

การชดเชยการแกว่งความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ FACTS

COMPENSATION OF LOW FREQUENCY OSCILATION IN POWER  
SYSTEMS WITH FACTS DRIVES

อมร อ้นกรอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาส่วนหนึ่งของหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

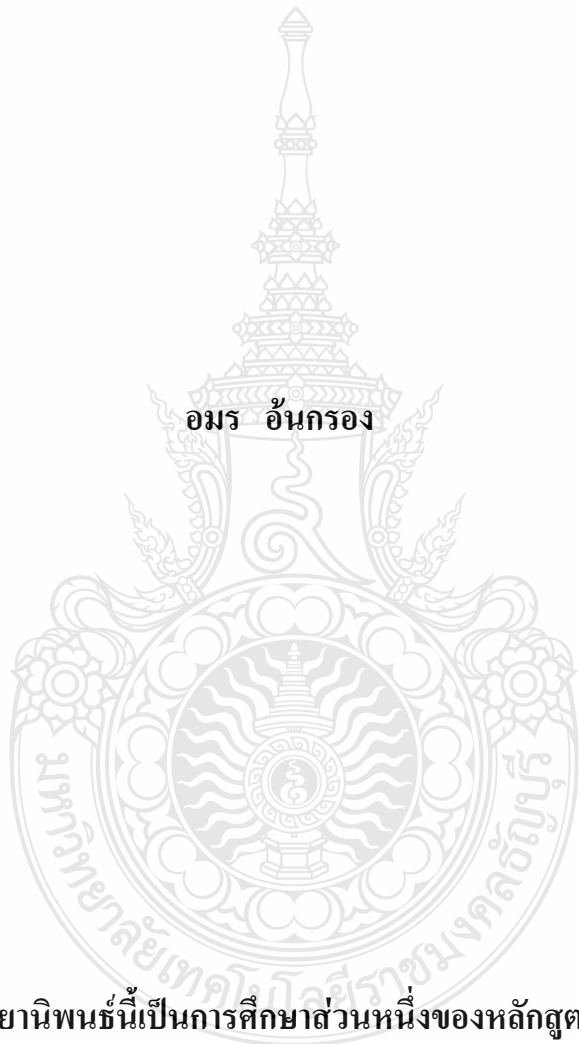
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การชดเชยการแกว่งความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ FACTS



อมร อ้นกรอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาส่วนหนึ่งของหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การชดเชยการแกว่งความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ FACTS
ชื่อ – นามสกุล	นายอมร อ้นกรอง
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์การชดเชยการแกว่งความถี่ต่ำ ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น โดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น เข้าไปในระบบไฟฟ้าเพื่อต้องการปรับปรุงเสถียรภาพระบบไฟฟ้า และความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อระบบสภาวะผิดปกติหรือสภาวะชั่วคราว

การวิเคราะห์ใช้แบบจำลองระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ที่นำมาใช้ในงานวิจัยโดยการใช้โปรแกรม PSAT ที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ระบบในการจำลอง โดยใช้วิธีการเขียนกราฟแสดงความผันแปรการไหลของแรงดัน และ กำลังไฟฟ้าจริง การทำงานเมื่อระบบเกิดสภาวะผิดปกติหรือสภาวะชั่วคราวและการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นเข้าไปในระบบไฟฟ้า

ผลการจำลองการทำงานพบว่าเมื่อแรงดันที่บัสเมื่อระบบเกิดสภาวะผิดปกติหรือสภาวะชั่วคราวในบัสที่ 3 ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพโดยมีค่าแรงดันที่บัส 3 อยู่ที่ มุมเฟส 1.8849 เรเดียน ผลการจำลอง โดยการติดตั้ง อุปกรณ์ชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น 3 แบบไปในระบบคือ SVC TCSC และ SSSC หลังจากเกิดสภาวะผิดปกติ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น แบบขนาน SVC สามารถควบคุมเสถียรภาพของระบบได้ดีเพราะว่า SVC มีมุมเฟส 0.17644 เรเดียน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ช่วยให้เข้าใจหลักการวิเคราะห์และการออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของด้วยอุปกรณ์ชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น

**คำสำคัญ:** การชดเชยการแกว่งความถี่ต่ำ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น เสถียรภาพ สภาวะผิดปกติ

<b>Thesis Title</b>	Compensation of Low Frequency Oscillation in Power System with FACTS Devices
<b>Name - Surname:</b>	Mr. Amorn Onkrong
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2013

## ABSTRACT

This thesis proposes the compensation of low-frequency oscillations in power systems with Flexible AC Transmission Systems Devices (FACTS). The FACTS devices are selected to install in the power system in order to improve power system stability and reliability when the disturbance was occurred.

The IEEE 14 BUS system is chosen for analysis in this thesis. This proposed system by modeled into Power System Analysis Toolbox that it can operate in MATLAB/Simulink program. The system analysis simulation operation is divided into 2 cases, The first case is the base case and the second case is the base case including FACTS devices installation.

The simulation results showed that when the system occurred at bus No.3, then it's makes unstable of system. The voltage volume at bus No.3 is 1.08849 rad. The 3 models FACTS devices are installed into the power system, namely: SVC, TCSC, and SSSC. The SVC can be control power system stability that is better than 2 types of FACTS devices because phase angle of SVC is 0.17644 rad. Therefore, this thesis show fundamental of analysis and designed for improving power system instability.

**Keywords:** compensate for low frequency oscillations, flexible AC transmission systems devices, stability, fault

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดีความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม อาจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการสอบ และ รองศาสตราจารย์ ดร.กานท์ เกิดชื่น ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงเงินทุนสำหรับสนับสนุนในบางส่วนสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจดญาติพี่น้องทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และรวมถึงพี่ๆ น้องๆ ทีมงานวิจัย ณ ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้กำลังใจและร่วมแรงร่วมใจอยู่ด้วยกันในการปฏิบัติงานตลอดมา

อมร อ้นกรอง



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง .....	(8)
สารบัญรูป .....	(9)
สัญลักษณ์และคำย่อ .....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	19
1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์ .....	19
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	19
1.5 ขั้นตอนในการศึกษา.....	20
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ .....	20
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
2.1 ความเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability).....	21
2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า .....	37
2.3 อุปกรณ์ชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น .....	42
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
2.5 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	54
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ โดยใช้โปรแกรม PSATร่วมกับ MATLAB /simulink....	54
3.2 ระบบ IEEE 14 Bus .....	55
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ SVC เข้าไปในระบบ.....	58
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ SSSC เข้าไปในระบบ.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ TCSC เข้าไปในระบบ.....	60
3.6 สรุปผล.....	61
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	62
4.1 การปรับปรุงเสถียรภาพโดยติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น.....	70
4.2 การปรับปรุงเสถียรภาพโดยติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น SSSC.....	73
4.3 การปรับปรุงเสถียรภาพโดยติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น TCSC.....	76
4.4 สรุปผล.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก ข้อมูล巴士ต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEEE 14 Bus.....	86
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโดยใช้โปรแกรม PSAT .....	88
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	125
ประวัติผู้เขียน .....	154

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบของแรงดันค่าคงที่ ความถี่ และ อัตราส่วนการแกว่ง.....	51
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส .....	56
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของ SVC ขนาด 32 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 2-3.....	58
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลของ SSSC ขนาด 32 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 2-3.....	59
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลของ TCSC ขนาด 32 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 2-3.....	60
ตารางที่ 4.1 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ 14 บัส.....	65
ตารางที่ 4.2 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสถานะชั่วคราว.....	68
ตารางที่ 4.3 การไหลของระบบ IEEE 14 บัส หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC.....	72
ตารางที่ 4.4 การไหลของระบบ IEEE 14 บัส หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC.....	75
ตารางที่ 4.5 การไหลของระบบ IEEE 14 บัส หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC.....	78





## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	17
รูปที่ 1.2 เกิดจากสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Small Signal).....	17
รูปที่ 1.3 การเกิดสภาวะความผิดปกติ (Fault).....	18
รูปที่ 1.4 สัญญาณรบกวนและฮาร์โมนิกส์.....	18
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	21
รูปที่ 2.2 ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีค่าแรงดันสนามไฟฟ้าคงที่.....	23
รูปที่ 2.3 ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมการกระตุ้น.....	24
รูปที่ 2.4 เวกเตอร์ของแกนโรเตอร์ภายใต้สภาวะปกติมุมทางไฟฟ้าจะคงที่.....	27
รูปที่ 2.5 เส้นไขพื้นที่เท่ากัน เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	37
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส.....	37
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่ค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนแปลง.....	38
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง.....	39
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการคำนวณ โดยวิธี CPF.....	40
รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น.....	43
รูปที่ 2.11 ลักษณะของการติดตั้ง SVC.....	43
รูปที่ 2.12 สวิตช์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน TCR.....	44
รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของ SVC.....	44
รูปที่ 2.14 วงจรแบบจำลองของ SVC.....	45
รูปที่ 2.15 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC.....	45
รูปที่ 2.16 ควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสถานะคงตัว.....	47
รูปที่ 2.17 พื้นฐานวงจรแปลงผันแบบเดียวกับสำหรับการต่ออนุกรมกับสายส่งและเฟสเซอร์ไดอะแกรม.....	47
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุม SSSC.....	48
รูปที่ 2.19 วงจรแบบจำลองของ SSSC.....	48
รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของ TCSC.....	49

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 ระบบ IEEE 14 Bus.....	50
รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเครือข่าย.....	51
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเกิน.....	52
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนดำเนินงานวิจัยด้วยโปรแกรม PSAT .....	55
รูปที่ 3.2 ระบบของ IEEE 14 บัส ที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	56
รูปที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยัดหยุนแบบ SVC .....	58
รูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยัดหยุนแบบ SSSC.....	50
รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยัดหยุนแบบ TCSC.....	60
รูปที่ 4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัส.....	62
รูปที่ 4.2 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัสเทียบกับเวลา.....	63
รูปที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัส.....	63
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัสเทียบกับเวลา.....	64
รูปที่ 4.5 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง).....	64
รูปที่ 4.6 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติ.....	66
รูปที่ 4.7 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติเทียบกับเวลา	66
รูปที่ 4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติเทียบ กับเวลา .....	67
รูปที่ 4.9 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัส เมื่อระบบ เกิดสภาวะความผิดปกติเทียบ กับเวลา .....	67
รูปที่ 4.10 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติ.....	68
รูปที่ 4.11 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC.....	70
รูปที่ 4.12 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC .....	70
รูปที่ 4.13 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC.....	71

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อติดตั้ง SVC.....	71
รูปที่ 4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC.....	73
รูปที่ 4.16 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC.....	73
รูปที่ 4.17 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC.....	74
รูปที่ 4.18 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อติดตั้งSSSC.....	74
รูปที่ 4.19 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC.....	76
รูปที่ 4.20 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC .....	76
รูปที่ 4.21 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC.....	77
รูปที่ 4.22 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อติดตั้ง TCSC.....	77
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์ชดเชยแต่ละชนิดเมื่อระบบเกิดสภาวะผิดปกติ	80



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$B_c$	ชั้นเซียบเตนซ์ของอุปกรณ์ FACTS
$B_{\min}$	ชั้นเซียบเตนซ์ต่ำสุด
$B_{\max}$	ชั้นเซียบเตนซ์สูงสุด
$C$	คาปาซิเตอร์
CPF	Continuation Power Flow
$D$	อัตราขยายของอุปกรณ์แปลงผัน
$E$	แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิด
$E_A$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเครื่องกำเนิด
$E \angle \delta$	แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$e_k$	แถวของเวกเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์
FACTS	Flexible AC Transmission line System
$G_C$	คอนดัคเตนซ์ของอุปกรณ์ FACTS
$H$	ค่าความเฉื่อย
Hz	<i>Hertz</i>
IPFC	Interline Power Flow Controller
$I$	กระแสที่ไหลระหว่างระบบไฟฟ้ากับอุปกรณ์ FACTS
$I_S$	กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์
$I_r$	กระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์
$I_{\min}$	กระแสต่ำสุด
$I_{\max}$	กระแสสูงสุด
$J$	โมเมนต์ความเฉื่อยของ Primr Mover และ Generator
$jX$	ค่ารีแอคเตนซ์ของสาย
$K$	ลักษณะของโหลด
$L$	ค่าความเหนี่ยวนำ

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

M	ความไม่คงที่ของโรเตอร์
$k$	อัตราส่วนของการมอดูเลชัน
$P$	กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$P_S$	กำลังไฟฟ้าจริงที่ขดลวดสเตเตอร์
$P_i$	กำลังไฟฟ้าจริงของอุปกรณ์ FACTS
$P_r$	กำลังไฟฟ้าจริงที่ขดลวดโรเตอร์
$P_W$	กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้า
$P_m$	กำลังทางกล
$P_e$	กำลังทางไฟฟ้า
PSAT	Power System Analysis Toolbox
PST	Matlab Power System Toolbox
$P+jQ$	ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดคงที่เขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน
$Q$	กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$Q_i$	กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของอุปกรณ์ FACTS
$R_S$	ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
$R_r$	ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
$R_A$	ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์
$s$	สลิป
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
$S_B$	ค่าฐานกำลังไฟฟ้าของระบบ
$T_e$	แรงบิดของสนามแม่เหล็กหมุน
TCSC	Thyristor Control Series Capacitor
$T_S$	เรียกว่าสัมประสิทธิ์กำลังบิดเชิงโรไนซ์

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$T_D \Delta \omega$	กำลังบิดการหน่วงเป็นค่ากำลังบิดในเฟสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว
$T_D$	เรียกว่า สัมประสิทธิ์กำลังบิดการหน่วง (Damping torque coefficient)
$T_a$	แรงบิดที่มีอัตราเร่ง
TSC	Thyristor-Switched Capacitor
UPFC	Unified Power Flow Controller
$V$	แรงดันที่บัส
$V_i$	แรงดันของอุปกรณ์ FACTS
$V_S$	แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์
$V_r$	แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดโรเตอร์
$V_a$	แรงดันที่ตกคร่อมค่ารีแอคแตนซ์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก
$V_\phi$	แรงดันต่อเฟสที่บัส
$V_{ref}$	แรงดันอ้างอิง
$V_{ac}$	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$V_{dc}$	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$V_{min}$	แรงดันต่ำสุด
$V_{max}$	แรงดันสูงสุด
$V_{SSVC\ ref}$	แรงดันอ้างอิงของ SSSV
$V_d, V_q$	แรงดันไฟฟ้าที่ได้รับการชดเชย
$X$	รีแอคแตนซ์ของสายส่ง
$X_1$	รีแอคแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์
$X_2$	รีแอคแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์
$X_m$	รีแอคแตนซ์ที่ทำให้เกิดฟลักซ์
$X_S$	ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์
$X_L$	รีแอคแตนซ์ของ SVC

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$X_c$	คาปาซิแตนซ์ของ SVC
$X_{SL}$	รีแอคแตนซ์ของ SVC ในสถานะสมดุล
$x_k$	ค่าพารามิเตอร์ของความต่อเนื่องที่เลือกใช้
$Z_{in}$	อิมพีแดนซ์อินพุต
$\alpha$	มุมจุดชนวนสวิตช์
$\alpha_m, \alpha_{\min}$	มุมจุดชนวนต่ำสุด
$\alpha_M, \alpha_{\max}$	มุมจุดชนวนสูงสุด
$\delta$	มุมของแรงดันที่บัส
$\delta_m$	มุมของการเคลื่อนที่ (Angular Displacement) ของ โรเตอร์เทียบแกนอ้างอิง ก่อนเกิดการรบกวนที่เวลา ( $t = 0$ ) และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์
$\beta$	มุมเฟส
$\Delta T_e$	กำลังบิดทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง
$\theta_m$	ความเร็วเชิงโคโรนัสของเครื่องจักรกลมีหน่วยเป็น (rad/s)
$\lambda$	ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าโหลดสูงสุด
$\sigma$	ขนาดของขั้นการเปลี่ยนแปลงในการทำนายครั้งต่อไป ที่ค่าการเพิ่มขึ้นของโหลด
$\omega_d$	เป็นความถี่ของการสั่นที่ถูกหน่วงไว้
$\omega_n$	เป็นความถี่ธรรมชาติของการสั่น
$\omega$	ความเร็วเชิงมุมของ โรเตอร์
$\tau$	ค่าคงตัวในการตอบสนอง
$\rho$	จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\zeta$	เป็นอัตราส่วนของการหน่วง

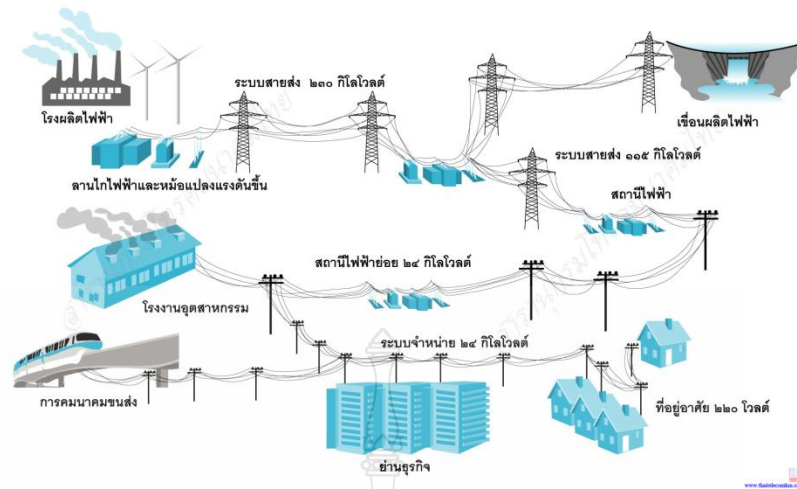
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลจากจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าเพื่อรองรับกับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น และระบบกำลังไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้าจำนวนมาก โดยโรงไฟฟ้าแต่ละโรงจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยหน้าที่หลักของเครื่องกำเนิด คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่เชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้าด้วยระดับแรงดันที่กำหนดพลังงานไฟฟ้าถือว่าเป็นพลังงานที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากการส่งจ่ายไฟฟ้าทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพที่สูง การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ามีความจำเป็นต่อการทำงานของระบบอย่างมากในระบบไฟฟ้านั้นจะประกอบด้วย ระบบการผลิตไฟฟ้า ระบบส่งจ่าย สถานีไฟฟ้าและระบบจำหน่าย การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญในส่วนของระบบจำลองโหลดที่เกิดขึ้นในระบบนั้นสามารถดูได้จากสถานีไฟฟ้าย่อยว่ามีโหลดเท่าไร ผลกระทบของโหลดที่จะมีผลกระทบต่อการควบคุมระบบไฟฟ้า โหลดทางไฟฟ้าประกอบด้วยโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าจริงและโหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟการทราบ โหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟนั้น ทำให้ทราบถึงความต้องการของโหลดระบบทั้งหมดรวมทั้งโหลดในอนาคต นอกจากนี้พฤติกรรมของโหลดก็เช่นเดียวกันมีความสำคัญซึ่งจะส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทำให้การเตรียมการและการวางแผนระบบควบคุมที่ถูกต้อง เสถียรภาพทางไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญในยุคปัจจุบัน เสถียรภาพทางไฟฟ้า คือ คุณสมบัติของระบบพลวัตหรือความสามารถของระบบที่สามารถรักษาสถานะในเงื่อนไขการทำงานปกติและเมื่อเกิดการรบกวนจากสิ่งอื่นระบบก็สามารถกลับสู่สภาพการทำงาน โดยปกติได้อย่างรวดเร็ว ทางด้านเศรษฐศาสตร์นั้นจะต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตกับการจำหน่ายไฟฟ้าในราคาที่เหมาะสม ส่วนทางด้านความน่าเชื่อถือของระบบนั้นอยู่ที่การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้มีคุณภาพและเพียงพอกับความต้องการ ดังนั้นเสถียรภาพไฟฟ้าและจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือในระบบไฟฟ้า

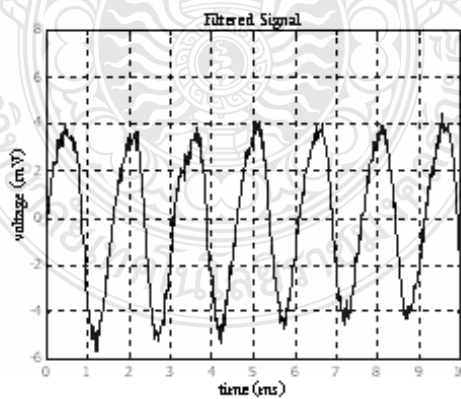




รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

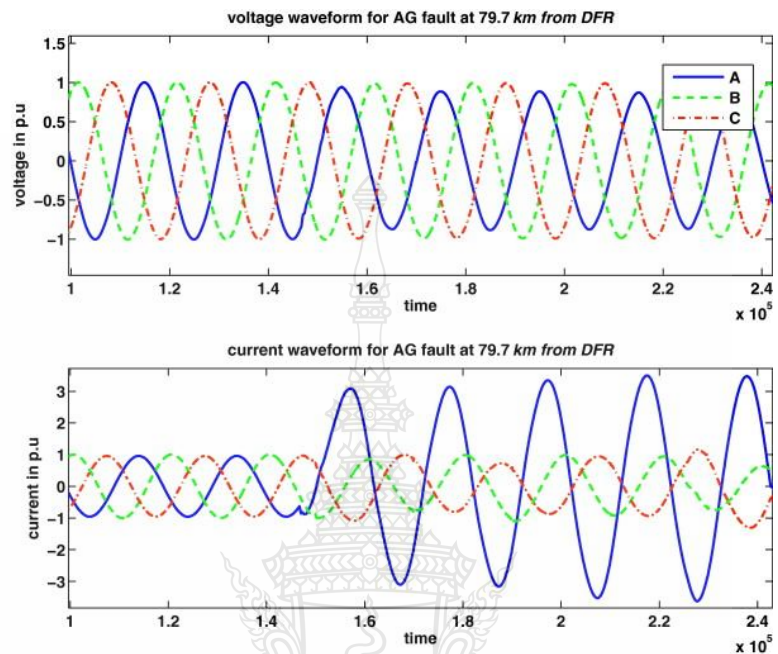
ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อผลของโหลดบนการแกว่งของระบบไฟฟ้า เช่น

1. เกิดจากสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Small Signal) สถานีไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะทำการควบคุมระบบไฟฟ้าจะมีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นจะเกิดกำลังการแกว่งของสัญญาณขนาดเล็กและความถี่ต่ำเป็นระยะเวลานาน ระบบจะเสถียรภาพหรือไม่เสถียรภาพขึ้นอยู่กับความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีโหลดต่ออยู่ในระบบโดยที่ลักษณะของโหลดจะมีความสำคัญต่อความเสถียรภาพของระบบอย่างมาก



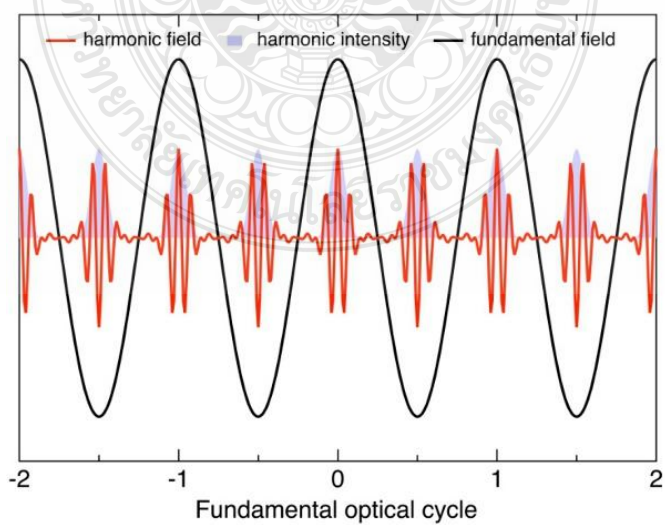
รูปที่ 1.2 เกิดจากสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Small Signal)

2. การเกิดสภาวะความผิดปกติ (Fault) ทางไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า



รูปที่ 1.3 การเกิดสภาวะความผิดปกติ (Fault)

3. ปัญหาสัญญาณรบกวนและฮาร์โมนิกส์ ในระบบไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น จากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 1.4 สัญญาณรบกวนและฮาร์โมนิกส์

ดังนั้นการวิเคราะห์ การจำลองทางคณิตศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงของโหลด การศึกษาการแกว่งในระบบความถี่ต่ำมีผลเสถียรภาพของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจึงมีความสำคัญต่อการทำงานระบบไฟฟ้ากำลังอย่างมาก เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าทั่วไป จึงทำให้ต้องมีการออกแบบระบบที่ดีระบบที่ทำให้เสถียรภาพถูกนำมามากที่สุดในการออกแบบคือ (Power System Stability, PSS) ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการออกแบบระบบ PSS จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบไฟฟ้า ปัจจัยที่เป็นปัญหาสำคัญมีผลการแกว่งความถี่ต่ำจะต้องมีการศึกษา ดังนั้นจึงมีวิธีการแก้ไขปัญหาค่าความไม่มั่นคงของระบบ

## 1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความการแกว่งในระบบความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบ
- 1.2.3 ศึกษาผลของวิธีการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม

## 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาผลทางด้านเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อเกิดการรบกวนหรือเกิดการแกว่งในระบบเช่น การเกิดสภาวะชั่วคราว การเกิดสภาวะความผิดปกติ โดยใช้โปรแกรม PSAT มาช่วยในการวิเคราะห์การจำลองทางคณิตศาสตร์ และ เปรียบเทียบเปรียบเทียบความเหมาะสมของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหย่น โดยจะจำลองการทำงานกับระบบ มาตรฐาน (Institute Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 14 บัส

## 1.4. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สามารถรู้ถึงผลกระทบของการแกว่งระบบความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.3.2 สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแกว่งระบบความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.3.3 สามารถออกแบบและวิเคราะห์อุปกรณ์ชดเชยการแกว่งระบบความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน IEEE14 บัส

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษารายละเอียดของวิทยานิพนธ์จากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดขอบเขตของวิทยานิพนธ์
- 1.5.2 ศึกษาวิธีการใช้งาน โปรแกรม (Power System Analysis Toolbox, PSAT) เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพในระบบเกิดสถานะชั่วคราวเมื่อระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบ IEEE 14 บัส ทั้งก่อน และ หลังการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น โดยใช้โปรแกรม PSAT
- 1.5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.5.4 สรุปและอภิปรายผล
- 1.5.5 เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

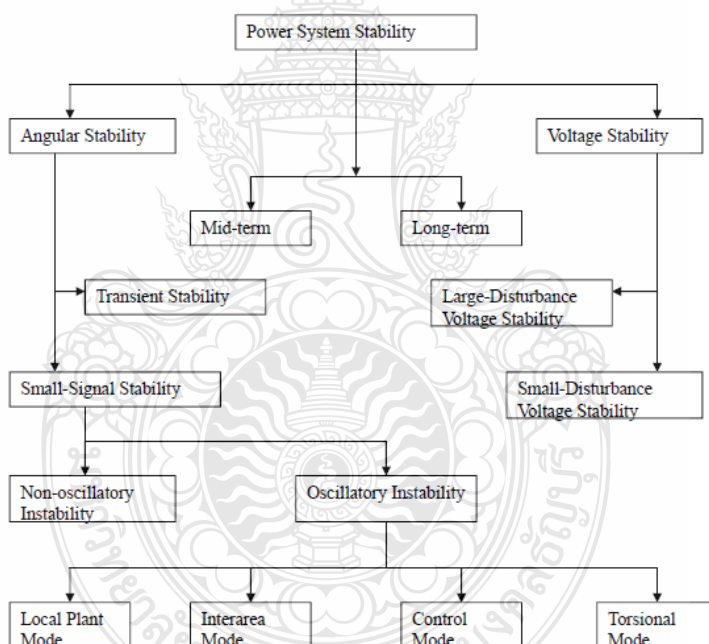
- 1.4.1 สามารถทราบถึงคุณลักษณะการแกว่งในความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 1.4.2 สามารถออกแบบแก้ไขวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PSAT ในการช่วยวิเคราะห์
- 1.4.3 สามารถใช้รูปแบบอุปกรณ์ชดเชยความถี่ในการแก้ปัญหาการแกว่งในความถี่ต่ำ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability)

เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่ยังสามารถจ่ายโหลดได้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นในระบบ โดยระบบที่มีเสถียรภาพย่อมสามารถทนทานต่อผลกระทบต่างๆ ได้ เสถียรภาพในระบบนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ เสถียรภาพการเคลื่อนที่เชิงมุม เสถียรภาพแรงดัน และเสถียรภาพระยะกลางและระยะยาว ซึ่งผลของปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นนี้จะเกิดปัญหาต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ [5]



