถานีไฟฟ้าแรงสูง สะเดา ประเทศไทย และ สถานีไฟฟ้าแรงสูง Bubit Ketri ประเทศมาเลเซีย เป็นระยะทาง 26 กิโลเมตร โดยทั้งสองฝ่ายเห็นควรให้มีการทบทวนและปรับปรุงสัญญาแลกเปลี่ยนไฟฟ้า ระยะที่ 1 ซึ่งใช้งานมานานตั้งแต่วันที่ 27 กรกฎาคม 2521 จนถึงปัจจุบันโดยเปลี่ยนวิธีเสนอราคาเป็นรายชั่วโมงแทนการกำหนดราคาตายตัวซึ่งจะเริ่มซื้อขายกันวันที่ 1 เมษายน 2543 เป็นต้นไป และต่อไปจะมีการนำระบบส่งกระแสตรงเชื่อมโยง ไทย-มาเลเซีย ระยะที่ 2 เข้าใช้ประมาณปลายปี 2544 นี้ โดยมีการลงนามในสัญญาซื้อขายไฟฟ้าไทย-มาเลเซียฉบับใหม่เมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2543



รูปที่ ผ.5.1 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่าง EGAT - TNB

โดยที่

$$R_{dc} = R_{pole} + (R_{pole}) // (R_{neutral}) = 5.41...6.25 \Omega$$

Transmission Capacity:	300(600) MW ;	Rated Operating Current:	1,000 A DC
Thyristor Blocking Voltage:	8 kV ;	HVDC Line Data:	$\pm 300$ kV, 110 km
Distance:	EGAT. 25 km.	TNB. 85 km.	Total 110 km.
Pole conductor:	546 mm <sup>2</sup> ACSR/GA CARDINAL		
No. of conductor per pole/no. of pole:	2/2		
Neutral conductor:	477 MCM. ACSR/GA. HEN		
No. of neutral conductor:	2		
Contractor:	SIEMENS AG.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.10 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย

Bus	Name	Nominal Voltage (kV)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAR)
1	115KN	115	0	0
2	115RPB 115	115	0	0
3	115SRT 115	115	0	0
4	115SRT 115	115	0	0
5	115RPB 115	115	0	0
6	115NT 115	115	0	0
7	115NT 115	115	0	0
8	115PU 115	115	0	0
9	115KN 115	115	0	0
10	115SRT 115	115	0	0
11	115HY2 115	115	0	0
12	115HY2 115	115	0	0
13	115HY2 115	115	0	0
14	033KN 33.0	33	0	0
15	033RPB 33.0	33	0	0
16	033SRT 33.0	33	0	0
17	033SRT 33.0	33	0	0
18	033NT 33.0	33	0	0
19	033SRT 33.0	33	0	0
20	033HY2 33.0	33	0	0
21	033HY2 33.0	33	0	0
22	BLG H1 13.8	13.8	0.14	0.06
23	BLG H2 13.8	13.8	0	0
24	BLG H3 13.8	13.8	0	0
25	KN GT11 9.90	9.9	4.16	2.03
26	KN GT12 9.90	9.9	4.19	2.04
27	KN GT13 9.90	9.9	4.16	2.03
28	KN CC10 9.90	9.9	6.62	3.27
29	RPB H1 13.8	13.8	0.36	0.17
30	KN T1 13.2	13.2	3.70	2.40
31	KN T2 13.2	13.2	4.98	2.68
32	SRT S1 10.2	10.2	2.30	1.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.10 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

Bus	Name	Nominal Voltage (kV)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAR)
33	CP 115	115	0	0
34	SRT 115	115	0	0
35	PU-DET 115	115	0	0
36	TS 115	115	0	0
37	CP 115	115	0	0
38	LSN 115	115	0	0
39	SRT 115	115	0	0
40	PP 115	115	0	0
41	RPB 115	115	0	0
42	RN 115	115	0	0
43	TP 115	115	0	0
44	PN 115	115	0	0
45	PK1 115	115	0	0
46	PK2 115	115	0	0
47	KA 115	115	14.44	6.56
48	LR 115	115	0	0
49	TS 115	115	21.08	7.23
50	NT 115	115	0	0
51	BDN 115	115	0	0
52	KN 115	115	19.92	-16.35
53	PU 115	115	0	0
54	HY1 115	115	0	0
55	HY2 115	115	1.35	-0.38
56	SKL 115	115	0	0
57	STU 115	115	0	0
58	YL 115	115	0	0
59	NW 115	115	0	0
60	PTN 115	115	0	0
61	BLG 115	115	0	0
62	SDO 115	115	0	0
63	SUK 115	115	0	0
64	RA 115	115	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.10 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

Bus	Name	Nominal Voltage (kV)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAR)
65	KNE 115	115	0	0
66	RPB 230	230	0	0
67	SRT 230	230	0	0
68	KN 230	230	0	0
69	NT 230	230	0	0
70	PU 230	230	0	0
71	HY2 230	230	0	0
72	KNE 230	230	0	0
73	CP 22.0	22	15.12	7.86
74	CP 22.0	22	21.38	10.02
75	LSN 33.0	33	14.82	7.86
76	PP 33.0	33	16.11	9.63
77	PP 33.0	33	17.70	8.94
78	RPB 33.0	33	4.57	1.67
79	RN 33.0	33	8.45	1.87
80	RN 33.0	33	14.52	8.35
81	TP 33.0	33	3.85	1.05
82	TP 33.0	33	3.85	1.05
83	TP 33.0	33	3.85	1.05
84	PN 33.0	33	4.48	2.16
85	PN 33.0	33	15.51	-0.57
86	PK1 33.0	33	32.62	18.07
87	PK1 33.0	33	30.53	14.34
88	PK2 33.0	33	12.48	5.50
89	PK2 33.0	33	12.48	5.50
90	PK2 33.0	33	15.36	7.56
91	PK2 33.0	33	15.36	7.57
92	KA 33.0	33	3.18	0
93	KA 33.0	33	14.02	-5.40
94	LR 33.0	33	13.03	5.70
95	LR 33.0	33	16.56	8.79
96	LR 33.0	33	16.56	8.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.10 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

Bus	Name	Nominal Voltage (kV)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAR)
97	MOBILE 33.0	33	15.41	8.64
98	TS 33.0	33	24.76	12.28
99	TS 33.0	33	16.31	6.58
100	NT 33.0	33	28.14	11.59
101	NT 33.0	33	38.49	19.94
102	BDN 33.0	33	24.66	11.00
103	BDN 33.0	33	27.95	14.54
104	KN 33.0	33	4.57	0.69
105	KN 33.0	33	14.42	6.88
106	PU 33.0	33	18.70	6.58
107	PU 33.0	33	14.52	4.91
108	HY1 33.0	33	23.47	7.86
109	HY1 33.0	33	31.23	13.56
110	HY2 33.0	33	23.27	9.04
111	HY2 33.0	33	25.76	5.60
112	SKL 33.0	33	23.87	11.10
113	SKL 33.0	33	28.44	11.10
114	STU 33.0	33	14.92	3.73
115	STU 33.0	33	12.63	8.64
116	SUK 33.0	33	15.81	7.27
117	YL 33.0	33	10.39	4.42
118	YL 33.0	33	10.39	4.42
119	YL 33.0	33	14.02	6.29
120	NW 33.0	33	11.83	2.85
121	NW 33.0	33	6.76	3.14
122	RA 33.0	33	8.95	4.13
123	RA 33.0	33	10.74	2.65
124	PTN 33.0	33	13.82	4.13
125	PTN 33.0	33	14.62	5.55
126	PTN 33.0	33	14.62	5.55
127	BLG 33.0	33	3.63	0.98
128	BLG 33.0	33	3.63	0.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.10 ข้อมูลของบัส ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

Bus	Name	Nominal Voltage (kV)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVAR)
129	SDO 33.0	33	12.23	5.11
130	SDO 33.0	33	10.44	3.73
131	PKK 115	115	0	0
132	BSP 230	230	0	0
133	SDO 132	132	0	0
134	CPNG 132	132	0	0
135	CPNG 275	275	0	0
136	MALY 275	275	0	0
137	GRUN 275	275	0	0

สำหรับสแลคบัสของระบบทดสอบเอเชีย-ดีซีภาคใต้ของประเทศไทย คือบัส 131 และบัส 132 โดยที่ค่าของแรงดันที่บัสดังกล่าวจะได้อาจการันเพาเวอร์โฟลว์ของระบบไฟฟ้าของประเทศไทย และสัญลักษณ์อักษรย่อของ Substation ต่างๆ ที่ใช้ในข้อมูลของบัสในระบบทดสอบ คือ

BDN คือ BAN DON	PN คือ PHANGNGA
BSP คือ BANG SAPHAN	PU คือ PHATTHALUNG
BST คือ BAN SANTI	PK1 คือ PHUKET-1
BLG คือ BANGLANG SUB.	PK2 คือ PHUKET-2
CP คือ CHUMPHON	PKK คือ PRACHUAP KHIRI KHAN
CPNG คือ CHUPING	PP คือ PHUNPHIN
GRUN คือ GURUN	RPB คือ RAJJAPRABHA
HY1 คือ HAT YAI-1	RN คือ RANONG
HY2 คือ HAT YAI-2	RA คือ RANOT
KN คือ KHANOM	SDO คือ SADAO
KNE คือ KHLONG NGAE	STU คือ SATUN
KA คือ KRABI	SKL คือ SONGKHLA
LR คือ LAM POO RA	SUK คือ SUNGAI KOLOK
LSN คือ LANG SUAN	SRT คือ SURAT THANI
MALY คือ MALASIA SYSTEM	TP คือ TAKUA PA
NT คือ NAKHON SI THAMMARAT	TS คือ THUNG SONG
NW คือ NARATHIWAT	YL-1 คือ YALA-1
PTN คือ PATTANI	YL-2 คือ YALA-2

ตารางที่ ผ.5.11 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย

No.	Bus	Bus type	Voltage setting (p.u.)	$P_G$ (MW)	$Q_{G,min}$ (MVAR)	$Q_{G,max}$ (MVAR)	$X_d''$ (p.u.)
1	22	PV	0.9716	24.000	-7.400	14.900	0.174
2	23	PV	0.9718	24.000	-7.400	14.900	0.174
3	24	PV	0.9718	24.000	-7.400	14.900	0.174
4	25	PV	0.9902	110.000	-37.200	45.000	0.151
5	26	PV	0.9902	110.000	-37.200	45.000	0.151
6	27	PV	0.9902	110.000	-37.200	45.000	0.180
7	28	PV	0.9869	165.000	-37.200	45.000	0.151
8	29	PV	0.9909	40.000	-74.000	47.000	0.195
9	30	PV	0.9638	70.000	-23.200	46.500	0.246
10	31	PV	0.9923	70.000	-23.200	46.500	0.246
11	32	PV	1.0000	25.000	-1.000	7.500	0.190
12	131	Slack	1.0400 $\angle$ -44.86°	-	-	-	0.276
13	132	Slack	1.0450 $\angle$ -46.05°	-	-	-	0.276
14	136	PV	1.0200	357.000	-100.000	100.000	0.276

ตารางที่ ผ.5.12 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย

No.	Branch type	Left bus	Right bus	$R_l$ (p.u.)	$X_l$ (p.u.)	$B_l$ (p.u.)	Tap (p.u.)	Distance (km)
1	Xfmr (Y-Y)	1	14	0	0.25750	0	1.0000	-
2	Xfmr (Y-Y)	52	1	0	-0.01050	0	1.0500	-
3	Xfmr (Y-Y)	68	1	0.00140	0.13100	0	1.0875	-
4	Xfmr (Y-Y)	2	15	0	0.22650	0	1.0000	-
5	Xfmr (Y-Y)	41	2	0	-0.00680	0	1.0500	-
6	Xfmr (Y-Y)	66	2	0.00060	0.07279	0	1.0625	-
7	Xfmr (Y-Y)	3	16	0	0.27550	0	1.0000	-
8	Xfmr (Y-Y)	39	3	0	-0.01050	0	1.0500	-
9	Xfmr (Y-Y)	67	3	0.00140	0.14050	0	1.0125	-
10	Xfmr (Y-Y)	4	17	0	0.27550	0	1.0000	-
11	Xfmr (Y-Y)	39	4	0	-0.01050	0	1.0500	-
12	Xfmr (Y-Y)	67	4	0.00140	0.14050	0	1.0125	-
13	Xfmr (Y-Y)	41	5	0	-0.00680	0	1.0500	-
14	Xfmr (Y-Y)	66	5	0.00060	0.07279	0	1.0625	-

ตารางที่ ผ.5.12 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

No.	Branch type	Left bus	Right bus	$R_I$ (p.u.)	$X_I$ (p.u.)	$B_I$ (p.u.)	Tap (p.u.)	Distance (km)
15	Xfmr (Y-Y)	6	18	0	-0.00680	0	1.0000	-
16	Xfmr (Y-Y)	50	6	0	-0.00680	0	1.0000	-
17	Xfmr (Y-Y)	69	6	0.00060	0.07279	0	1.0125	-
18	Xfmr (Y-Y)	50	7	0	-0.00680	0	1.0000	-
19	Xfmr (Y-Y)	69	7	0.00060	0.07279	0	1.0125	-
20	Xfmr (Y-Y)	53	8	0	-0.00680	0	1.0500	-
21	Xfmr (Y-Y)	70	8	0.00060	0.07279	0	1.0625	-
22	Xfmr (Y-Y)	52	9	0	-0.01050	0	1.0500	-
23	Xfmr (Y-Y)	68	9	0.00140	0.13100	0	1.0875	-
24	Xfmr (Y-Y)	10	19	0	0.27550	0	1.0000	-
25	Xfmr (Y-Y)	39	10	0	-0.01050	0	1.0500	-
26	Xfmr (Y-Y)	67	10	0.00140	0.14050	0	1.0125	-
27	Xfmr (Y-Y)	11	20	0	0.22650	0	1.0000	-
28	Xfmr (Y-Y)	55	11	0	-0.00680	0	1.0500	-
29	Xfmr (Y-Y)	71	11	0.00060	0.07279	0	1.0500	-
30	Xfmr (Y-Y)	12	21	0	0.22654	0	1.0000	-
31	Xfmr (Y-Y)	55	12	0	-0.00680	0	1.0500	-
32	Xfmr (Y-Y)	71	12	0.00060	0.07279	0	1.0500	-
33	Xfmr (Y-Y)	55	13	0	-0.00680	0	1.0500	-
34	Xfmr (Y-Y)	71	13	0.00060	0.07279	0	1.0500	-
35	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	22	61	0	0.33850	0	0.9375	-
36	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	23	61	0	0.33850	0	0.9375	-
37	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	24	61	0	0.33850	0	0.9375	-
38	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	25	68	0	0.06520	0	0.9500	-
39	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	26	68	0	0.06520	0	0.9500	-
40	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	27	68	0	0.06520	0	0.9500	-
41	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	28	68	0	0.06520	0	0.9500	-
42	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	29	66	0	0.13260	0	0.9500	-
43	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	30	52	0	0.11490	0	0.9500	-
44	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	31	68	0	0.11490	0	0.9500	-
45	Xfmr ( $\Delta$ -Y)	32	39	0	0.24860	0	0.9500	-
46	Line	33	37	0.05147	0.15132	0.01971	-	0.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.12 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

No.	Branch type	Left bus	Right bus	$R_l$ (p.u.)	$X_l$ (p.u.)	$B_l$ (p.u.)	Tap (p.u.)	Distance (km)
47	Line	33	38	0.00136	0.00401	0.00052	-	10.000
48	Line	33	39	0.12715	0.37383	0.04868	-	176.055
49	Line	34	37	0.05147	0.15132	0.01971	-	176.055
50	Line	34	39	0.12715	0.37383	0.04868	-	0.010
51	Line	35	36	0.01754	0.18569	0.04735	-	0.010
52	Line	35	53	0.00812	0.02387	0.00311	-	0.010
53	Line	35	65	0.02413	0.25536	0.06512	-	100.000
54	Line	37	131	0.17820	0.52393	0.06823	-	175.585
55	Line	37	131	0.17820	0.52393	0.06823	-	175.585
56	Xfmr (Y-Y)	73	37	0	0.25240	0	1.0200	-
57	Xfmr (Y-Y)	74	37	0	0.25240	0	1.0500	-
58	Xfmr (Y-Y)	75	38	0	0.51067	0	1.0500	-
59	Line	39	40	0.01180	0.02047	0.00214	-	6.240
60	Line	39	43	0.21605	0.37616	0.03943	-	114.074
61	Line	39	51	0.01364	0.04054	0.00517	-	13.443
62	Xfmr (Y-Y)	76	40	0	0.25240	0	1.0350	-
63	Xfmr (Y-Y)	77	40	0	0.51067	0	1.0200	-
64	Line	41	44	0.07377	0.21920	0.02795	-	72.691
65	Line	41	44	0.07377	0.21920	0.02795	-	72.691
66	Line	41	44	0.04980	0.21902	0.03280	-	72.691
67	Line	41	44	0.04980	0.21902	0.03280	-	72.691
68	Xfmr (Y-Y)	78	41	0	0.73300	0	0.9800	-
69	Line	42	43	0.16790	0.36174	0.04362	-	116.782
70	Xfmr (Y-Y)	79	42	0	0.49240	0	1.0312	-
71	Xfmr (Y-Y)	80	42	0	0.49240	0	1.0375	-
72	Line	43	44	0.08537	0.14551	0.01580	-	44.880
73	Xfmr (Y-Y)	81	43	0	1.56000	0	1.0400	-
74	Xfmr (Y-Y)	82	43	0	1.56000	0	1.0400	-
75	Xfmr (Y-Y)	83	43	0	1.56000	0	1.0400	-
76	Line	44	45	0.07706	0.22897	0.02920	-	75.932
77	Line	44	45	0.07706	0.22897	0.02920	-	75.932
78	Line	44	47	0.18486	0.31872	0.03400	-	97.459

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.12 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอจี-ดีจี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