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

##### 2.2.1. ความเสถียรภาพทางมุม (Angle Stability)

จุดสมดุลระหว่างกำลังบิดทางกล (Mechanical torque) และกำลังบิดทางไฟฟ้า (Electrical torque) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วคงที่ถ้าสภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกรบกวนจุด

สมดุก็่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้อัตราเร่งของมุมโรเตอร์ (Rotor Angle) เพิ่มขึ้นหรือลดลงและถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหมุนเร็วกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกเครื่องหนึ่ง มุมโรเตอร์เทียบกับแกนโรเตอร์ของเครื่องนั้นจะมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนช้ากว่า ความแตกต่างของมุมนี้เป็นผลให้ภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช้าจะย้ายไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เร็วซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-มุมโรเตอร์ (Power angle relationship) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ส่งผลให้ลดความแตกต่างของความเร็วและมุมที่แยกออกจากกันการเพิ่มขนาดของมุมที่แยกออกจากกันนี้เกิดขึ้นจากความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าลดลง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-มุม และยังเพิ่มความแตกต่างของมุมที่แยกออกจากกัน เสถียรภาพของระบบจะยิ่งลดลง ดังนั้นกล่าวได้ว่าเสถียรภาพของระบบจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของมุมที่แยกกันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด โดยขึ้นอยู่กับจุดทำงานของระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ และถ้าค่ามุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ก็จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นสูญเสียสภาพซิงโครไนส์และทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบไฟฟ้า การสูญเสียสภาพซิงโครไนส์ในระบบไฟฟ้าสามารถเกิดได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียวหรือหลายเครื่องก็ได้ จะกลับมาสู่สภาพซิงโครไนส์ใหม่ได้ด้วยการขนานเข้าสู่ระบบอีกครั้ง การทำงานของระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมกัน สามารถเปรียบได้กับการที่มีรถหลาย ๆ คัน วิ่งเกาะกลุ่มกันไป โดยรถแต่ละคันจะเชื่อมต่อกันด้วยสายที่ยึดหยุ่นได้หรือ Rubber band โดยเปรียบเสมือนได้กับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายที่ยึดหยุ่นได้เปรียบเหมือนสายส่ง เมื่อรถทุกคันวิ่งด้วยความเร็วเท่ากัน สายที่ยึดหยุ่นได้ก็จะอยู่ในภาวะที่คงที่ แต่ถ้ามีแรงมากระทำ ที่รถคันหนึ่งทำให้ความเร็วของรถเพิ่มขึ้นชั่วขณะสายที่ยึดหยุ่นได้ที่ต่อกับรถคันนี้ก็จะยืดออกจากคันอื่นทำให้รถที่ถูกแรงมากระทำจะช้าลงส่วนรถที่ต่ออยู่จะเร็วขึ้น ลักษณะนี้จะเกิดต่อเนื่องเป็นลูกโซ่กับรถทุกคัน จะกระทั่งความเร็วของรถทั้งหมดกลับสู่ปกติถ้าแรงที่มากระทำทำให้สายที่ยึดหยุ่นได้รับแรงมากเกินไปจนขาด รถก็จะแยกออกจากกลุ่ม เสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แยกออกจากระบบไฟฟ้านั่นเอง แต่ถ้าสายที่ยึดหยุ่นได้มีความยืดหยุ่นมากเกินไป รถที่ต่อเชื่อมอยู่ก็จะมีอาการแกว่งรอบความเร็วของรถหรือถ้าวิเคราะห์จากปริมาณกำลังบิดทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วยกำลังบิดซิงโครไนส์ (Synchronizing torque) และกำลังบิดการหน่วง (Damping torque) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Delta T_e = T_s \Delta \sigma + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

เมื่อ

$\Delta T_e$  = กำลังบิดทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง

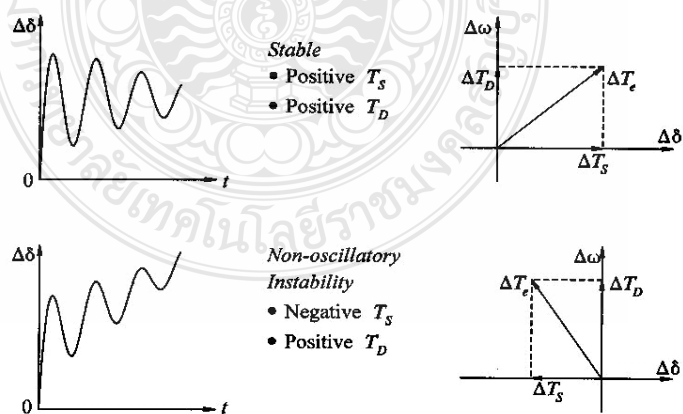
$T_S \Delta \sigma =$  กำลังบิดเชิงโครโมไนซ์เป็นค่ากำลังบิดในเฟสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์  $\Delta \delta$

โดยที่  $T_S$  เรียกว่าสัมประสิทธิ์กำลังบิดเชิงโครโมไนซ์

$T_D \Delta \omega =$  กำลังบิดการหน่วงเป็นค่ากำลังบิดในเฟสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว  $\Delta \omega$  โดยที่

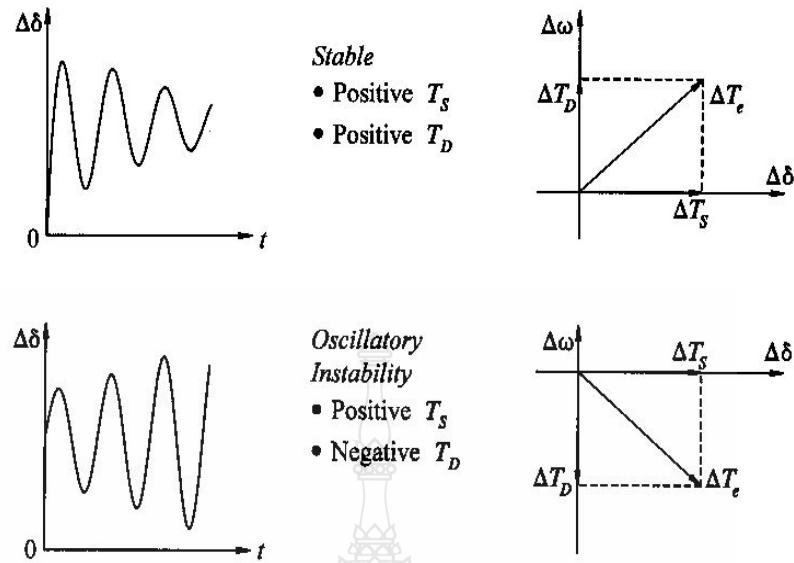
$T_D$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์กำลังบิดการหน่วง (Damping torque coefficient)

ถ้าระบบขาดกำลังบิดเชิงโครโมไนซ์หรือมีค่า  $T_S$  เป็นลบจะทำให้มุมโรเตอร์มีอัตราเร่งเพิ่มขึ้นจนสูญเสียสภาพเชิงโครโมไนซ์ และถูกปลดออกจากระบบในที่สุดทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ส่วนการขาดกำลังบิดการหน่วงหรือมีค่า  $T_D$  ก็จะเป็นผลทำให้เมื่อเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าขึ้นจะไม่สามารถลดขนาดการแกว่งที่เกิดขึ้นได้จนทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพในที่สุดในระบบไฟฟ้าโดยปกติลักษณะของการรบกวนขนาดเล็กจะขึ้นอยู่กับค่าการทำงานเริ่มต้น, ความยาวสายส่ง ชนิดของระบบกระตุ้น (Excitation) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกันอยู่นั้น ถ้าระบบไม่มีตัวปรับเปลี่ยนแรงดัน (Votageregulator) หรือมีค่าแรงดันสนามคงที่ (Constant field voltage) การสูญเสียเสถียรภาพของระบบเป็นผลเนื่องมาจากการขาดกำลังบิดเชิงโครโมไนซ์ไม่ได้เกิดจากการแกว่งเนื่องจากขาดกำลังบิดการหน่วง ซึ่งจะเรียกการสูญเสียเสถียรภาพในลักษณะนี้ว่า Non-Oscillatory Instability ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 แต่ถ้ามีการควบคุมการกระตุ้น (Excitation control) ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพของระบบจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากการขาดกำลังบิดการหน่วงในระบบทำให้เกิดการแกว่งที่มีการเพิ่มขนาดขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเรียกการสูญเสียเสถียรภาพในลักษณะนี้ว่า Oscillatory Instability แสดงดังรูปที่ 2.3



(a) With constant field voltage

รูปที่ 2.2 ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีค่าแรงดันสนามไฟฟ้าคงที่



(b) With excitation control

### รูปที่ 2.3 ลักษณะการแกว่งของระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมการกระตุ้น

ในระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันปัญหาเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กนี้เป็นปัญหาที่ส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องจากการขาดการหน่วงของการแกว่งในระบบนั่นเองหรือเรียกได้ว่าระบบเกิดการแกว่งนั่นเอง ซึ่งเสถียรภาพของการแกว่งนี้สามารถแบ่งตามความถี่ได้เป็น 4 ลักษณะด้วยกัน

1. โหมดพื้นที่เดียวกัน (Local mode) เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกันตอบสนองโต้ตอบกันกับระบบที่เหลือซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าความถี่ที่เกิดอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 2.0 Hz

2. โหมดระหว่างพื้นที่ (Inter-Area mode) เป็นการแกว่งจากการโต้ตอบของกลุ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลุ่มหนึ่งกับกลุ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลุ่มอื่นๆ ในระบบ การแกว่งแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโหมดพื้นที่เดียวกัน ความถี่จะอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 Hz

3. โหมดควบคุม (Control mode) เกิดจากการปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมในระบบที่ไม่เหมาะสมเช่น ตัวควบคุมความเร็ว (Speed Governor) หรือ ตัวชดเชยวาล์วลัด (SVC) เป็นต้น

4. โหมดเชิงความบิด (Tensional mode) เป็นการแกว่งที่เกิดขึ้นที่แกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกังหัน ความถี่จะอยู่ในช่วงความถี่ช่วงชิงโครนัส



### 2.1.2. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability)

เสถียรภาพแรงดันบางครั้งเรียกว่า เสถียรภาพโวลต์ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจาก เกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่างโวลต์กับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ ความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่บัลลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจาก การสูญเสียที่โวลต์หรือการสูญเสียในสายส่ง เสถียรภาพแรงดันแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

- เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนกับระบบอย่างรุนแรง (Large Disturbance Voltage Stability) คือระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความสามารถในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้า เมื่อเกิดการรบกวนกับระบบอย่างรุนแรง เช่นการเกิดความผิดปกติในระบบ (Faults) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบตัวใดตัวหนึ่งเสียหาย

- เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนเพียงเล็กน้อย (Small Disturbance Voltage Stability) คือระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความสามารถในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการรบกวนหรือมีความผิดปกติในระบบเพียงเล็กน้อย เช่น การเปลี่ยนแปลงของโวลต์ในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

### 2.1.3. เสถียรภาพระยะยาวและระยะปานกลาง

การศึกษาที่เกี่ยวกับเสถียรภาพระยะยาวและระยะปานกลางเป็นเรื่องใหม่พอสมควร โดยปกติแล้วรูปแบบการจำลองในเรื่องนี้จะไม่อยู่ในการศึกษาเสถียรภาพแบบสถานะชั่วคราว การศึกษาเรื่องนี้เพื่อที่จะแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบอย่างรุนแรง เช่นการขาดหายไปแรงดันและความถี่

สำหรับเสถียรภาพระยะยาวนั้นจะสนใจในเรื่องหรือปรากฏการณ์ที่ทำให้ระบบเสียหายตลอดจนการทำให้อายุขัยของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ปรากฏการณ์จะเกี่ยวข้องกับไดนามิกของหม้อน้ำในเครื่องกำเนิดพลังความร้อน ทางเดินของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ตัวควบคุมเครื่องกำเนิด ตัวควบคุม โรงไฟฟ้าและสายส่งต่างๆการอิมพัลส์ของหม้อแปลงและผลของความถี่ต่อโวลต์และสายส่ง เป็นต้น

เสถียรภาพระยะปานกลางนั้นจะอยู่ในช่วงการส่งผ่านสถานะชั่วคราวไปสู่เสถียรภาพระยะยาวการศึกษาระยะปานกลางนี้จะสนใจในการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตลอดจนผลกระทบจากอุปกรณ์หรือปรากฏการณ์ต่างๆที่อยู่ในช่วงปานกลางนี้ โดยช่วงเวลาการศึกษานี้ ถ้าเป็นสถานะชั่วคราวหรือระยะสั้นจะอยู่ในช่วงระยะเวลา 0-10 วินาที ระยะปานกลางช่วงเวลา 10 วินาทีและระยะยาวช่วงเวลา 1-10 นาที โดยทั่วไปปัญหาที่เกิดขึ้นของเสถียรภาพระยะปานกลาง และ

ระยะยาวนี้จะเกิดการควบคุมอุปกรณ์ที่ไม่ดี มีการตอบสนองที่ไม่เหมาะสม ตลอดจนมาจากการสำรองกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไม่เพียงพอ

#### 2.1.4 เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Stability)

เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กนั้นจะเป็นความสามารถของระบบจะคงอยู่ได้ เมื่อระบบเจอสัญญาณขนาดเล็กในบางครั้งเสถียรภาพแบบนี้จะเรียกว่า “เสถียรภาพสภาวะคงตัว (Steady – state stability) เพราะว่าเสถียรภาพชนิดนี้จะพิจารณาในช่วงที่ระบบทำงานในสภาวะผิดปกติ แต่เนื่องจากมีการรบกวนด้วยระบบด้วยสัญญาณขนาดเล็กต่างดังนั้นการวิเคราะห์อาจใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นได้ การขาดเสถียรภาพเกิดขึ้นเนื่องจาก 2 สาเหตุ ดังต่อไปนี้

- การเพิ่มขึ้นเรื่อยๆของมุมโพลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีแรงบิดเพียงพอ
- การแกว่งของโรเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงบิดหน่วงน้อยเกินไป

#### 1) สมการการแกว่ง (Swing Equation)

โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุนเร็วขึ้นหรือช้าจะมีผลกระทบต่อ (Synchronously Rotating Air Gap MMF) ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร่งและมีการเคลื่อนที่แบบพลวัต (Dynamic mutation) ที่เกิดขึ้นเรียกสมการการเคลื่อนที่แบบนี้ว่า สมการการแกว่งในระบบกำลังไฟฟ้า (Swing Equation) และที่สภาวะคงตัว (Study State Condition) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโคจร โดยที่ไม่คิดค่าสูญเสียภายในเครื่องกำเนิดจะพบว่าระบบฟ้าจะสมดุลเมื่อแรงบิด (Torque) ทางกลจะเท่ากับทางกำลังไฟฟ้างดสมการ

$$T_e = T_m \quad (2.2)$$

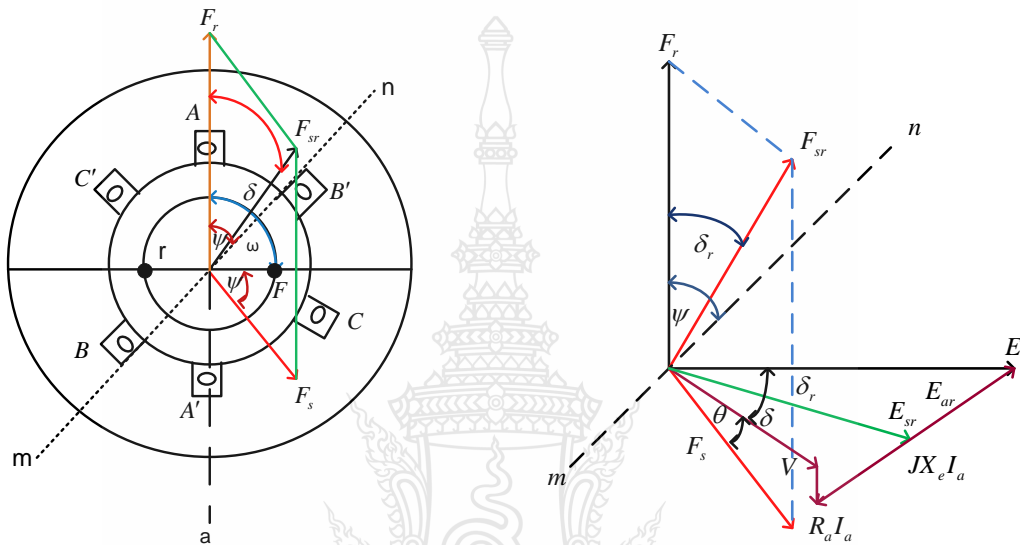
เมื่อมีการรบกวนในระบบจะพิจารณาแล้วพบว่า  $T_e \neq T_m$  ขึ้นอยู่กับลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้นและมีแรงบิดที่อัตราเร่ง (Accelerating Torque,  $T_a$ ) เกิดขึ้นที่บนโรเตอร์ แบ่งเป็น Accelerating ( $T_e < T_m$ ) และ Decelerating ( $T_e > T_m$ ) ดังสมการที่ 2.3

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

และยังจัดอยู่ในรูปของสมการความเฉื่อย (Moment of Inertia) ดังในสมการ ที่ 2.4

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} T_a = T_m - T_e \quad (2.4)$$

เมื่อ  $J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ Prime Mover และ Generator และ  $\theta_m$  มุมแกนเคลื่อนที่ของโรเตอร์โดยอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์



รูปที่ 2.4 เวกเตอร์ของแกนโรเตอร์ภายใต้สภาวะปกติมุมทางไฟฟ้าจะคงที่

เมื่อความเร็วของสเตเตอร์มีความสัมพันธ์กับโรเตอร์การวัดมุมของโรเตอร์จะเทียบกับแกนอ้างอิงโดยที่ความเร็วเชิงโคโรนัสเขียนความเร็วดังสมการที่ 2.5

$$\theta_m = \omega_{sm} + \delta_m \quad (2.5)$$

เมื่อ

$\theta_m$  คือ ความเร็วเชิงโคโรนัสของเครื่องจักรกลมีหน่วยเป็น (rad/s)

$\delta_m$  คือ มุมของการเคลื่อนที่ (Angular Displacement) ของโรเตอร์เทียบกับแกนอ้างอิงก่อนเกิดการรบกวนที่เวลา ( $t = 0$ ) และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ดังสมการที่ (2.6)

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{mst} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.6)$$

โดยอัตราเร่งของโรเตอร์หาได้ดังสมการ (2.7)

$$J\omega_m = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.7)$$

ถ้าค่า  $M$  ไม่คงที่ความเร็วของโรเตอร์  $\omega_m$  เบี่ยงออกจากความ  $\omega_{sm}$  แต่ในทางปฏิบัติค่าของ  $\omega_m$  จะไม่ต่างจาก  $\omega_{sm}$  มากนักเมื่อเครื่องทำงานที่สภาวะคงที่ ก่อนจะสูญเสียเสถียรภาพซึ่งสามารถสมมติให้  $\omega_m = \omega_{sm}$  จะได้ดังสมการที่ (2.8)

$$M = \frac{2W_k}{\omega_n} \quad (2.8)$$

และยังสามารถเขียนสมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในค่าเทมของค่ามุมกำลังไฟฟ้า (Electrical Power Angle,  $\delta$ ) โดยที่  $\sigma = \frac{\rho}{2}\delta_m$  และ  $\omega = \frac{\rho}{2}\omega_m$  เมื่อ  $\rho$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเขียนได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\frac{\rho}{2}M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

สามารถเขียนสมการการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในรูป  $P.U$  ได้เป็นสมการที่ (2.10)

$$\frac{\rho}{2} \frac{2wk}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $S_B$  คือ ค่าฐานกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติจะบ่งบอกเป็นค่าคงที่  $H$  นิยามว่า

$$H = \frac{\text{Kinetic Energy in MJ at Rated Speed}}{\text{Machine Rating in MVA}} = \frac{W_k}{W_B}$$

แทนค่า  $\omega_{sm} = \frac{\rho}{2}\omega_m$

$$\frac{\rho}{2} \frac{2H}{\omega_{sm} s_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(P.U) - P_e(P.U) \quad (2.11)$$

$$\frac{2H}{\pi f_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(P.U) - P_e(P.U) \quad (2.12)$$

และวิเคราะห์มุม  $\delta$  ในรูปแบบขององศาทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\frac{H}{180 f_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

จากกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดแปลงสภาพมาได้จากกำลังทางกล จึงเขียนสมการการแกว่งนี้ได้เป็น

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{\max} \sin \delta \quad (2.14)$$

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 (\delta_o + \Delta \delta)}{dt^2} = P_m - P_{\max} \sin (\delta_o + \Delta \delta) \quad (2.15)$$

สำหรับค่าเริ่มต้นก่อนมีการบกวนคือ

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_m - P_{\max} \sin \delta_o \quad (2.16)$$

ดังนั้นสมการข้างบนเฉพาะส่วนของมุม โทลด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็น

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_{\max} \cos(\delta_o) \Delta \delta \quad (2.17)$$

$$\frac{H}{\pi f_o} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_s \Delta \delta = 0 \quad (2.18)$$

สมการที่ (2.17) และ (2.18) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งคำตอบของสมการนี้ขึ้นอยู่กับรากของสมการเอกลักษณะ (Characteristic equation) เขียนสมการได้เป็น

$$S^2 = -\frac{\pi f_o}{H} P_s \quad (2.19)$$

หาก  $P_s$  มีค่าเป็นลบ รากของสมการที่อยู่ด้านขวาของ  $S$ -plane ผลตอบสนองของระบบนี้จะเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกโพเนนเชียลและระบบอาจขาดเสถียรภาพ แต่ถ้าหาก  $P_s$  มีค่าเป็นบวก ได้รากที่สองของสมการสองตัวอยู่บนแกน  $j-\omega$  จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพอยู่ขอบ โดยระบบจะตอบสนองเป็นแบบแกว่งไปมาโดยไม่มีการหน่วงต่ออย่างใด ระบบจะสั้นที่ความถี่โดยธรรมชาติ ที่

$$P_d = D \frac{d\delta}{dt} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $D$  เป็นสมประสิทธิ์การหน่วง ซึ่งอาจหาค่าได้ซึ่งอาจหาค่าได้จากการออกแบบเครื่องกลหรือการทดสอบ ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์กำลังเชิงโครโนมีค่าเป็นบวกผลของกำลังการหน่วงนี้จะส่งผลให้การแกว่งของระบบหายไปในที่สุด ซึ่งระบบจะเข้าสู่สภาวะปกติและทำงานอยู่ที่จุดมุมโหลดหยุดนิ่ง ลักษณะเช่นนี้จะถือว่าระบบเสถียรภาพถ้าหากมีการหน่วงเข้ามาสมการเขียนได้เป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_o}{H} D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{\pi f_o}{H} P_s \Delta\delta \quad (2.30)$$

หรือในแบบมาตรฐานสมการอนุพันธ์อันดับสองเป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_n^2 P_s \Delta\delta = 0 \quad (2.31)$$

เมื่อ  $\omega_n$  เป็นความถี่ธรรมชาติของการสั้น และ  $\zeta$  เป็นอัตราส่วนของการหน่วงเขียนได้เป็น

$$\zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_o}{HP_2}} \quad (2.32)$$

จากสมการสมการเอกลักษณะ

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (2.33)$$

สภาวะรอบทำงานปกติงานปกติค่า  $\zeta < 1$  และรากที่สองของสมการจำนวนเชิงซ้อน

$$\begin{aligned} S_1, S_2 &= -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \\ &= -\zeta\omega_n \pm j\omega_d \end{aligned} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $\omega_d$  เป็นค่าความถี่ของการสั่นที่ถูกหน่วงไว้เขียนได้เป็น

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.35)$$

สำหรับระบบที่มีค่าการหน่วงเป็นบวก ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์กำลังซิงก์โครไนต์  $P_s$  มีค่าเป็นบวกแล้ว ค่ารากของสมการเอกลักษณะจะมีจำนวนค่าจริงเป็นลบ ซึ่งถือว่าระบบเสถียรภาพจากสมการที่ (2.31) เขียนอยู่ในรูปตัวแปรสถานะ (State variable) จะทำให้สะดวกขึ้นเมื่อการวิเคราะห์จำนวนมาก

จัดสมการอยู่ในสมการเมทริกซ์

$$\begin{aligned} x_1 &= \Delta\delta \quad \text{และ} \quad x_2 = \Delta\dot{\delta} = \Delta^{\square}\dot{\delta} \\ x_1^{\square} &= x_2 \quad \text{และ} \quad x_2^{\square} = -\omega_n^2 x_1 - 2\zeta\omega_n x_2 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} x_1^{\square} \\ x_2^{\square} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

หรือ

$$x^{\square}(t) = Ax(t) \quad (2.36)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

สมการที่ (2.36) และ (2.37) นี้คือ เป็นสมการตัวแปรสถานะธรรมชาติ (Unforced state variable) หรือสมการสถานะ โฮ-โม-จีนีเยส เป็นตัวแปรที่เป็นการตอบสนองที่ต้องการเวกเตอร์เขียนได้เป็น

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

หรือ

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.38)$$

เมื่อแปลงลาปลาซของสมการที่ (2.35) จะได้สมการที่ (2.39)

$$sX(s) - x(0) = AX(s) \quad (2.39)$$

$$X_s = \frac{\begin{bmatrix} s + 2\zeta\omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.40)$$

เมื่อ โรเตอร์ถูกรบกวนแบบทันทีทันใดด้วยมุมเล็กน้อย  $\Delta\delta_0$ ,  $x_1(0)$  และ  $x_2(0) = \Delta\omega_0 = 0$

$$\Delta\delta(s) = \frac{(s + 2\zeta\omega_n)\Delta\delta_0}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.41)$$

และ

$$\Delta\omega(s) = -\frac{\omega_n^2\Delta\delta_0}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.42)$$

ทำการแปลงลาปลาซ คำตอบของการตอบสนองขณะไม่มีอินพุต (Zero-input response) จะได้



$$\Delta\delta(s) = -\frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n t + \theta) \quad (2.43)$$

$$\Delta\omega(s) = -\frac{\omega_n \Delta\delta_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t \omega_d t} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $\omega_d$  เป็นความถี่ของการสั่นที่ถูกหน่วงไว้  $\theta$  หาได้จาก

$$\theta = \cos^{-1} \zeta \quad (2.45)$$

การเคลื่อนที่ของ โรเตอร์ที่หมุนไปกับความถี่เชิงโคโรน่าสเป็น

$$\delta = \delta_o + \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1+\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} (\sin \omega_d t + \theta) \quad (2.46)$$

ความเร็วเชิงมุมของ โรเตอร์มีค่าเป็น

$$\omega = \omega_o - \frac{\omega_n \Delta\delta_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.47)$$

ค่าคงตัวในการตอบสนองนี้มีค่าเป็น

$$\tau = \frac{1}{\zeta\omega_n} = \frac{2H}{\pi f_o D} \quad (2.48)$$

สำหรับระยะเวลาที่ระบบจะเข้าที่ หรือนิ่งนั้นจะใช้เวลาประมาณสี่เท่าของค่าคงตัว ดังนั้นเวลาการตอบสนองเป็น

$$t_s = 4\tau \quad (2.49)$$

ถ้าค่าคงตัวความเฉื่อย  $H$  มีค่าเพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงจะมีค่าลดลง จะทำให้เวลาที่ใช้สำหรับใช้ระบบนิ่งหรือสภาวะคงตัวนั้นมีค่ามากขึ้นการรบกวนของกำลังไฟฟ้า  $\Delta P$  เข้ามา

ในระบบแล้วกำลังนั้นยังคงอยู่สมการการแกว่งจะเขียนได้เป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_o}{H} D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{\pi f_o}{H} P_s \Delta\delta = \frac{\pi f_o}{H} \Delta P \quad (2.50)$$

หรือในแบบมาตรฐานสมการอนุพันธ์อันดับสองเป็น

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta\delta = \Delta u \quad (2.51)$$

เมื่อ

$$\Delta u = \frac{\pi f_o}{H} \Delta P \quad (2.52)$$

เขียนในสมการรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

หรือ

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.54)$$

สมการที่ (2.54) เป็นสมการตัวแปรสถานะที่ถูกกระตุ้น หรือเรียกว่าสมการ *Zero state* เป็นผลตอบสนองที่เกิดที่  $x_1$  และ  $x_2$  เป็นตัวที่ต้องการ แปลงลาปลาซในที่ (2.54) จะได้

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (2.55)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1} BU(s) \quad (2.56)$$

ทำการแปลงลาปลาซผกผันจะได้ผลตอบสนองแบบขั้น (Step response) เป็น

$$\Delta\delta = \frac{Au}{\omega_n^2} \left[ 1 - \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \right] \quad (2.57)$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta u}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.58)$$

นำสมการที่ (2.37) มาแทนค่าในสมการที่ (2.57) และ (2.58) พร้อมกันนำค่าเริ่มต้นเข้าไปด้วยจะได้ว่า

$$\delta = \delta_o + \Delta\delta = \frac{\pi f_o}{H\omega_n^2} \left[ 1 - \frac{\Delta\delta_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \theta) \right] \quad (2.59)$$

ความเร็วเชิงมุมมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาทีเป็น

$$\omega = \omega_o + \Delta\omega = \frac{\pi f_o \Delta P}{H\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.60)$$

## 2) เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability)

การศึกษาเสถียรภาพชั่วคราวเป็นไปอย่างกว้างขวาง เพื่อจะศึกษาว่าเครื่องกำเนิดจะอยู่ในระบบได้หรือไม่เมื่อต้องเจอการรบกวนที่รุนแรงและทันทีทันใด เช่น การลัดวงจร การหยุดออกของเครื่องกำเนิดโดยระบบ การต่อเข้ากับโหลดขนาดใหญ่หรือการสูญเสียโหลดขนาดใหญ่ เป็นต้น การวิเคราะห์ลักษณะนี้จะไม่ใช่สมการแบบเชิงเส้น จะต้องใช้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น วิธีการที่ได้รับความนิยมคือ วิธีเงื่อนไขพื้นที่เท่ากัน (Equal-area criterion) วิธีการนี้สามารถพยากรณ์ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในเสถียรภาพหรือไม่ การศึกษาจะใช้พื้นที่เก็บสะสมพลังงานที่เกิดจากการหมุน กับพลังงานที่สามารถเข้ามารบกวนว่ามีขนาดเท่ากันหรือไม่วิธีนี้จะศึกษาเครื่องกำเนิดตัวหนึ่งเท่านั้น

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi f_o}{H} \int_{\delta_o}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.60)$$

จากสมการที่ (2.60) เป็นความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเครื่องกลเทียบกับความเร็วเชิงโคโรนัส สำหรับระบบที่มีเสถียรภาพแล้วความเร็วรอบตัวนี้จะมีค่าพลังงานเป็นศูนย์หลังจากที่เจอการรบกวนแล้ว ถ้าการมีเสถียรภาพของเครื่องกลจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.61)$$

ถ้าพิจารณาที่จุดทำงานปกติหนึ่ง หรือหนึ่งของการทำงาน  $\delta_0$  ณ จุดนี้กำลังทางกล  $P_{m0} = P_{e0}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ถ้าพิจารณาในรูปนี้ซึ่งกำลังทางกลด้านเข้าเป็น  $P_{m1}$  เนื่องจาก  $P_{m0} > P_{e0}$  กำลังการเร่งขึ้นที่โรเตอร์จะมีค่าเป็นบวก และมุมโหลดจะมีค่าสูงขึ้น พลังงานที่สะสมในโรเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นการเร่งนี้เป็น

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = \text{area } abc = \text{area } A1 \quad (2.62)$$

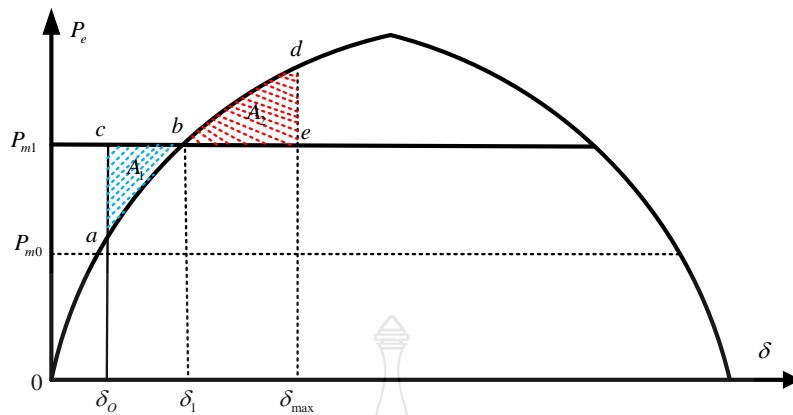
การที่มุมโหลดเพิ่มขึ้นทำให้กำลังทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อ  $\delta = \delta_1$  ทางกำลังไฟฟ้า  $P_e$  จะเท่ากับกำลังด้านทางกลด้านเข้า  $P_{m1}$  ถึงแม้ว่ากำลังการเร่งจะมีค่าเป็นศูนย์ ณ จุดนี้ แต่โรเตอร์จะมีความเร็วมากกว่าความเร็วเชิงโคโรนัส เนื่องจากมุมโหลดยังสูงขึ้นไป กำลังฟ้าจะสูงขึ้นไปอีกเช่นเดียวกัน ณ ที่ขณะ  $P_m < P_e$  จะทำให้โรเตอร์มีการเร่งลดลงซึ่งความเร็วจะลดลงจนกระทั่ง  $\delta = \delta_{\max}$  ลักษณะนี้โรเตอร์จะต้องแกว่งผ่านจุด b จนกระทั่งพื้นที่เท่ากับพลังงานที่ให้กับโรเตอร์นั่นเอง สำหรับพลังงานที่ให้โดยโรเตอร์นี้หาได้จาก

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area } bde = \text{area } A2 \quad (2.63)$$

การแกว่งของโรเตอร์ผ่านจุด b จนถึงจุด  $\delta_{\max}$  จะทำให้

$$|\text{area } A1| = |\text{area } A2| \quad (2.64)$$

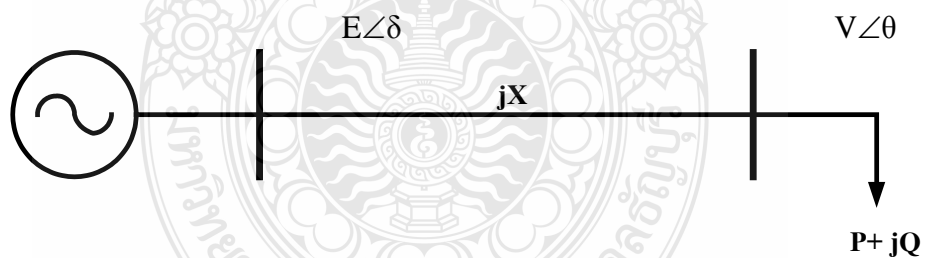
สมการนี้เรียกว่า “เงื่อนไขการเท่ากัน” มุมของโรเตอร์จะแกว่งไปมาระหว่าง  $\delta_0$  และ  $\delta_{\max}$  ความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์เอง การแกว่งนี้จะมีการหน่วงและเข้าสู่สภาวะคงตัวครั้งใหม่ที่จุด b



รูปที่ 2.5 เงื่อนไขพื้นที่ที่เท่ากัน เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

## 2.2. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 2.6 แสดงไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส ใช้ศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจคุณลักษณะของเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า โดยที่  $E \angle \delta$  คือ แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sending End Bus),  $V \angle \theta$  คือแรงดันที่จุดต่อของโหลด (Receiving End Bus),  $jX$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสาย และ  $P + jQ$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดคงที่เขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส

จากรูปที่ 2.6 เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้จากสมการที่ (2.65) และ (2.64) ตามลำดับ

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (2.65)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos\delta \quad (2.66)$$

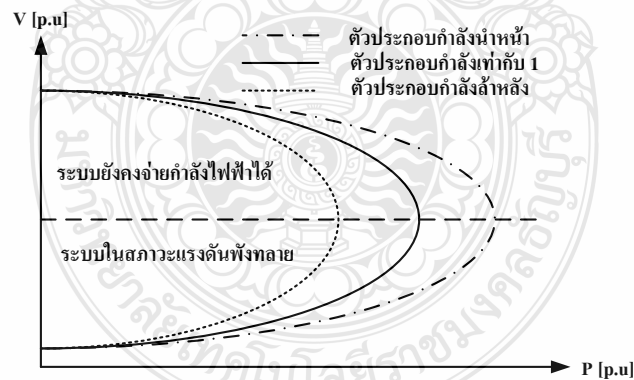
จากสมการที่ 2.65 และ 2.66 จะได้สมการกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส คือ

$$V^2 = \frac{PX}{E} + \left[ \frac{QX + V^2}{E} \right] \quad (2.67)$$

แรงดันที่โหลดจะมีค่าดังสมการ

$$V = \sqrt{\frac{E^2 - 2QX \pm \sqrt{(E^2 - 2QX)^2 - 4(P^2 + Q^2)X^2}}{2}} \quad (2.68)$$

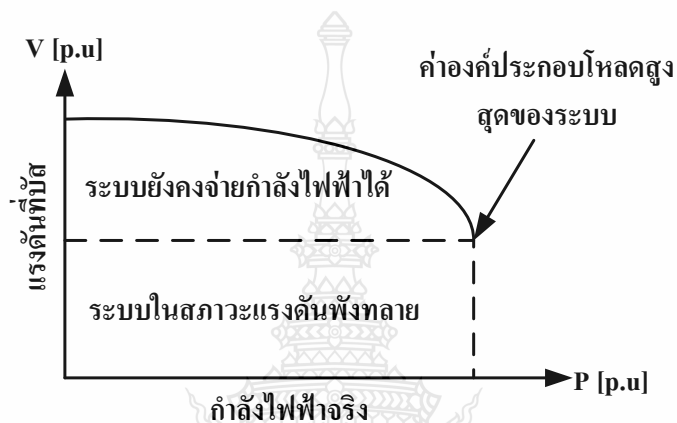
จากสมการที่ 2.65 ถ้ากำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดคงที่ และ ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเปลี่ยนแปลงไป (P) เราจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังล้าหลังค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบจะลดลง เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้าค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับกำลังไฟฟ้าจริงที่ค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนแปลง

## 2.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

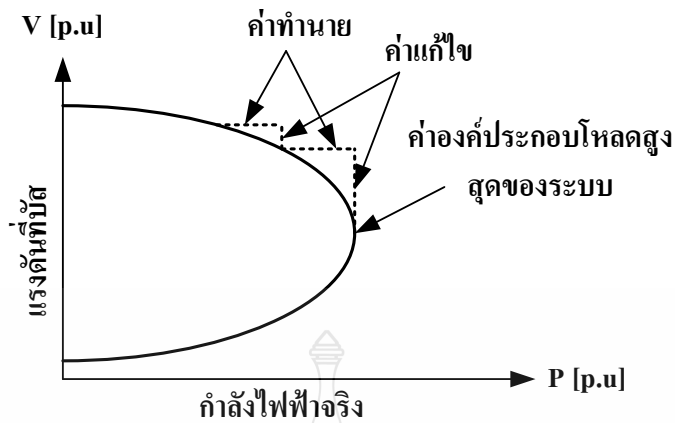
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดความสามารถของระบบในการจ่ายโหลด ที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าอยู่ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P) และแรงดันที่บัส (V) ที่สนใจศึกษา



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

จากรูปที่ 2.8 เป็นลักษณะของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า เพื่อหาขีดจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสถานะแรงดันพังทลาย แรงดันที่บัสจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความต้องการโหลดเพิ่มมากขึ้น

วิธี Continuation Power Flow (CPF) คือ วิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ทั้งบนและล่างเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุด วิธีการของ CPF จะทำงานเข้าไปเป็นขั้นๆ คือการทำนายค่าและการหาค่าแก้ไข ดังรูปที่ 2.9 [8]



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการคำนวณ โดยวิธี CPF

พื้นฐานบนสมการของ CPF มีลักษณะคล้ายกับการวิเคราะห์โหนดโพล้วแต่จะมีการเพิ่มโหนดคือเพิ่มค่าพารามิเตอร์ ( $\lambda$ ) ต่อท้ายสมการโหนดโพล้ว สำหรับการเริ่มต้นของการเพิ่มโหนดสามารถเขียนสมการได้

$$\lambda K - f(\delta, V) = 0 \quad (2.69)$$

หรือ

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.69)$$

เมื่อ  $K$  คือ ลักษณะของโหนด และ  $\lambda$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของโหนดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าโหนดสูงสุด จากสมการที่ 2.69 เขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\frac{\partial f}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial f}{\partial V} dV + \frac{\partial f}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (2.70)$$

จากสมการที่ 2.70 มีตัวแปรอีกหนึ่งตัวตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ  $\lambda$  ซึ่งจะทำให้มีตัวแปรมากกว่าสมการ ดังนั้นเราต้องเพิ่มสมการอีกหนึ่งสมการคือ

$$e_k \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \pm 1 \quad (2.71)$$



เมื่อ  $e_k$  คือแถวของเวกเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าจะมีค่าเป็น 1 ค่าพารามิเตอร์ของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า ( $\lambda$ ) จะมีค่าเป็นบวกเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นและค่าแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในสภาวะตามการเพิ่มขึ้นของโหลด แต่จะมีค่าเป็นลบเมื่อค่าของแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจากจุดที่ระบบสามารถรับโหลดได้สูงสุด

ค่าทำนาย หาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{\text{predicted}} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ \dots \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ J_{LF} \vdots K \\ \vdots \\ \dots \dots \dots \\ [e_k] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

และ  $\sigma$  คือ ขนาดของขั้นการเปลี่ยนแปลงในการทำนายครั้งต่อไป ที่ค่าการเพิ่มขึ้นของโหลด  $dx_k = 1$  จะได้

$$x_k^{\text{predicted}} = x_{k0} + \sigma \quad (2.74)$$

วิธีการคำนวณหาค่าแก้ไข หาได้จากสมการ

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.75)$$

$$x_k - x_k^{\text{predicted}} = 0 \quad (2.76)$$

เมื่อ  $x_k$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของความต่อเนื่องที่เลือกใช้

## 2.2.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

ก. การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ การเกิดแรงดันพังทลายมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ป้องกันด้วย ซึ่งการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันควรจะพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว ความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และมีการตัดตอนส่วนที่มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุดออกไป

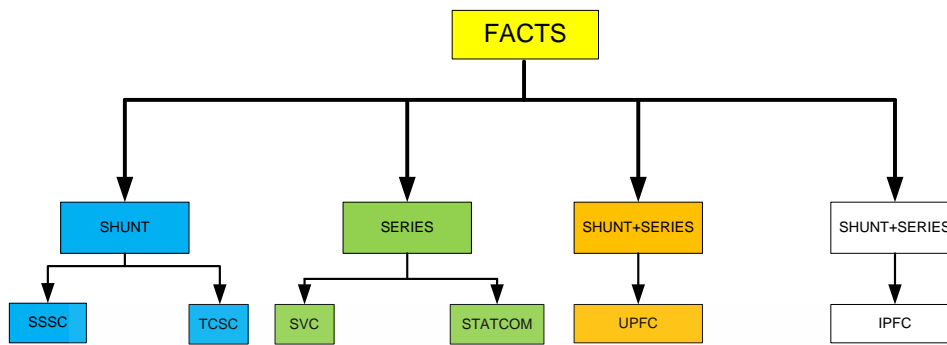
ข. กรณีการเกิดข้อผิดพลาดในระบบ ถ้าใช้เวลาในการตัดข้อผิดพลาดมากเกินไป จะทำให้แรงดันของระบบลดลง จนอาจทำให้เกิดสภาวะการพังทลายได้ ดังนั้นการออกแบบระบบ และการตั้งเวลาวิกฤติของระบบ จะต้องคำนึงถึงการเกิดสภาวะแรงดันพังทลายเอาไว้ด้วย

ค. ปริมาณและตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านมาสู่โหลดเนื่องจากความสูญเสียในสายส่งระหว่างการจ่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งต้องมีปริมาณที่พอเพียง และอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแรงดันพังทลาย

ง. ปัจจัยอันเนื่องมาจากปัญหาเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง เพราะปกติการเกิดสภาวะแรงดันพังทลายมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่อยู่ในสภาวะเครียด นั่นคือ ระบบมีความยืดหยุ่นต่ำอันเนื่องมาจากรายจ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรายได้ จากสภาวะทางสังคมและเหตุผลทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้บรรดาผู้ผลิตไฟฟ้าต่างๆ ต้องปิดโรงไฟฟ้าลง อันเนื่องมาจากความไม่คุ้มทุนและปัญหาทางสังคม ส่งผลให้แหล่งจ่ายพลังงานลดลงแต่โหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

## 2.3 อุปกรณ์ชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS)

อุปกรณ์ชดเชยในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีไว้เพื่อรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันซึ่งมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ชดเชยระบบไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น FACTS เป็นอุปกรณ์ควบคุมและชดเชยแรงดันการไหลในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีความราบเรียบและยืดหยุ่น มีการตอบสนองตอบสนองได้รวดเร็วกว่าอุปกรณ์การควบคุมแบบดั้งเดิมมาก FACTS มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น อุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม SSSC ,TCSC อุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน SVC . STATCOM และอุปกรณ์ชดเชยแบบ อนุกรม-ขนาน UPFC โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และแบบต่ออนุกรม-อนุกรม IPFC ควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งชนิดของ FACTS



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

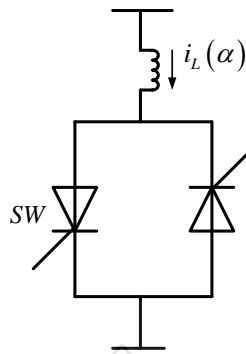
### 2.3.1 Static Var Compensator (SVC)

ตัวชดเชยระบบไฟฟ้ากำลัง ถูกใช้งานเป็นครั้งแรกปี 1979 โดยนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า SVC จะมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายและโหลดทางไฟฟ้าเพราะสามารถจ่ายและรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากระบบได้ และจะช่วยในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าในระบบเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะประกอบไปด้วย สวิตซ์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (Thyristor-Controlled-Reactor ,TCR) และ สวิตซ์ตัดต่อตัวเหนี่ยวนำ (Thyristor-Switched Capacitor ,TSC) ต่อขนานเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ



รูปที่ 2.11. ลักษณะของการติดตั้ง SVC

1. สวิตซ์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (Thyristor-Controlled-Reactor ,TCR) องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสของสวิตซ์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน(TCR) ดังแสดงรูปภาพที่ 2.12 โดยพิจารณาจากค่าความเหนี่ยวนำ (L) และใช้ไทลิสเตอร์สวิตซ์แบบสองทิศทาง

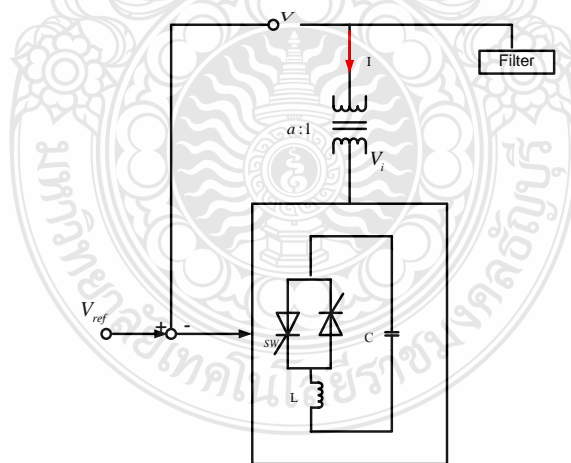


รูปที่ 2.12 สวิตช์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงาน (Thyristor-Controlled-Reactor, TCR)

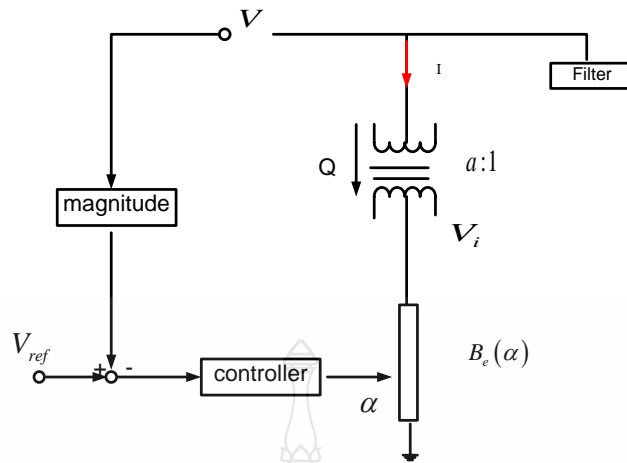
เมื่อกระแสในไฟฟ้าด้านกลับสามารถควบคุมค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดถึงศูนย์ โดยใช้วิธีการโดยการควบคุมมุมให้ช้าลง

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (2.77)$$

วงจรสมมูลและแบบจำลองการควบคุมเสถียรภาพของ SVC แสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ

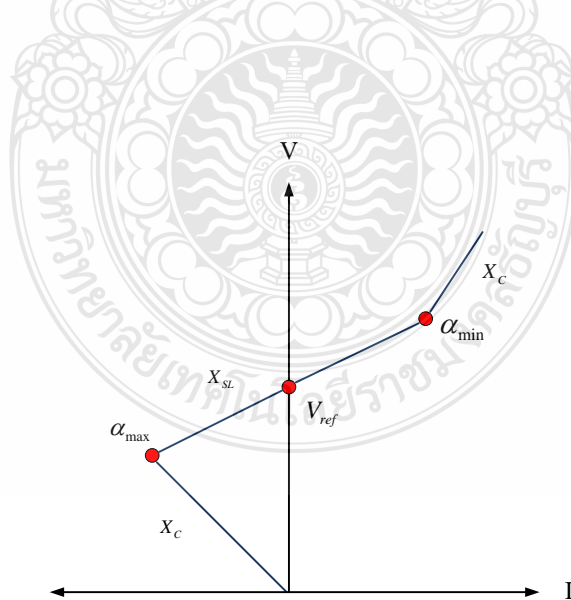


รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของ SVC



รูปที่ 2.14 วงจรแบบจำลองของ SVC

ความสำคัญของ SVC ในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ รักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่ หรือ ใกล้เคียง ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ของโหลด SVC สามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนาน ได้ดังรูปที่ 2.14 โดย SVC จะสามารถควบคุมแรงดันที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังได้ จากรูปที่ 2.13 SVC จะใช้การควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์การรับหรือจ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ มุมการจุดชนวนนี้จะอยู่ในช่วง  $90^\circ \sim 180^\circ$  คุณลักษณะเฉพาะของ SVC แสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.15 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC

จากรูปที่ 2.15 ระบบการทำงานของ SVC ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ส่วนขอบเขตของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ SVC จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่จุด  $\alpha_{\min}$  คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเหนี่ยวนำทำงานรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบตามพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ และที่จุด  $\alpha_{\max}$  คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเก็บประจุทำงานจ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตามขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ

ส่วนประกอบในการควบคุมของ SVC มีความสำคัญมากในแบบจำลองของ SVC ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์เป็นดังสมการที่ (2.78) และ (2.79)

$$\begin{bmatrix} X_C \\ \alpha \end{bmatrix} = f(X_C, \alpha, V, V_{ref}) \quad (2.78)$$

$$0 = \underbrace{\begin{bmatrix} B_e - \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L / X_C)}{\pi X_L} \\ I - V_i B_e \\ Q - V_i^2 B_e \end{bmatrix}}_{g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_e)} \quad (2.79)$$

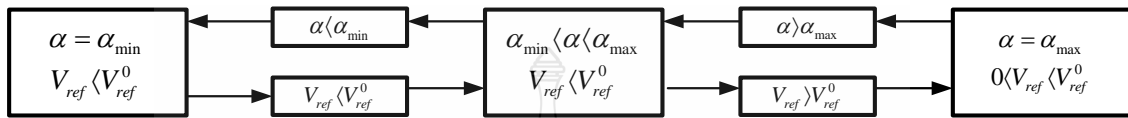
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าจะต้องกำหนดค่าให้ชัดเจนในภาพที่ 2.21 โดยที่  $X_c$  และ  $f(.)$  ยังคงอยู่ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ ซึ่งจะไม่มีการกำหนดขอบเขตของสมการยกเว้นมุมการจุดชนวน ( $\alpha$ ), โดยเฉพาะกระแส (I), การควบคุมแรงดัน (V) และ แรงดัน SVC ( $V_i$ ) เช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

จากสมการที่ (2.78)และ(2.79) สามารถเขียนสมการจำลองของ SVC ได้สมการใหม่คือ

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL} I \\ g(\alpha, V, V_i, I, Q_i, B_e) \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

ดังนั้นเราสามารถใส่โปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในการหาขอบเขตที่เหมาะสมของมุมจุดชนวนจากสมการที่ 2.80 เป็นแสดงบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช้สเซียแบนซ์ ( $B_e$ ) และมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ ( $\alpha$ ), กระแส (I) และ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ( $Q_i$ )

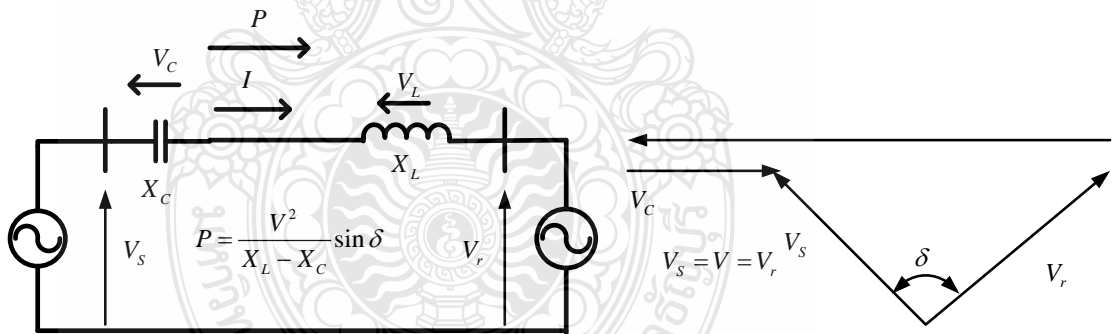
ขอบเขตของการควบคุม SVC คือ การควบคุมค่าของมุมจตุชนวนไทรสเตอร์ซึ่งอยู่ในช่วง  $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$  และ  $\alpha_M$  คือ มุมจตุชนวนน้อยที่สุดและมุมจตุชนวนมากที่สุดตามลำดับ ถ้าเราไม่รู้วิธีหาขอบเขตมุมจตุชนวน ให้กำหนดมุมจตุชนวนให้คงที่และเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  วิธีการของการจัดการควบคุมขอบเขตแสดงดังภาพที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัว

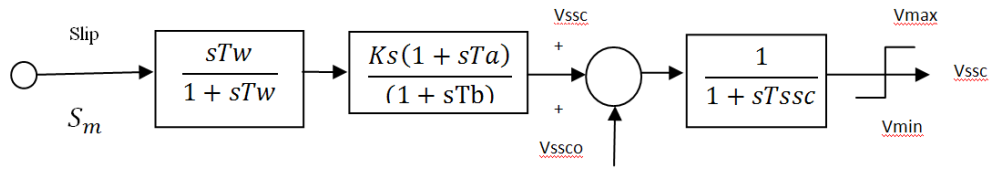
### 2.3.2. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

อุปกรณ์ SSSC เป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าโดยมีการเริ่มต้นในปี 1989 โดยการใช้พื้นฐานวงจรแปลงผันแบบเดียวกับสำหรับการต่อขนานและอนุกรม จะใช้ในการควบคุมมุมของสายส่ง การทำงานขั้นพื้นฐานของ SSSC สามารถอธิบายโดยการอ้างอิงการต่ออนุกรมของคาปาซิเตอร์



รูปที่ 2.17 พื้นฐานวงจรแปลงผันแบบเดียวกับสำหรับการต่ออนุกรมกับสายส่งและเฟสเซอร์ไดอะแกรม

SSSC เป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยแรงดันโดยขึ้นอยู่กับการทำงานของทรานซิสเตอร์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ (Voltage Source Inverter ,VSI) มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คาปาซิเตอร์



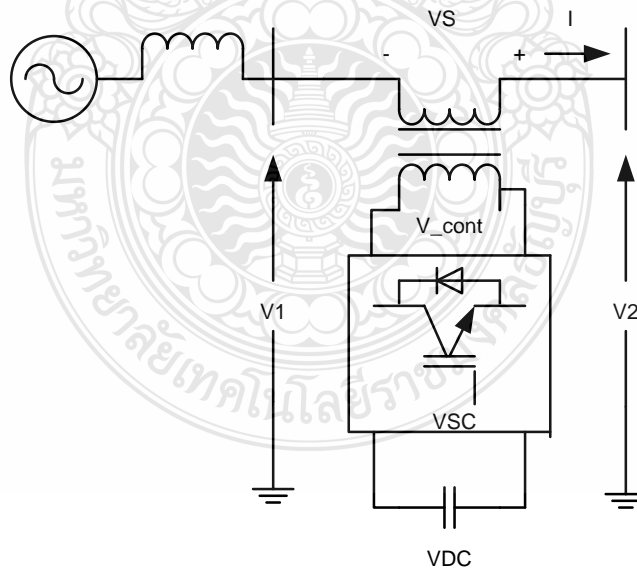
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุม SSSC