No.	Branch type	Left bus	Right bus	$R_I$ (p.u.)	$X_I$ (p.u.)	$B_I$ (p.u.)	Tap (p.u.)	Distance (km)
79	Xfmr (Y-Y)	84	44	0	0.73300	0	1.0000	-
80	Xfmr (Y-Y)	85	44	0	0.51067	0	0.9850	-
81	Line	45	46	0.01816	0.05338	0.00695	-	17.769
82	Xfmr (Y-Y)	86	45	0	0.25240	0	1.0400	-
83	Xfmr (Y-Y)	87	45	0	0.25240	0	1.0350	-
84	Xfmr (Y-Y)	88	46	0	0.51067	0	1.0100	-
85	Xfmr (Y-Y)	89	46	0	0.51067	0	1.0100	-
86	Xfmr (Y-Y)	90	46	0	0.51067	0	1.0200	-
87	Xfmr (Y-Y)	91	46	0	0.51067	0	1.0200	-
88	Line	47	48	0.16073	0.27696	0.02953	-	84.730
89	Xfmr (Y-Y)	92	47	0	0.51067	0	0.9750	-
90	Xfmr (Y-Y)	93	47	0	0.51067	0	0.9500	-
91	Line	48	49	0.09391	0.16163	0.01721	-	49.445
92	Line	48	53	0.12065	0.20573	0.02235	-	63.500
93	Xfmr (Y-Y)	94	48	0	0.49240	0	1.0250	-
94	Xfmr (Y-Y)	95	48	0	0.51067	0	1.0200	-
95	Xfmr (Y-Y)	96	48	0	0.51067	0	1.0200	-
96	Xfmr (Y-Y)	97	48	0	0.51067	0	1.0650	-
97	Line	49	50	0.02018	0.14614	0.02026	-	51.050
98	Line	49	50	0.02018	0.14614	0.02026	-	51.050
99	Xfmr (Y-Y)	98	49	0	0.25240	0	1.0200	-
100	Xfmr (Y-Y)	99	49	0	0.25240	0	1.0000	-
101	Line	50	64	0.05257	0.23120	0.03463	-	83.593
102	Line	50	64	0.05257	0.23120	0.03463	-	83.593
103	Xfmr (Y-Y)	100	50	0	0.25240	0	1.0200	-
104	Xfmr (Y-Y)	101	50	0	0.25240	0	1.0400	-
105	Xfmr (Y-Y)	102	51	0	0.25240	0	1.0500	-
106	Xfmr (Y-Y)	103	51	0	0.25240	0	1.0400	-
107	Xfmr (Y-Y)	104	52	0	0.25240	0	1.0000	-
108	Xfmr (Y-Y)	105	52	0	0.51067	0	1.0300	-
109	Line	53	54	0.15526	0.26493	0.02880	-	81.819
110	Xfmr (Y-Y)	106	53	0	0.25240	0	1.0000	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.12 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอซี-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

No.	Branch type	Left bus	Right bus	$R_I$ (p.u.)	$X_I$ (p.u.)	$B_I$ (p.u.)	Tap (p.u.)	Distance (km)
111	Xfmr (Y-Y)	107	53	0	0.25240	0	1.0000	-
112	Line	54	55	0.01140	0.02432	0.00299	-	8.772
113	Line	54	55	0.00890	0.0264	0.00337	-	7.931
114	Line	54	57	0.07450	0.22137	0.02823	-	73.410
115	Xfmr (Y-Y)	108	54	0	0.25240	0	1.0000	-
116	Xfmr (Y-Y)	109	54	0	0.25240	0	1.0000	-
117	Line	55	56	0.02086	0.06197	0.00790	-	20.552
118	Line	55	56	0.02086	0.06197	0.00790	-	20.552
119	Line	55	60	0.09642	0.28347	0.03692	-	94.973
120	Line	55	60	0.09642	0.28347	0.03692	-	94.973
121	Line	55	62	0.04457	0.13243	0.01689	-	43.915
122	Xfmr (Y-Y)	110	55	0	0.25240	0	1.0000	-
123	Xfmr (Y-Y)	111	55	0	0.25240	0	1.0000	-
124	Xfmr (Y-Y)	112	56	0	0.25240	0	1.0100	-
125	Xfmr (Y-Y)	113	56	0	0.25240	0	1.0100	-
126	Xfmr (Y-Y)	114	57	0	0.51067	0	1.0200	-
127	Xfmr (Y-Y)	115	57	0	0.51027	0	1.0500	-
128	Line	58	59	0.08739	0.18828	0.02270	-	60.783
129	Line	58	60	0.03994	0.11866	0.01513	-	39.351
130	Line	58	61	0.05742	0.12372	0.01492	-	39.942
131	Line	58	61	0.05742	0.12372	0.01492	-	39.942
132	Xfmr (Y-Y)	117	58	0	0.51067	0	1.0000	-
133	Xfmr (Y-Y)	118	58	0	0.51067	0	1.0000	-
134	Xfmr (Y-Y)	119	58	0	0.51067	0	1.0000	-
135	Line	59	63	0.05088	0.14958	0.01948	-	50.069
136	Xfmr (Y-Y)	120	59	0	0.51067	0	0.9625	-
137	Xfmr (Y-Y)	121	59	0	0.51067	0	1.0000	-
138	Xfmr (Y-Y)	124	60	0	0.51067	0	0.9800	-
139	Xfmr (Y-Y)	125	60	0	0.51067	0	1.0000	-
140	Xfmr (Y-Y)	126	60	0	0.51067	0	1.0200	-
141	Xfmr (Y-Y)	127	61	0	1.56000	0	0.9900	-
142	Xfmr (Y-Y)	128	61	0	1.56000	0	0.9900	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.12 ข้อมูลของสายส่ง ในระบบทดสอบเอซี-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

No.	Branch type	Left bus	Right bus	$R_l$ (p.u.)	$X_l$ (p.u.)	$B_l$ (p.u.)	Tap (p.u.)	Distance (km)
143	Xfmr (Y-Y)	129	62	0	0.51067	0	1.0300	-
144	Xfmr (Y-Y)	130	62	0	0.51067	0	1.0300	-
145	Xfmr (Y-Y)	116	63	0	0.25240	0	1.0000	-
146	Xfmr (Y-Y)	122	64	0	0.25240	0	1.0000	-
147	Xfmr (Y-Y)	123	64	0	0.25240	0	1.0000	-
148	Line	66	67	0.00512	0.04029	0.07593	-	51.312
149	Line	66	67	0.00512	0.04029	0.07593	-	51.312
150	Line	67	68	0.00763	0.06006	0.11318	-	76.486
151	Line	67	68	0.00763	0.06006	0.11318	-	76.486
152	Line	67	132	0.02871	0.22586	0.42563	-	287.656
153	Line	67	132	0.02871	0.22586	0.42563	-	287.656
154	Line	68	69	0.00974	0.07662	0.14440	-	97.589
155	Line	68	69	0.00974	0.07662	0.14440	-	97.589
156	Line	69	70	0.00894	0.07036	0.13259	-	89.606
157	Line	69	70	0.00894	0.07036	0.13259	-	89.606
158	Line	70	71	0.00879	0.06918	0.13036	-	88.101
159	Line	70	71	0.00879	0.06918	0.13036	-	88.101
160	Line	71	72	0.00150	0.01557	0.06576	-	30.171
161	Line	71	72	0.00150	0.01557	0.06576	-	30.171
162	Xfmr (Y-Y)	62	133	0	0.51067	0	1.0000	-
163	Line	133	134	0.01816	0.05338	0.00695	-	26.000
164	Xfmr (Y-Y)	135	134	0	0.14050	0	1.0000	-
165	Line	135	136	0.00974	0.07662	0.14440	-	9.598
166	Line	135	136	0.00974	0.07662	0.14440	-	9.598
167	Line	136	137	0.00150	0.01557	0.06576	-	6.478
168	Line	136	137	0.00150	0.01557	0.06576	-	6.478

ตารางที่ ผ.5.13 ข้อมูลของคาปาซิเตอร์ที่บัส ในระบบทดสอบเอซี-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย

No.	Bus number	Susceptance* (p.u.)
1	44	0.2204
2	45	0.2204
3	46	0.6612

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.13 ข้อมูลของคาปาซิเตอร์ที่บัส ในระบบทดสอบเอช-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

No.	Bus number	Susceptance* (p.u.)
4	47	0.2204
5	48	0.2204
6	49	0.4408
7	50	0.2204
8	53	0.3306
9	55	0.3306
10	58	0.2204
11	73	0.0606
12	79	0.0603
13	80	0.0909
14	88	0.0303
15	89	0.0303
16	90	0.0288
17	91	0.0288
18	94	0.0658
19	95	0.0411
20	96	0.0411
21	101	0.0576
22	108	0.1062
23	109	0.1455
24	112	0.0909
25	113	0.0909
26	114	0.0576
27	115	0.0303
28	116	0.1212
29	119	0.0494
30	120	0.0864
31	121	0.0576
32	122	0.0606
33	124	0.0864
34	125	0.0303
35	126	0.0303
36	129	0.0288

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*ค่าชั้สเซปแดนซ์เปอร์ยูนิตที่  $100 \text{ MVA}_{\text{Base}}$

ตารางที่ ผ.5.14 ข้อมูลของเครื่องกรองฮาร์มอนิก ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย

Bus	Harmonic	$R$ (p.u.)	$L$ (p.u.)	$C$ (p.u.)
72	11	0.01212	$1.05227 \times 10^{-4}$	$7.95775 \times 10^{-4}$
	13	0.01026	$7.53408 \times 10^{-5}$	$7.95775 \times 10^{-4}$
137	11	0.01212	$1.05227 \times 10^{-4}$	$7.95775 \times 10^{-4}$
	13	0.01026	$7.53408 \times 10^{-5}$	$7.95775 \times 10^{-4}$

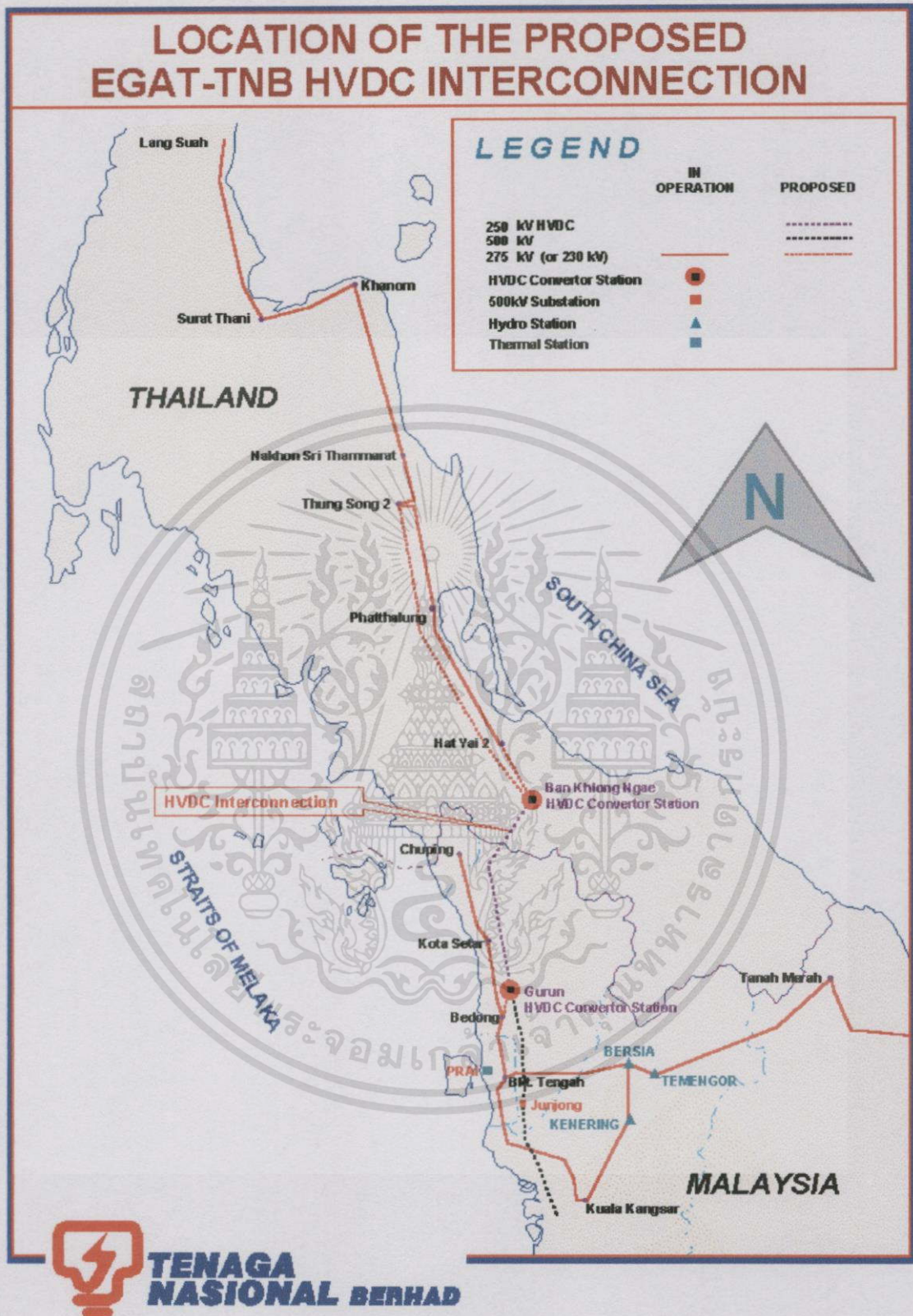
ตารางที่ ผ.5.15 ข้อมูลของระบบ HVDC ในระบบทดสอบเอเชีย-ดีซี ภาคใต้ของประเทศไทย

	Rectifier	Inverter
A.C.-D.C. busbar	Bus 137	Bus 72
D.C. voltage base (kV)	300	300
Transformer reactance (p.u.)	0.140	0.140
Commutation reactance (p.u.)	0.140	0.140
Filter admittance (p.u.)	2.800	2.300
D.C. link resistance ( $\Omega$ )	-	5.24
D.C. link power (MW)	-	300
Firing angle (deg)	15	-
Extinction angle (deg)	-	18
Converter d.c. voltage (kV)	300	-

โดยที่ ระบบมีความถี่หลักมูลที่ 50 Hz และ  $P_{dc,base} = 100 \text{ MW}$

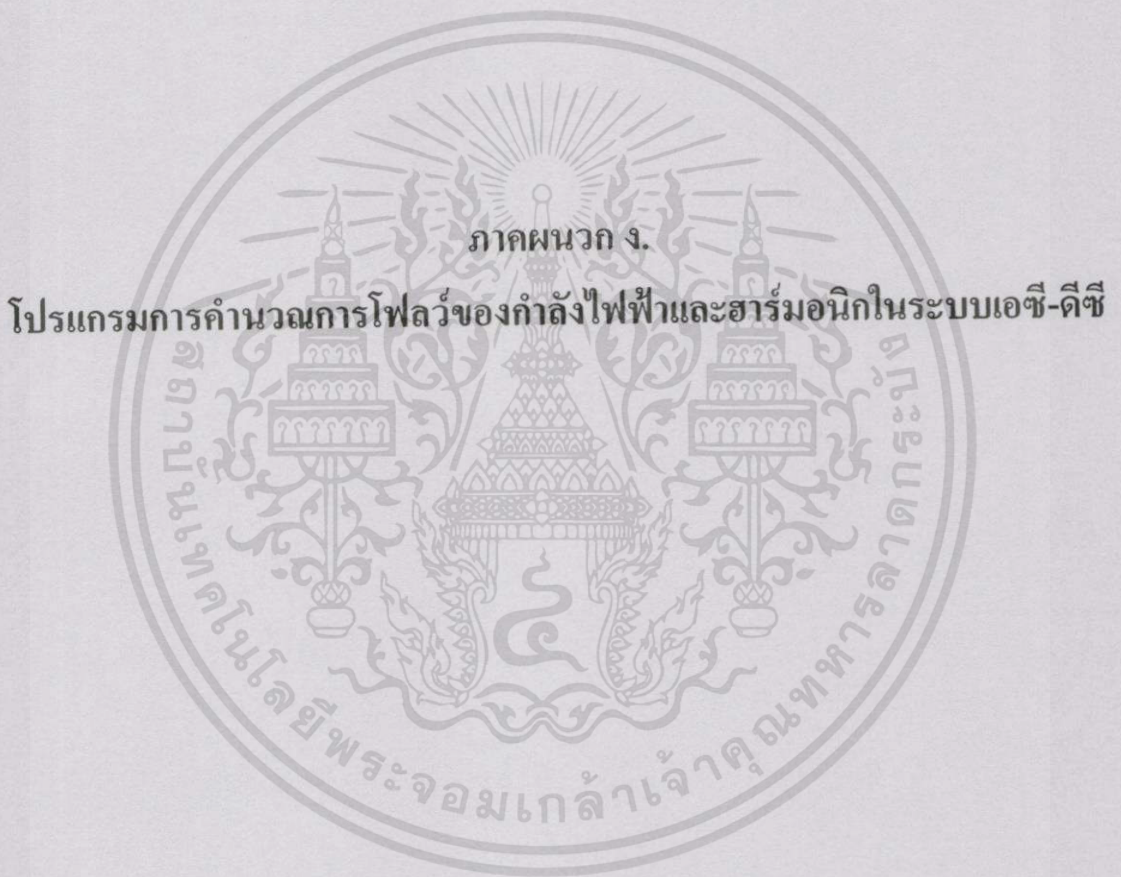
- สำหรับข้อมูลของสายส่ง เมื่อทำการคำนวณการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอเชีย-ดีซี ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งจะต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ในส่วนขององค์ประกอบลำดับลบ (Negative sequence) คือ  $R_2$ ,  $X_2$  และ  $B_2$  จะมีค่าเท่ากับ  $R_1$ ,  $X_1$  และ  $B_1$  ตามลำดับ
- สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆของ Filter จะเป็นค่าที่กำหนดขึ้นมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น
- ข้อมูลต่างๆของระบบภาคใต้ของประเทศไทยที่ใช้รันโหลดโพล์ จะเป็นข้อมูลของวันที่ 19 กรกฎาคม 2542, ข้อมูลของโหลดจะเป็นข้อมูลของเดือน สิงหาคม 2542 (Peak load) และข้อมูลของ Switching and transmission line diagram [34] จะเป็นข้อมูลของวันที่ 1 มีนาคม 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