สมการควบคุม SSSC

$$V_{sssc_{ref}} = \frac{(S_m - x_1) K_2 T_a}{T_b + x_2 + V_{sssc0}} \quad (2.81)$$

$$V_q = R_e I_q - x_e I_d + h_1 E_b \cos \delta + h_2 E_b \sin \delta - V_{sssc} \cos \beta \quad (2.82)$$

$$V_d = x_e I_q - R_e I_d + h_2 E_b \cos \delta + h_1 E_b \sin \delta - V_{sssc} \cos \beta \quad (2.83)$$

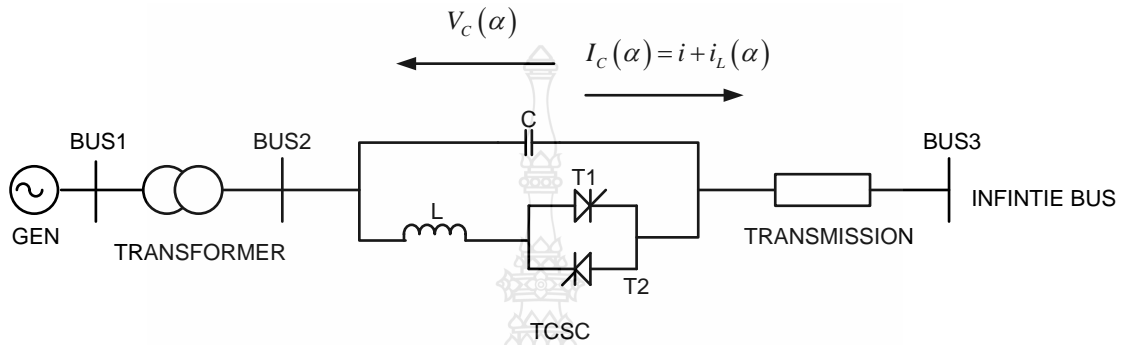


รูปที่ 2.19 วงจรแบบจำลองของ SSSC



### 2.3.3 Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)

พื้นฐานของอุปกรณ์ (Thyristor Controlled Series Capacitors , TCSC) เริ่มต้นใช้งานปี ค.ศ 1986 โดย Vithayathil เป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปสำหรับการปรับค่าของการเชื่อมต่อค่าความต้านทานดังแสดงในภาพที่ 2.20

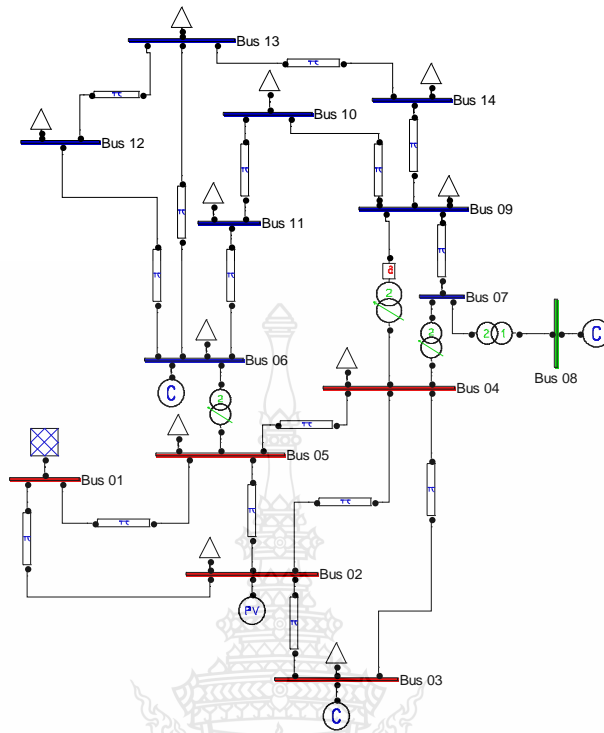


รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของ TCSC

ถ้าพิจารณาจากการต่ออนุกรมคาปาซิเตอร์ขนานกับการควบคุมด้วยไทลิสเตอร์ TCSC คืออุปกรณ์ที่ช่วยให้ FACTS การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของความต้านทานสายส่ง และเป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง การแกว่งระหว่างพื้นที่ และการปรับปรุงเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับบัสอนันต์ควบคุมด้วย TCSC , TCSC เป็นอุปกรณ์ของการต่อวงจรขนาน LC พิจารณาจากค่าความจุของ  $X_C$

### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิเคราะห์การแกว่งความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังของระบบ IEEE 14 บัส ดังรูปที่ 14 ซึ่งเกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องเกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกันตอบสนองโต้ตอบกันกับระบบที่เหลือซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ความถี่ที่เกิดอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 2.0 Hz เป็นโหมดพื้นที่เดียวกัน (Local mode) และ โหมดระหว่างพื้นที่ ความถี่ระหว่าง 0.1 – 1.0 Hz



รูปที่ 2.21 ระบบ IEEE 14 Bus

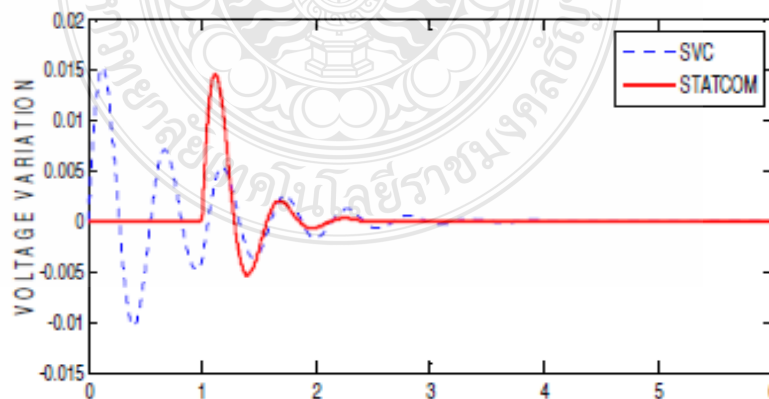
[6] บทความนี้นำเสนอภาพรวมที่สมบูรณ์ของปรากฏการณ์การสั้นความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้า ความหมายของการแกว่งความถี่ต่ำและการจำแนกของระบบจะถูกอธิบายอย่างชัดเจนระบบไฟฟ้าบางเหตุการณ์ที่หยุดชะงักเนื่องจากความถี่ต่ำและบทเรียนที่เรียนรู้จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านั้นจะได้รับ ในบทความนี้ วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการศึกษาความถี่ต่ำโดยทั่วไป วิธีการสำหรับการแก้การแกว่งในระบบ ทั้งที่การดำเนินงานและขั้นตอนการวางแผนของระบบไฟฟ้าที่จะกล่าวถึงในเวลาสั้น ๆ กรณีศึกษาที่ครอบคลุมของความถี่ต่ำในระบบที่ง่ายก็คือการนำเสนอโดยใช้การวิเคราะห์ eigenvalue ผลโดเมนเวลาจะถูกนำเสนอเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ eigenvalue

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบของแรงดันค่าคงที่ ความถี่ และ อัตราส่วนการแกว่ง

Case	Critical Eigenvalue	Frequency (Hz)	Damping Ratio
Base	-0.34310±7.3752	1.1738	0.0465
AVR	-0.19071±7.6685	1.2205	0.0249
AVR+PSS	-2.1570±6.54490	1.0417	0.3130
AVR+SSSC	-0.31507±6.8315	1.0873	0.0461
AVR+TCSC	-0.29064±6.9716	1.1096	0.0417
AVR+PSS+SSSC	-1.8910±6.04850	0.9626	0.2984
AVR+PSS+TCSC	-1.93660±6.1544	0.9795	0.3002

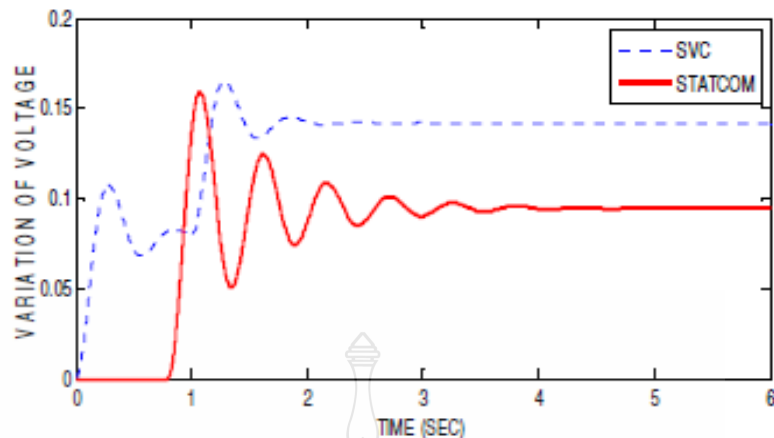
[7] ใช้การควบคุมโดย FACTS เป็นการเพิ่มความสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าการแกว่งระบบไฟฟ้า และการควบคุมแรงดันที่บัสเป็นตัวชดเชย โดยใช้วิธีการ SVC , STATCOM ในการควบคุมการแกว่ง ในระบบ IEEE 14 บัส ระบบมาตรฐาน IEEE 14 ได้รับการสร้างแบบจำลองและจำลองการใช้ Simulink ของ MATLAB ผลการจำลองของ IEEE 14 บัสโดยไม่ต้องควบคุมและรวมกับ SVC-PID และ SVCS TATCOM ได้รับการนำเสนอ สามารถเห็นได้ว่าการใช้ควบคุมการนำเสนอ (SVC - STATCOM) มีการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันและคุณภาพไฟฟ้าผลการจำลองเป็นสอดคล้องกับการ คาดการณ์ แม้ว่า SVC และ STATCOM ทำงานบนหลักการที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อ การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันสามารถเทียบเคียง ปัญหาดังกล่าวเป็นความสูญเสียค่า ต้องถูกตรวจสอบ สำหรับความถูกต้องที่เหมาะสม

### 1.กรณีแรงดันตก



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเครือข่าย

### 2.แรงดันเกิน



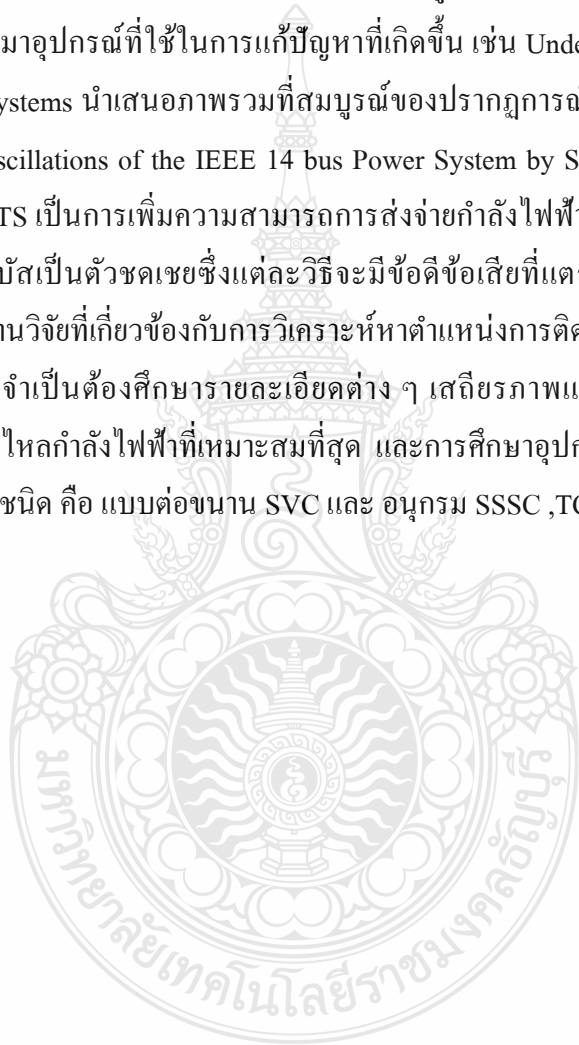
### รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเกิน

[8] การศึกษาบทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัสโดยใช้โปรแกรม (Matlab Power System Toolbox , PST) โดยการเกิดสามเฟสภาวะความผิดปกติในระบบที่แตกต่างในสถานที่ วิเคราะห์ผลกระทบในการเกิดภาวะความผิดปกติที่สำคัญที่เวลาเสถียรภาพในระบบ ซึ่งเสถียรภาพจะพิจารณาได้จากสมการการแกว่งที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้วิธีการดิเทอร์มินันท์แมททริกซ์ในการเชื่อมต่อ  $F_{\text{fault}}$  และ  $Y_{\text{postfault}}$  หลังจากเกิดภาวะความผิดปกติแล้ว โดยการเปรียบเทียบระหว่างของการเกิดภาวะความผิดปกติสองพื้นที่ โดยดูจากผลกระทบของการเกิดภาวะความผิดปกติของบัสเครื่องกำเนิดและเสถียรภาพ ดังนั้นขอแนะนำให้ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าต้องทำตรวจสอบที่เหมาะสมกับการออกแบบโดยคำนึงถึงการชั่วคราวเสถียรภาพในขณะที่มันเป็นด้านที่ยุงยากมากที่สุดในระบบไฟฟ้า

[9] การศึกษาบทความนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์การแกว่งของระบบไฟฟ้าโดยการประมวลผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งสองแบบซึ่งในแบบ Local Plant Mode โดยการทดสอบการเปิดและกลับเบรกเกอร์ที่สถานีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและที่บัสของเครื่องกำเนิดพบการแกว่งความถี่ต่ำประมาณ 1.68 Hz ใช้เวลาประมาณ 1.85 วินาที ซึ่งเกินค่ามาตรฐานที่การไฟฟ้ากำหนดและการจำลองรูปแบบการต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องระหว่างพื้นที่ Inter Area Mode สมมุติให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ที่ 1 เกิดการถ่ายเทกำลังไฟระหว่างพื้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ประมาณ 0.3 Hz ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าบ่งบอกถึงคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับสายจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะมีผลต่อการผลิตผู้ใช้ไฟฟ้า

## 2.5 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทั้งทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการศึกษาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำจะมีกระแสไหลในสายมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้ายิ่งมากและเป็นระบบที่สำคัญ เมื่อเกิดการแกว่งหรือเกิดสถานะผิดปกติขึ้นในระบบจะมีผลต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง เพราะระบบขาดความเสถียรภาพของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าน้อยลงหรืออาจจะเกิดไฟฟ้าดับได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาอุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น Understanding low frequency oscillation in power systems นำเสนอภาพรวมที่สมบูรณ์ของปรากฏการณ์การสั่นความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้า Damping of Oscillations of the IEEE 14 bus Power System by SVC with STATCOM” ใช้การควบคุมโดย FACTS เป็นการเพิ่มความสามารถการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าการแกว่งระบบไฟฟ้าและการควบคุมแรงดันที่บัสเป็นตัวชัดเจนซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง จึงจำเป็นต้องศึกษารายละเอียดต่าง ๆ เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้า ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด และการศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดยูน FACTS ทั้ง 2 ชนิด คือ แบบต่อขนาน SVC และ อนุกรม SSSC ,TCSC



## บทที่ 3

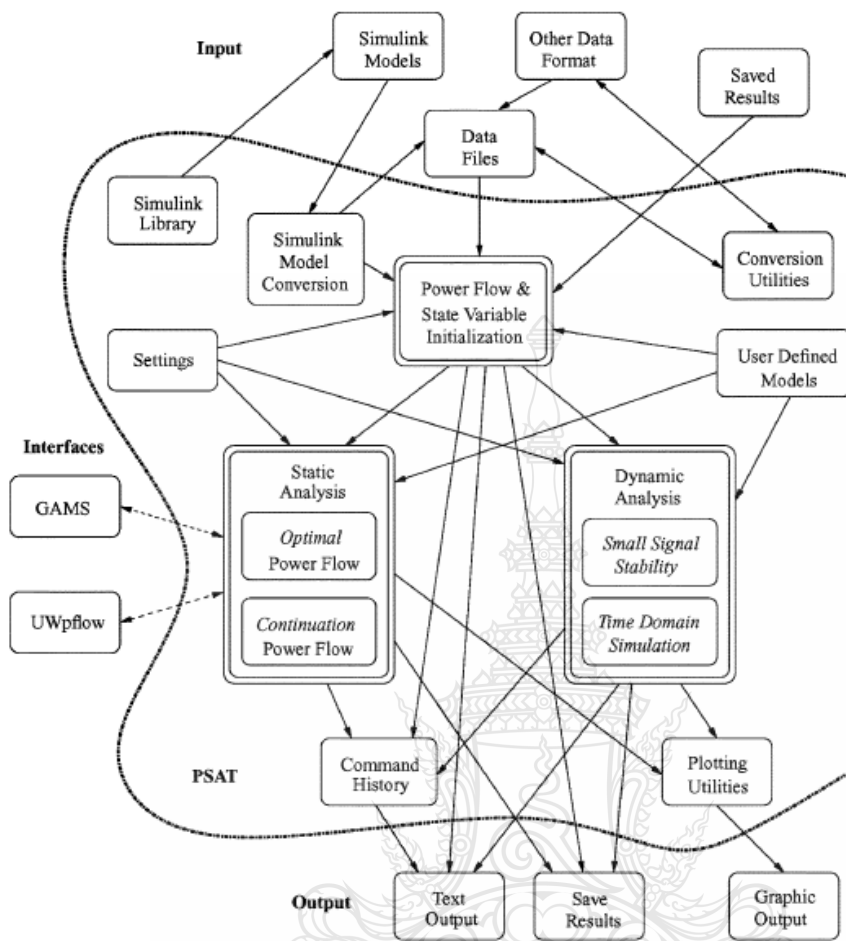
### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การแกว่งความถี่ต่ำด้วยอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่น FACTS โดยการใช้โปรแกรม PSAT ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB /Simulink ซึ่งโปรแกรมเครื่องมือที่จะเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ระบบในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบ 14 บัส ตามมาตรฐาน IEEE เป็นต้นแบบ [1] โดยการออกแบบจำลองบนระบบคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ายรวมทั้งการสภาวะชั่วคราวและในการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS จากนั้นใช้โปรแกรม PSAT ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในระบบที่ได้จากระบบ จากนั้นวิเคราะห์ค่าของระบบเพื่อที่จะติดตั้งอุปกรณ์ FACTS เข้าไปในระบบ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าจริงแล้ววิเคราะห์ค่าเสถียรภาพของระบบโดยใช้อุปกรณ์ยืดหยุ่น FACTS 3 ชนิดคือ ต่อแบบขนาน SVC และอนุกรม SSSC กับ TCSC

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการโดยใช้โปรแกรม PSATร่วมกับ MATLAB /Simulink

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้โปรแกรม PSAT ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB /Simulink การวิเคราะห์ระบบในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบ 14 บัส ตามมาตรฐาน IEEE เพื่อที่จะติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่น FACTS เมื่อเกิดสภาวะชั่วคราวขึ้นในระบบ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

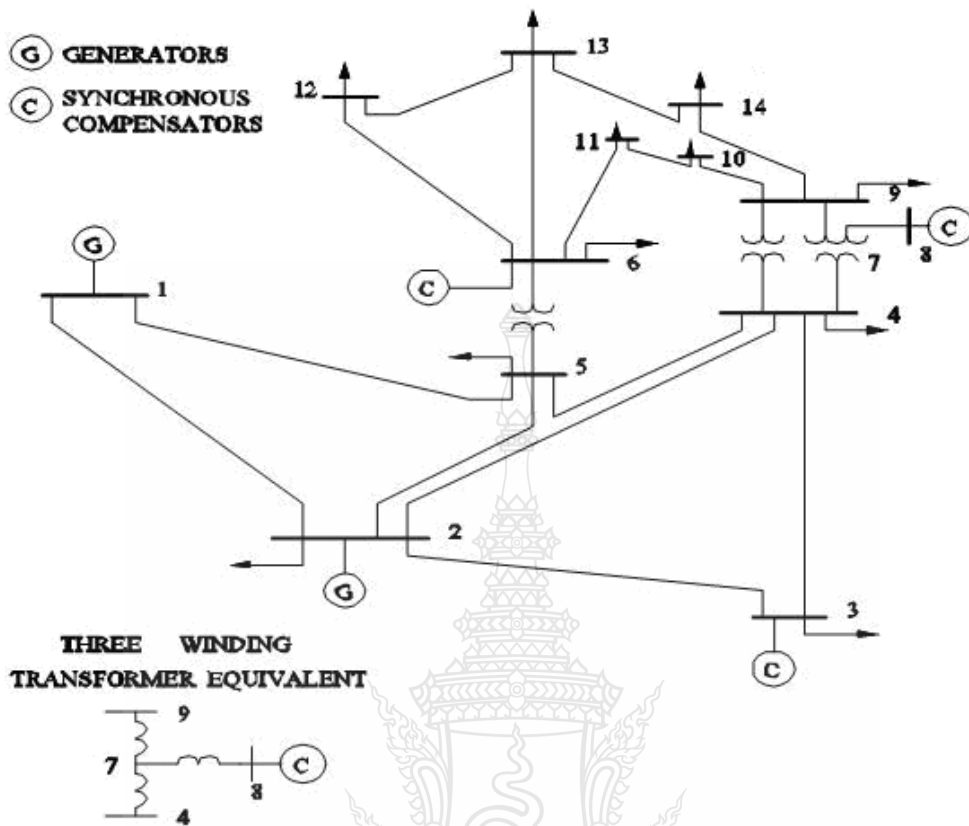
1. ศึกษาทฤษฎี บทความวิชาการ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยที่นำเสนอ
2. รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ใช้ในการอ้างอิง
3. ศึกษาแอมพลิจูดการแกว่งของระบบไฟฟ้าในระบบความถี่ต่ำ
4. ศึกษาทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง
5. ศึกษาศึกษาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าและความถี่
6. ศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง
7. วิเคราะห์ แอมพลิจูดการแกว่งของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการ โดยโปรแกรม PSAT
8. สรุปผลการวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนดำเนินงานวิจัยด้วยโปรแกรม PSAT

### 3.2 ระบบ IEEE 14 Bus

ระบบมาตรฐานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยนำข้อมูลในระบบมาใช้กับโปรแกรม PSAT เพื่อจะหาค่าเสถียรภาพความสั่นพ้องแรงดันและกำลังไฟฟ้าจริง จากภาพที่ 3.2 แสดงระบบของ IEEE 14 บัส ที่นำมาใช้ในงานวิจัยโดยระบบของ IEEE 14 บัส จะประกอบด้วย เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 5 เครื่อง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เครื่อง มีสายส่ง 20 สาย และมีบัส 14 Bus มีโหลดทั้งหมด 259 เมกะวัตต์ (Megawatt , MW) และ 81.4 เมกะวา (MegaVAR, MVAR)



รูปที่ 3.2 ระบบของ IEEE 14 บัส ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

Line number	From bus	To bus	Line impedance (p.u.)		Half line charging susceptance (p.u.)	MVA rating
			Resistance	Reactance		
1	1	2	0.01938	0.05917	0.02640	120
2	1	5	0.05403	0.22304	0.02190	69
3	2	3	0.04699	0.19797	0.01870	36
4	2	4	0.05811	0.17632	0.02460	65
5	2	5	0.05695	0.17388	0.01700	50
6	3	4	0.06701	0.17103	0.01730	65
7	4	5	0.01335	0.04211	0.00640	45

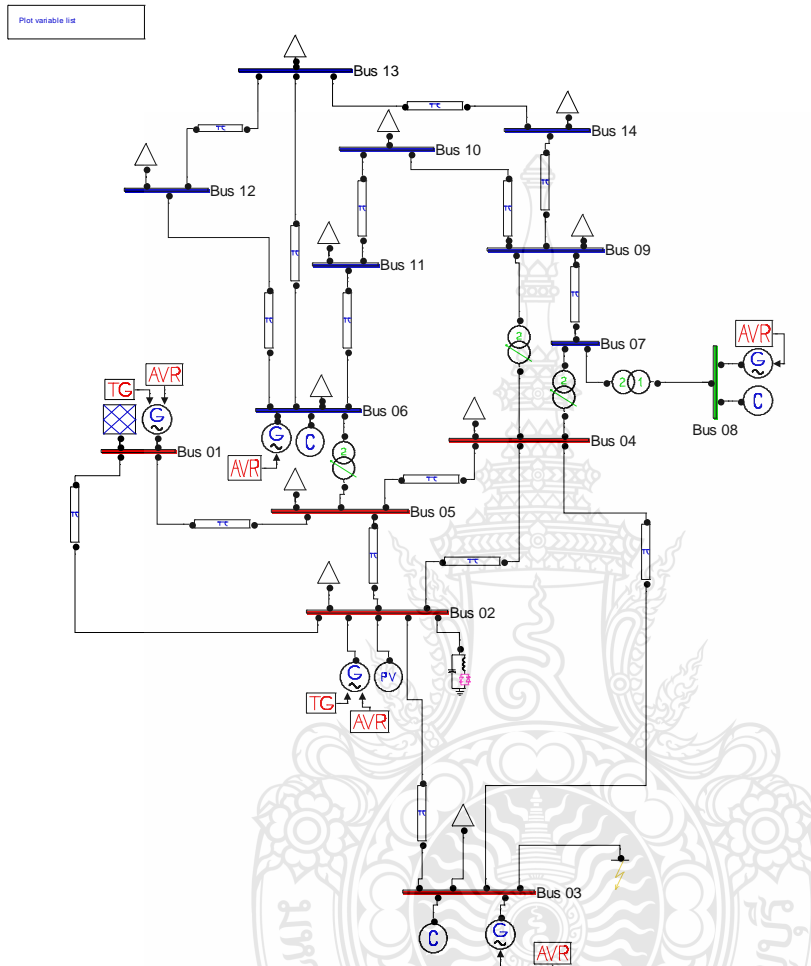


ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส (ต่อ)

Line number	From bus	To bus	Line impedance (p.u.)		Half line charging susceptance (p.u.)	MVA rating
			Resistance	Reactance		
8	4	7	0	0.20912	0	55
9	4	9	0	0.55618	0	32
10	5	6	0	0.25202	0	45
11	6	11	0.09498	0.1989	0	18
12	6	12	0.12291	0.25581	0	32
13	6	13	0.06615	0.13027	0	32
14	7	8	0	0.17615	0	32
15	7	9	0	0.11001	0	32
16	9	10	0.03181	0.0845	0	32
17	9	14	0.12711	0.27038	0	32
18	10	11	0.08205	0.19207	0	12
19	12	13	0.22092	0.19988	0	12
20	13	14	0.17093	0.34802	0	12

### 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ SVC เข้าไปในระบบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบบการศึกษาเสถียรภาพแรงดันเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ SVC ขนาด 36 MVA เข้าไปในระบบ ตามมาตรฐาน IEEE 14 บัส



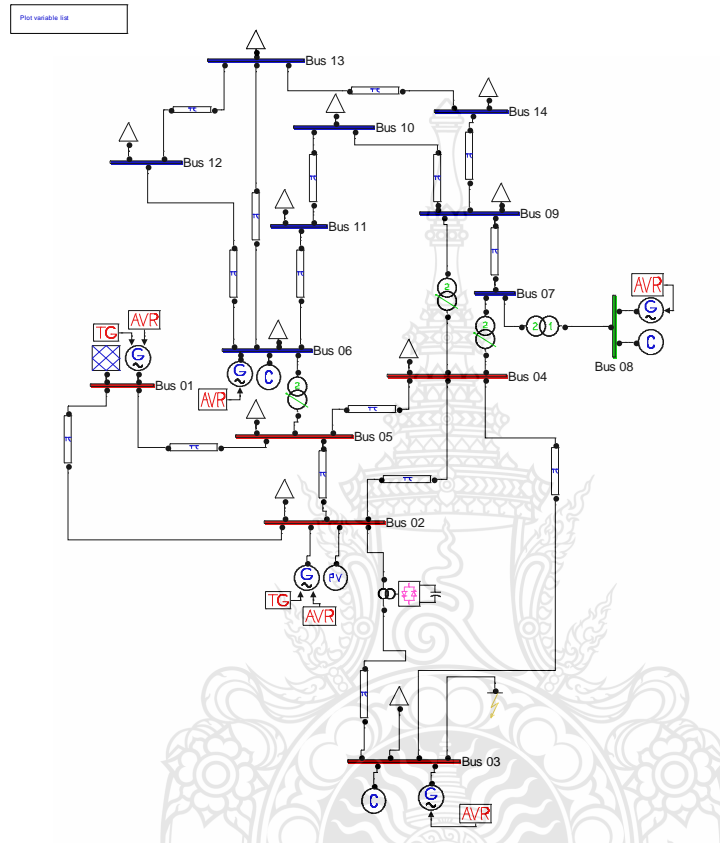
รูปที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ SVC