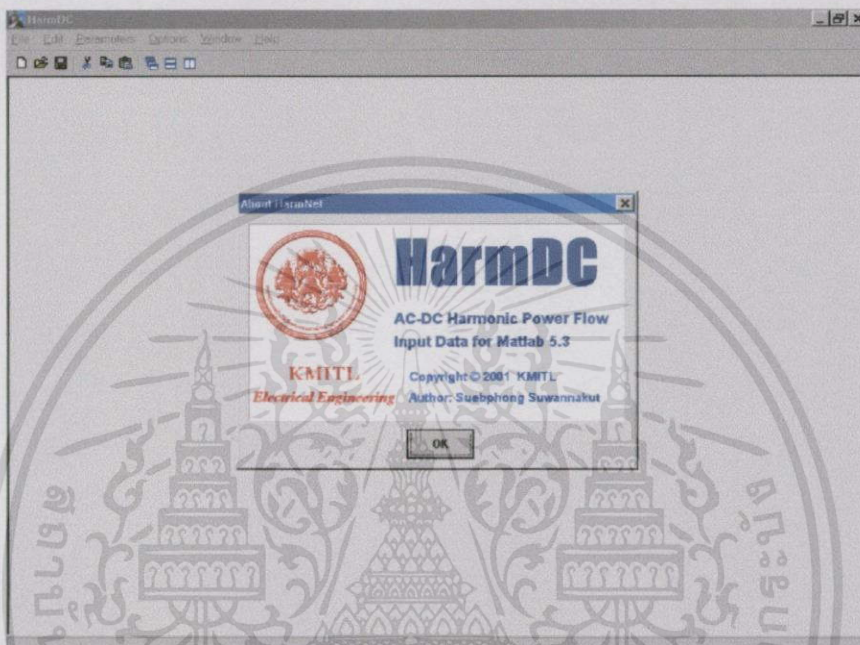


รูปที่ ผ.5.2 แผนที่แสดงการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC ระหว่าง EGAT - TNB

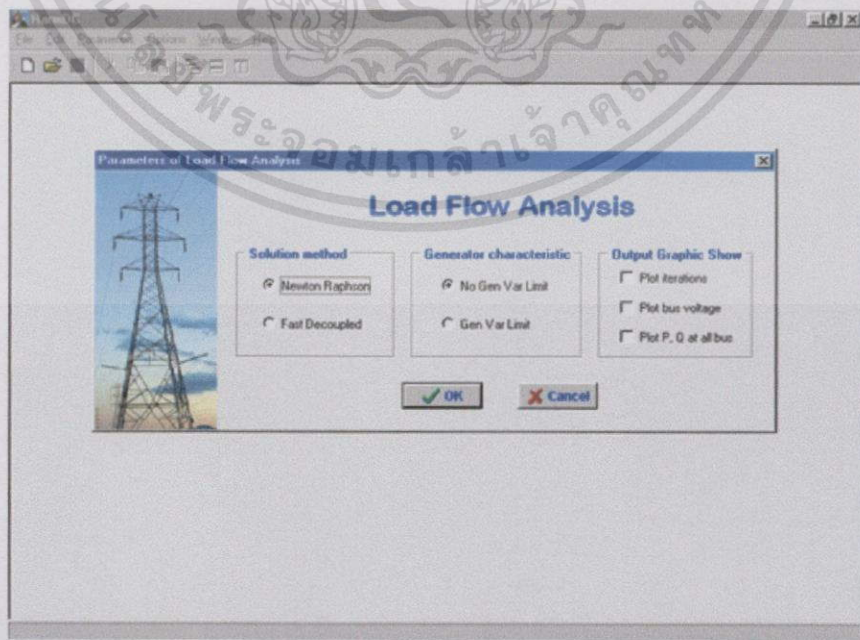
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี เขียนขึ้นจากโปรแกรม Delphi 5.0 และโปรแกรม MATLAB 5.3 หรือ MATLAB 5.3.1 สำหรับส่วนรับค่าข้อมูลจะใช้โปรแกรม Delphi 5.0 เขียนขึ้นมาซึ่งเรียกโปรแกรมนี้ว่า HarmDC โดยสามารถรับข้อมูลและแก้ไขข้อมูลได้ สำหรับขีดจำกัดของการรับค่าข้อมูลของระบบ คือ 1200 บัส และ 1500 สายส่ง (สามารถขยายระบบได้อีก) ดังแสดงโปรแกรมในรูปแบบที่ ผ.5.3 – ผ.5.7

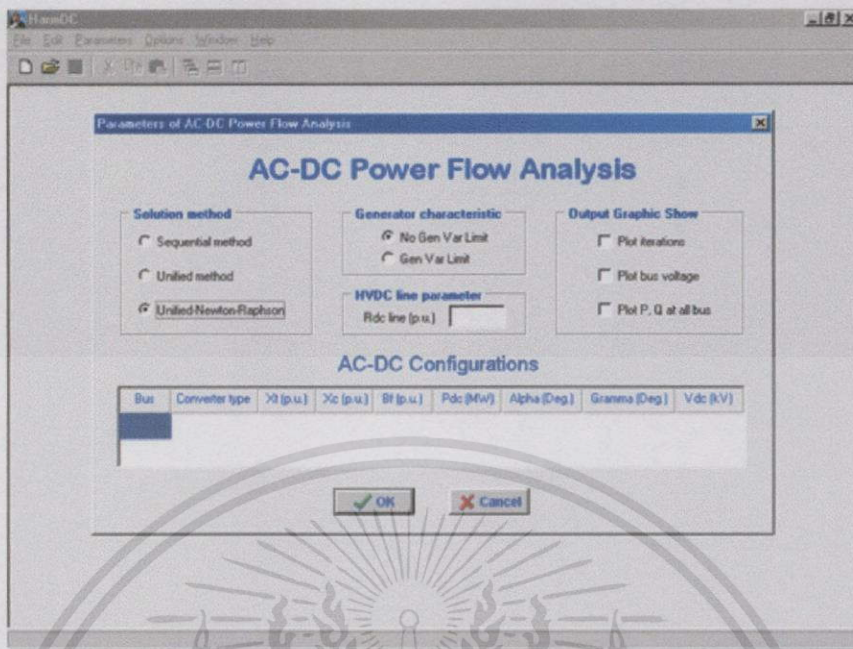


รูปที่ ผ.5.3 โปรแกรม HarmDC

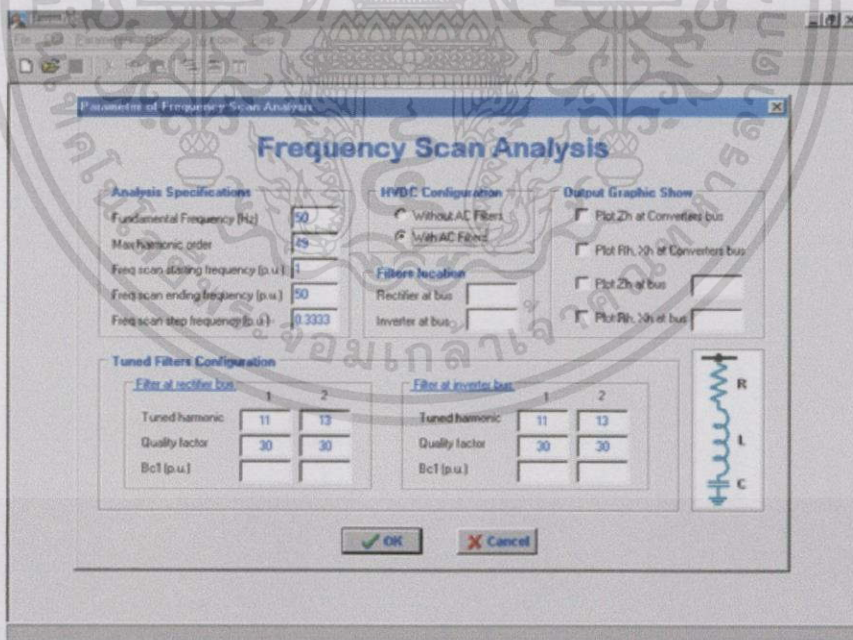


รูปที่ ผ.5.4 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณเพาเวอร์โพลาร์

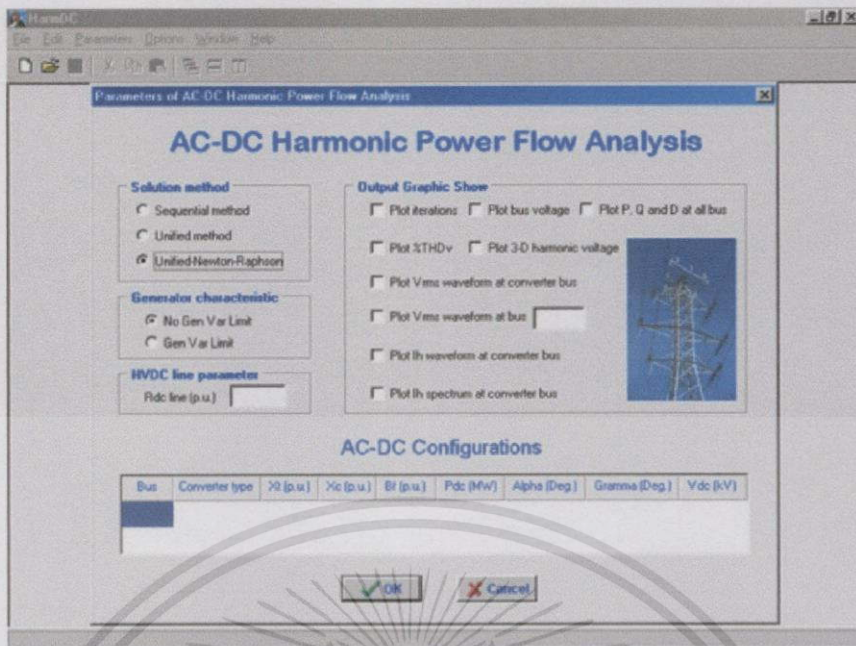
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.5.5 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณเอช-ดีซีเพาเวอร์โฟลว์



รูปที่ ผ.5.6 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณการสแกนความถี่

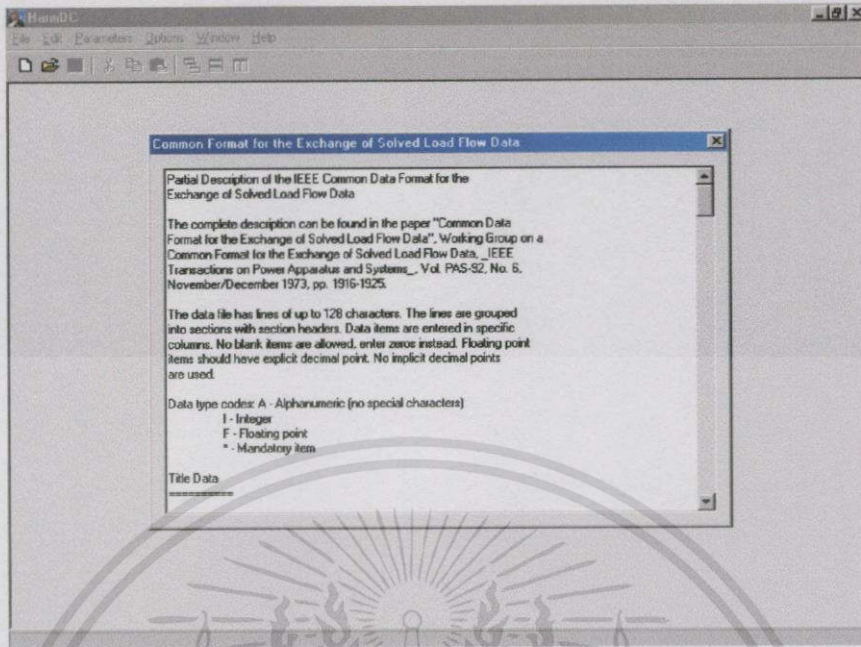


รูปที่ ผ.5.7 โปรแกรม HarmDC ในส่วนของการคำนวณเอซี-ดีซีฮาร์โมนิกเพาเวอร์โฟลว์

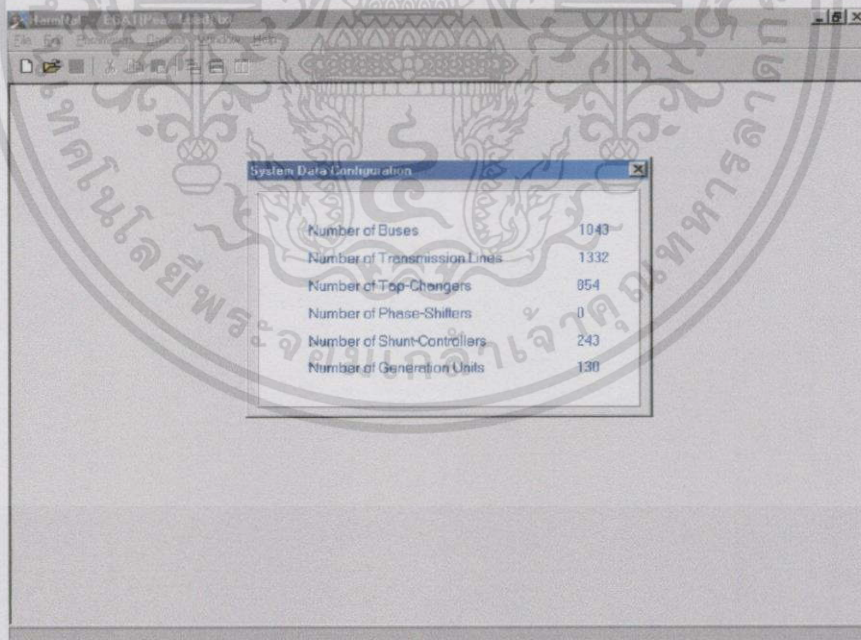
โปรแกรม HarmDC นี้มีพื้นฐานของการจัดข้อมูลที่ใช้สำหรับรันโหลดโฟลว์จากบทความ “Common Data Format for the Exchange of Solve Load Flow Data”, Working Group on a Common Format for the Exchange of Solve Load Flow Data, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, November/December 1973, pp. 1916-1925. โดยจัดรูปแบบของระบบทดสอบเป็นไฟล์ \*.cdf โดยมี Help แสดงในตัวโปรแกรมดังรูปที่ ผ.5.8

โปรแกรมนี้สามารถใช้ในการรับค่าข้อมูลจากระบบทดสอบของ IEEE คือระบบ IEEE 14 บัส, 30 บัส, 57 บัส, 118 บัส และ 300 บัส โดยสามารถที่บอกถึงจำนวนของบัส, จำนวนของสายส่ง, จำนวนของหม้อแปลงที่ปรับแทป, จำนวนของหม้อแปลงที่ปรับมุมเฟส, จำนวนของคาปาซิเตอร์ที่บัส และจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ผ.5.9

เมื่อทำการโหลดข้อมูลของระบบ (โปรแกรมนี้สามารถโหลดข้อมูลของระบบมีเป็นไฟล์ \*.cdf และ \*.txt ที่มีรูปแบบของการจัดข้อมูลดังกล่าวข้างต้น) ขึ้นมาจะแสดงในรูปที่ ผ.5.10 และสามารถทำการเก็บไฟล์ (Save file) ดังกล่าวเพื่อนำไปให้โปรแกรม MATLAB ทำการประมวลผลและแสดงผลต่อไป ซึ่งไฟล์ที่เก็บนี้มีนามสกุล \*.m ดังแสดงในรูป ผ.5.11 และ ผ.5.12



รูปที่ ผ.5.8 รูปแบบ Help ของโปรแกรม HarmDC



รูปที่ ผ.5.9 ข้อมูลของจำนวนอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The screenshot shows the HamNet software interface with two data tables. The top table is 'Bus Data' and the bottom table is 'Branch Data'.

Bus	Name	Area number	Loss zone number	Type	Final voltage	Final angle	Load MW	Load MVAR	Gen MW
1	230	1	1	0	1.04890	-23.42000	0.00000	0.00000	0.00000
2	069NB1 69.0	1	1	0	0.96930	-19.06000	0.00000	0.00000	0.00000
3	069NB2 69.0	1	1	0	0.95310	-18.95000	0.00000	0.00000	0.00000
4	069NB3 69.0	1	1	0	1.00890	-20.38000	0.00000	0.00000	0.00000
5	069LPR1 69.0	1	1	0	0.96770	-17.33000	0.00000	0.00000	0.00000
6	069LPR2 69.0	1	1	0	1.03240	-14.83000	0.00000	0.00000	0.00000
7	069LPR3 69.0	1	1	0	1.01820	-18.20000	0.00000	0.00000	0.00000
8	069LPR4 69.0	1	1	0	1.00530	-18.32000	0.00000	0.00000	0.00000

Line	From Bus	To Bus	Area	Loss zone	Circuit	Type	Resistance	Reactance	Line charging	MVA rating No 1	MVA rating No 2
1	1	4804	0	0	1	0	0.01239	0.08948	0.19885	477	429
2	1	5903	0	0	1	0	0.01239	0.08948	0.19885	477	429
3	101	151	0	0	1	1	0.00000	0.24621	0.00000	50	50
4	1601	101	0	0	1	1	0.00000	-0.00721	0.00000	200	200
5	1801	101	0	0	1	2	0.00060	0.07246	0.00000	200	200
6	102	152	0	0	1	1	0.00000	0.24621	0.00000	50	50
7	1611	102	0	0	1	1	0.00000	-0.00721	0.00000	200	200
8	1801	102	0	0	1	2	0.00060	0.07246	0.00000	200	200

รูปที่ ผ.5.10 ข้อมูลของระบบทั้งหมดโดยแสดงเป็นข้อมูลของบัสและข้อมูลของสายส่ง

The screenshot shows the HamNet software interface with a 'Save Project File' dialog box open. The dialog box is centered over the 'Bus Data' and 'Branch Data' tables. The 'Save in:' field is set to 'Subphong (C:)' and the 'File name:' field is '230/230/1000'. The 'Save as type:' is 'Program files (\*.m)'. The background tables are partially visible.

Bus	Name	Area number	Loss zone number	Type	Final voltage	Final angle	Load MW	Load MVAR	Gen MW
1	230	1	1	0	1.04890	-23.42000	0.00000	0.00000	0.00000
2	069NB1 69.0	1	1	0	0.96930	-19.06000	0.00000	0.00000	0.00000
3	069NB2 69.0	1	1	0	0.95310	-18.95000	0.00000	0.00000	0.00000
4	069NB3 69.0	1	1	0	1.00890	-20.38000	0.00000	0.00000	0.00000
5	069LPR1 69.0	1	1	0	0.96770	-17.33000	0.00000	0.00000	0.00000
6	069LPR2 69.0	1	1	0	1.03240	-14.83000	0.00000	0.00000	0.00000
7	069LPR3 69.0	1	1	0	1.01820	-18.20000	0.00000	0.00000	0.00000
8	069LPR4 69.0	1	1	0	1.00530	-18.32000	0.00000	0.00000	0.00000

Line	From Bus	To Bus	Area	Loss zone	Circuit	Type	Resistance	Reactance	Line charging	MVA rating No 1	MVA rating No 2
1	1	4804	0	0	1	0	0.01239	0.08948	0.19885	477	429
2	1	5903	0	0	1	0	0.01239	0.08948	0.19885	477	429
3	101	151	0	0	1	1	0.00000	0.24621	0.00000	50	50
4	1601	101	0	0	1	1	0.00000	-0.00721	0.00000	200	200
5	1801	101	0	0	1	2	0.00060	0.07246	0.00000	200	200
6	102	152	0	0	1	1	0.00000	0.24621	0.00000	50	50
7	1611	102	0	0	1	1	0.00000	-0.00721	0.00000	200	200
8	1801	102	0	0	1	2	0.00060	0.07246	0.00000	200	200

รูปที่ ผ.5.11 การเก็บไฟล์เป็นไฟล์ที่มีนามสกุล \*.m เพื่อนำไปรันในโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

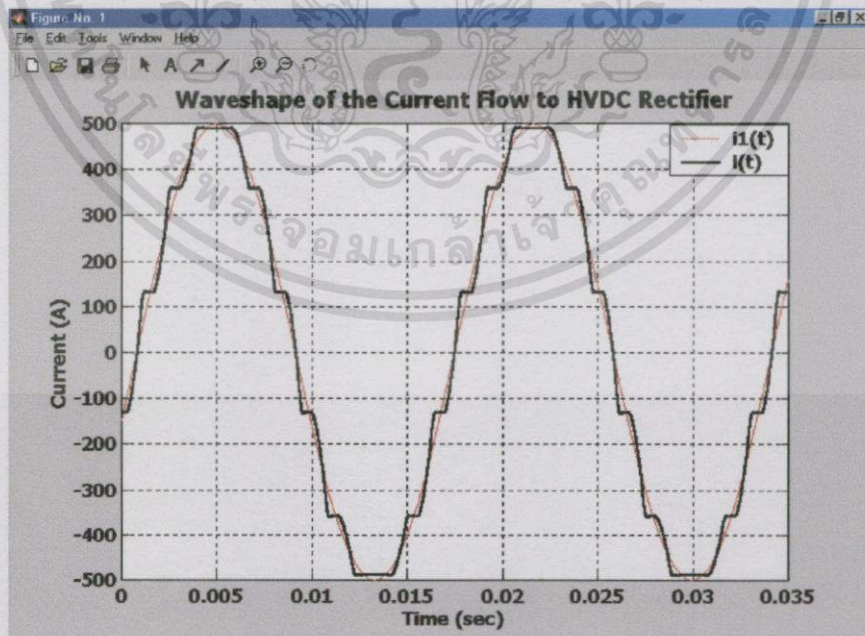
```

MATLAB Editor/Debugger - [EGAT (Peak Load) m - C:\EGAT (Peak Load) m]
File Edit View Debug Tools Window Help
Stack:
clear
basemva = 100; accuracy = 0.001; maxiter = 20;
busdata=[
1 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 230.00
2 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
3 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
4 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
5 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
6 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
7 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
8 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
9 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
10 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
11 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
12 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
13 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
14 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
15 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
16 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
17 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
18 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
19 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
20 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
21 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 115.00
22 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
23 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 69.00
24 0 0.0000 0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 115.00

```

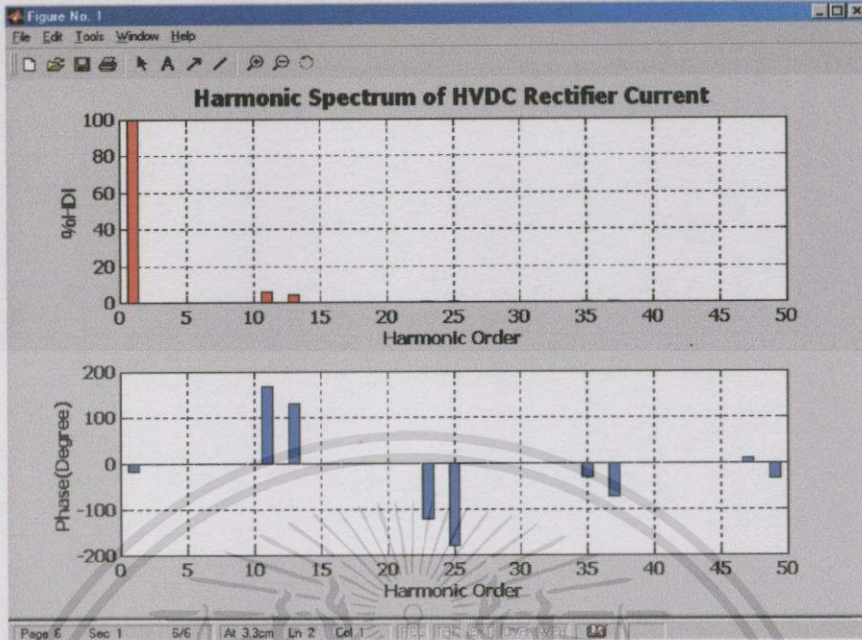
รูปที่ ผ.5.12 การจัดข้อมูลของระบบที่มีนามสกุล \*.m ที่สามารถทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการไหลของฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี

สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณแสดงในรูปที่ ผ.5.13 - ผ.5.17

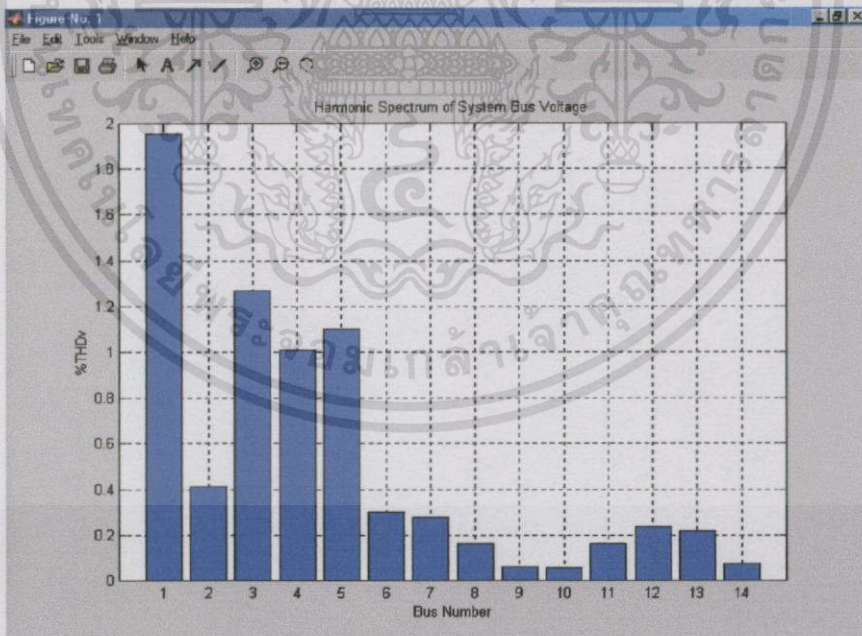


รูปที่ ผ.5.13 รูปคลื่นของกระแสเอชดีซีที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC

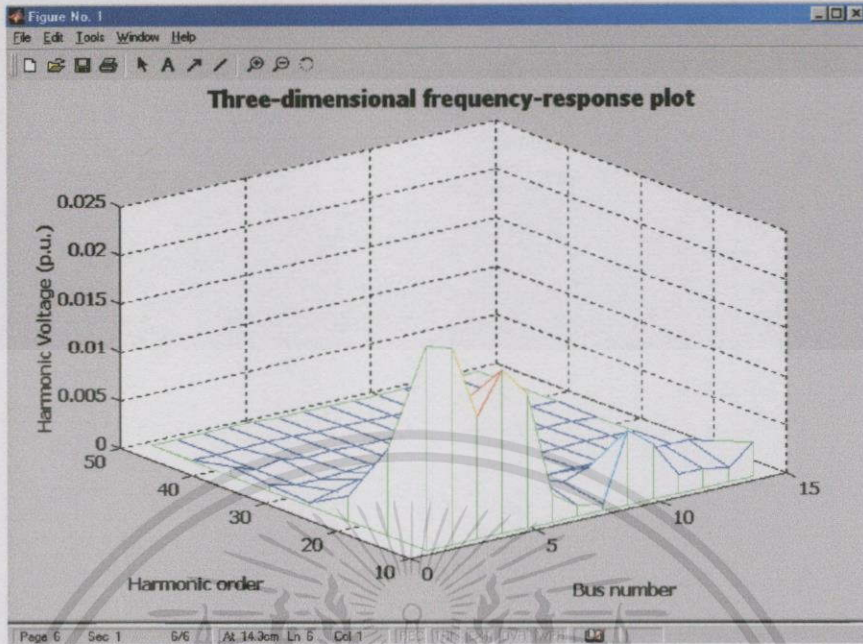
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.5.14 สเปกตรัมของกระแสที่เอชไอโวลต์เข้าคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC



รูปที่ ผ.5.15 ค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆในระบบเอชไอ-ดีซี



รูปที่ ผ.5.16 ค่าของแรงดันฮาร์โมนิกอันดับต่างๆที่บัสต่างๆในระบบเอซี-ดีซี

UNF AC-DC HIF EGAT with Filter - WordPad

AC-DC Harmonic Power Flow by Unified-Newton-Raphson Method

Setting - Accuracy = 1e-006 Maximum of Iterations = 15  
 run time = 135.120000 sec.  
 No. of Iterations = 8

Iteration	P max mismatch	Q max mismatch	Pdc max mismatch	Qdc max mismatch	Pmax mismatch
1	3.253257	19.617158	0.166873	5.404240	2.000000
2	1.964465	24.239127	11.444363	3.209438	0.564576
3	0.405583	2.801128	1.830462	0.654171	0.058980
4	0.071740	0.325561	0.201331	0.285147	0.036535
5	0.013884	0.019222	0.006339	0.018423	0.010675
6	0.001115	0.000360	0.003462	0.000327	0.000708
7	0.000009	0.000007	0.000039	0.000016	0.000005
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

RESULT OF AC-DC POWER FLOW PROGRAM

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Generation		Load		Injected Cap
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	0.9759	13.1799	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	1.0264	1.4507	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	1.0216	2.9502	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	1.0216	2.9502	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.0264	1.4507	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	1.1116	5.1062	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	1.1116	5.1062	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	1.1088	4.8424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.9759	13.1799	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0216	2.9502	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	1.0988	6.5146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	1.0988	6.5146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	1.0988	6.5146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.9759	13.1799	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	1.0264	1.4507	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

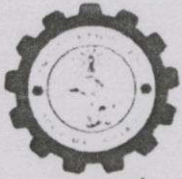
For Help, press F1

รูปที่ ผ.5.17 ค่าของผลลัพธ์ต่างๆของระบบเอซี-ดีซีโดยแสดงเป็นตัวเลข

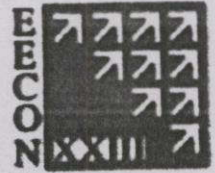
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ  
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23



23<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference  
(EECON-23)



วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543 โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

# การจำลองการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและการวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

## Modeling of HVDC Link and Analysis in Power System

สืบพงศ์ สุวรรณภู

ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนลาดพร้าว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร (02) 3269902 E-mail : s1061027@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองของการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและสมการเรซิดวลเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยแบบจำลองที่ใช้ในบทความนี้เป็นแบบโมโนโพลาคีซีลิ่งค์ 12 พัลส์ ซึ่งใช้วงจรสมมูลก่อนเวอร์เตอร์ และมีการควบคุมปริมาณการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์ไทรซิสเตอร์และการปรับแทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะการทำงานปกติ แล้วทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่บัสและการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อมีและไม่มี การเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง อีกทั้งการเพิ่มและลดพิสัยของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ

**คำสำคัญ:** การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า, เอช-ดีซี เพาเวอร์ โฟลว์, การเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

### Abstract

This paper presents the HVDC link model and residual equations for development of AC-DC power flow analysis program. This model is used for 12-pulse monopolar dc link with equivalent converter and controls of power flow by controlling the firing angle ( $\alpha$ ), the extinction-advance angle ( $\gamma$ ) and tap setting of converter transformer during normal operation. The system with and without HVDC link is then analysed and the obtained voltage profile is compared. We increase and decrease the capacity of HVDC link rated to investigate system behavior.

**Keywords:** Power flow, AC-DC power flow, HVDC link

### 1. บทนำ

ในการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ เอช-ดีซี จะมีการคำนวณสองวิธีคือ วิธีการคำนวณแบบตามลำดับ (Sequential method) และวิธีการคำนวณแบบสอดคล้องกัน (Unified method) [1] โดยวิธีการคำนวณแบบ Sequential method เป็นวิธีที่ง่ายและสามารถดูเข้าหาค่าตอบ

ได้อย่างรวดเร็วแต่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่อนแอ (Weak AC system) [2] ส่วนวิธีการคำนวณแบบ Unified method เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีแรก และมีความรวดเร็วในการดูเข้าหาค่าตอบ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีความเหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่อนแอ อีกทั้งยังสามารถที่จะพัฒนาวิธีนี้ในการคำนวณระบบไฟฟ้าที่มี HVDC links หลายขั้ว (Multiterminal DC ; MTDC) [3] ได้อีกด้วย

### 2. สมการของ DC link และ DC Jacobian matrix

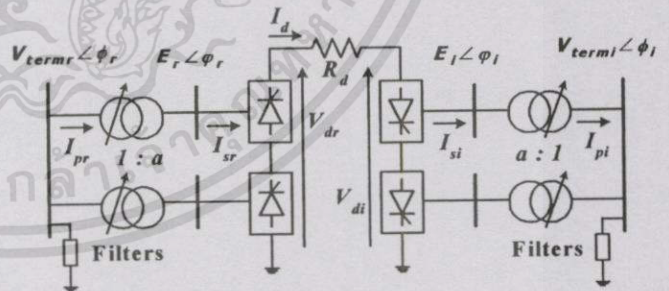
ในการคำนวณ AC-DC power flow จะต้องทำการแปลงสมการและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ HVDC link ให้เป็นค่าเปอร์ยูนิค ซึ่งจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของระบบเอชและระบบดีซี คือ

$$P_{dc \text{ base}} = MVA_{\text{base}} = \sqrt{3} V_{ac \text{ base}} I_{ac \text{ base}} \quad (1)$$

$$V_{dc \text{ base}} = k_1 V_{ac \text{ base}} \quad (2)$$

$$I_{dc \text{ base}} = \sqrt{3} I_{ac \text{ base}} / k_1 \quad (3)$$

$$Z_{dc \text{ base}} = k_1^2 Z_{ac \text{ base}} \quad (4)$$



รูปที่ 1 แบบจำลองระบบของ HVDC link

จากรูปที่ 1 และสมการที่ (1)–(4) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ คือ

$$I_s = k k_1 I_d \quad (5)$$

$$I_p = a I_s \quad (6)$$

$$V_d = k_1 a V_{term} \cos \alpha - k_2 X_c I_d \quad (7)$$

$$V_d I_d = E I_s \cos \phi \quad (8)$$

$$V_d I_d = V_{term} I_p \cos \phi \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_s = B_t \sin \phi - B_t a V_{term} \sin \phi \quad (10)$$

$$f(V_d, I_d) = 0 \quad (11)$$

โดยที่

$$k_1 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_b \quad (12) \text{ และ } k_2 = \frac{3}{\pi} n_b \quad (13)$$

เมื่อ  $n_b$  คือจำนวนบริจค์ของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่ออนุกรมกัน และ  $B_t$  คือค่าซัสเซปแตนซ์รั่วไหล (Leakage susceptance) ของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ (Converter transformer) และค่า  $k$  ในสมการที่ (5) มีค่าเท่ากับ 0.995 [1] บัสที่อยู่ระหว่างคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงจะไม่พิจารณาซึ่งสมการที่ (5), (6), (8) และ (9) สามารถที่จะนำมารวมกัน และแรงดันที่บัสเอช ( $V_{term}$ ) จะใช้เป็นตัวอ้างอิง ในการลดจำนวนของตัวแปรและสมการให้มีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณ จะได้เซตตัวแปรของแรงดันไฟตรง, กระแสไฟตรง, การปรับแทปของหม้อแปลง, มุมนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์ และมุมต่างเฟสของแรงดันกับกระแสไฟสลับที่มีความถี่หลักมูล คือ

$$\bar{x} = [V_d, I_d, a, \cos \alpha, \phi]^T \quad (14)$$

การคำนวณ AC-DC power flow ได้พัฒนาจากวิธี Fast decoupled power flow โดยส่วนที่พิจารณาเพิ่มเติมเข้าจะเป็นฟังก์ชันของแรงดันที่บัสของระบบเอชที่เชื่อมต่อกับบัสของระบบดีซี ซึ่งจะได้อสมการของระบบดีซี คือ

$$\bar{R} = (V_{term}, \bar{x})_n = 0 \quad (15)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนของคอนเวอร์เตอร์ที่พิจารณา จะได้สมการของ DC Jacobian matrix คือ

$$[\bar{R}] = [\bar{A}][\Delta \bar{x}] \quad (16)$$

โดยที่  $\bar{R}$  คือ Residual vector

$\bar{A}$  คือ DC Jacobian matrix

$\Delta \bar{x}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์พารามิเตอร์

### 3. แบบจำลองการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และสมการ Residual ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ค่าของตัวแปร  $\bar{x}$  ในสภาวะการทำงานปกติของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้

1. แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต้องสมดุล (Balanced phase) และเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal)
2. การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ต้องกำหนดแรงดันที่สมดุล
3. กระแสและแรงดันไฟตรงต้องเรียบ (Smooth)
4. หม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์ไม่มีการสูญเสียและไม่เกิดแอดมิตแตนซ์ทำแม่เหล็ก (Magnetizing admittance)