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของ SVC ขนาด 36 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 2

SVC DATA				
Bus No.	kV	$X_C$	$X_L$	MVA
3	69	0.04699	0.19797	36

### 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ SSSC เข้าไปในระบบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบบการศึกษาเสถียรภาพแรงดันเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ SSSC ขนาด 36 MVA เข้าไปในระบบ ตามมาตรฐาน IEEE 14 บัส



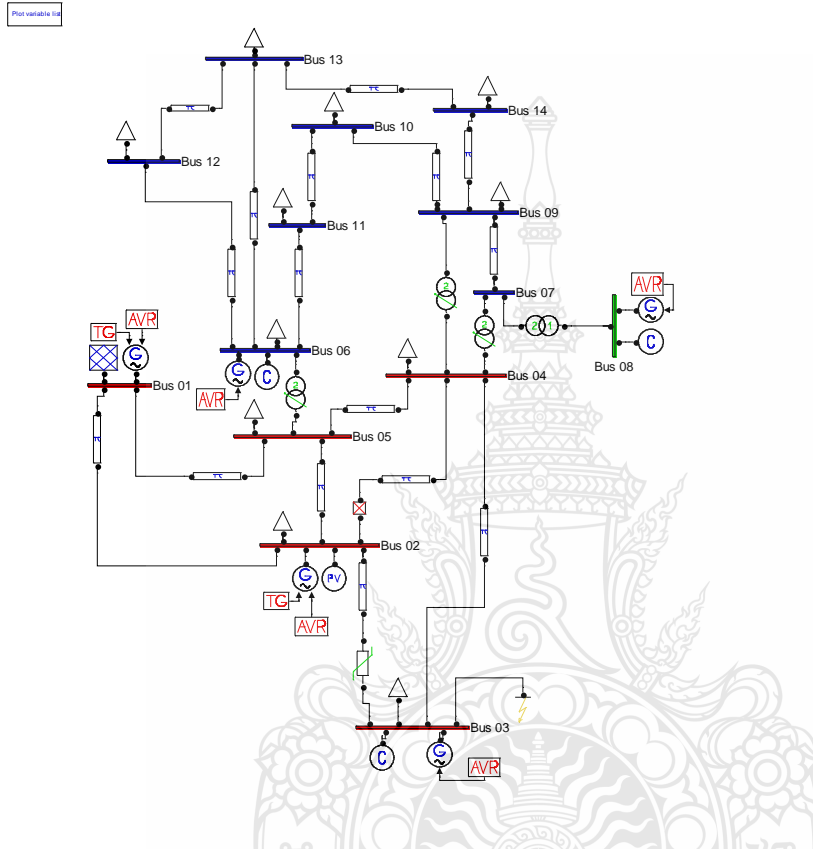
รูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ SSSC

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลของ SSSC ขนาด 36 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งสายส่งของบัสที่ 2-3

SSSC DATA				
Bus No.	kV	$X_c$	$X_L$	MVA
2-3	69	0.04699	0.19797	36

### 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ TCSC

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบบการศึกษาเสถียรภาพแรงดันเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ TCSC ขนาด 36 MVAเข้าไปในระบบ ตามมาตรฐานIEEE 14 บัส



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบ TCSC

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลของ TCSC ขนาด 36 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งสายส่งของบัสที่ 2-3

TCSC DATA				
Bus No.	kV	$X_C$	$X_L$	MVA
2-3	69	0.04699	0.19797	36

### 3.6 สรุปผล

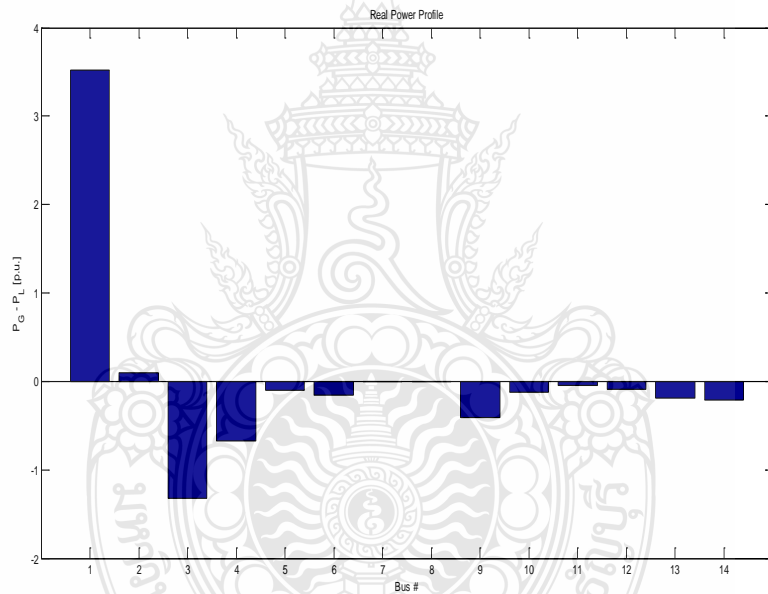
วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม PSAT ที่ทำงานร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยใช้ระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ของมาตรฐาน IEEE เป็นระบบอ้างอิงที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ เพื่อการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายก่อนติดตั้ง FACTS และการศึกษาเสถียรภาพของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบของ IEEE 14 บัส จะประกอบด้วย เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส 5 เครื่อง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส 2 เครื่องและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเชิงโครนัส 3 เครื่อง มีสายส่ง 20 สาย และมีบัส 14 บัส มีโหลดทั้งหมด 259 เมกะวัตต์ (Megawatt , MW) และ 81.4 เมกะวา (Mega VAR , MVAR)



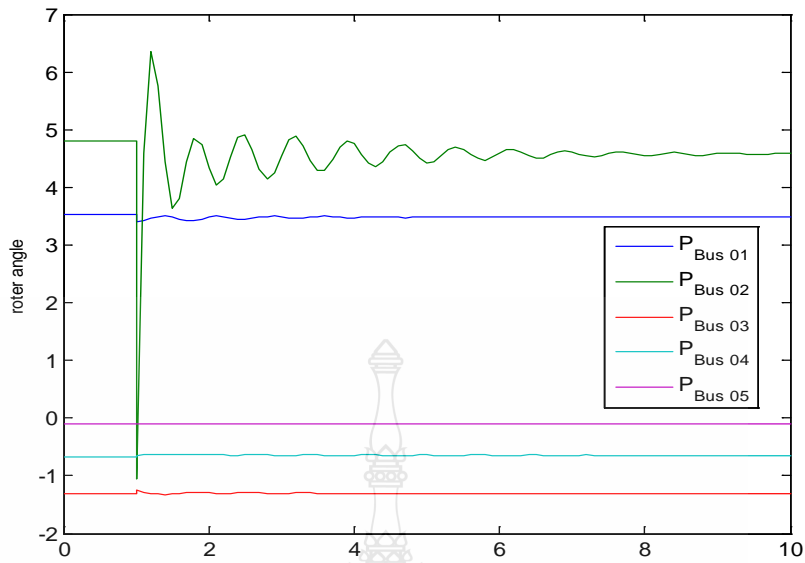
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

ระบบที่นำมาใช้ทดสอบกับระบบ คือ ระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยการนำข้อมูลต่าง ๆ มาใช้โปรแกรมในการช่วยวิเคราะห์ คือ โปรแกรม PSAT ที่ทำงานร่วมกับ โปรแกรม MATLAB/Simulink วิเคราะห์ค่าเสถียรภาพระบบไฟฟ้า โดยการจำลองการเกิดสภาวะชั่วคราวหรือสภาวะความผิดปกติในระบบขึ้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยืดหยุ่น (FACTS) เพื่อทำการศึกษาเสถียรภาพของระบบโดยทำการติดตั้ง FACTS แบบ 3 ชนิด คือ SVC , SSSC และ TCSC ดังมีผลการจำลองดังนี้

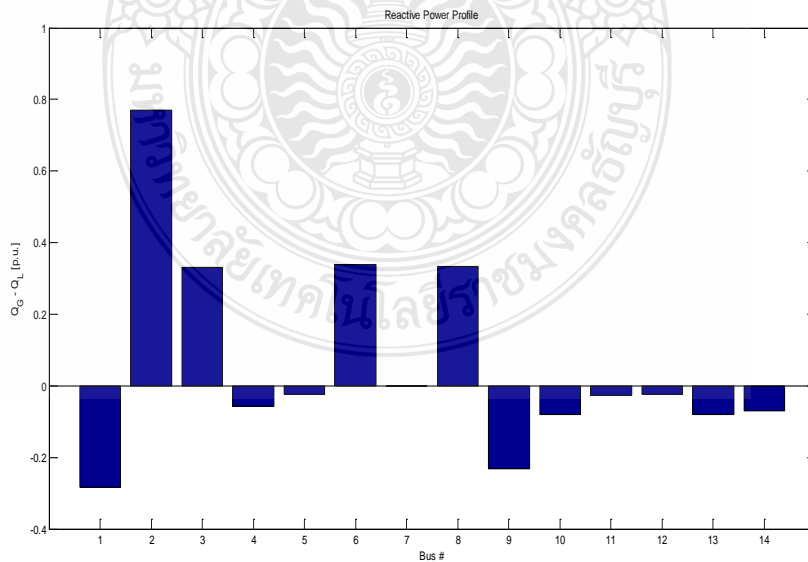


รูปที่ 4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัส

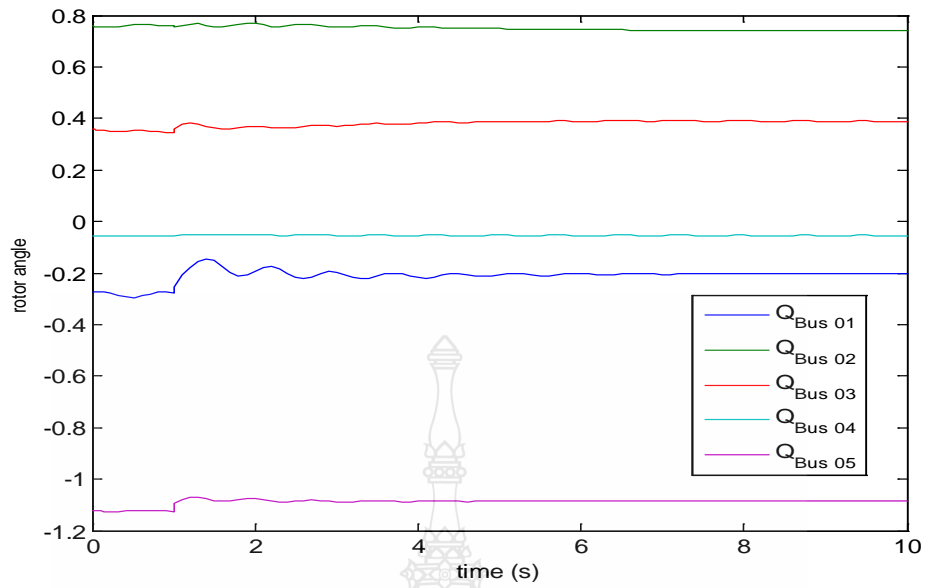


รูปที่ 4.2 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัส เทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 Bus โดยใช้โปรแกรม PSAT ในการช่วยในการวิเคราะห์ จากรูปสามารถพิจารณาได้ว่าแรงดันที่ Bus 1 ยังมีการแกว่งในระบบเนื่องจากเป็นบัสอ้างอิง (Slack Bus) และเป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ทำให้ระบบยังมีการแกว่งอยู่ในช่วงเวลา 0-6 S แต่หลังจากช่วงเวลา 7-10 S ระบบจะเสถียรภาพ

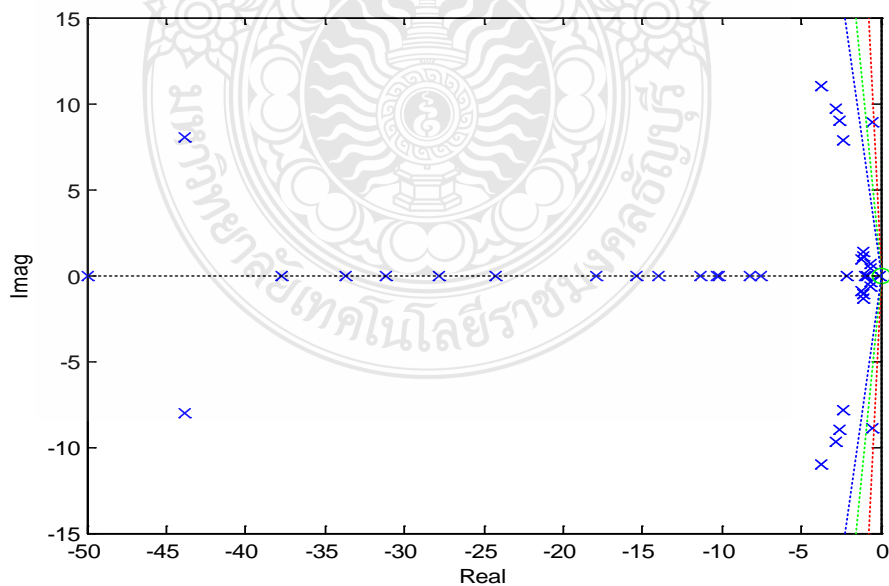


รูปที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัส



รูปที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัส เทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในระบบ 14 บัส เทียบกับเวลา เมื่อระบบยังไม่เกิดสถานะความผิดปกติในระบบ ค่าในระบบยังมีความเสถียรภาพเนื่องจากยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือสถานะความผิดปกติในระบบขึ้น



รูปที่ 4.5 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง)

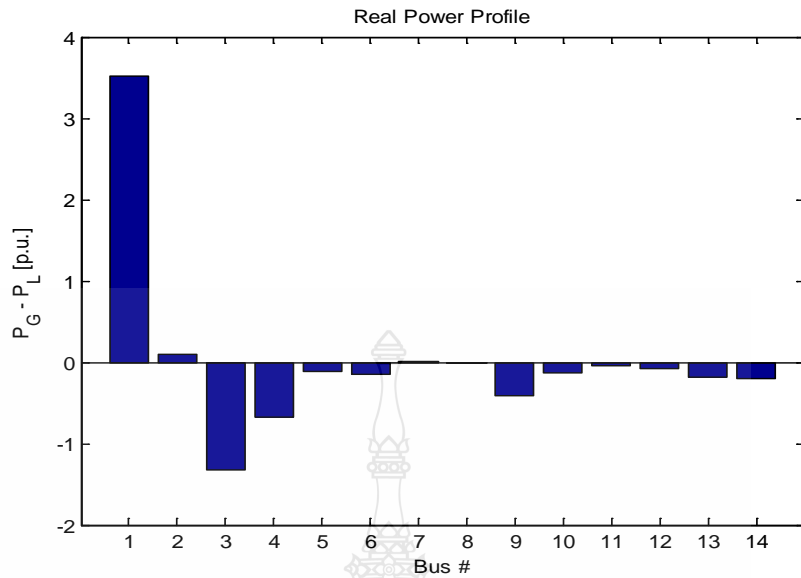


จากรูปที่ 4.5 เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue บน S-Plan ถ้าค่า  $P_s$  มีค่าเป็นบวกทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่ถ้าหาก  $P_s$  มีค่ามีค่าเป็นลบทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงระบบยังมีเสถียรภาพเนื่องจาก  $P_s$  มีค่าเป็นบวก

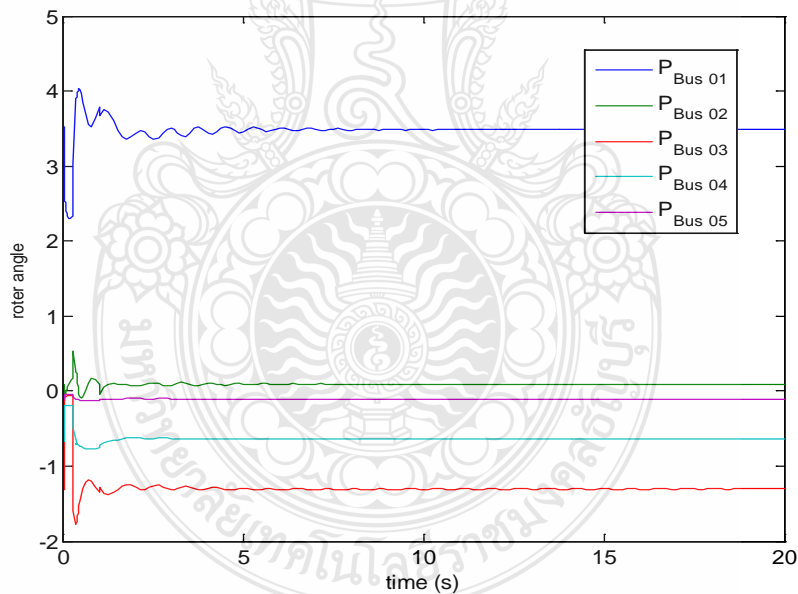
จากรูปที่ 4.1-4.5. เป็นการแสดงถึงผลการจำลองระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส โดยที่มีบัส มีโหลดทั้งหมด 259 MW และ 81.4 MVAR และใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏเท่ากับ 100 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 69

ตารางที่ 4.1 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ 14 บัส

BUS	V (P.U)	PHASE (RAD)	P-GEN (P.U)	Q-GEN (P.U)	PLOAD (P.U)	Q-LOAD (P.U)
01	1.0599	1.4028	3.5203	-0.28197	0	0
02	1.0475	1.2801	0.4	0.9486	0.3038	0.1778
03	1.0052	1.0414	0	0.59736	1.3188	0.266
04	0.97714	1.0731	0	0	0.6692	0.056
05	0.98641	1.1328	0	0	0.1064	0.0224
06	1.0605	0.98191	0	0.44433	0.1568	0.105
07	1.0219	1.0018	0	0	0	0
08	1.0819	1.0018	0	0.33402	0	0
09	0.99856	0.96421	0	0	0.413	0.2324
10	0.99873	0.96036	0	0	0.126	0.0812
11	1.0241	0.96838	0	0	0.049	0.0252
12	1.0365	0.96031	0	0	0.0854	0.0224
13	1.0265	0.95895	0	0	0.189	0.0812
14	0.98478	0.93589	0	0	0.2086	0.07

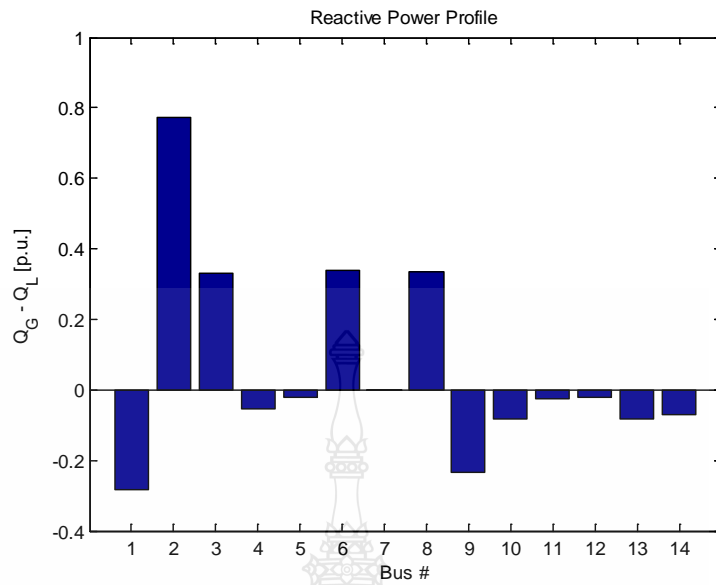


รูปที่ 4.6 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติ

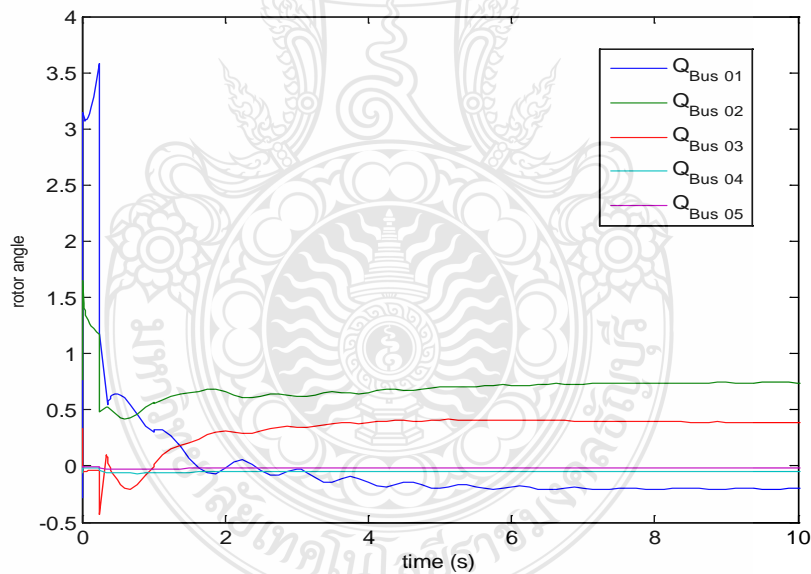


รูปที่ 4.7 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบ โดยการจำลองการเกิดสภาวะความผิดปกติที่บัส 3 ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSAT ดังรูปที่ 4.7

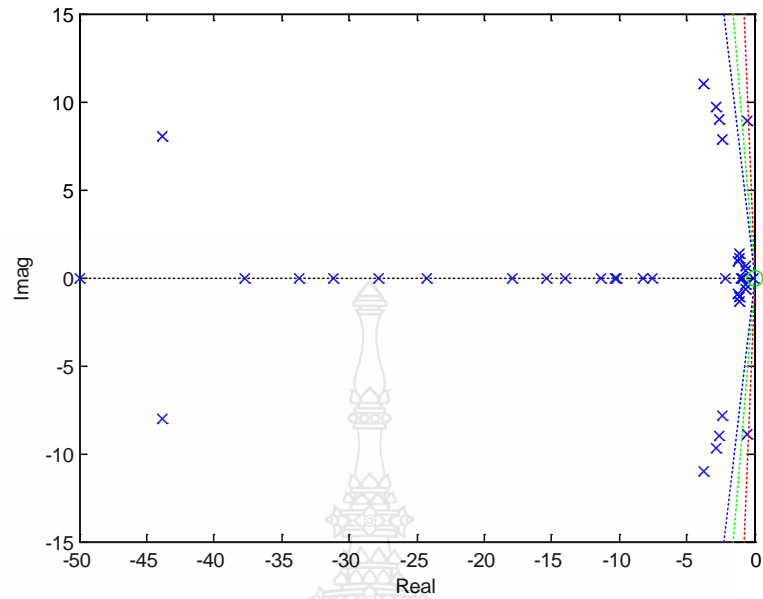


รูปที่ 4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.9 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ 14 บัส เมื่อระบบ เกิดสภาวะความผิดปกติเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบ ค่าในระบบไม่มีความเสถียรภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือสภาวะความผิดปกติในระบบขึ้น



**รูปที่ 4.10** ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติ

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงการจำลองเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบขนาด 1.0 p.u ที่ บัส 2 สามารถพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าจริง และค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ ระบบไม่มีเสถียรภาพเท่าที่ควร

**ตารางที่ 4.2** แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติ

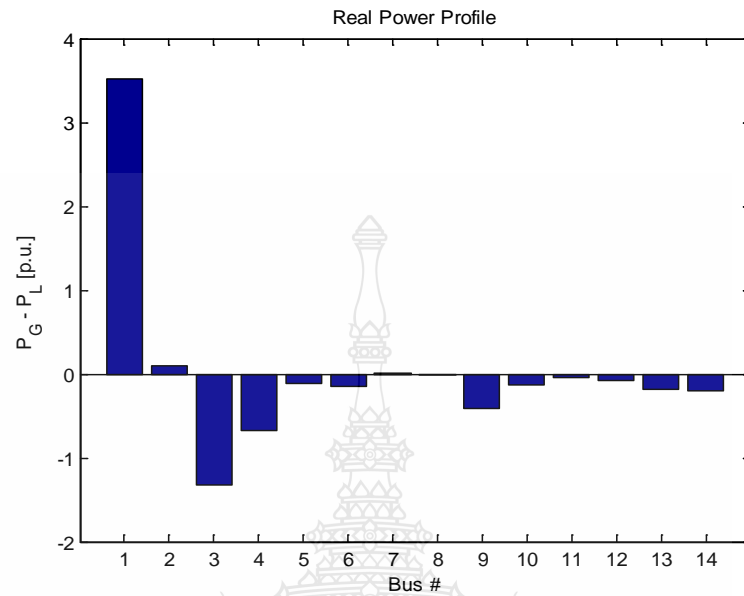
BUS	V (P.U)	PHASE (RAD)	P-GEN (P.U)	Q-GEN (P.U)	P-LOAD (P.U)	Q-LOAD (P.U)
01	1.06	2.2466	3.5203	-0.28197	0	0
02	1.0475	2.1238	0.4	0.9486	0.3038	0.1778
<b>03</b>	<b>1.0051</b>	<b>1.8849</b>	<b>0</b>	<b>0.59736</b>	<b>1.3188</b>	<b>0.266</b>
04	0.97707	1.9167	0	0	0.6692	0.056
05	0.98635	1.9764	0	0	0.1064	0.0224
06	1.0604	1.8254	0	0.44433	0.1568	0.105

ตารางที่ 4.2 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ 14 บัส เมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติ (ต่อ)

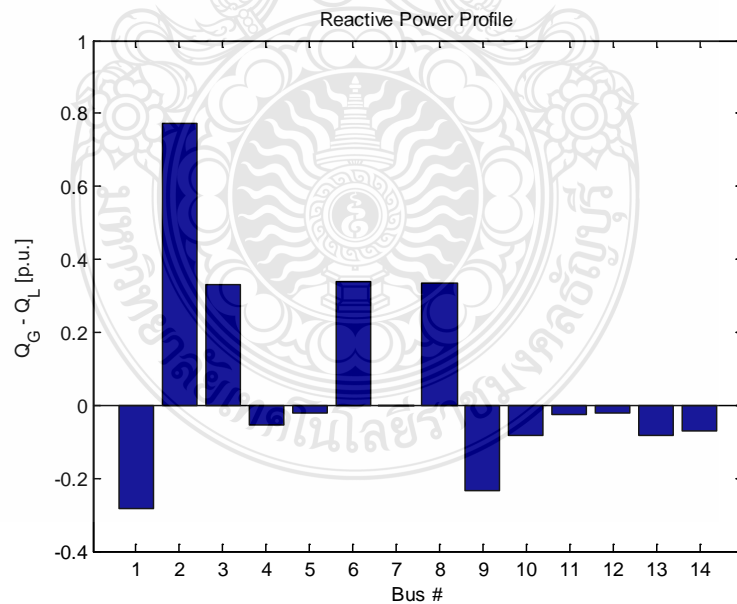
BUS	V (P.U)	PHASE (RAD)	P-GEN (P.U)	Q-GEN (P.U)	P-LOAD (P.U)	Q-LOAD (P.U)
07	1.0219	1.8452	0	0	0	0
08	1.0818	1.8452	0	0.33402	0	0
09	0.9985	1.8077	0	0	0.413	0.2324
10	0.99867	1.8039	0	0	0.126	0.0812
11	1.024	1.8119	0	0	0.049	0.0252
12	1.0365	1.8038	0	0	0.0854	0.0224
13	1.0265	1.8025	0	0	0.189	0.0812
14	0.98472	1.7794	0	0	0.2086	0.07

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อระบบเกิดสภาวะความผิดปกติในบัสที่ 2 จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง มีค่า 1.3188 P.U และ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ มีค่า 0.266 P.U ของบัสที่ 3 ทำให้ระบบมีการแกว่งและระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยืดหยุ่น FACTS ในบัสที่ 3 โดยที่ใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นทั้ง 3 แบบคือ 1. SVC 2. SSSC และ 3. TCSC