จากสมการที่ (5)–(11) และสมการที่ (14) เมื่อกำหนดค่ามุมนำกระแส, แรงดัน และกำลังงานที่ส่งผ่าน HVDC link จะได้สมการ Residual คือ

$$R_1 = V_d - k_1 a V_{term} \cos \phi \quad (17)$$

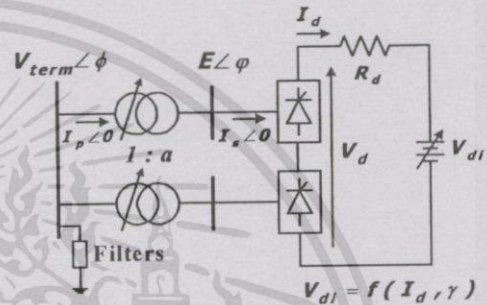
$$R_2 = V_d - k_1 a V_{term} \cos \alpha + k_2 X_c I_d \quad (18)$$

$$R_3 = V_d - I_d R_d - f(I_d, \gamma) \quad (19)$$

$$R_4 = \cos \alpha - \cos \alpha_{min} \quad (20)$$

$$R_5 = V_d I_d - P_d^{SP} \quad (21)$$

สมการที่ (19) เป็นสมการของการเชื่อมโยงด้วยดีซีลิงก์ (Dc link equation) สำหรับสมการที่ (20) และ (21) เป็นสมการควบคุม (Control equations) ซึ่งเซตของตัวแปรทั้งห้าตัวในสมการที่ (14) และสมการที่ (17)–(21) จะนำมาใช้กับแบบจำลองของวงจรมูลฐานคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองของวงจรมูลฐานคอนเวอร์เตอร์

### 4. สมการของ AC-DC Jacobian matrix

จากแบบจำลองของวงจรมูลฐานคอนเวอร์เตอร์จะนำวิธีการคำนวณของ Fast decoupled power flow มาพัฒนา ซึ่งวิธีการนี้จะพิจารณาโดยการนำคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC link มาต่อเข้ากับบัสของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ จะได้สมการ AC-DC Jacobian matrix [4] คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P} / \bar{V} \\ \Delta P_{term} / V_{term} \\ \bar{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & B' & \\ & & AA' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \theta_{term} \\ \Delta \bar{x} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{Q} / \bar{V} \\ \Delta Q_{term} / V_{term} \\ \bar{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & B'' & \\ & & AA'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta V_{term} \\ \Delta \bar{x} \end{bmatrix} \quad (23)$$

โดยที่สมการ Power mismatches ของ ค่า P และ ค่า Q ที่บัสเอช ซึ่งมีคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC link ต่ออยู่ คือ

$$\Delta P_{term} = P_{term}^{SP} - P_{term}(ac) - P_{term}(dc) = 0 \quad (24)$$

$$\Delta Q_{term} = Q_{term}^{SP} - Q_{term}(ac) - Q_{term}(dc) = 0 \quad (25)$$

สำหรับสมการของ  $P_{dc}$  และ  $Q_{dc}$  ที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$P_{term}(dc) = V_d I_d \quad (26)$$

$$Q_{term}(dc) = V_{term} k_1 a I_d \sin \phi \quad (27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (22) และ (23) ช่องว่างในสมการของ AC-DC Jacobian matrix มีสมาชิกเป็นศูนย์โดยที่เมตริกซ์  $[B']$  และ  $[B'']$  จะมีค่าคงที่เหมือนกับสมการ Jacobian matrix ของ Fast decoupled power flow และสำหรับเมตริกซ์ย่อยอื่น ๆ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามวิธีการคำนวณแบบทำซ้ำ (Iteration method) ซึ่งสมาชิกของ AC-DC Jacobian matrix คือ

$$[A] = \partial \bar{R} / \partial \bar{x} \tag{28}$$

$$[AA'] = [\partial P_{term}(dc) / \partial \bar{x}] / V_{term} \tag{29}$$

$$[AA''] = [\partial Q_{term}(dc) / \partial \bar{x}] / V_{term} \tag{30}$$

$$[BB'] = \partial \bar{R} / \partial V_{term} \tag{31}$$

$$[B''_{ii}] = [B''_{ii}(ac)] + [k_1 a I_d \sin \phi / V_{term}] \tag{32}$$

5. โปรแกรมการคำนวณ

จากสมการที่ (22) และ (23) จะได้รูปแบบแผนผังการคำนวณของโปรแกรม AC-DC power flow โดยใช้วิธี Unified method แสดงในรูปที่ 3 โดยมีการคำนวณในลักษณะการทำซ้ำ ซึ่งแยกการคำนวณเป็นแบบ PDC, QDC โดยที่สมาชิกของ AC Jacobian matrix จะมีค่าคงที่ส่วน AC-DC Jacobian matrix และ DC Jacobian matrix จะมีค่าเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบของการคำนวณ

6. ระบบที่ใช้ทดสอบและตัวอย่างการวิเคราะห์

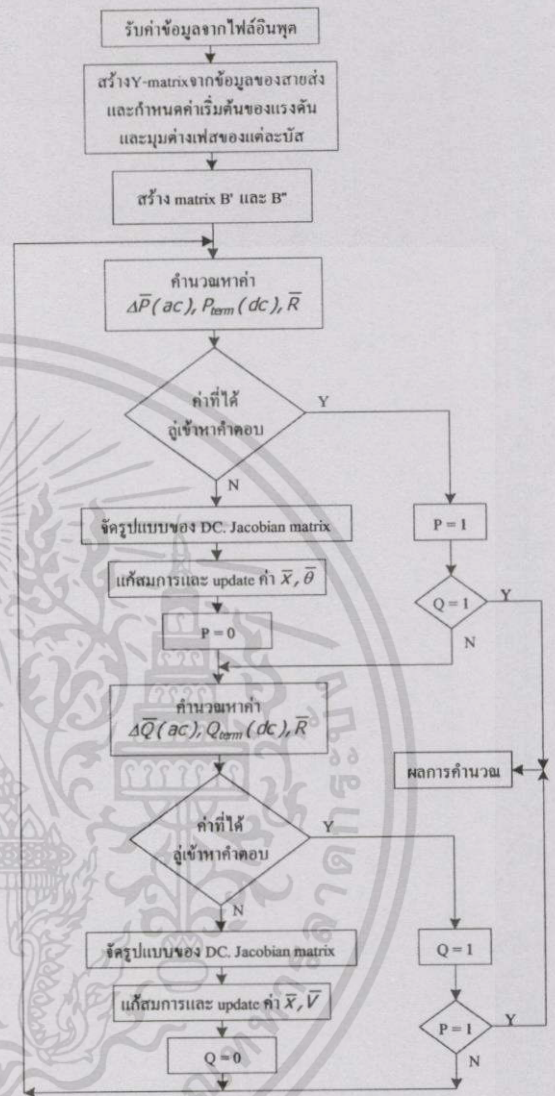
ในบทความนี้ใช้ระบบทดสอบ A.E.P. Standard 14-bus test system [5] ซึ่งระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ทำการทดสอบนี้จะถูกแทนที่ด้วยระบบ HVDC link ระหว่างบัสที่ 4 และบัสที่ 5 ซึ่งมีสวิตช์ถ่วงไม่ใช้บัสที่ถูกควบคุมแรงดัน โดยข้อมูลต่างๆของระบบ HVDC link ที่ใช้ในการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AC-DC power flow คือ

	Rectifier	Inverter
AC-DC busbar	Bus 5	Bus 4
Transformer reactance (p.u.)	0.126	0.0728
Commutation reactance (p.u.)	0.126	0.0728
Filter admittance $B_f$ (p.u.)	0.478	0.629
DC link resistance (p.u.)	0.00334	
DC link power (MW)	61.7	-
Firing angle (deg)	15	-
Extinction-advance angle (deg)	-	18
DC voltage (kV)	-	-128.87

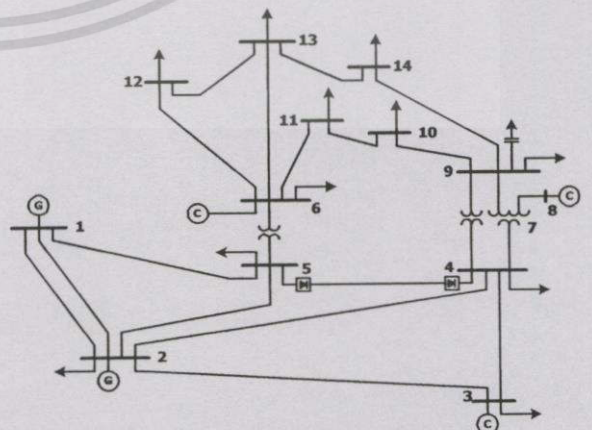
โดยที่  $MVA_{base} = 100$  และ  $V_{DC base} = 100$  kV.

ในการทดสอบ โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ โดยทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแรงดันที่บัส, กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส ก่อนการติดตั้ง HVDC link และหลังจากการติดตั้ง HVDC link โดยที่ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่ทำการส่งถ่ายมีค่าเดียวกันที่ระดับ 61.7 MW ซึ่งทิศทางกำลังไฟลัของพลัง

งานไฟฟ้าจะไหลจากบัสที่ 5 ไปยังบัสที่ 4 ระบบที่ใช้ทดสอบโปรแกรม AC-DC power flow แสดงในรูปที่ 4



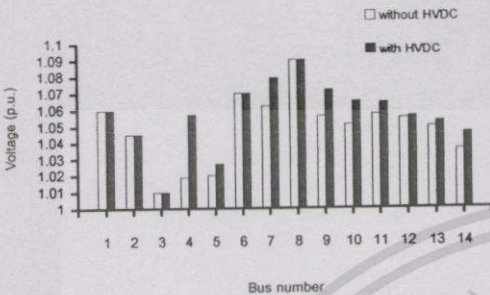
รูปที่ 3 แผนผังโปรแกรมการคำนวณ AC-DC power flow



รูปที่ 4 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

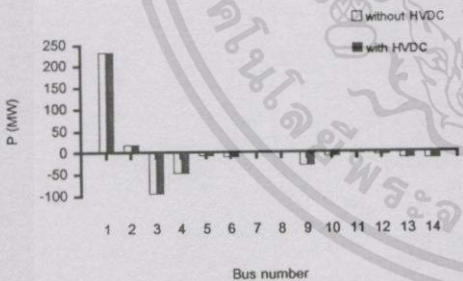
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีและมี HVDC link ค่าของแรงดันที่บัสจะมีการเปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปที่ 5 พบว่าภายหลังจากการติดตั้ง HVDC link ค่าของแรงดันที่บัสต่างๆ จะมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะที่บัส 4 ก่อนติดตั้ง ค่าแรงดันที่บัส 4 เท่ากับ 1.019 p.u. และหลังจากติดตั้งค่าแรงดันที่บัส 4 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.057 p.u.

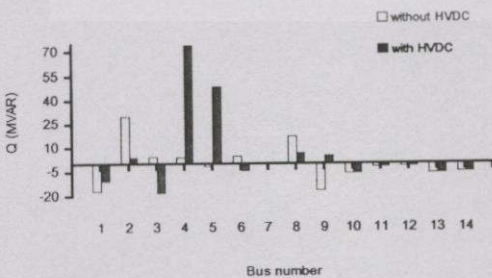


รูปที่ 5 ระดับของแรงดันที่บัสต่างๆของระบบ

ค่าของ P ในระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและทิศทางการไหลของ P จะมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับเมื่อไม่มีหรือมี HVDC link ส่วนค่า Q ในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากทั้งขนาดและทิศทางการไหล เนื่องจากว่าเมื่อทำการติดตั้ง HVDC link เข้าไปในระบบระหว่างบัส 4 กับบัส 5 ก็จะทำให้การติดตั้งฟีดเตอร์ที่บัสเหล่านี้ด้วยซึ่งจะจ่ายค่า Q ให้กับคอนเวอร์เตอร์ของ HVDC link แต่เนื่องจากว่าฟีดเตอร์เหล่านี้จ่ายค่า Q คงที่โดยไม่มีการควบคุมจึงทำให้ Q ที่เหลือจะไปจ่ายให้กับบัสอื่นๆในระบบซึ่งจะทำให้ทั้งขนาดและทิศทางการไหลของ Q เปลี่ยนไป และยังมีผลทำให้ระดับของแรงดันที่บัสต่างๆมีค่าสูงขึ้น

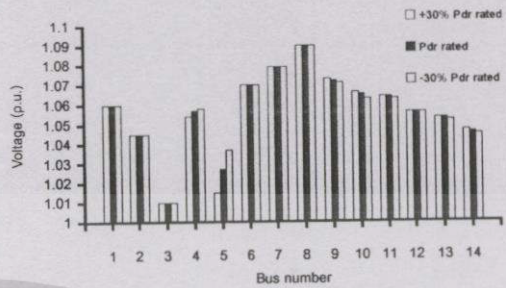


รูปที่ 6 ระดับของค่า P ที่บัสต่างๆของระบบ



รูปที่ 7 ระดับของค่า Q ที่บัสต่างๆของระบบ

จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ค่า P และ Q ที่บัสต่างๆในระบบมีค่าเป็นบวก แสดงถึงค่า P หรือ Q ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่ามากกว่าที่รับเข้ามาและเป็นลบแสดงถึงค่า P หรือ Q ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่าน้อยกว่าที่รับเข้ามา



รูปที่ 8 ระดับของแรงดันที่บัสต่างๆของ HVDC link

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการเพิ่มพิกัดของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าใน HVDC link โดยที่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆคงที่ จะทำให้แรงดันที่บัส 4 และ บัส 5 ลดลง แต่ว่าจะมีผลทำให้แรงดันที่บัส 9, 10, 11, 13 และบัส 14 มีค่าสูงขึ้น

### 7. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองของ HVDC link และสมการเรขาคณิตเพื่อนำมาพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์ AC-DC power flow ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AC-DC power flow จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมต่างๆของระบบเมื่อไม่มีและมีการเชื่อมโยงด้วยระบบ HVDC link โดยสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการผลิตและการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลของกำลังฮาร์มอนิก, การวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดัน และการทำออปติไมซ์เพาเวอร์โฟลว์ในระบบเอช-ดีซีได้ต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ พุทธิ ประเสริฐธรรม และผู้ร่วมงานวิจัยที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความร่วมมือในงานวิจัยมาโดยตลอด

### เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Arrillaga , C.P. Arnold and B.J. Harker, "Computer Modelling of Electrical Power System", J. Wiley & Sons Ltd., London, 1983, p. 124-151.
- [2] "IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities", IEEE Std.1204-1997, IEEE, New York, 1997, p. 5-28.
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., New York, 1994, p. 463-580.
- [4] J. Arrillaga, and B. Smith, "AC-DC Power System Analysis", The Institute of Electrical Engineers, London, 1998, p. 61-108.
- [5] Freris, D.I.C., and A.M. Sasson, "Investigation of the load-flow problem", Proc. IEE, 1968. 115(10), pp. 1459-1470.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี โดยประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับสมการเรซิดวล

## The Newton-Raphson Method with Residual Equations Applied to Power Flow Analysis in AC-DC Systems

สืบพงศ์ สุวรรณกุล

ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองของระบบ HVDC link และสมการเรซิดวล (Residual equations) เพื่อการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี โดยทำการปรับปรุงสมการจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrix equation) ให้เหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ซึ่งมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีที่มีการเชื่อมต่อด้วยระบบ HVDC link ระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Gen. bus) เชื่อมต่อกับบัสที่มีชิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Voltage-controlled bus) และสามารถทำการเชื่อมต่อระหว่างบัสต่างๆเหล่านี้กับโหลดบัส (Load bus) อื่นๆที่ตั้งอยู่ในระบบเอซี-ดีซี โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบตามลำดับ (Sequential method) และวิธีการคำนวณแบบสอดคล้องกัน (Unified method) ผลจากการทดสอบการคำนวณของโปรแกรมพบว่าการหาค่าตอบอย่างรวดเร็ว

### Abstract

This paper presents the HVDC link model and residual equations for power flow analysis in ac-dc systems using an application of the jacobian matrix equation in the Newton-Raphson method. The technique is efficient and reliable for power flow analysis in ac-dc systems with HVDC link connected between a generator bus, a voltage-controlled bus and the load bus in ac-dc systems. The results of the proposed method are compared with those obtained using the Sequential method and the Unified method. It is found that the Newton-Raphson method gives satisfactory results in term of the fast convergence and the accuracy.

### 1. บทนำ

ในการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีโดยวิธี Unified method [1] ซึ่งเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนมากกว่าวิธี Sequential method [2] แต่สามารถหาค่าตอบได้อย่างรวดเร็ว และมีความน่าเชื่อถือสูง แต่วิธี Unified method จะมีปัญหาในเรื่อง

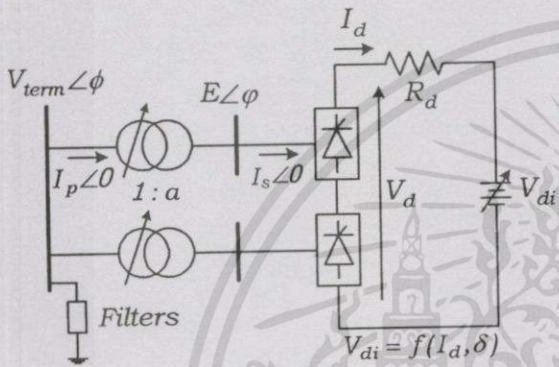
ของ ill-condition และเมื่อนำไปพัฒนาการคำนวณการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กับบัสที่มีโหลดค่ออยู่ หรือระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสที่มีชิงโครนัสคอนเดนเซอร์ค่ออยู่ จะพบว่ามีปัญหาในเรื่องของการหาค่าตอบ จึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยทำการปรับปรุงสมการจาโคเบียนเมตริกซ์และสมการเรซิดวลให้มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ระบบดังกล่าว

2. แบบจำลองของระบบบีซีและสมการเรซิดวล

แบบจำลองที่ใช้ในบทความนี้จะใช้แบบจำลองและสมการเรซิดวลที่ทำการพัฒนามาขึ้นจากบทความ [3] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองของวงจรสมมูลคอนเวอร์เตอร์

จากแบบจำลองของวงจรสมมูลคอนเวอร์เตอร์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้าของระบบบีซี คือ

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} a V_{term} (\cos \alpha + \cos \delta) \quad (1)$$

$$I_d = \frac{\sqrt{2} a V_{term}}{2 x_c} (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2)$$

$$P_d = \frac{3a^2 V_{term}^2}{2\pi x_c} (\cos^2 \alpha - \cos^2 \delta) \quad (3)$$

$$Q_d = \frac{3a^2 V_{term}^2}{2\pi x_c} (\sin \alpha \cos \alpha - \sin \delta \cos \delta + \delta - \alpha) \quad (4)$$

โดยที่ :

- $V_d$  คือ แรงดันไฟตรงของระบบ HVDC
- $I_d$  คือ กระแสไฟตรงของระบบ HVDC
- $P_d$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ส่งผ่านระบบ HVDC
- $Q_d$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เข้าไปยังคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC
- $x_c$  คือ รีแอกแตนซ์นำกระแสของคอนเวอร์เตอร์
- $a$  คือ แทปของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์

- $V_{term}$  คือ แรงดันไฟสลับที่บัสคอนเวอร์เตอร์
- $\alpha$  คือ มุมนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์
- $\delta$  คือ มุมดับการนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์

จากสมการที่ (1)-(4) จะได้สมการเรซิดวล (Residual equations) คือ

$$R_1 = V_d - \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} a V_{term} (\cos \alpha + \cos \delta) \quad (5)$$

$$R_2 = V_d - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a V_{term} \cos \alpha + \frac{3}{\pi} I_d x_c \quad (6)$$

$$R_3 = V_d - I_d R_d - f(I_d, \delta) \quad (7)$$

$$R_4 = \cos \alpha - \cos \alpha^{sp} \quad (8)$$

$$R_5 = V_d I_d - P_d^{sp} \quad (9)$$

$$R_6 = \cos \delta - \cos \delta^{sp} \quad (10)$$

$$R_7 = V_d - V_d^{sp} \quad (11)$$

สมการที่ (5) และ (6) จะมีตามจำนวนของคอนเวอร์เตอร์ที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งจะได้ตัวแปรของพารามิเตอร์ในระบบบีซี คือ

$$\bar{x} = [V_d, I_d, a, \cos \alpha, \cos \delta]^T \quad (12)$$

3. สมการของ AC-DC Jacobian matrix โดยวิธี Newton-Raphson method

จากสมการที่ (1) - (12) จะนำวิธีการคำนวณของวิธี Newton-Raphson method ที่ใช้ในการคำนวณ AC Power Flow มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ AC-DC Power Flow ในระบบที่มี HVDC link เชื่อมต่อระหว่างบัสสองบัส โดยทำการพัฒนาสมการจาโคเบียนเมตริกซ์ขึ้นมาใหม่ซึ่งนำเอาสมการเรซิดวลของระบบบีซีและการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบเอซีเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบบีซีเข้ามารวมอยู่ในสมการจาโคเบียนเมตริกซ์ ซึ่งจะได้สมการ (13) คือ

$\Delta P$	=	H	N	$B_{ii}'$	AA'	$\Delta \theta$
$\Delta P_{term}$						$\Delta \theta_{term}$
$\Delta Q$		J	L	$B_{ii}''$	AA''	$\Delta  V / V $
$\Delta Q_{term}$						$\Delta  V_{term} / V_{term} $
R				B	A	$\Delta x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะได้สมการ Power mismatches ของค่า  $P$  และค่า  $Q$  ที่บัสเอชซึ่งมีคอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่ คือ

$$\Delta P_{term} = P_{term}^{SP} - P_{term} - P_d \quad (14)$$

$$\Delta Q_{term} = Q_{term}^{SP} - Q_{term} - Q_d \quad (15)$$

จากสมการที่ (13) ช่องว่างในสมการของ AC-DC Jacobian matrix จะมีสมาชิกเป็นศูนย์ โดยที่เมตริกซ์  $[H]$ ,  $[N]$ ,  $[J]$  และ  $[L]$  จะมีค่าเหมือนกับสมการ Jacobian matrix ของ Newton-Raphson Power Flow และสำหรับเมตริกซ์ย่อยอื่นๆจะมีสมาชิก คือ

$$[A] = \partial R / \partial x \quad (16)$$

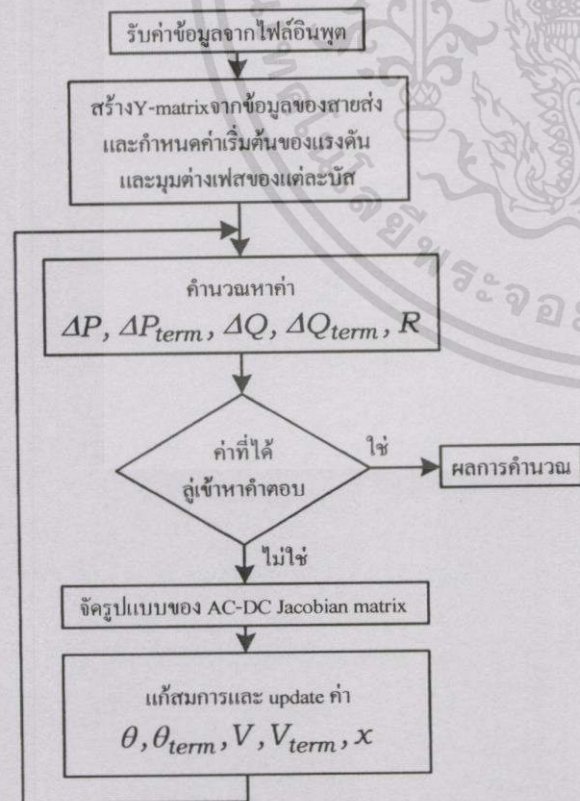
$$[AA'] = \partial P_d / \partial x \quad (17)$$

$$[AA''] = \partial Q_d / \partial x \quad (18)$$

$$[B] = |V_{term}| \partial R / \partial |V_{term}| \quad (19)$$

$$[B'_{ii}] = |V_{term}| \left[ \frac{\partial P_{term}}{\partial |V_{term}|} + \frac{\partial P_d}{\partial |V_{term}|} \right] \quad (20)$$

$$[B''_{ii}] = |V_{term}| \left[ \frac{\partial Q_{term}}{\partial |V_{term}|} + \frac{\partial Q_d}{\partial |V_{term}|} \right] \quad (21)$$



รูปที่ 2 แผนผังการคำนวณ AC-DC Power Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. โปรแกรมการคำนวณ

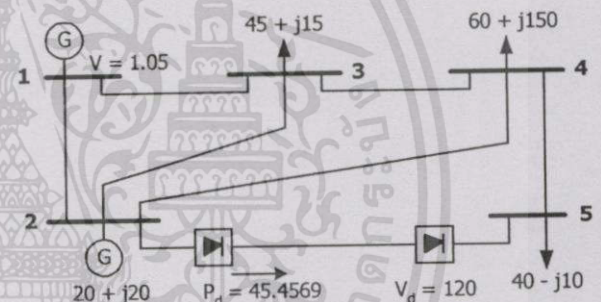
จากสมการที่ (13) จะได้รูปแบบวิธีการคำนวณของโปรแกรม AC-DC Power Flow โดยใช้วิธี Newton-Raphson method ดังแสดงในรูปที่ 2

#### 5. ระบบที่ใช้ทดสอบและตัวอย่างการวิเคราะห์

ระบบที่ใช้ทดสอบในบทความนี้มีสองระบบคือ ระบบทดสอบ 5 bus test system และ ระบบทดสอบ IEEE 14 bus test system ซึ่งมีสองแบบ

##### 5.1 ระบบทดสอบ 5 บัส

ระบบทดสอบ 5 บัส นี้จะถูกแทนที่ด้วยระบบ HVDC link ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 5 ซึ่งบัสที่ 2 เป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $P$  และ ค่าของ  $Q$  ส่วนบัสที่ 5 เป็นโหลดบัส โดยแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบทดสอบ 5 บัส

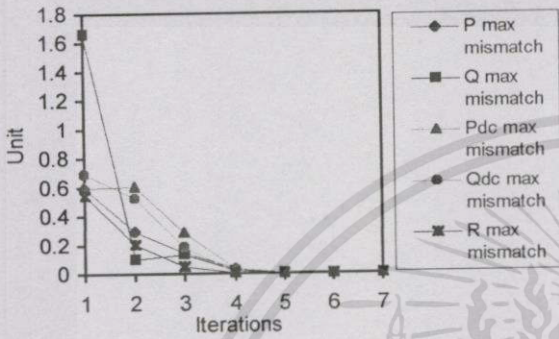
โดยข้อมูลต่างๆของระบบ HVDC link ที่ใช้ในการทดสอบของระบบ 5 บัส คือ

	Rectifier	Inverter
AC-DC busbar	Bus 2	Bus 5
Transformer reactance (p.u.)	0.0584	0.0601
Commutation reactance (p.u.)	0.0584	0.0601
Filter admittance $B_f$ (p.u.)	0.4541	0.5976
DC link resistance (p.u.)		0.04
DC link power (MW)	45.4569	-
Firing angle (deg)	29.10	-
Extinction-delay angle (deg)	-	155.51
DC voltage (kV)	-	120

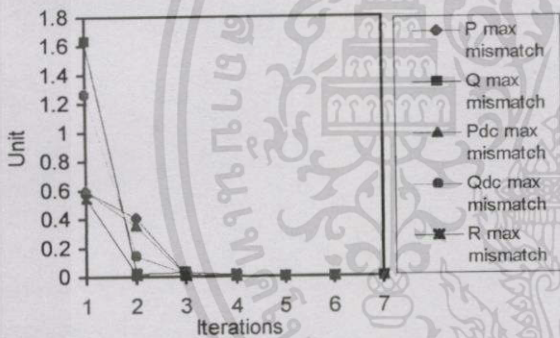
โดยที่  $MVA_{base} = 100$  และ  $V_{DC base} = 100$  kV.

การทดสอบโปรแกรมของระบบ 5 บัส จะทำการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซีโดย

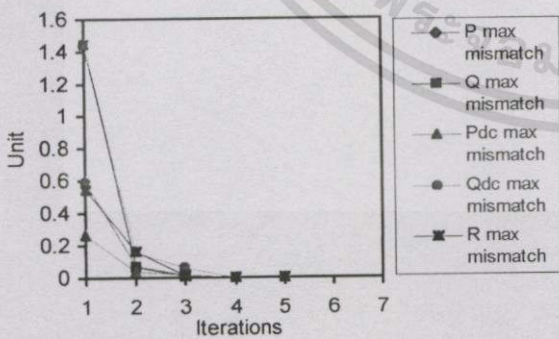
ทำการเปรียบเทียบค่ามismatch ในการหาคำตอบของวิธี Sequential method และ Unified method โดยใช้แบบจำลองและสมการ Residual equations จากบทความ [3] เปรียบเทียบกับวิธี Newton-Raphson method ที่นำเสนอในบทความนี้ โดยมีค่ามismatch ไม่เกิน 0.001 ซึ่งแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 4 การหาคำตอบของวิธี Sequential method



รูปที่ 5 การหาคำตอบของวิธี Unified method



รูปที่ 6 การหาคำตอบของวิธี

Newton-Raphson method

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธี

Sequential method จะพบว่าค่าการหาคำตอบเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกว่งมากที่สุดในส่วนของค่า Pdc max mismatch ในรอบที่ 2 ของการคำนวณ, ในรอบที่ 3 ของค่า Q max mismatch และในรอบที่ 6 และรอบที่ 7 ของค่า R max mismatch โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 7 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 0.22 วินาที

จากรูปที่ 5 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธี Unified method จะพบว่าค่าการหาคำตอบเกิดการแกว่งมากที่สุดในส่วนของค่า Q max mismatch ในรอบที่ 3 ของการคำนวณ โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 7 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 0.66 วินาที

จากรูปที่ 6 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธี Newton-Raphson method จะไม่เกิดการแกว่งในการหาคำตอบ และใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมดน้อยที่สุดคือจำนวน 5 รอบเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 0.44 วินาที

ตารางที่ 1 ค่าของจำนวนรอบและเวลาในการคำนวณ

	Sequential method	Unified method	Newton-Raphson method
Iterations	7	7	5
Run time (s)	0.22	0.66	0.44

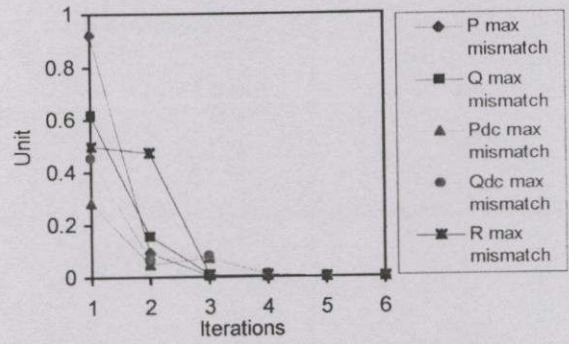
จากผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซีที่มีการเชื่อมต่อระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกควบคุมค่าของ P และ ค่าของ Q เชื่อมต่อกับโหนดบัส ด้วยแบบจำลองและสมการ Residual equations โดยใช้วิธี Newton-Raphson method ที่นำเสนอในบทความนี้ใช้จำนวนรอบในการคำนวณน้อยที่สุด และการหาคำตอบดีที่สุดในเมื่อเทียบกับการคำนวณโดยใช้วิธี Sequential method และวิธี Unified method ที่ใช้แบบจำลองและสมการ Residual equations ในบทความ [3]

## 5.2 ระบบทดสอบ 14 บัส

สำหรับระบบ 14 บัส ที่ใช้ในการทดสอบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซี จะใช้เฉพาะวิธี Newton-Raphson method เท่านั้น โดยจะแบ่งออกเป็นสองแบบ ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของระบบทดสอบ 14 บัส

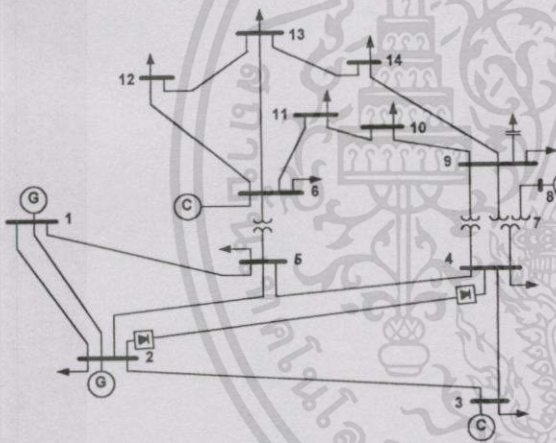
	HVDC link	
	From bus	To bus
Case 1	2 (Gen bus) fixed $P,  V $	4 (load bus)
Case 2	2 (Gen bus) fixed $P,  V $	3 (Voltage-controlled bus) fixed $ V $



รูปที่ 8 การลู่เข้าหาค่าตอบของระบบทดสอบ 14 บัส แบบที่ 1

5.2.1 ระบบทดสอบ 14 บัส แบบที่ 1

ระบบทดสอบ 14 บัส นี้จะถูกแทนที่ด้วยระบบ HVDC link ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 4 ซึ่งบัสที่ 2 เป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $P$  และ ค่าของ  $|V|$  ส่วนบัสที่ 4 เป็นโหลดบัส โดยแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ระบบทดสอบ 14 บัส แบบที่ 1

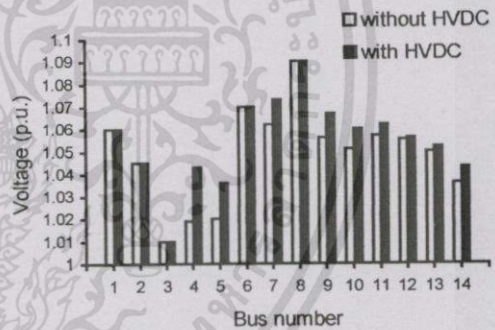
โดยข้อมูลต่างๆของระบบ HVDC link ที่ใช้ในการทดสอบของระบบ 14 บัส แบบที่ 1 คือ

	Rectifier	Inverter
AC-DC busbar	Bus 2	Bus 4
Transformer reactance (p.u.)	0.1071	0.0619
Commutation reactance (p.u.)	0.1071	0.0619
Filter admittance $B_f$ (p.u.)	0.4063	0.5347
DC link resistance (p.u.)	0.05811	
DC link power (MW)	56.1381	-
Firing angle (deg)	7	-
Extinction-delay angle (deg)	-	160
DC voltage (kV)	-	150

โดยที่  $MVA_{base} = 100$  และ  $V_{DC base} = 100$  kV.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธี Newton-Raphson method จะพบว่าการลู่เข้าหาค่าตอบช้ามากที่สุดในส่วนของคุณค่า R max mismatch, เกิดการแกว่งในรอบที่ 3 ของค่า P max mismatch และ Q max mismatch และในรอบที่ 4 ของค่า R max mismatch โดยใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 6 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณ 2.26 วินาที

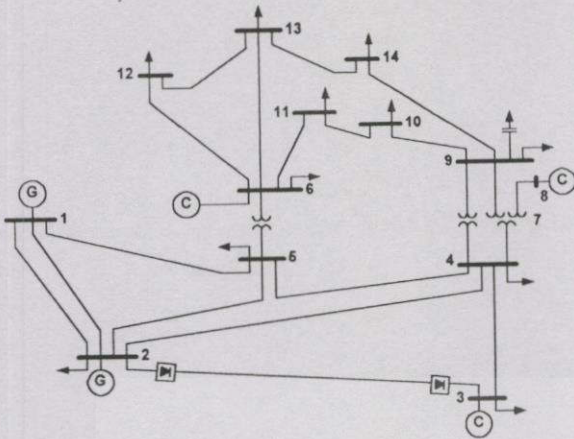


รูปที่ 9 ระดับของแรงดันที่บัสต่างๆของระบบ

จากรูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีและมี HVDC link ค่าของแรงดันที่บัสต่างๆจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งพบว่าภายหลังจากการติดตั้ง HVDC link ที่ตำแหน่งดังกล่าว ค่าของแรงดันที่บัสต่างๆจะมีค่าสูงขึ้น ยกเว้นในกรณีบัสที่ถูกควบคุมแรงดัน

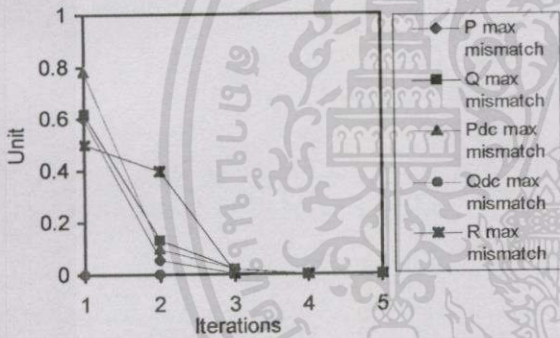
5.2.2 ระบบทดสอบ 14 บัส แบบที่ 2

ระบบทดสอบ 14 บัส นี้จะถูกแทนที่ด้วยระบบ HVDC link ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3 ซึ่งบัสที่ 2 เป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $P$  และ ค่าของ  $|V|$  ส่วนบัสที่ 3 เป็นบัสที่ถูกควบคุมค่าของ  $|V|$  โดยแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ระบบทดสอบ 14 บัส แบบที่ 2

โดยข้อมูลต่างๆของระบบ HVDC link ที่ใช้ในการทดสอบของระบบ 14 บัส แบบที่ 2 จะเหมือนกับข้อมูลของระบบ 14 บัส แบบที่ 1 แต่จะเปลี่ยนแปลงค่า  $P_d$  ที่บัส 2 มีค่า 73.1881 MW และ  $R_{dc}$  มีค่า 0.04699 (p.u.)