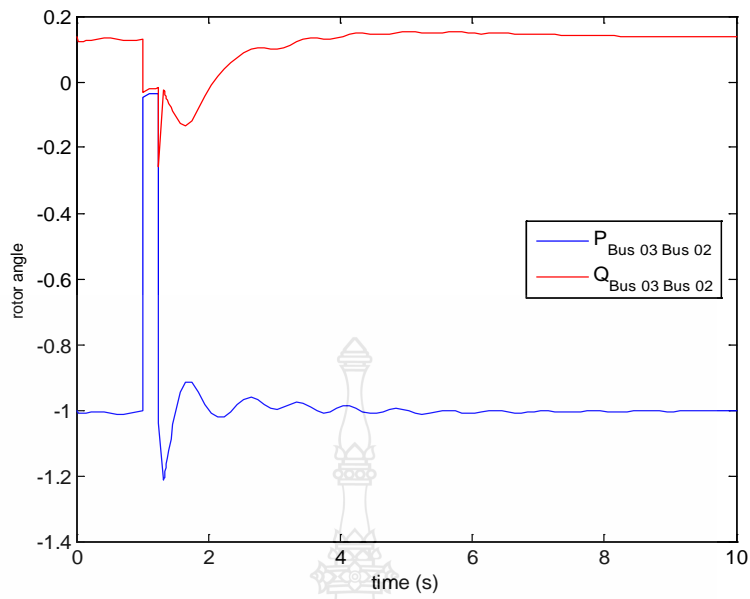
#### 4.1. การปรับปรุงเสถียรภาพโดยติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น SVC



รูปที่ 4.11 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC

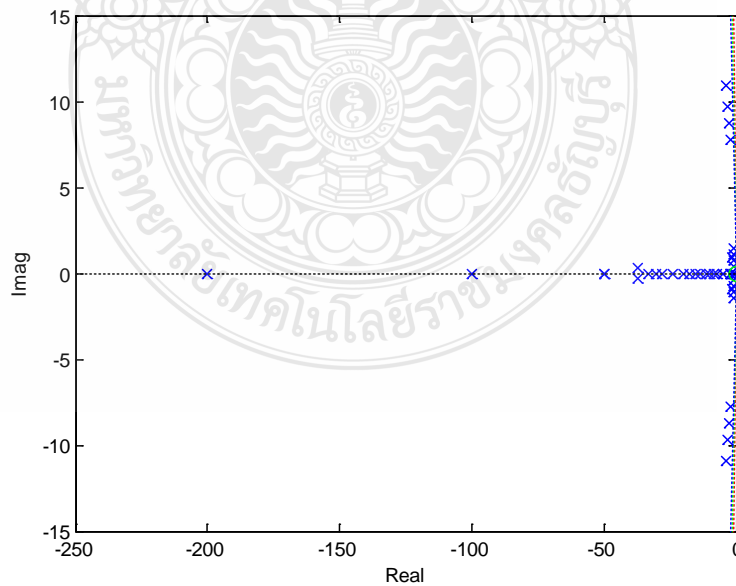


รูปที่ 4.12 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC



รูปที่ 4.13 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC

จากรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.14 เป็นกราฟค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ หลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย SVC ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นหลังจากการเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบ



รูปที่ 4.14 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อ ติดตั้ง SVC

จากรูปที่ 4.14 เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue บน S-Plan ถ้าค่า  $P_s$  มีค่าเป็นบวกทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่ถ้าหาก  $P_s$  มีค่าเป็นลบทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ จากรูปที่ 4.14 แสดงถึงระบบยังมีเสถียรภาพเนื่องจาก  $P_s$  มีค่าเป็นบวก

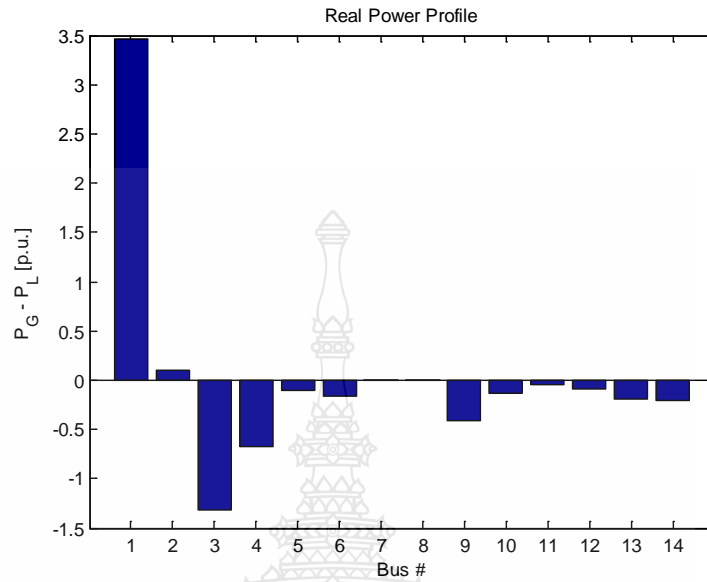
ตารางที่ 4.3 การไหลของระบบ IEEE 14 บัส หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC

BUS	V (P.U)	PHASE (RAD)	P-GEN (P.U)	Q-GEN (P.U)	P-LOAD (P.U)	Q-LOAD (P.U)
01	1.06	0.50834	3.5203	-0.28197	0	0
02	1.0458	0.37253	0.4	0.9486	0.3038	0.1778
03	1.0103	0.17644	0	0.59736	1.3188	0.266
04	0.99826	0.24401	0	0	0.6692	0.056
05	1.0034	0.28144	0	0	0.1064	0.0224
06	1.0703	0.13894	0	0.44433	0.1568	0.105
07	1.0363	0.16912	0	0	0	0
08	1.0902	0.16919	0	0.33402	0	0
09	1.0132	0.12941	0	0	0.413	0.2324
10	1.0125	0.12403	0	0	0.126	0.0812
11	1.0359	0.12866	0	0	0.049	0.0252
12	1.0464	0.11792	0	0	0.0854	0.0224
13	1.0369	0.11703	0	0	0.189	0.0812
14	0.99724	0.09793	0	0	0.2086	0.07

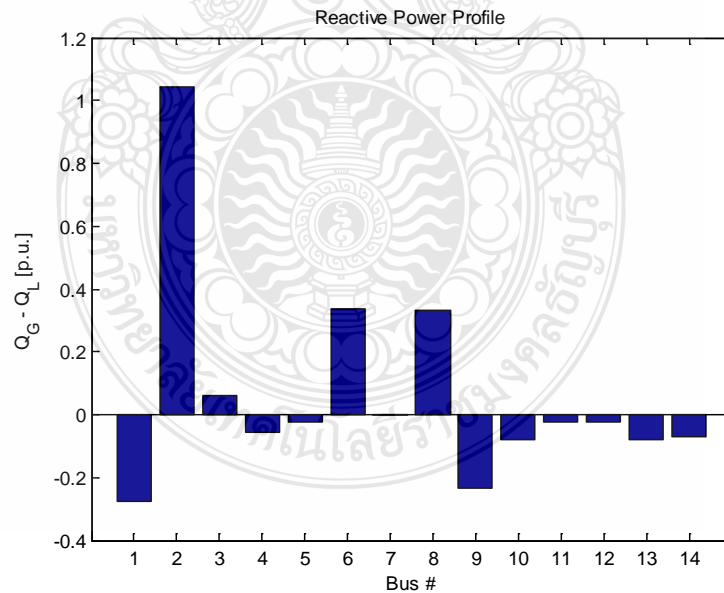
จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นเสถียรภาพของระบบ เมื่อติดตั้ง SVC โดยที่ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงยังมีค่า 1.3188 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ มีค่าอยู่ที่ 0.266 p.u. ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากระบบเกิดสภาวะความผิดปกติแต่ค่าแรงดันที่บัสและมุมของเฟสมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่ แรงดัน มีค่า 1.0103 p.u. และมุมเฟส มีค่า 0.17644 เรเดียน ทำให้ระบบหลังจากการปรับปรุงติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยึดหยุ่น SVC ผลปรากฏว่าระบบมีความเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาจากค่าต่างๆในระบบและพิจารณาจากภาพที่ 4.14



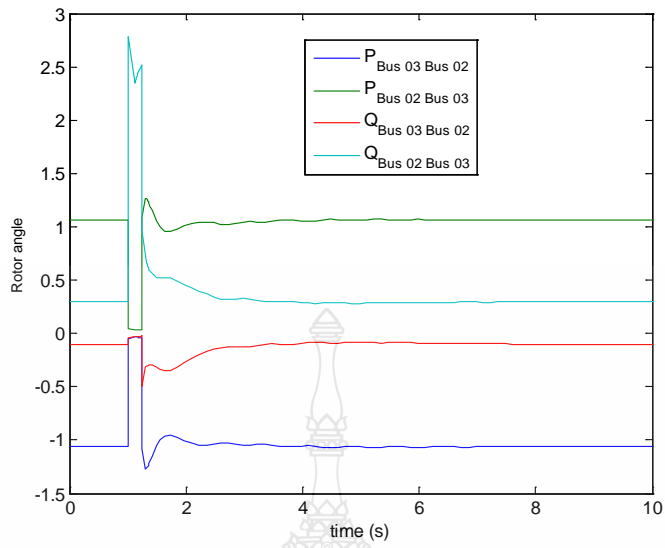
#### 4.2. การปรับปรุงเสถียรภาพโดยติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น SSSC



รูปที่ 4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC

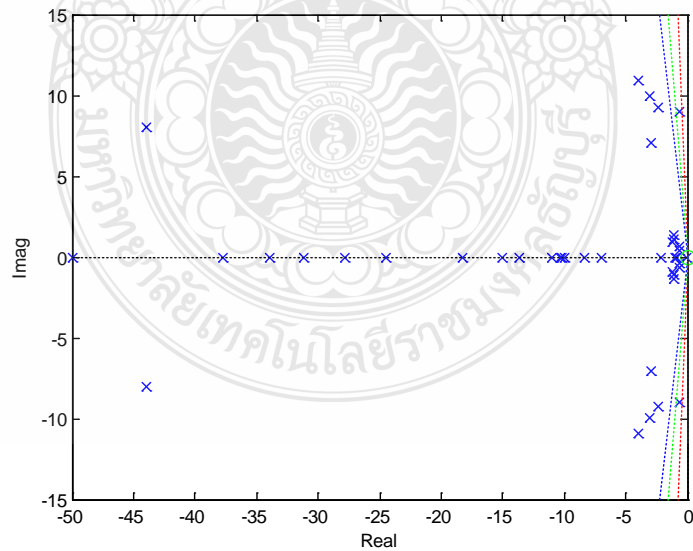


รูปที่ 4.16 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC



รูปที่ 4.17 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC

จากรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 เป็นกราฟค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ หลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย SSSC ทำให้ระบบมีเสถียรภาพหลังจากการเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบ



ภาพที่ 4.18 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อติดตั้ง SSSC

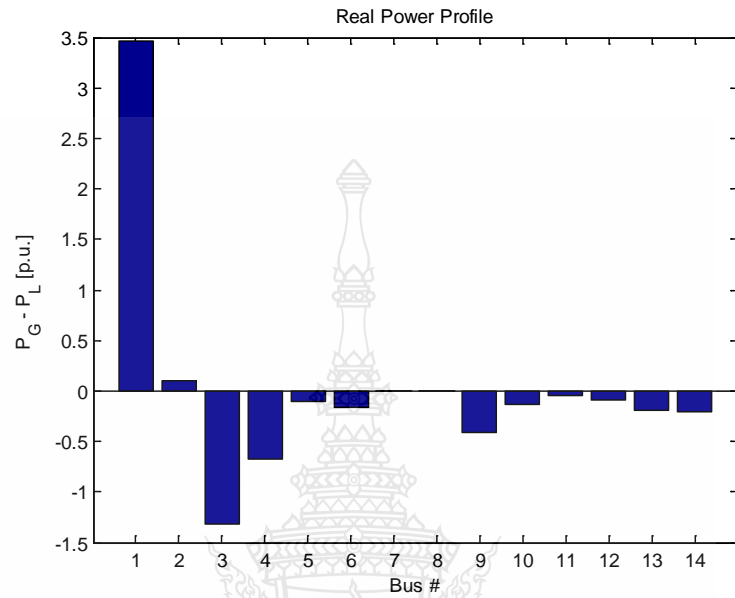
จากรูปที่ 4.18 เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue บน S-Plan ถ้าค่า  $P_s$  มีค่าเป็นบวกทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่ถ้าหาก  $P_s$  มีค่าเป็นลบทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ จากรูปที่ 4.18 แสดงถึงระบบยังมีเสถียรภาพเนื่องจาก  $P_s$  มีค่าเป็นบวก

ตารางที่ 4.4 การไหลของระบบ IEEE 14 บัส หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SSSC

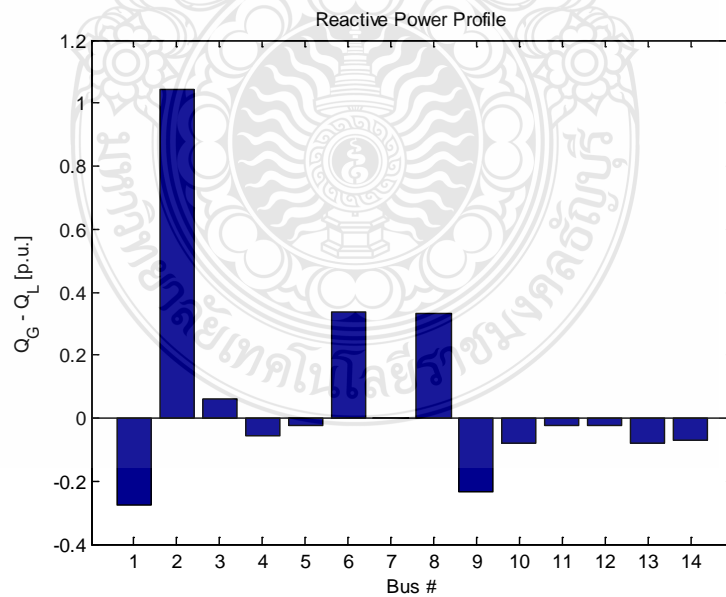
BUS	V (P.U)	PHASE (RAD)	P-GEN (P.U)	Q-GEN (P.U)	P-LOAD (P.U)	Q-LOAD (P.U)
01	1.06	0.65498	3.4603	-0.27708	0	0
02	1.045	0.52138	0.4	1.2233	0.3038	0.1778
03	1.01	0.34146	0	0.32574	1.3188	0.266
04	0.99822	0.39734	0	0	0.6692	0.056
05	1.0034	0.43314	0	0	0.1064	0.0224
06	1.07	0.29113	0	0.44194	0.1568	0.105
07	1.0362	0.32212	0	0	0	0
08	1.09	0.32213	0	0.33274	0	0
09	1.0132	0.28228	0	0	0.413	0.2324
10	1.0124	0.27678	0	0	0.126	0.0812
11	1.0358	0.28112	0	0	0.049	0.0252
12	1.0462	0.27015	0	0	0.0854	0.0224
13	1.0366	0.26931	0	0	0.189	0.0812
14	0.99712	0.25055	0	0	0.2086	0.07

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเป็นเสถียรภาพของระบบ เมื่อติดตั้ง SSSC โดยที่ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงยังมีค่า 1.3188 p.u. และ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏมีค่าอยู่ที่ 0.266 p.u. ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากระบบเกิดสภาวะความผิดปกติแต่ค่าแรงดันที่บัสและมุมของเฟสมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่ แรงดัน (V) มีค่า 1.01 p.u. และมุมเฟสมีค่า 0.34146 เรเดียน ทำให้ระบบหลังจากการปรับปรุงติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยืดหยุ่น SSSC ผลปรากฏว่าระบบไม่มีมีความเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาจากค่าต่างๆในระบบและพิจารณาจากภาพที่ 4.18

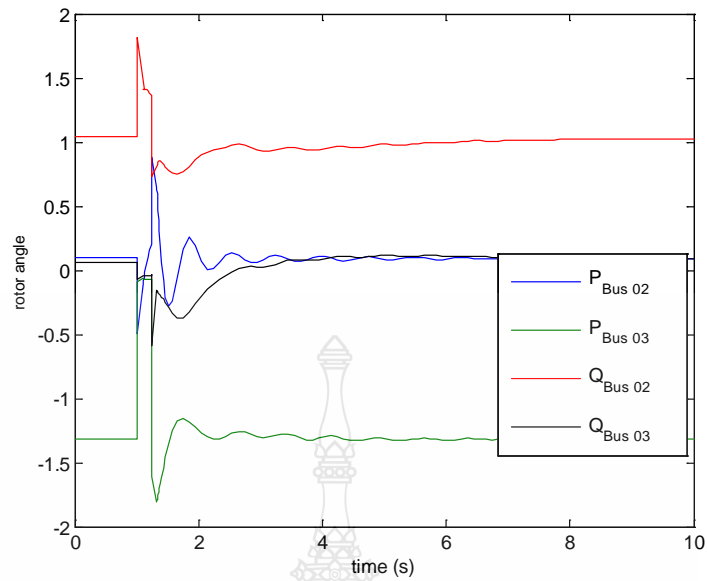
### 4.3. การปรับปรุงเสถียรภาพโดยติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น Controlled Series Capacitors (TCSC)



รูปที่ 4.19 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC

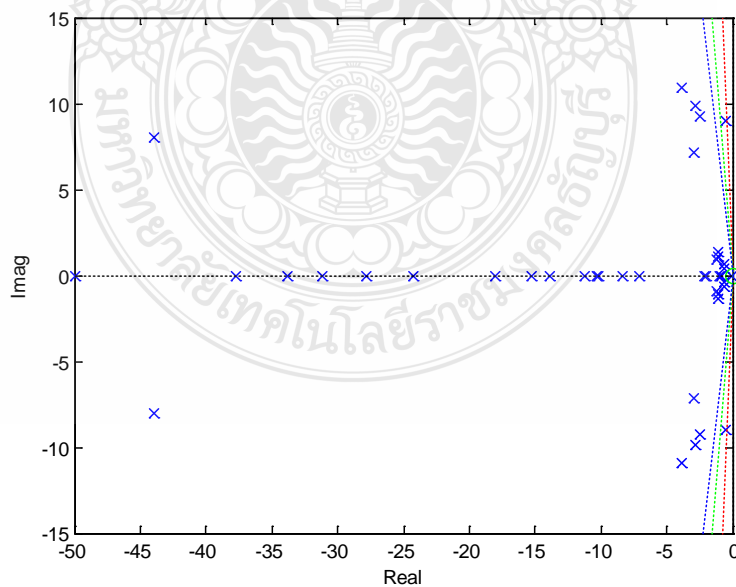


รูปที่ 4.20 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC



รูปที่ 4.21 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและค่ากำลังไฟฟ้าจริงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC

จากรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 เป็นกราฟค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ หลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย TCSC ทำให้ระบบมีเสถียรภาพหลังจากการเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบ



รูปที่ 4.22 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงความเป็นเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue Analysis (ค่าเจาะจง) เมื่อติดตั้ง TCSC

จากรูปที่ 4.22 เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของระบบ Eigenvalue บน S-Plan ถ้าค่า  $P_s$  มีค่าเป็นบวกทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่ถ้าหาก  $P_s$  มีค่าเป็นลบทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงระบบยังมีเสถียรภาพเนื่องจาก  $P_s$  มีค่าเป็นบวก

ตารางที่ 4.5 การไหลของระบบ IEEE 14 บัส หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ TCSC

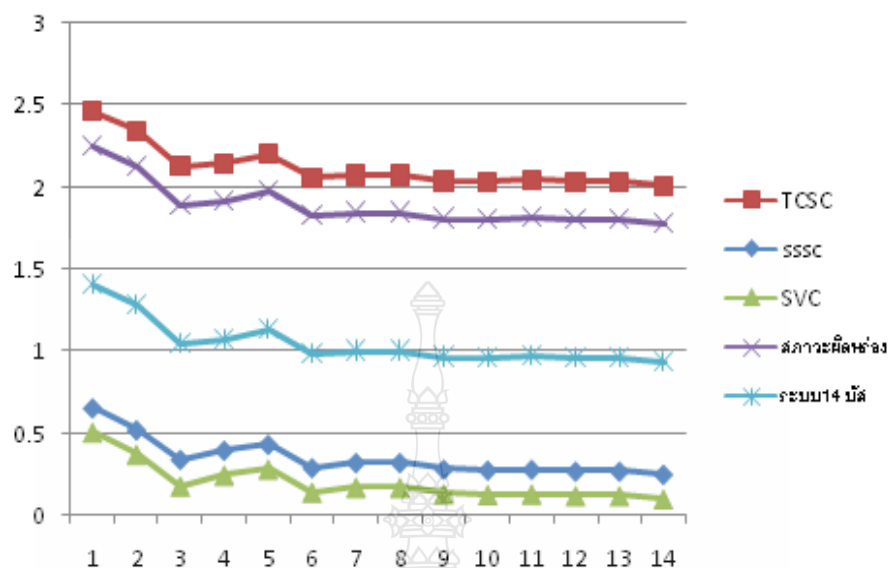
BUS	V (P.U)	PHASE (RAD)	P-GEN (P.U)	Q-GEN (P.U)	P-LOAD (P.U)	Q-LOAD (P.U)
01	1.0599	2.4633	3.4603	-0.27708	0	0
02	1.0467	2.3429	0.4	1.2233	0.3038	0.1778
03	1.0077	2.1257	0	0.32574	1.3188	0.266
04	0.97854	2.1448	0	0	0.6692	0.056
05	0.98771	2.2015	0	0	0.1064	0.0224
06	1.061	2.0517	0	0.44194	0.1568	0.105
07	1.0229	2.073	0	0	0	0
08	1.0823	2.073	0	0.33274	0	0
09	0.99954	2.0352	0	0	0.413	0.2324
10	0.99963	2.0311	0	0	0.126	0.0812
11	1.0248	2.0386	0	0	0.049	0.0252
12	1.037	2.0302	0	0	0.0854	0.0224
13	1.0271	2.0289	0	0	0.189	0.0812
14	0.98556	2.0064	0	0	0.2086	0.07

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเป็นเสถียรภาพของระบบ เมื่อติดตั้ง TCSC โดยที่ ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ยังมีค่า 1.3188 p.u และค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ มีค่าอยู่ที่ 0.266 p.u ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากระบบเกิดสภาวะความผิดปกติ แต่ค่าแรงดันที่บัสและมุมของเฟสมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ แรงดัน มีค่า p.u. และมุมเฟส มีค่า 2.1257 เรเดียน ทำให้ระบบหลังจากการปรับปรุงติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยึดหยุ่น TCSC ผลปรากฏว่าระบบมีความเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่าต่างๆในระบบและพิจารณาจากภาพที่ 4.22

#### 4.4 สรุปผล

ผลการทดลองการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของการจำลองระบบไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 14 บัส ประกอบด้วย เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 5 เครื่อง ได้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เครื่อง มีสายส่ง 20 สาย และมีบัส 14 บัส มีโหลดทั้งหมด 259 MW และ 81.4 MVAR ด้วยโปรแกรม PSAT เมื่อระบบเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ และทำการชดเชยอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น 3 ชนิด คือ SVC ,SSSC และ TCSC สรุปผลการทดลองได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นชนิด SVC โดยที่มีค่ากำลังไฟฟ้าจริง ยังมีค่า 1.3188 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏมีค่าอยู่ที่ 0.266 p.u. ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากระบบเกิดความผิดปกติแต่ค่าแรงดันที่บัสและมุมของเฟสมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่แรงดัน มีค่า 1.0103 p.u. และมุมเฟสมีค่า 0.17644 เรเดียน ทำให้ระบบหลังจากการปรับปรุงติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยืดหยุ่น SVC ผลปรากฏว่าระบบมีความเสถียรภาพเมื่อติดตั้ง SSSC โดยที่ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงยังมีค่า 1.3188 P.U. และค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏมีค่าอยู่ที่ 0.266 p.u. ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากระบบเกิดความผิดปกติ แต่ค่าแรงดันที่บัสและมุมของเฟสมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่แรงดันมีค่า 1.01 p.u. และมุมเฟสมีค่า 0.34146 เรเดียน ทำให้ระบบหลังจากการปรับปรุงติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยืดหยุ่น SSSC ผลปรากฏว่าระบบไม่มีเสถียรภาพเมื่อติดตั้ง TCSC โดยที่ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงยังมีค่า 1.3188 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏมีค่าอยู่ที่ 0.266 p.u. ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากระบบเกิดความผิดปกติ แต่ค่าแรงดันที่บัสและมุมของเฟสมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่ แรงดันมีค่า 1.0077 p.u. และมุมเฟสมีค่า 2.1257 เรเดียน ทำให้ระบบหลังจากการปรับปรุงติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบยืดหยุ่น TCSC ผลปรากฏว่าระบบมีความเสถียรภาพน้อยกว่า SSSC ดังนั้นสรุปได้ว่าการติดตั้งระบบ SVC ที่มีการติดตั้งแบบขนานสามารถชดเชยแรงดันในระบบเมื่อเกิดความผิดปกติดีกว่าระบบ SSSC และ TCSC ที่เป็นการต่ออนุกรมเข้าในระบบดังรูปที่ 4.23

มุม(เรเดียน)



บัส

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์ชดเชยแต่ละชนิดเมื่อระบบเกิดสภาวะผิดปกติ

จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบอุปกรณ์ชดเชยแต่ละชนิดเมื่อระบบเกิดสภาวะผิดปกติแต่ละชนิดซึ่ง SVC ที่มีการติดตั้งแบบขนานสามารถชดเชยแรงดันในระบบเมื่อเกิดความผิดปกติดีกว่าระบบ SSSC และ TCSC ที่เป็นการต่ออนุกรมเข้าไปในระบบ



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองโดยการจำลองระบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน IEEE 14 บัสเมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบและเมื่อนำอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น FACTS สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

จากการวิเคราะห์การติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น FACTS เมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติในระบบ เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบสามารถสรุปการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์ระบบแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 14 บัส บัส มีโหลดทั้งหมด 259 MW และ 81.4 MVAR และใช้โปรแกรม PSAT ที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink ขนาดของแรงดันที่บัสความผิดปกติในบัสที่ 3 อยู่ที่แรงดันที่บัส 1.0051 p.u. มุมเฟส 1.8849 เรเดียน กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด 1.3188 p.u. กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ 0.266 p.u. นั้นทำให้ระบบเกิดการแกว่งหรือไม่มีความเสถียรภาพดังนั้นจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่น FACTS เข้าไปในระบบทั้งในแบบขนาน คือ SVC และ อนุกรม คือ SSSC, TCSC

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นแบบขนาน ชนิด SVC ผลการทดลองวิเคราะห์การจำลองด้วยการใช้โปรแกรม PSAT แรงดันที่บัส 3 มีค่า 1.0103 p.u. มุมเฟส 0.17644 เรเดียน กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด 1.3188 p.u. กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ 0.266 p.u. ทำให้ระบบมีเสถียรภาพหลังจากการเกิดสภาวะความผิดปกติ

และเมื่อหลังจากอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นแบบอนุกรม ชนิด SSSC แรงดันที่บัส 3 มีค่าเท่ากับ 1.01 p.u. มุมเฟส 0.34164 เรเดียน และ ชนิด TCSC มีค่าเท่ากับ 1.0077 p.u. มุมเฟส 2.1257 เรเดียน และ กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด 1.3188 p.u. กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ 0.266 p.u. ทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากัน

จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSAT อุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นแบบอนุกรม ชนิด SSSC สามารถควบคุมแรงดันเสถียรภาพของระบบได้ดีกว่าชนิด TCSC เนื่องจากมุมเฟส 2.1257 เรเดียน แต่ชนิด SSSC มุมเฟส 0.34164 เรเดียน เมื่อนำเอาชนิด SSSC มาเปรียบเทียบกับ

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นแบบขนานชนิด SVC สามารถควบคุมแรงดันดีกว่าชนิด SSSC เนื่องจากอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นชนิด SVC มีมุมเฟส 0.17644 เรเดียน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์การแกว่งความถี่ด้วยอุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่น FACTS มี 3 ชนิด คือ อุปกรณ์ชดเชยแบบยืดหยุ่นแบบขนาน SVC และอนุกรม คือ SSSC , TCSC โดยการใช้โปรแกรม PSAT ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB /Simulink ซึ่งโปรแกรมเครื่องมือที่จะเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ระบบในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบ IEEE 14 Bus ดังนั้นวิทยานิพนธ์มีข้อเสนอแนะและข้อควรศึกษาเพิ่มเติมให้ผู้สนใจพิจารณาและศึกษาวิจัยเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1. พิจารณาโปรแกรมอื่นเปรียบเทียบกับโปรแกรม PSAT เช่น โปรแกรม PSCAD
2. พิจารณาระบบที่ใหญ่กว่า เช่น IEEE 33 บัส IEEE 69 บัส หรือ IEEE 118 บัส
3. พิจารณาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นชนิดอื่น เช่น UPFC IPFC
4. พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลดเพื่อให้เข้ากับการใช้แรงดันไฟฟ้าในปัจจุบัน



## รายการอ้างอิง

- [1] DATA SHEETS FOR IEEE 14 BUS SYSTEM
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, (McGraw-Hill: New York, 1994).
- [3] F. Milano, “An Open Source Power System Analysis Toolbox, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), (August 2005), 1199-1206
- [4] G. Rogers, *Power System Oscillations*, (Kluwer: Massachusetts, 2000).
- [5] กฤตญ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ “การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง”( 1 ธันวาคม 2553),ISBN 978-616-7326-20-7
- [6] K.Prasertwong , N.Mithulananthan and D.Thakur “**Understanding low frequency oscillation in power system**”Power and Energy System Grop, School of Information Technology and Electrical Engineering,The University of Queensland
- [7] Galu Papy Yuma , Kanzumba Kusakana “**Damping of Oscillations of the IEEE 14 bus Power System by SVC with STATCOM** 978-1-4577-1829-8/12/\$26.00 ©2012 IEEE
- [8] P.K. Iyambo, and R. Tzoneva, “**Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Electric Power System**” 1-4244-0987-X/07/\$25.00 ©2007 IEEE
- [9] ภาธร มีนานุญ , ไพศาล บุญเจียม “การแก้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้าจำหน่าย 115 KV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมื่อต่อร่วมกับผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายย่อย”การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 วันที่ 28-31 ตุลาคม 2553
- [10] Saeid jalilzadeh , Reza noroozian, M.Reza Safari Tirtashi and Peyman Farhang “**Comparison of TCSC and PSS State Feedback controller Performances on Damping of Power System Oscillation usind PSO**”in Electrical Engineering (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on( 17-19 May 2011)
- [11] T.R.Jyothsna, *Member, IEEE*, and K. Vaisakh, *Member, IEEE* “**MOEP Based Design of PSS and FACTS for Transient Stability Improvement under Symmetrical and Unsymmetrical Fault Conditions**”in TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference”( 19-21 Nov. 2008)

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [12] N. Hashim, N. Hamzah, M.F. Abdul Latip “**Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Test System Using Dynamic Computation for Power Systems (DCPS)**”, 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation (Date of Conference: 8-10 Feb. 2012).
- [13] Angamma Mohottige Chitral Jayasank Angamma “**Analytical Study of Factors Affecting To Electromechanical Oscillations In Power Systems**”, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering, Asian Institute of Technology, May 2006
- [14] A. Vinash Srivastava and S. Dawnee “**Performance Analysis and Tuning of FACTS Controllers in Tandem with PSS in a Power System Network**” 28-30 Sept. 2011, Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE), 2011 International Conference and, (28-30 Sept. 2011).
- [15] จักรินทร์ วิเศษยา, “การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค”, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554
- [16] Arfah Marini Mohamad “**Transient Stability Analysis on Sarawak’s Grid using Power System Simulator for Engineering (PSS/E)**” Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2011 IEEE Symposium on (Date of Conference: 25-28 Sept. 2011)
- [17] P. Kundur, “**Power System Stability and Control**”, Chapter 14 Voltage Stability, New York: McGraw-Hill, 1994. pp. 959-1022.
- [18] P. Kundur, “**Power System Stability and Control**”, Chapter 2 Introduction to the Power System Stability Problem, New York: McGraw-Hill, 1994. pp. 17-41
- [19] G Naveen Kumar, Dr M Surya Kalavathi “**CPF, TDS based Voltage Stability Analysis using Series, Shunt and Series–Shunt FACTS controllers for Line Outage Contingency**” Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference on (Date of Conference: 22-24 Dec. 2011).