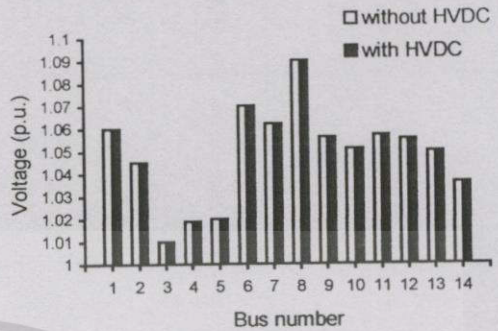
รูปที่ 11 การลู่เข้าหาค่าตอบของระบบทดสอบ 14 บัส แบบที่ 2

จากรูปที่ 11 เมื่อทำการคำนวณพบว่าการลู่เข้าหาค่าตอบช้ามากที่สุดในส่วนของคุณค่า R max mismatch ซึ่งใช้จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 5 รอบ และใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 1.59 วินาที

จากรูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีและมี HVDC link ที่ตำแหน่งดังกล่าว จะพบว่าค่าขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงว่าทิศทางกำลังของ  $P$  และ  $Q$  ไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะมีผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและซิงโครไนส์คอนเดนเซอร์ที่บัสต่างๆเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะค่า  $Q$  ที่จ่ายออกมาจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และซิงโครไนส์คอนเดนเซอร์ที่บัส 3 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $P$  และค่าของ  $Q$  ที่จ่ายออกมาเพียงเล็กน้อยที่แสดงบัส 1 กับค่าของ  $Q$  ที่จ่ายออกมาจากซิงโครไนส์คอนเดนเซอร์ที่ บัส 6 และบัส 8



รูปที่ 12 ระดับของแรงดันที่บัสต่างๆของระบบ

## 6. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลอง HVDC link, สมการเรขาคณิต และการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีโดยใช้วิธี Newton-Raphson method ซึ่งสามารถทำการคำนวณในระบบเอซี-ดีซีที่มีการเชื่อมต่อด้วย HVDC link ระหว่างบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการควบคุมค่าของ  $P$  และ ค่าของ  $Q$  หรือมีการควบคุมค่าของ  $P$  และ ค่าของ  $|V|$  เชื่อมต่อกับบัสที่มีซิงโครไนส์คอนเดนเซอร์ที่มีการควบคุมค่าของ  $|V|$  หรือทำการเชื่อมต่อระหว่างบัสเหล่านี้กับ โหลดบัสอื่น ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ และจากการทดสอบการคำนวณของโปรแกรมจะพบว่ามีการลู่เข้าหาค่าตอบอย่างรวดเร็ว และใช้จำนวนรอบในการคำนวณน้อย

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Arrillaga, C.P. Arnold, J.R. Camacho and S. Sankar, "AC-DC Load Flow with Unit-Connected Generator-Converter Infeeds", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 8, No. 2, 1993, pp. 701-706.

[2] J. Arrillaga, C.P. Arnold and B.J. Harker, "Computer Modelling of Electrical Power System", J. Wiley & Sons Ltd., London, 1983, p. 124-151.

[3] สืบพงศ์ สุวรรณภูมิ, ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล "การจำลองการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและการวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลัง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543, หน้า 113-116.



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

# ลาดกระบัง

ฉบับวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 18 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2544

1. การประยุกต์ใช้ไฟฟ้ที่ผลิตเองที่ป้รังสี่เหลี่ยมสำหรับป้ฎกการไหลของของไหลและการนำข้ความร้อน	1
ภาสกร เวชชะโศกสกล จักรวัตร เจริญสุข	
2. คุณสมบัติทางสัณนิตยของสารหล่อลื่นที่มีของแข็งเป็นส่วนประกอบโดยใช้แบ้รังป้รัง ขัปคัสถ์ภกที่มีลักษณะที่สัณนิตย	7
สิทธิชัย ญุทพันธุ์ มงคล มงคลวงศศิริพงษ์	
3. การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID และ PIDA ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับพลขัณตัณตัม	13
สุเทพ ภาวณตทา วิจิตร ภิณเรศ เตชะ พวงควารอง รัตนา จันทรเมือง ไซโย สวรรมรัตน์	
4. วิธีการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักด้วยระบบไฟฟ้า โดยใช้หลักการอิเล็กโทรลิซิส	19
ศิริวัฒน์ เกตุแก้ว ปะภษา ไพรสวรรณา ภาสกร ภูจิชัย	
5. การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงคุณลักษณะการกระจายแสงของโคมไฟถนนโดยอาศัยข้อมูลจาก IES File	25
ชัชชัญญ์ โห้สสาร รชช ษณภูมิไวย ลานันทรวัฒน์ คุณภากร มีทัศน กฤษณจินดา สุธี บรรจงจิตร	
6. เครื่องต้นแบบสำหรับการศึกษาของแรงดันสูงความถี่สูง	30
ศักดิ์ชัย ศรีวิคตย์จวรรณ ศิริวัฒน์ ไพริณวสุกุล	
7. การวิเคราะห์การไหลของน้ำในลำน้ำในระบเบบซี-ทีที	36
สืบพงศ์ สุวรรณฤกษ์ ศิริวัฒน์ ไพริณวสุกุล	
8. การวิเคราะห์โพลีโพลีด้วยวิธีฟัซซี่คัสปัล โดยใช้เทคนิคสเปกตรัมวงศ และการแยกส่วนย่อยโดยใช้แมตริกซ์	42
พรวิมล ชัยศิริวงศ มณฑล สิวจินดากรฤกษ์	
9. การศึกษาคัสปัลไฟฟ้าในตัมแหน่งที่เหมาะสมในระบบแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง	48
ภูวสิณณั ทัณนาคัสสิณ มณฑล สิวจินดากรฤกษ์	
10. การควบคุมแวลวเตอร้ของมอเตอร์เหนือน้ำแบบกระตุณสองทาง	54
พิเชษฐ ภัตรพรน ประเสริฐ สอระสัน วิจิตร ภิณเรศ	
11. เทคนิคการประมวลผลสเปกตรัมแบบอน-ไลน์ เพื่อวัดความเร็วลมเตอร้เหนือน้ำโดยใช้วิธี แมกนิติม เอนโทรปี	60
อวิชัย ษุภโยธภักถ ชาญวิทย์ ตั้งสิริวงศ วิจิตร ภิณเรศ	
12. ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงเชิงสัณนิตยของระบบการดีคัสปัลการดีคัสปัลโรงงรไฟฟ้าที่กระแสดับแรงดันต่ำ	66
สุพช ภูณจันทร ษณภา เมื่อนนอย กอบชัย เตชะชญ	
13. การศึกษาทางใช้จันตักกลลวที่มีต่อการคัสปัลสารสนเตชจาก WW	72
เชื่อน ปันเงิน ไทฑูรย์ ศรีวิชัย	
14. การวัดความขับขัของขัฟ้แวลวจากโครงสร้างควบคุมการไหลและข้อมูลควบคุมการไหล	78
นิภากร ประภาศิริ เชื่อน ปันเงิน	
15. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานผลัขัของกำลังทางแยกแบบไดนามิก	84
หวัณนภร ภิณชื่อน จักรพันธุ์ วสิริภานนถ บรรจง ปิธธาร	
16. การประยุกต์ใช้ ATM Management Information Base และ Simple Network Management Protocol เพื่อการจัดการ	90
เครือข่าย ATM	
สชะ ดันอังสนากุล กอบชัย เตชะชญ	
17. การออกแบบระบบเครือข่ายส่วนตัมเมชัน เพื่อตรวจสอบการทำงาน	96
วิโรจน์ จงษชะชวีพัฒน์ กอบชัย เตชะชญ	
18. การมอดูเลตเฟสแบบ Armstrong โดยปราศจากตัวกรองความถี่	102
จันทรเพ็ญ จันทรคุณภาส ปราโมทย์ วาดเชื่อน	
19. การออกแบบระบบเผ้าตรวจพื้นที่ระชะโกล	108
ชัญชัย มีสะอาต นภัทร สระเอียม กอบชัย เตชะชญ	
20. การสร้างตัวกรองความถี่ชนิดแบบแคบโดยใช้กาณงานฟัซซี่เตอร้บนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	114
พญ เตชชัญ สุรพันธุ์ ภิณณั กอบชัย เตชะชญ	
21. การออกแบบและสร้างตัวกำจัตสัญญาณเสียงสะท้อนโดยใช้ FPGA	120
วัชระ ภิณนาศร ภิณณั เตชะชญ	
22. วงจรสมัทรภักเกอร้แบบทรานเชิลแซทชัฟเฟ้	126
ศิริวัฒน์ ลิมไทรุสท์ กอบชัย เตชะชญ วิษณุ กอพัคคัสนภร	
23. วงจรทรานสคณตัณตัมตัมที่หัวเอ็นทุปฎิเพ็รงงานเบ้บเบรล ชู-เรล	131
ณนัเอศวดี เพ็รงพรนภน กอบชัย เตชะชญ	
24. วงจรคัสปัลเตอร้กลลวแบบใช้โพลีโพลีของสัทธิกระแสดั เหว้บแรงดันไฟฟ้าและที่เรงนัที่ความเร็วสูง	136
ังวิมลนั สัทธิกร ปะภษา ภูนารนุญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การวิเคราะห์การไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี

## Harmonics Power Flow Analysis in the AC-DC Systems

สืบพงศ์ สุวรรณภู

ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี ที่มีคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ของระบบ HVDC link เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก โดยจะนำเสนอถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกแบบจำลองฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง, สมการของกำลังไฟฟ้าในกรณีที่คำนึงถึงผลของฮาร์มอนิก การวิเคราะห์โดยการสแกนความถี่เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบเอซี-ดีซีที่มีผลต่อความถี่ และวิธีการคำนวณหาการไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซี ตัวอย่างในการวิเคราะห์จะมี 3 กรณี คือทำการวิเคราะห์หาค่าฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ โดยสแกนในแต่ละความถี่ที่บัสคอนเวอร์เตอร์, การวิเคราะห์หาค่าของ %THD ของแรงดันที่บัส และการวิเคราะห์การไหลของกำลังฮาร์มอนิกที่เทียบกับการรันเพาเวอร์โฟลว์ในระบบเอซี-ดีซี ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ายรวมที่บัสต่างๆในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการไหลของกระแสฮาร์มอนิกเข้าไปรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลัง

### Abstract

This paper presents of harmonics power flow analysis with the 12-pulse converters of HVDC link which are harmonics current source in the ac-dc systems. The presents of harmonic current equations, network elements in the harmonic model, frequency scan analysis for investigate system behavior and solutions of harmonics power flow algorithms in the ac-dc systems. The samples of analysis are 3 cases, frequency scan analysis at converter bus, analysis of %THD of voltage at all bus in the system and the compared of harmonics power flow analysis with ac-dc power flow analysis. The results are distrotion of amplitude and power angle of voltage and net power at all bus, which are causes of harmonics current flow to distored wave forms in the systems.

### 1. บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันได้มีการเชื่อมต่อบริเวณการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างสถานี

ควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีระยะทางห่างกันมากๆ หรือทำการเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความแตกต่างกันในด้านของความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งในปัจจุบันนี้มีการใช้การส่งจ่ายด้วยระบบ HVDC link กันอย่างแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลาย แต่จะพบว่าคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC link นั้นเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งไม่สามารถที่จะทำนายได้ว่าสถานีควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทุกๆสถานีในระบบจะมีปริมาณของฮาร์มอนิกส์แพร่กระจายอยู่มากน้อยเพียงใด ดังนั้นในการที่จะลดปริมาณของฮาร์มอนิกส์ในระบบลงจึงต้องทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังฮาร์มอนิกส์ในระบบ ซึ่งเมื่อทราบปริมาณและทิศทางของการไหลของกำลังฮาร์มอนิกส์ในระบบก็สามารถที่จะวางแผนปรับปรุงหรือหาวิธีการป้องกันปัญหาจากฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นได้ จึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การไหลของกำลังฮาร์มอนิกส์ในระบบเอซี-ดีซีขึ้น ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอในเรื่องของสมการที่ใช้ในการคำนวณ, แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง, สมการของกำลังไฟฟ้า, การสแกนความถี่เพื่อบ่งบอกพฤติกรรมของระบบเอซี-ดีซีที่มีผลเกิดจากฮาร์มอนิกส์ และวิธีการคำนวณหาการไหลของกำลังฮาร์มอนิกส์ในระบบเอซี-ดีซี โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงค่าของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆในระบบในแต่ละลำดับของฮาร์มอนิกส์ที่พิจารณา, เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของระดับแรงดันและกำลังไฟฟ้ารวมที่บัสต่างๆในระบบ โดยเทียบกับผลของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีที่ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากบทความ [1]

**2. สมการของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC link**

ในบทความนี้จะใช้สมการจาก [2] ซึ่งจะได้สมการของกระแสเอชอาร์มอนิกที่ออกมาจากบัสคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC link โดยขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงค่ามุม  $\alpha$  และ  $\delta$  ของคอนเวอร์เตอร์ คือ

$$I_h = \frac{\sqrt{6} I_d}{2\pi h(\cos\alpha - \cos\delta)} K_1(\alpha, \delta, h) \quad (1)$$

โดยที่

$$K_1 = \frac{e^{-j(h+1)\alpha} - e^{-j(h+1)\delta}}{h+1} - \frac{e^{-j(h-1)\alpha} - e^{-j(h-1)\delta}}{h-1} \quad (2)$$

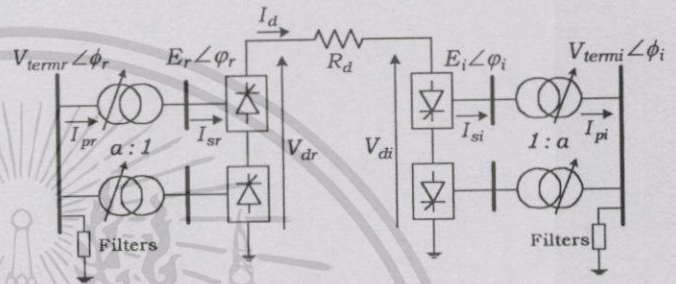
และจะได้สมการของแรงดันฮาร์มอนิกที่

DC link ของระบบ HVDC คือ

$$V_{dh} = \frac{3\sqrt{2} a V_{term}}{2\pi} K_2(\alpha, \delta, h) \quad (3)$$

โดยที่

$$K_2 = \frac{e^{j(h+1)\alpha} + e^{j(h+1)\delta}}{h+1} - \frac{e^{j(h-1)\alpha} + e^{j(h-1)\delta}}{h-1} \quad (4)$$



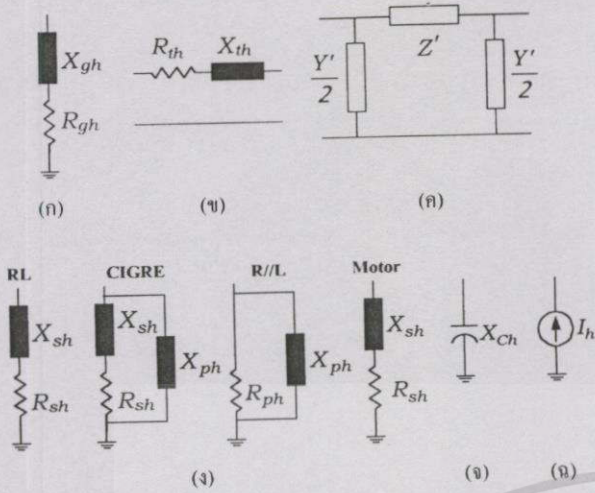
รูปที่ 1 แบบจำลองของระบบ HVDC link

จากรูปที่ 1 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์สามเฟสของระบบ HVDC link จะเป็นแบบบริดจ์ 12 พัลส์ โดยกำหนดให้ :

- 2.1 แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีความสมดุลของสัญญาณไซน์ของแรงดันฮาร์มอนิกส์
- 2.2 ไม่มีการกระเพื่อมของกระแสไฟตรง  $I_d$
- 2.3 มุมเหลื่อม (Overlap angle) ไม่เกิน  $60^\circ$
- 2.4 หม้อแปลงในระบบไม่เกิดการอิ่มตัว, ไม่คำนึงถึงเวกเตอร์กรุป และไม่กระทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในระบบ

**3. แบบจำลองฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในการคำนวณ**

สำหรับแบบจำลองแสดงในรูปที่ 2 จะใช้ตามแบบจำลองของ WG CC02 (CIGRE 36.05/ CIRED 2) [3] สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก), สายส่งไฟฟ้า (ค), โหลด (ง) และคาปาซิเตอร์ (จ) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า (ข) จะใช้ตามแบบจำลองของ JTF 36.05.02/14.03.03 [4] โดยที่กำหนดให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล และแบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ (ฉ) จะเป็นแบบจำลองของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ ดังนั้นจึงคิดค่าต่างๆเป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด



รูปที่ 2 แบบจำลองฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ต่างๆ

4. สมการของกำลังไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Harmonic Analysis) ค่าของกำลังไฟฟ้าจริง  $P$ , กำลังไฟฟ้าเสมือน  $Q$  และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ  $S$  โดยคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกได้จาก [5] คือ

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) \quad (5)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (6)$$

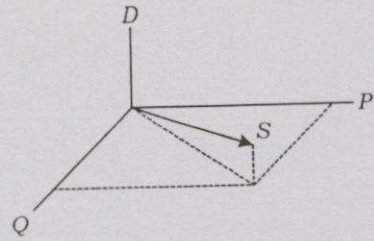
$$S = \sqrt{\left(\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2\right)\left(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2\right)} = V_{rms} I_{rms} \quad (7)$$

สัญญาณที่ไม่เป็นไซน์ซอซoidal (non-sinusoidal) จากสมการที่ (5)-(7) จะได้กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในเทอมของความเพี้ยนโวลต์แอมแปร์ (Distortion voltamperes;  $D$ ; โดยที่ค่า  $D$  คือผลคูณของแรงดันและกระแสในแต่ละความถี่ที่แตกต่างกัน) คือ