**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก

ข้อมูลบัสต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEEE 14 บัส



ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส

Line number	From bus	To bus	Line impedance (p.u.)		Half line charging susceptance (p.u.)	MVA rating
			Resistance	Reactance		
1	1	2	0.01938	0.05917	0.02640	120
2	1	5	0.05403	0.22304	0.02190	69
3	2	3	0.04699	0.19797	0.01870	36
4	2	4	0.05811	0.17632	0.02460	65
5	2	5	0.05695	0.17388	0.01700	50
6	3	4	0.06701	0.17103	0.01730	65
7	4	5	0.01335	0.04211	0.00640	45
8	4	7	0	0.20912	0	55
9	4	9	0	0.55618	0	32
10	5	6	0	0.25202	0	45
11	6	11	0.09498	0.1989	0	18
12	6	12	0.12291	0.25581	0	32
13	6	13	0.06615	0.13027	0	32
14	7	8	0	0.17615	0	32
15	7	9	0	0.11001	0	32
16	9	10	0.03181	0.0845	0	32
17	9	14	0.12711	0.27038	0	32
18	10	11	0.08205	0.19207	0	12
19	12	13	0.22092	0.19988	0	12
20	13	14	0.17093	0.34802	0	12

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโดยใช้โปรแกรม PSAT





## ข.1 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโดยใช้โปรแกรม PSAT

### POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.6

Author: Federico Milano, (c) 2002-2010

e-mail: Federico.Milano@uclm.es

website: <http://www.uclm.es/area/gsee/Web/Federico>

File: D:\Program1\โปรแกรม Psat\psat-2.1.6-mat\psat\tests\d\_014\_dyn\_114.mdl

Date: 16-Sep-2013 15:38:05

### NETWORK STATISTICS

Buses: 14

Lines: 16

Transformers: 4

Generators: 5

Loads: 11

### SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 3

Maximum P mismatch [p.u.] 3.4817

Maximum Q mismatch [p.u.] 0.74201

Power rate [MVA] 100

### POWER FLOW RESULTS

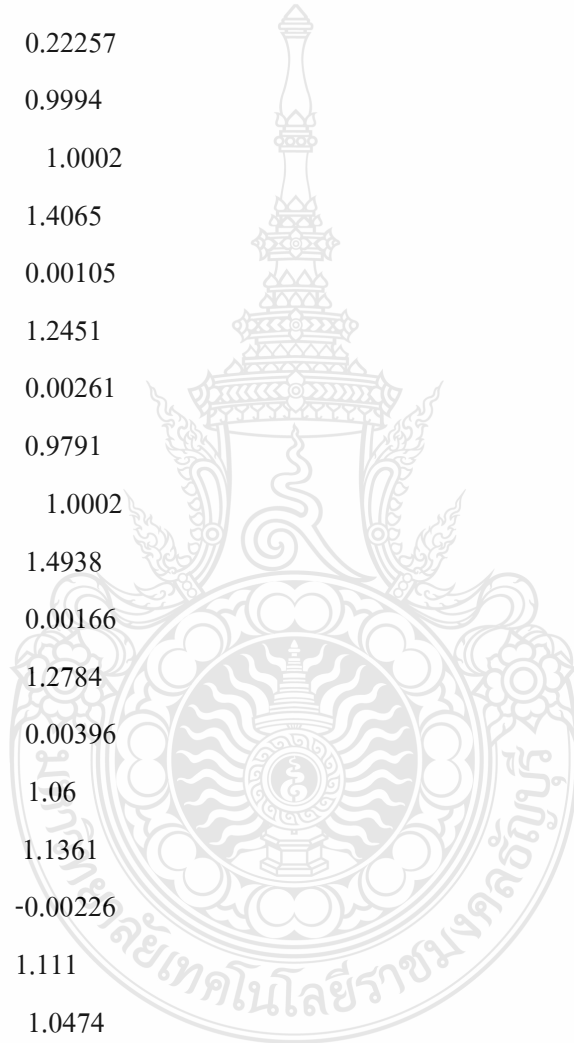
Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
-----	---	-------	-------	-------	--------	--------

	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 01	1.0599	1.4028	3.5203	-0.28197	0	0
Bus 02	1.0475	1.2801	0.4	0.9486	0.3038	0.1778
Bus 03	1.0052	1.0414	0	0.59736	1.3188	0.266
Bus 04	0.97714	1.0731	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	0.98641	1.1328	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.0605	0.98191	0	0.44433	0.1568	0.105
Bus 07	1.0219	1.0018	0	0	0	0
Bus 08	1.0819	1.0018	0	0.33402	0	0
Bus 09	0.99856	0.96421	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	0.99873	0.96036	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.0241	0.96838	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.0365	0.96031	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.0265	0.95895	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.98478	0.93589	0	0	0.2086	0.07

#### STATE VARIABLES

delta_Syn_1	1.7232
omega_Syn_1	1.0002
e1q_Syn_1	1.0477
e2q_Syn_1	1.0378
e1d_Syn_1	0.12713
delta_Syn_2	1.0396
omega_Syn_2	1.0002
e1q_Syn_2	1.2096
e1d_Syn_2	0.0007
e2q_Syn_2	1.1458

e2d_Syn_2	0.00111
delta_Syn_3	1.5229
omega_Syn_3	1.0002
e1q_Syn_3	1.3151
e1d_Syn_3	0.14298
e2q_Syn_3	1.2223
e2d_Syn_3	0.22257
delta_Syn_4	0.9994
omega_Syn_4	1.0002
e1q_Syn_4	1.4065
e1d_Syn_4	0.00105
e2q_Syn_4	1.2451
e2d_Syn_4	0.00261
delta_Syn_5	0.9791
omega_Syn_5	1.0002
e1q_Syn_5	1.4938
e1d_Syn_5	0.00166
e2q_Syn_5	1.2784
e2d_Syn_5	0.00396
vm_Exc_1	1.06
vr1_Exc_1	1.1361
vr2_Exc_1	-0.00226
vf_Exc_1	1.111
vm_Exc_2	1.0474
vr1_Exc_2	2.6856
vr2_Exc_2	-0.00267
vf_Exc_2	2.6706
vm_Exc_3	1.0053
vr1_Exc_3	2.1496



vr2_Exc_3	-0.00214
vf_Exc_3	2.1398
vm_Exc_4	1.0822
vr1_Exc_4	2.8019
vr2_Exc_4	-0.00278
vf_Exc_4	2.7825
vm_Exc_5	1.0607
vr1_Exc_5	3.3691
vr2_Exc_5	-0.00333
vf_Exc_5	3.3303
tg1_Tg_1	3.456
tg2_Tg_1	3.4551
tg3_Tg_1	2.6576
tg1_Tg_2	0.39845
tg2_Tg_2	0.39857
tg3_Tg_2	0.30605

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.111
pm_Syn_1	3.4869
p_Syn_1	3.4817
q_Syn_1	-0.20416
vf_Syn_2	2.1398
pm_Syn_2	0.00181
p_Syn_2	0.00045
q_Syn_2	0.65245
vf_Syn_3	2.6706
pm_Syn_3	0.40171

p_Syn_3	0.39784
q_Syn_3	0.92067
vf_Syn_4	2.7825
pm_Syn_4	0.00154
p_Syn_4	5e-005
q_Syn_4	0.36798
vf_Syn_5	3.3303
pm_Syn_5	0.00283
p_Syn_5	-0.00025
q_Syn_5	0.48141
vref_Exc_1	1.0656
vref_Exc_2	1.1819
vref_Exc_3	1.1126
vref_Exc_4	1.2219
vref_Exc_5	1.2289
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
Bus 02	Bus 05	1	0.91553	0.11406	0.04442	0.10042
Bus 06	Bus 12	2	0.11454	0.0452	0.00166	0.00345
Bus 12	Bus 13	3	0.02904	0.01976	0.00025	0.00023
Bus 06	Bus 13	4	0.26491	0.14394	0.00535	0.01053
Bus 06	Bus 11	5	0.13583	0.12976	0.00298	0.00624
Bus 11	Bus 10	6	0.08494	0.09888	0.00133	0.00311
Bus 09	Bus 10	7	0.03912	-0.01656	6e-005	0.00015

Bus 09	Bus 14	8	0.10451	0.00324	0.00139	0.00296
Bus 14	Bus 13	9	-0.10041	-0.06803	0.00259	0.00528
Bus 07	Bus 09	10	0.34822	0.22366	0	0.01804
Bus 01	Bus 02	11	2.1818	-0.38091	0.08425	0.19859
Bus 03	Bus 02	12	-1.2048	0.19945	0.0698	0.2479
Bus 03	Bus 04	13	-0.10088	0.18956	0.00352	-0.02502
Bus 01	Bus 05	14	1.2998	0.17675	0.08326	0.29214
Bus 05	Bus 04	15	1.3152	-0.16529	0.02408	0.06362
Bus 02	Bus 04	16	0	0	0	0
Bus 05	Bus 06	17	0.66954	0.04187	0	0.10125
Bus 04	Bus 09	18	0.1968	0.02856	0	0.02163
Bus 04	Bus 07	19	0.34817	-0.09659	0	0.02735
Bus 08	Bus 07	20	5e-005	0.36798	0	0.02038

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 05	Bus 02	1	-0.87112	-0.01364	0.04442	0.10042
Bus 12	Bus 06	2	-0.11288	-0.04175	0.00166	0.00345
Bus 13	Bus 12	3	-0.02879	-0.01953	0.00025	0.00023
Bus 13	Bus 06	4	-0.25956	-0.13341	0.00535	0.01053
Bus 11	Bus 06	5	-0.13285	-0.12352	0.00298	0.00624
Bus 10	Bus 11	6	-0.08361	-0.09577	0.00133	0.00311
Bus 10	Bus 09	7	-0.03906	0.01672	6e-005	0.00015
Bus 14	Bus 09	8	-0.10312	-0.00027	0.00139	0.00296
Bus 13	Bus 14	9	0.10301	0.07331	0.00259	0.00528
Bus 09	Bus 07	10	-0.34822	-0.20561	0	0.01804

Bus 02	Bus 01	11	-2.0976	0.57949	0.08425	0.19859
Bus 02	Bus 03	12	1.2746	0.04845	0.0698	0.2479
Bus 04	Bus 03	13	0.1044	-0.21457	0.00352	-0.02502
Bus 05	Bus 01	14	-1.2166	0.11539	0.08326	0.29214
Bus 04	Bus 05	15	-1.2911	0.22891	0.02408	0.06362
Bus 04	Bus 02	16	0	0	0	0
Bus 06	Bus 05	17	-0.66954	0.05938	0	0.10125
Bus 09	Bus 04	18	-0.1968	-0.00693	0	0.02163
Bus 07	Bus 04	19	-0.34817	0.12394	0	0.02735
Bus 07	Bus 08	20	-5e-005	-0.3476	0	0.02038

#### GLOBAL SUMMARY REPORT

##### TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 3.9203  
 REACTIVE POWER [p.u.] 2.0424

##### TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 3.626  
 REACTIVE POWER [p.u.] 1.1396

##### TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 0.2943  
 REACTIVE POWER [p.u.] 0.90275

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโดยใช้โปรแกรม PSAT โดยการติดตั้ง FACTS เมื่อ  
ระบบเกิดสถานะผิดปกติ

POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.6

Author: Federico Milano, (c) 2002-2010

e-mail: Federico.Milano@uclm.es

website: <http://www.uclm.es/area/gsee/Web/Federico>

File: D:\Program1\โปรแกรม Psat\psat-2.1.6-mat\psat\tests\d\_014\_dyn\_114FULT.mdl

Date: 16-Sep-2013 20:08:54

NETWORK STATISTICS

Buses: 14

Lines: 16

Transformers: 4

Generators: 5

Loads: 11

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 3

Maximum P mismatch [p.u.] 3.4845

Maximum Q mismatch [p.u.] 0.74177

Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

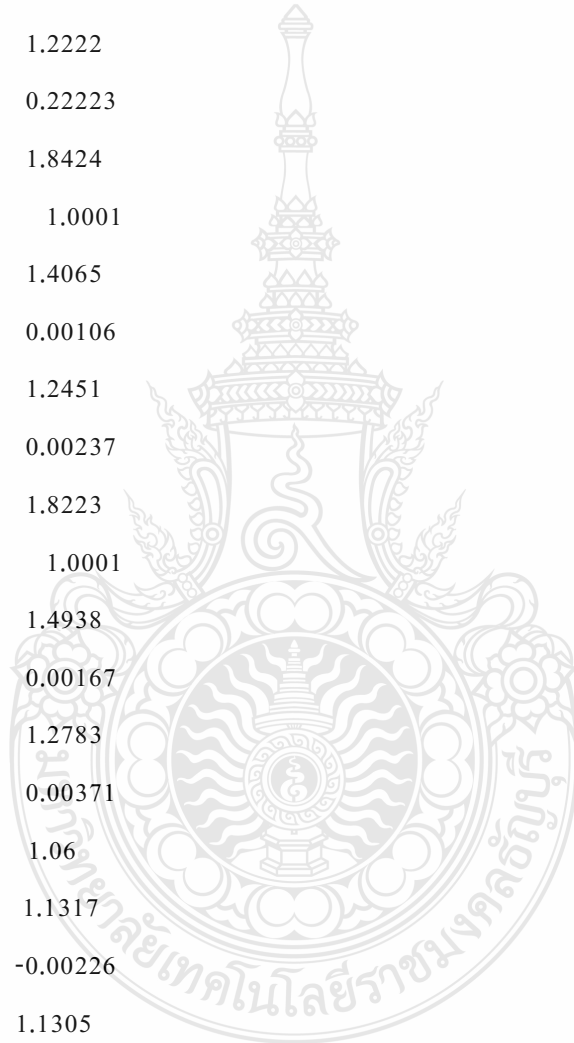


Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 01	1.06	2.2466	3.5203	-0.28197	0	0
Bus 02	1.0475	2.1238	0.4	0.9486	0.3038	0.1778
Bus 03	1.0051	1.8849	0	0.59736	1.3188	0.266
Bus 04	0.97707	1.9167	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	0.98635	1.9764	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.0604	1.8254	0	0.44433	0.1568	0.105
Bus 07	1.0219	1.8452	0	0	0	0
Bus 08	1.0818	1.8452	0	0.33402	0	0
Bus 09	0.9985	1.8077	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	0.99867	1.8039	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.024	1.8119	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.0365	1.8038	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.0265	1.8025	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.98472	1.7794	0	0	0.2086	0.07

#### STATE VARIABLES

delta_Syn_1	2.5672
omega_Syn_1	1.0001
e1q_Syn_1	1.0479
e2q_Syn_1	1.0379
e2d_Syn_1	0.12721
delta_Syn_2	1.8829
omega_Syn_2	1.0001
e1q_Syn_2	1.2097
e1d_Syn_2	0.00073

e2q_Syn_2	1.1459
e2d_Syn_2	0.00113
delta_Syn_3	2.3661
omega_Syn_3	1.0001
e1q_Syn_3	1.315
e1d_Syn_3	0.14278
e2q_Syn_3	1.2222
e2d_Syn_3	0.22223
delta_Syn_4	1.8424
omega_Syn_4	1.0001
e1q_Syn_4	1.4065
e1d_Syn_4	0.00106
e2q_Syn_4	1.2451
e2d_Syn_4	0.00237
delta_Syn_5	1.8223
omega_Syn_5	1.0001
e1q_Syn_5	1.4938
e1d_Syn_5	0.00167
e2q_Syn_5	1.2783
e2d_Syn_5	0.00371
vm_Exc_1	1.06
vr1_Exc_1	1.1317
vr2_Exc_1	-0.00226
vf_Exc_1	1.1305
vm_Exc_2	1.0475
vr1_Exc_2	2.6872
vr2_Exc_2	-0.00267
vf_Exc_2	2.6696
vm_Exc_3	1.0051



vr1_Exc_3	2.1508
vr2_Exc_3	-0.00214
vf_Exc_3	2.1419
vm_Exc_4	1.0818
vr1_Exc_4	2.803
vr2_Exc_4	-0.00278
vf_Exc_4	2.7826
vm_Exc_5	1.0604
vr1_Exc_5	3.3704
vr2_Exc_5	-0.00333
vf_Exc_5	3.3305
tg1_Tg_1	3.4806
tg2_Tg_1	3.4804
tg3_Tg_1	2.6507
tg1_Tg_2	0.40114
tg2_Tg_2	0.40112
tg3_Tg_2	0.30538

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.1305
pm_Syn_1	3.486
p_Syn_1	3.4845
q_Syn_1	-0.20297
vf_Syn_2	2.1419
pm_Syn_2	0.00181
p_Syn_2	-0.00053
q_Syn_2	0.65292
vf_Syn_3	2.6696

pm_Syn_3	0.40165
p_Syn_3	0.39678
q_Syn_3	0.92042
vf_Syn_4	2.7826
pm_Syn_4	0.00154
p_Syn_4	-0.00042
q_Syn_4	0.36798
vf_Syn_5	3.3305
pm_Syn_5	0.00283
p_Syn_5	-0.00061
q_Syn_5	0.48143
vref_Exc_1	1.0656
vref_Exc_2	1.1819
vref_Exc_3	1.1126
vref_Exc_4	1.2219
vref_Exc_5	1.2289
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 02	Bus 05	1	0.91578	0.11411	0.04444	0.1005
Bus 06	Bus 12	2	0.11452	0.04519	0.00166	0.00345
Bus 12	Bus 13	3	0.02904	0.01976	0.00025	0.00023
Bus 06	Bus 13	4	0.26488	0.14392	0.00535	0.01053
Bus 06	Bus 11	5	0.13582	0.12975	0.00298	0.00624

Bus 11	Bus 10	6	0.08494	0.09888	0.00133	0.00311
Bus 09	Bus 10	7	0.0391	-0.01656	6e-005	0.00015
Bus 09	Bus 14	8	0.10449	0.00324	0.00139	0.00296
Bus 14	Bus 13	9	-0.10041	-0.06802	0.00259	0.00528
Bus 07	Bus 09	10	0.34805	0.22363	0	0.01803
Bus 01	Bus 02	11	2.1839	-0.38014	0.08439	0.19903
Bus 03	Bus 02	12	-1.2054	0.19975	0.06988	0.24824
Bus 03	Bus 04	13	-0.10115	0.18975	0.00353	-0.02499
Bus 01	Bus 05	14	1.3006	0.17717	0.08336	0.29255
Bus 05	Bus 04	15	1.3158	-0.16536	0.0241	0.0637
Bus 02	Bus 04	16	0	0	0	0
Bus 05	Bus 06	17	0.66984	0.04192	0	0.10136
Bus 04	Bus 09	18	0.19688	0.02856	0	0.02165
Bus 04	Bus 07	19	0.34847	-0.09657	0	0.0274
Bus 08	Bus 07	20	-0.00042	0.36798	0	0.02038

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
Bus 05	Bus 02	1	-0.87134	-0.0136	0.04444	0.1005
Bus 12	Bus 06	2	-0.11287	-0.04174	0.00166	0.00345
Bus 13	Bus 12	3	-0.02879	-0.01953	0.00025	0.00023
Bus 13	Bus 06	4	-0.25954	-0.13339	0.00535	0.01053
Bus 11	Bus 06	5	-0.13284	-0.12351	0.00298	0.00624
Bus 10	Bus 11	6	-0.08361	-0.09576	0.00133	0.00311
Bus 10	Bus 09	7	-0.03904	0.01672	6e-005	0.00015
Bus 14	Bus 09	8	-0.1031	-0.00027	0.00139	0.00296

Bus 13	Bus 14	9	0.103	0.0733	0.00259	0.00528
Bus 09	Bus 07	10	-0.34805	-0.2056	0	0.01803
Bus 02	Bus 01	11	-2.0996	0.57917	0.08439	0.19903
Bus 02	Bus 03	12	1.2753	0.04849	0.06988	0.24824
Bus 04	Bus 03	13	0.10467	-0.21474	0.00353	-0.02499
Bus 05	Bus 01	14	-1.2172	0.11538	0.08336	0.29255
Bus 04	Bus 05	15	-1.2917	0.22906	0.0241	0.0637
Bus 04	Bus 02	16	0	0	0	0
Bus 06	Bus 05	17	-0.66984	0.05944	0	0.10136
Bus 09	Bus 04	18	-0.19688	-0.00691	0	0.02165
Bus 07	Bus 04	19	-0.34847	0.12397	0	0.0274
Bus 07	Bus 08	20	0.00042	-0.3476	0	0.02038

#### GLOBAL SUMMARY REPORT

#### TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 3.9203

REACTIVE POWER [p.u.] 2.0424

#### TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 3.626

REACTIVE POWER [p.u.] 1.1396

#### TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 0.2943

REACTIVE POWER [p.u.] 0.90275

## เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบหย่อน ชนิด SVC

### POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.6

Author: Federico Milano, (c) 2002-2010

e-mail: Federico.Milano@uclm.es

website: <http://www.uclm.es/area/gsee/Web/Federico>

File: D:\Program1\โปรแกรม Psat\psat-2.1.6-mat\psat\d\_014\_dyn\_114\_AVR\_PSS\_SVC.mdl

Date: 18-Sep-2013 15:12:43

### NETWORK STATISTICS

Buses: 14

Lines: 16

Transformers: 4

Generators: 5

Loads: 11

### SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 3

Maximum P mismatch [p.u.] 3.4277

Maximum Q mismatch [p.u.] 0.70911

Power rate [MVA] 100

### POWER FLOW RESULTS

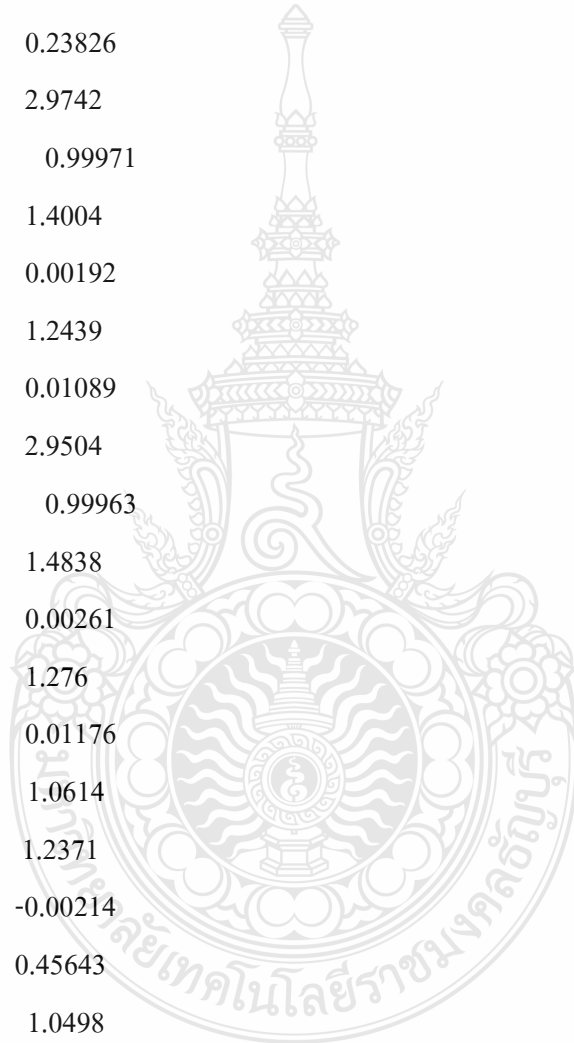
Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 01	1.0613	3.3594	3.5203	-0.28197	0	0
Bus 02	1.0498	3.2394	0.4	0.9486	0.3038	0.1778
Bus 03	1.0079	3.0047	0	0.59736	1.3188	0.266
Bus 04	0.98278	3.0339	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	0.99304	3.0923	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.0645	2.9439	0	0.44433	0.1568	0.105
Bus 07	1.0261	2.9642	0	0	0	0
Bus 08	1.0846	2.9659	0	0.33402	0	0
Bus 09	1.0028	2.9263	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	1.0029	2.9224	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.0281	2.9304	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.0405	2.9223	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.0305	2.921	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.9888	2.898	0	0	0.2086	0.07

#### STATE VARIABLES

delta_Syn_1	3.6752
omega_Syn_1	0.99991
e1q_Syn_1	1.0449
e2q_Syn_1	1.0385
e1d_Syn_1	0.12546
delta_Syn_2	3.0122
omega_Syn_2	0.99998
e1q_Syn_2	1.2043
e1d_Syn_2	0.00349
e2q_Syn_2	1.1434



e2d_Syn_2	0.00598
delta_Syn_3	3.5002
omega_Syn_3	0.99973
e1q_Syn_3	1.3047
e1d_Syn_3	0.15282
e2q_Syn_3	1.2149
e2d_Syn_3	0.23826
delta_Syn_4	2.9742
omega_Syn_4	0.99971
e1q_Syn_4	1.4004
e1d_Syn_4	0.00192
e2q_Syn_4	1.2439
e2d_Syn_4	0.01089
delta_Syn_5	2.9504
omega_Syn_5	0.99963
e1q_Syn_5	1.4838
e1d_Syn_5	0.00261
e2q_Syn_5	1.276
e2d_Syn_5	0.01176
vm_Exc_1	1.0614
vr1_Exc_1	1.2371
vr2_Exc_1	-0.00214
vf_Exc_1	0.45643
vm_Exc_2	1.0498
vr1_Exc_2	2.6179
vr2_Exc_2	-0.0026
vf_Exc_2	2.5968
vm_Exc_3	1.008
vr1_Exc_3	2.0794