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (8)$$

ความสัมพันธ์ของค่า  $S$ ,  $P$ ,  $Q$  และ  $D$  ในรูปของเวกเตอร์สามมิติแสดงในรูปที่ 3 โดยที่ค่าของ  $P$  และ  $Q$  จะเป็นองค์ประกอบของค่า  $S$  ในกรณีที่ไม่นำคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิก และสำหรับ  $D$  จะเป็นองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นมาของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏอันเนื่องมาจากผลของฮาร์มอนิก

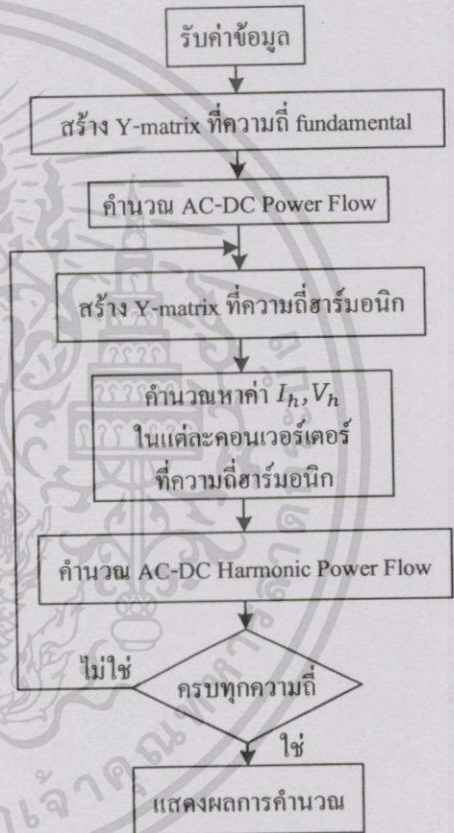
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกำลังไฟฟ้า

5. การคำนวณการไหลของกำลังฮาร์มอนิก

ขั้นตอนของการคำนวณการไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซี

ในการคำนวณการไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอช-ดีซีจะต้องทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอช-ดีซีก่อน ซึ่งในบทความนี้จะใช้วิธี Unified method [1] เพื่อที่จะทราบค่าของแรงดัน, ค่าของกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัส และค่าของพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ HVDC link แล้วนำค่าต่างๆเหล่านี้ไปคำนวณหาค่ากระแสเอชฮาร์มอนิกจากสมการที่ (1) และ (2) และคำนวณการไหลของกำลังฮาร์มอนิกใน

ระบบเอช-ดีซีต่อไป ซึ่งค่าของแรงดันฮาร์โมนิกที่บัสต่างๆ คือ

$$[V'_h] = [Y_h]^{-1} [I'_h] \quad (9)$$

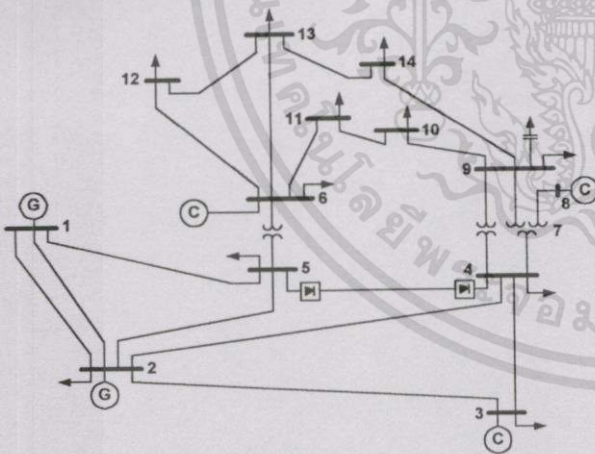
$$[V''_h] = [Y_h]^{-1} [I''_h] \quad (10)$$

เมื่อ  $V'_h$  คือแรงดันฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นเครื่องเรียงกระแส และ  $V''_h$  คือแรงดันฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะได้สมการของแรงดันฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ทั้งหมดที่ติดตั้งในระบบเอช-ดีซีโดยใช้ทฤษฎีของการวางซ้อน (Superposition) คือ

$$[V_h] = [V'_h] + [V''_h] \quad (11)$$

6. ระบบที่ใช้ทดสอบและตัวอย่างการวิเคราะห์

ในบทความนี้ใช้ระบบทดสอบจากบทความ [1] ซึ่งทำการติดตั้งระบบ HVDC link ระหว่างบัสที่ 4 กับบัสที่ 5 โดยที่คอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งในบัสที่ 5 เป็นเครื่องเรียงกระแส และคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งในบัสที่ 4 เป็นอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

6.1 การวิเคราะห์หาค่าฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์โดยสแกนในแต่ละความถี่ (Frequency Scan Analysis)

จากแบบจำลองฮาร์โมนิกของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เมื่อทำการสร้าง Y-matrix ที่ความถี่ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ จะได้ค่าฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์ของระบบ คือ

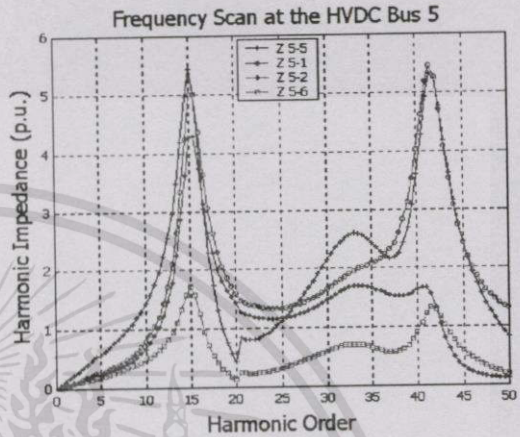
$$Z_h = Y_h^{-1} \quad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_h(i, i)$  คือ Driving point impedance ; bus  $i = j$

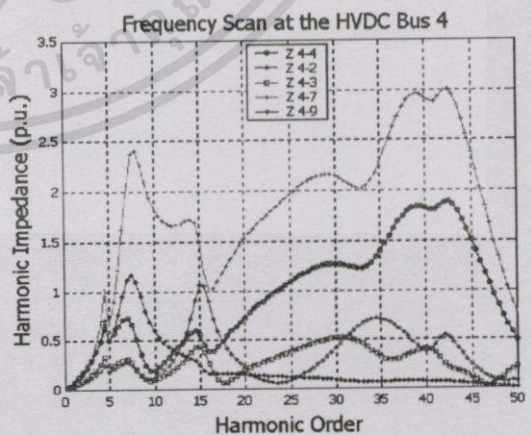
$Z_h(i, j)$  คือ Transfer impedance ; bus  $i \neq j$

โดยทำการสแกนตั้งแต่ความถี่ของฮาร์โมนิกอันดับที่ 0.5 จนถึงฮาร์โมนิกอันดับที่ 50 ซึ่งทำการเพิ่มความถี่ของฮาร์โมนิกทีละ 0.5 เป็นจำนวน 100 ค่า



รูปที่ 6 Frequency Scan Analysis ที่บัส 5

จากรูปที่ 6 Driving point impedance คือค่าของ  $Z_h$  ที่ตำแหน่ง  $Z_{h(5,5)}$  และ Transfer impedance จากบัส 5 ไปบัส 1, บัส 5 ไปบัส 2 และ บัส 5 ไปบัส 6 พบว่าระบบที่ทำการวิเคราะห์จะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ฮาร์โมนิกที่ 15 และฮาร์โมนิกที่ 43 ซึ่งสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 5 ไปบัส 1 และบัส 5 ไปบัส 2 จะเกิดการเรโซแนนซ์มาก นั่นคือจะทำให้ฮาร์โมนิกที่บัส 5 โพล์ไปทางบัส 1 และบัส 2 มาก

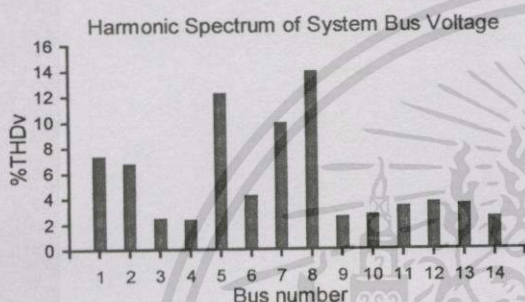


รูปที่ 7 Frequency Scan Analysis ที่บัส 4

จากรูปที่ 7 Driving point impedance คือค่าของ  $Z_h$  ที่ตำแหน่ง  $Z_{h(4,4)}$  และ Transfer impedance

จากบัส 4 ไปบัส 2, บัส 4 ไปบัส 3, บัส 4 ไปบัส 7 และจากบัส 4 ไปบัส 9 พบว่าระบบที่ทำการวิเคราะห์จะเกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุดที่ฮาร์โมนิกที่ 7 และตั้งแต่ฮาร์โมนิกที่ 15 เป็นต้นไป ซึ่งสายส่งของการเชื่อมต่อระหว่างบัส 4 ไปบัส 7 จะเกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุดนั่นคือจะทำให้ฮาร์โมนิกที่บัส 4 โฟลว์ไปทางบัส 7 มากที่สุด

**6.2 การวิเคราะห์หาค่าของ %THD ของแรงดันที่บัส**  
จากการคำนวณการโฟลว์ของกำลังฮาร์โมนิกในระบบเอซี-ดีซี จะได้ค่าของ %THD ของแรงดันที่บัส

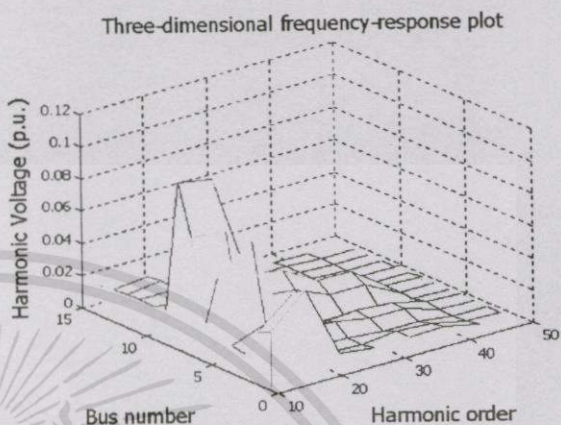


รูปที่ 8 ค่า %THD ของแรงดันที่บัสต่างๆ

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของแรงดัน (%THDv) ที่บัส 8 จะมีค่าสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 13.9274 % และที่บัส 4 และบัส 5 มีค่าเท่ากับ 2.3740 % และ 12.2583 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์หาค่าฮาร์โมนิกที่แคนซ์โดยสแกนในแต่ละความถี่จากรูปที่ 7 เนื่องจากว่าการเชื่อมต่อระหว่างบัส 4 ไปยังบัส 7 และเชื่อมต่อจากบัส 7 ไปยังบัส 8 จะมีการโฟลว์ของกำลังฮาร์โมนิกที่ไปยังตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งเป็นเส้นทางที่เกิดการเรโซแนนซ์มากที่สุด และเมื่อพิจารณาการโฟลว์ของกำลังฮาร์โมนิกที่จากบัส 5 ไปยังบัสต่างๆที่ทำการเชื่อมต่อ พบว่าที่บัส 1 และบัส 2 จะมีปริมาณของฮาร์โมนิกที่โฟลว์ไปยังบัสดังกล่าวค่อนข้างมาก ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์โดยการสแกนในแต่ละความถี่จากรูปที่ 6

จากรูปที่ 9 ในแกนของ Bus number จะแสดงบัสที่ 1 ถึง บัสที่ 14 และในแกนของ Harmonic order จะแสดงคุณลักษณะฮาร์โมนิก (Characteristic harmonics) ของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ซึ่งมีจำนวนลำดับของฮาร์โมนิกที่ 8 อันดับ คือ ฮาร์โมนิกที่ 11, 13, 23, 25, 35,

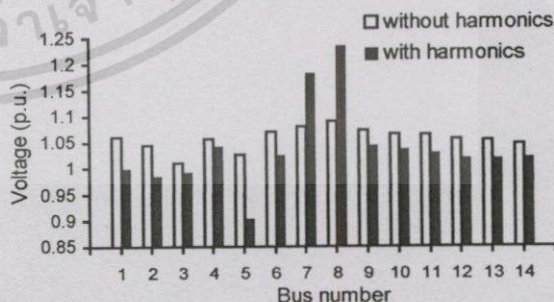
37, 47 และ 49 ตามลำดับ และในแกนตั้งจะแสดงถึงค่าของแรงดันฮาร์โมนิกที่ลำดับต่างๆที่บัสของระบบ ซึ่งจะพบว่าฮาร์โมนิกที่ 11 จะมีค่าสูงสุดที่บัส 8 คือ 0.1016 p.u. และรองลงมาคือฮาร์โมนิกที่ 13 มีค่า 0.0975 p.u.



รูปที่ 9 ค่าของแรงดันฮาร์โมนิกที่บัสต่างๆ

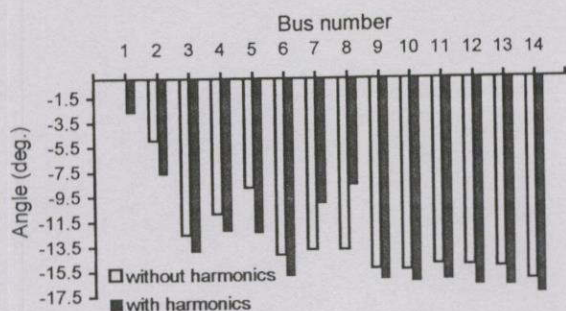
**6.3 การวิเคราะห์การโฟลว์ของกำลังฮาร์โมนิกที่เทียบกับการรันเพาเวอร์โฟลว์ในระบบเอซี-ดีซี**

เมื่อทำการคำนวณการโฟลว์ของกำลังฮาร์โมนิกในระบบเอซี-ดีซีเทียบกับการคำนวณการโฟลว์ของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซี [1] จะพบว่าค่าของแรงดันที่บัสต่างๆในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของกระแสฮาร์โมนิกที่โฟลว์อยู่ในระบบ โดยเฉพาะค่าของแรงดันที่บัส 5, บัส 7 และบัส 8 ดังแสดงในรูปที่ 10 และ รูปที่ 11



รูปที่ 10 ค่าขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆ

จากรูปที่ 10 พบว่าค่าขนาดของแรงดันที่บัส 5 มีค่าลดลง 0.124 p.u. , ที่บัส 7 มีค่าเพิ่มขึ้น 0.103 p.u. และที่ บัส 8 มีค่าเพิ่มขึ้น 0.145 p.u



รูปที่ 11 ค่ามุมของแรงดันที่บัสต่างๆ

จากรูปที่ 11 พบว่าค่ามุมของแรงดันที่บัส 5 มีค่าลดลง 3.593 องศา, ที่บัส 7 มีค่าเพิ่มขึ้น 3.686 องศา และที่ บัส 8 มีค่าเพิ่มขึ้น 5.161 องศา ซึ่งจากการคำนวณการไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบเอซี-ดีซีจะพบว่าฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ของระบบ HVDC link จะมีผลกระทบกับค่าของแรงดันที่บัสต่างๆในระบบ

ตารางที่ 1 ค่าของกำลังไฟฟารวมที่บัสต่างๆ (ในกรณีที่คำนึงผลของฮาร์มอนิก)

Bus	P (MW)	Q (MVAR)	D (MVA)	S (MVA)
1	232.50	-20.12	17.97	234.06
2	18.30	2.82	15.61	24.22
3	-94.20	-18.46	4.12	96.08
4	-47.80	3.90	4.17	48.14
5	-7.60	-1.60	9.43	12.22
6	-11.20	-4.21	6.84	13.78
7	0	0	4.09	4.09
8	0	6.83	5.01	8.47
9	-29.50	-16.60	4.52	34.15
10	-9.00	-5.80	3.49	11.26
11	-3.50	-1.80	2.30	4.56
12	-6.10	-1.60	2.14	6.66
13	-13.50	-5.80	3.65	15.14
14	-14.90	-5.00	1.30	15.77

เมื่อทำการพิจารณาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อค่าของกำลังไฟฟารวมที่บัสต่างๆในระบบ จากตารางที่ 1 จะพบว่าค่าของ  $P$ ,  $Q$  และ  $S$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากความเพี้ยน (Distortion) ของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสในระบบ ซึ่งค่า  $P$  และ  $Q$  รวมที่บัสต่างๆในระบบมีค่าเป็นบวกแสดงถึงค่า  $P$  และ  $Q$  ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่ามากกว่าที่รับเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเป็นลบแสดงถึงค่า  $P$  และ  $Q$  ที่จ่ายออกไปจากบัสมีค่าน้อยกว่าที่รับเข้ามา และจะมีค่า  $D$  เกิดขึ้นในระบบ

## 7. บทสรุป

การวิเคราะห์การไหลของกำลังฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มี HVDC link หรือว่าระบบที่มีอุปกรณ์ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุม ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนป้องกันหรือทำการลดทอนระดับของฮาร์มอนิกให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมีความเหมาะสมต่อระบบโดยรวม และจากผลการวิเคราะห์ของบทความนี้เปรียบเทียบให้เห็นว่าเมื่อทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเอซี-ดีซีโดยไม่คำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกกับเมื่อคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกมีความแตกต่างกันมาก

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สืบพงศ์ สุวรรณภู, สิริวัฒน์ โปธิเวชกุล “การจำลองการเชื่อมโยงด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและการวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลัง,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 113-116, พฤศจิกายน 2543.
- [2] E.W. Kimbark, Direct Current Transmission, Vol. 1, John Wiley & Sons Inc., New York, 1971.
- [3] A. Robert, T. Deflandre, and Working Group CC02, “Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance,” Electra No.167, pp. 97-131, 1996.
- [4] J. Arrillaga, and Joint Task Force: 36.05.02 / 14.03.03, “AC System Modelling for AC Filter Design an Overview of Impedance Modelling,” Electra No. 164, pp. 133-151, 1996.
- [5] “Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation: TP-125-0,” IEEE Power Engineering Society: PES, pp. 8-14, 1998.

## ประวัติผู้เขียน



นายสีบพงษ์ สุวรรณกุล เกิดเมื่อวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2517 ที่อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540

ปีการศึกษา 2541 – ปลายปี พ.ศ. 2542 เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปี พ.ศ. 2543 เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า โดยดูแลงานในด้านการตรวจสอบและการวิเคราะห์การใช้พลังงานของอาคารควบคุม ที่ บริษัท ฮันนี่เวลล์ ซิสเต็มส์ (ไทยแลนด์) จำกัด