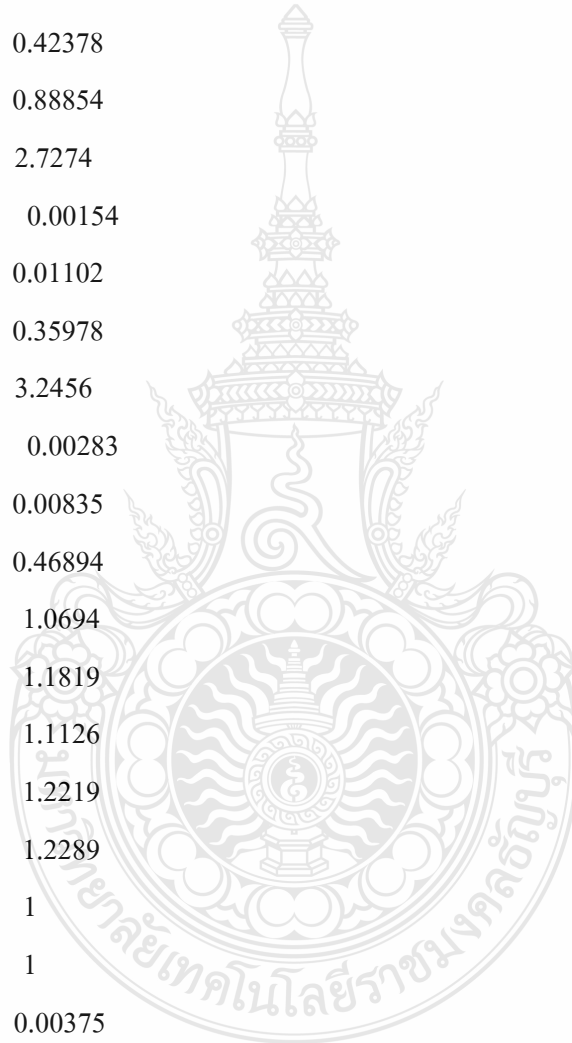


vr2_Exc_3	-0.0021
vf_Exc_3	2.0953
vm_Exc_4	1.0846
vr1_Exc_4	2.7342
vr2_Exc_4	-0.00274
vf_Exc_4	2.7274
vm_Exc_5	1.0645
vr1_Exc_5	3.2721
vr2_Exc_5	-0.00326
vf_Exc_5	3.2456
tg1_Tg_1	3.568
tg2_Tg_1	3.5505
tg3_Tg_1	2.6549
tg1_Tg_2	0.40531
tg2_Tg_2	0.40536
tg3_Tg_2	0.30652
v1_Pss_1	-49.9946
v2_Pss_1	0.00196
v3_Pss_1	-0.00304
va_Pss_1	0
alpha_Svc_1	1
vm_Svc_1	0.99357

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	0.45643
pm_Syn_1	3.507
p_Syn_1	3.4277
q_Syn_1	-0.23503

vf_Syn_2	2.0953
pm_Syn_2	0.00181
p_Syn_2	0.02698
q_Syn_2	0.62939
vf_Syn_3	2.5968
pm_Syn_3	0.40381
p_Syn_3	0.42378
q_Syn_3	0.88854
vf_Syn_4	2.7274
pm_Syn_4	0.00154
p_Syn_4	0.01102
q_Syn_4	0.35978
vf_Syn_5	3.2456
pm_Syn_5	0.00283
p_Syn_5	0.00835
q_Syn_5	0.46894
vref_Exc_1	1.0694
vref_Exc_2	1.1819
vref_Exc_3	1.1126
vref_Exc_4	1.2219
vref_Exc_5	1.2289
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
vss_Pss_1	0.00375
vref_Svc_1	1.0029
q_Svc_1	0.07703



## LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
Bus 02	Bus 05	1	0.91418	0.08905	0.04379	0.0982
Bus 06	Bus 12	2	0.11532	0.04544	0.00167	0.00347
Bus 12	Bus 13	3	0.02918	0.01982	0.00025	0.00023
Bus 06	Bus 13	4	0.26666	0.14459	0.00537	0.01058
Bus 06	Bus 11	5	0.13632	0.12989	0.00297	0.00622
Bus 11	Bus 10	6	0.08506	0.09883	0.00132	0.00309
Bus 09	Bus 10	7	0.04002	-0.01587	6e-005	0.00016
Bus 09	Bus 14	8	0.10577	0.00378	0.00142	0.00301
Bus 14	Bus 13	9	-0.10085	-0.06809	0.00259	0.00527
Bus 07	Bus 09	10	0.3543	0.22412	0	0.01836
Bus 01	Bus 02	11	2.1369	-0.38707	0.08076	0.18775
Bus 03	Bus 02	12	-1.1914	0.19408	0.06781	0.23932
Bus 03	Bus 04	13	-0.09507	0.1704	0.00293	-0.02681
Bus 01	Bus 05	14	1.2908	0.15204	0.08147	0.28435
Bus 05	Bus 04	15	1.3103	-0.14015	0.02348	0.06158
Bus 02	Bus 04	16	0	0	0	0
Bus 05	Bus 06	17	0.66514	0.05376	0	0.09885
Bus 04	Bus 09	18	0.19632	0.03133	0	0.02137
Bus 04	Bus 07	19	0.34328	-0.09017	0	0.02609
Bus 08	Bus 07	20	0.01102	0.35978	0	0.0194

## LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
Bus 05	Bus 02	1	-0.87039	0.00915	0.04379	0.0982
Bus 12	Bus 06	2	-0.11366	-0.04197	0.00167	0.00347
Bus 13	Bus 12	3	-0.02893	-0.01959	0.00025	0.00023
Bus 13	Bus 06	4	-0.26129	-0.13401	0.00537	0.01058
Bus 11	Bus 06	5	-0.13335	-0.12367	0.00297	0.00622
Bus 10	Bus 11	6	-0.08374	-0.09574	0.00132	0.00309
Bus 10	Bus 09	7	-0.03996	0.01603	6e-005	0.00016
Bus 14	Bus 09	8	-0.10435	-0.00077	0.00142	0.00301
Bus 13	Bus 14	9	0.10344	0.07336	0.00259	0.00527
Bus 09	Bus 07	10	-0.3543	-0.20575	0	0.01836
Bus 02	Bus 01	11	-2.0561	0.57482	0.08076	0.18775
Bus 02	Bus 03	12	1.2592	0.04524	0.06781	0.23932
Bus 04	Bus 03	13	0.098	-0.19722	0.00293	-0.02681
Bus 05	Bus 01	14	-1.2093	0.13231	0.08147	0.28435
Bus 04	Bus 05	15	-1.2868	0.20174	0.02348	0.06158
Bus 04	Bus 02	16	0	0	0	0
Bus 06	Bus 05	17	-0.66514	-0.04509	0	0.09885
Bus 09	Bus 04	18	-0.19632	-0.00996	0	0.02137
Bus 07	Bus 04	19	-0.34328	0.11626	0	0.02609
Bus 07	Bus 08	20	-0.01102	-0.34038	0	0.0194

## GLOBAL SUMMARY REPORT

### TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.]	3.9203
REACTIVE POWER [p.u.]	2.0424

### TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.]	3.626
REACTIVE POWER [p.u.]	1.1396

### TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.]	0.2943
REACTIVE POWER [p.u.]	0.90275

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบหยุน ชนิด SSSC

### POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.6

Author: Federico Milano, (c) 2002-2010

e-mail: Federico.Milano@uclm.es

website: <http://www.uclm.es/area/gsee/Web/Federico>

File: D:\Program1\โปรแกรม Psat\psat-2.1.6-mat\psat\d\_014\_dyn\_114\_AVR\_SSSC.mdl

Date: 10-Oct-2013 00:33:27

## NETWORK STATISTICS

Buses: 14  
Lines: 16  
Transformers: 4  
Generators: 5  
Loads: 11

## SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 3  
Maximum P mismatch [p.u.] 3.4602  
Maximum Q mismatch [p.u.] 1.0455  
Power rate [MVA] 100

## POWER FLOW RESULTS

Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 01	1.06	0.65498	3.4603	-0.27708	0	0
Bus 02	1.045	0.52138	0.4	1.2233	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	0.34146	0	0.32574	1.3188	0.266
Bus 04	0.99822	0.39734	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	1.0034	0.43314	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	0.29113	0	0.44194	0.1568	0.105
Bus 07	1.0362	0.32212	0	0	0	0
Bus 08	1.09	0.32213	0	0.33274	0	0

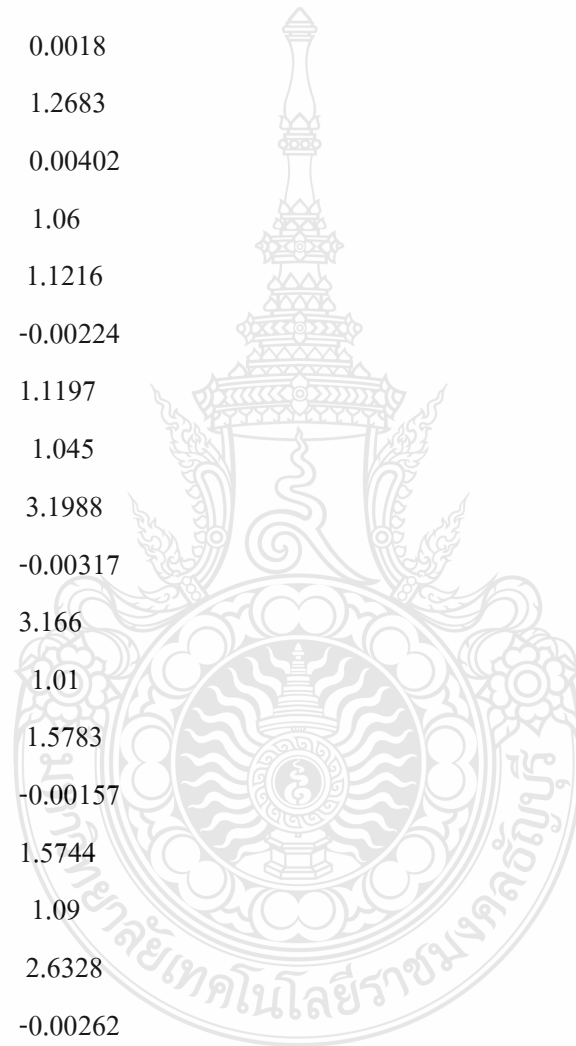
Bus 09	1.0132	0.28228	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	1.0124	0.27678	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.0358	0.28112	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.0462	0.27015	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.0366	0.26931	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.99712	0.25055	0	0	0.2086	0.07

#### STATE VARIABLES

delta_Syn_1	0.9756
omega_Syn_1	0.99994
e1q_Syn_1	1.0443
e2q_Syn_1	1.0352
e2d_Syn_1	0.12721
delta_Syn_2	0.34041
omega_Syn_2	0.99994
e1q_Syn_2	1.1116
e1d_Syn_2	0.00034
e2q_Syn_2	1.0799
e2d_Syn_2	0.00053
delta_Syn_3	0.72763
omega_Syn_3	0.99994
e1q_Syn_3	1.4092
e1d_Syn_3	0.12278
e2q_Syn_3	1.2888
e2d_Syn_3	0.19111
delta_Syn_4	0.32022
omega_Syn_4	0.99994
e1q_Syn_4	1.3814



e1d_Syn_4	0.00118
e2q_Syn_4	1.2365
e2d_Syn_4	0.00264
delta_Syn_5	0.28897
omega_Syn_5	0.99994
e1q_Syn_5	1.4643
e1d_Syn_5	0.0018
e2q_Syn_5	1.2683
e2d_Syn_5	0.00402
vm_Exc_1	1.06
vr1_Exc_1	1.1216
vr2_Exc_1	-0.00224
vf_Exc_1	1.1197
vm_Exc_2	1.045
vr1_Exc_2	3.1988
vr2_Exc_2	-0.00317
vf_Exc_2	3.166
vm_Exc_3	1.01
vr1_Exc_3	1.5783
vr2_Exc_3	-0.00157
vf_Exc_3	1.5744
vm_Exc_4	1.09
vr1_Exc_4	2.6328
vr2_Exc_4	-0.00262
vf_Exc_4	2.6163
vm_Exc_5	1.07
vr1_Exc_5	3.1667
vr2_Exc_5	-0.00314
vf_Exc_5	3.1351



tg1_Tg_1	3.4793
tg2_Tg_1	3.48
tg3_Tg_1	2.6246
tg1_Tg_2	0.40969
tg2_Tg_2	0.40976
tg3_Tg_2	0.30943
vcs_Sssc_1	0.02088

#### OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.1197
pm_Syn_1	3.4598
p_Syn_1	3.4602
q_Syn_1	-0.2771
vf_Syn_2	1.5744
pm_Syn_2	0.00054
p_Syn_2	4e-005
q_Syn_2	0.32573
vf_Syn_3	3.166
pm_Syn_3	0.40777
p_Syn_3	0.39999
q_Syn_3	1.2233
vf_Syn_4	2.6163
pm_Syn_4	0.00153
p_Syn_4	2e-005
q_Syn_4	0.33274
vf_Syn_5	3.1351
pm_Syn_5	0.0028
p_Syn_5	2e-005

q_Syn_5	0.44194
vref_Exc_1	1.0656
vref_Exc_2	1.2049
vref_Exc_3	1.0889
vref_Exc_4	1.2216
vref_Exc_5	1.2283
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
v0_Sssc_1	0.02088
pref_Sssc_1	-1.0601

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 02	Bus 05	1	0.56089	0.07134	0.01683	0.0157
Bus 06	Bus 12	2	0.11388	0.04595	0.00162	0.00337
Bus 12	Bus 13	3	0.02686	0.02018	0.00023	0.00021
Bus 06	Bus 13	4	0.25913	0.14446	0.00509	0.01001
Bus 06	Bus 11	5	0.11712	0.12849	0.00251	0.00525
Bus 11	Bus 10	6	0.06561	0.09804	0.00106	0.00249
Bus 09	Bus 10	7	0.06158	-0.01402	0.00012	0.00033
Bus 09	Bus 14	8	0.12093	0.0051	0.00181	0.00386
Bus 14	Bus 13	9	-0.08948	-0.06876	0.00219	0.00446
Bus 07	Bus 09	10	0.38008	0.22492	0	0.01998
Bus 01	Bus 02	11	2.3808	-0.37394	0.09981	0.24625
Bus 03	Bus 02	12	-1.0601	-0.10278	0	0.19813
Bus 03	Bus 04	13	-0.25867	0.1625	0.00653	-0.01823

Bus 01	Bus 05	14	1.0794	0.09684	0.05677	0.18193
Bus 05	Bus 04	15	0.81336	-0.126	0.00896	0.01545
Bus 02	Bus 04	16	0.7562	0.0531	0.03072	0.05415
Bus 05	Bus 06	17	0.6469	0.07414	0	0.09219
Bus 04	Bus 09	18	0.21543	0.04388	0	0.02533
Bus 04	Bus 07	19	0.38006	-0.06164	0	0.02976
Bus 08	Bus 07	20	2e-005	0.33274	0	0.01641

### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 05	Bus 02	1	-0.54406	-0.05564	0.01683	0.0157
Bus 12	Bus 06	2	-0.11226	-0.04258	0.00162	0.00337
Bus 13	Bus 12	3	-0.02663	-0.01997	0.00023	0.00021
Bus 13	Bus 06	4	-0.25404	-0.13444	0.00509	0.01001
Bus 11	Bus 06	5	-0.11461	-0.12324	0.00251	0.00525
Bus 10	Bus 11	6	-0.06455	-0.09554	0.00106	0.00249
Bus 10	Bus 09	7	-0.06145	0.01434	0.00012	0.00033
Bus 14	Bus 09	8	-0.11912	-0.00124	0.00181	0.00386
Bus 13	Bus 14	9	0.09167	0.07321	0.00219	0.00446
Bus 09	Bus 07	10	-0.38008	-0.20494	0	0.01998
Bus 02	Bus 01	11	-2.281	0.62019	0.09981	0.24625
Bus 02	Bus 03	12	1.0601	0.30091	0	0.19813
Bus 04	Bus 03	13	0.26519	-0.18073	0.00653	-0.01823
Bus 05	Bus 01	14	-1.0226	0.08509	0.05677	0.18193
Bus 04	Bus 05	15	-0.8044	0.14144	0.00896	0.01545
Bus 04	Bus 02	16	-0.72549	0.00105	0.03072	0.05415

Bus 06	Bus 05	17	-0.6469	0.01805	0	0.09219
Bus 09	Bus 04	18	-0.21543	-0.01855	0	0.02533
Bus 07	Bus 04	19	-0.38006	0.0914	0	0.02976
Bus 07	Bus 08	20	-2e-005	-0.31632	0	0.01641

## GLOBAL SUMMARY REPORT

### TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.]      3.8603  
 REACTIVE POWER [p.u.]      2.0467

### TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.]      3.626  
 REACTIVE POWER [p.u.]      1.1396

### TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.]      0.23425  
 REACTIVE POWER [p.u.]      0.90709

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบหย่อน ชนิด TCSC

## POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.6

Author: Federico Milano, (c) 2002-2010

e-mail: Federico.Milano@uclm.es

website: <http://www.uclm.es/area/gsee/Web/Federico>

File: D:\Program1\โปรแกรม Psat\psat-2.1.6-mat\psat\d\_014\_dyn\_114\_AVR\_TCSC.mdl

Date: 17-Sep-2013 16:59:59

#### NETWORK STATISTICS

Buses: 14  
Lines: 16  
Transformers: 4  
Generators: 5  
Loads: 11

#### SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 3  
Maximum P mismatch [p.u.] 0  
Maximum Q mismatch [p.u.] 0  
Power rate [MVA] 100

#### POWER FLOW RESULTS

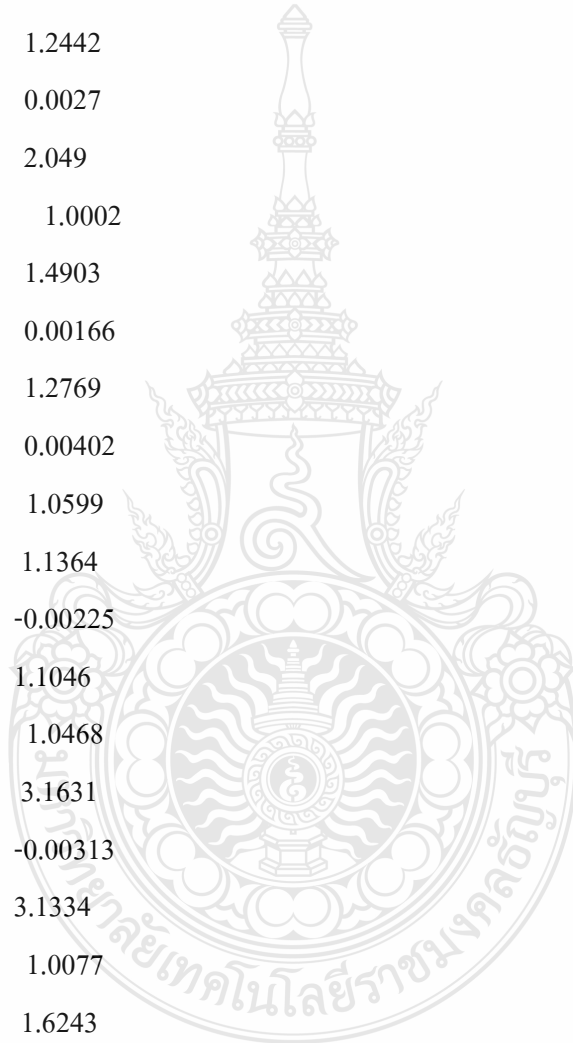
Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 01	1.0599	2.4633	3.4603	-0.27708	0	0
Bus 02	1.0467	2.3429	0.4	1.2233	0.3038	0.1778
Bus 03	1.0077	2.1257	0	0.32574	1.3188	0.266

Bus 04	0.97854	2.1448	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	0.98771	2.2015	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.061	2.0517	0	0.44194	0.1568	0.105
Bus 07	1.0229	2.073	0	0	0	0
Bus 08	1.0823	2.073	0	0.33274	0	0
Bus 09	0.99954	2.0352	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	0.99963	2.0311	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.0248	2.0386	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.037	2.0302	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.0271	2.0289	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.98556	2.0064	0	0	0.2086	0.07

#### STATE VARIABLES

delta_Syn_1	2.7769
omega_Syn_1	1.0002
e1q_Syn_1	1.0484
e2q_Syn_1	1.0389
e2d_Syn_1	0.12452
delta_Syn_2	2.1244
omega_Syn_2	1.0003
e1q_Syn_2	1.1178
e1d_Syn_2	0.00014
e2q_Syn_2	1.0835
e2d_Syn_2	0.00024
delta_Syn_3	2.5491
omega_Syn_3	1.0002
e1q_Syn_3	1.4044
e1d_Syn_3	0.1229

e2q_Syn_3	1.2861
e2d_Syn_3	0.19131
delta_Syn_4	2.0708
omega_Syn_4	1.0002
e1q_Syn_4	1.4043
e1d_Syn_4	0.00105
e2q_Syn_4	1.2442
e2d_Syn_4	0.0027
delta_Syn_5	2.049
omega_Syn_5	1.0002
e1q_Syn_5	1.4903
e1d_Syn_5	0.00166
e2q_Syn_5	1.2769
e2d_Syn_5	0.00402
vm_Exc_1	1.0599
vr1_Exc_1	1.1364
vr2_Exc_1	-0.00225
vf_Exc_1	1.1046
vm_Exc_2	1.0468
vr1_Exc_2	3.1631
vr2_Exc_2	-0.00313
vf_Exc_2	3.1334
vm_Exc_3	1.0077
vr1_Exc_3	1.6243
vr2_Exc_3	-0.00162
vf_Exc_3	1.618
vm_Exc_4	1.0823
vr1_Exc_4	2.7871
vr2_Exc_4	-0.00277

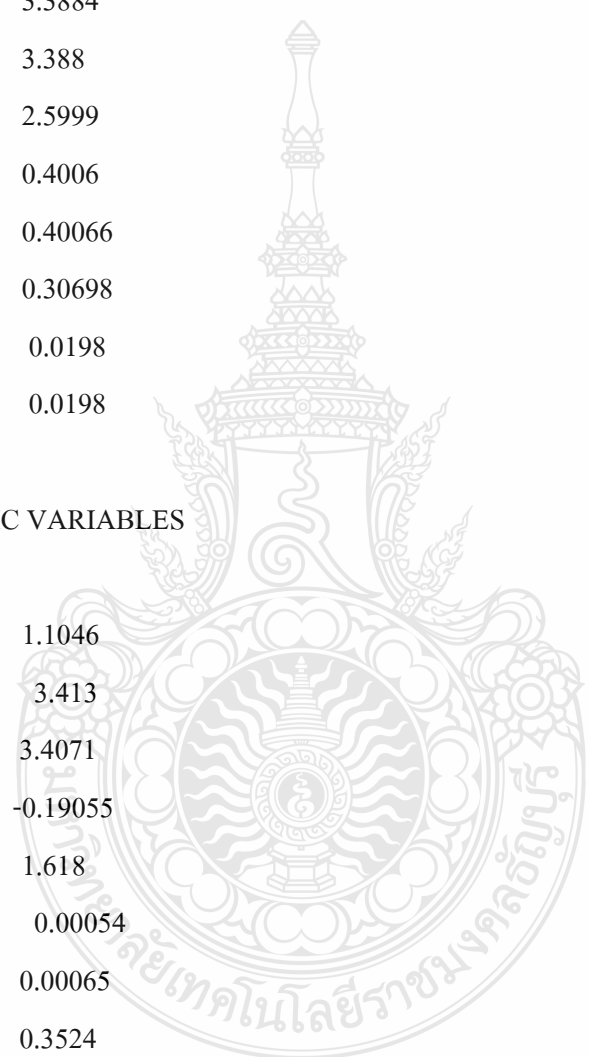




vf_Exc_4	2.7688
vm_Exc_5	1.061
vr1_Exc_5	3.3472
vr2_Exc_5	-0.00331
vf_Exc_5	3.31
tg1_Tg_1	3.3884
tg2_Tg_1	3.388
tg3_Tg_1	2.5999
tg1_Tg_2	0.4006
tg2_Tg_2	0.40066
tg3_Tg_2	0.30698
x1_Tcsc_1	0.0198
x2_Tcsc_1	0.0198

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.1046
pm_Syn_1	3.413
p_Syn_1	3.4071
q_Syn_1	-0.19055
vf_Syn_2	1.618
pm_Syn_2	0.00054
p_Syn_2	0.00065
q_Syn_2	0.3524
vf_Syn_3	3.1334
pm_Syn_3	0.40314
p_Syn_3	0.3966
q_Syn_3	1.2045
vf_Syn_4	2.7688



pm_Syn_4	0.00153
p_Syn_4	0.00018
q_Syn_4	0.36507
vf_Syn_5	3.31
pm_Syn_5	0.0028
p_Syn_5	-0.00014
q_Syn_5	0.47723
vref_Exc_1	1.0656
vref_Exc_2	1.2049
vref_Exc_3	1.0889
vref_Exc_4	1.2216
vref_Exc_5	1.2283
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
x0_Tcsc_1	0.0198
pref_Tcsc_1	0

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 02	Bus 05	1	0.87949	0.10806	0.04104	0.09009
Bus 06	Bus 12	2	0.11431	0.04528	0.00165	0.00344
Bus 12	Bus 13	3	0.02874	0.01983	0.00025	0.00023
Bus 06	Bus 13	4	0.26383	0.14399	0.00531	0.01046
Bus 06	Bus 11	5	0.13335	0.12981	0.00292	0.00612
Bus 11	Bus 10	6	0.08246	0.09903	0.0013	0.00304
Bus 09	Bus 10	7	0.04174	-0.01666	6e-005	0.00017

Bus 09	Bus 14	8	0.1063	0.00319	0.00144	0.00306
Bus 14	Bus 13	9	-0.09894	-0.06825	0.00254	0.00518
Bus 07	Bus 09	10	0.35141	0.22335	0	0.01823
Bus 01	Bus 02	11	2.1443	-0.36015	0.08121	0.18935
Bus 03	Bus 02	12	-1.2754	-0.08191	0	0.28661
Bus 03	Bus 04	13	-0.03666	0.16953	0.0024	-0.02801
Bus 01	Bus 05	14	1.2628	0.16961	0.07856	0.27267
Bus 05	Bus 04	15	1.2538	-0.1518	0.0218	0.05639
Bus 02	Bus 04	16	0	0	0	0
Bus 05	Bus 06	17	0.66578	0.045	0	0.09992
Bus 04	Bus 09	18	0.1986	0.0296	0	0.02199
Bus 04	Bus 07	19	0.35122	-0.09407	0	0.02762
Bus 08	Bus 07	20	0.00018	0.36507	0	0.02004

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 05	Bus 02	1	-0.83845	-0.01797	0.04104	0.09009
Bus 12	Bus 06	2	-0.11266	-0.04184	0.00165	0.00344
Bus 13	Bus 12	3	-0.02849	-0.0196	0.00025	0.00023
Bus 13	Bus 06	4	-0.25852	-0.13354	0.00531	0.01046
Bus 11	Bus 06	5	-0.13043	-0.12369	0.00292	0.00612
Bus 10	Bus 11	6	-0.08117	-0.09599	0.0013	0.00304
Bus 10	Bus 09	7	-0.04167	0.01683	6e-005	0.00017
Bus 14	Bus 09	8	-0.10486	-0.00013	0.00144	0.00306
Bus 13	Bus 14	9	0.10148	0.07343	0.00254	0.00518
Bus 09	Bus 07	10	-0.35141	-0.20512	0	0.01823

Bus 02	Bus 01	11	-2.0631	0.5495	0.08121	0.18935
Bus 02	Bus 03	12	1.2754	0.36853	0	0.28661
Bus 04	Bus 03	13	0.03906	-0.19754	0.0024	-0.02801
Bus 05	Bus 01	14	-1.1842	0.10306	0.07856	0.27267
Bus 04	Bus 05	15	-1.232	0.20819	0.0218	0.05639
Bus 04	Bus 02	16	0	0	0	0
Bus 06	Bus 05	17	-0.66578	0.05492	0	0.09992
Bus 09	Bus 04	18	-0.1986	-0.00762	0	0.02199
Bus 07	Bus 04	19	-0.35122	0.12168	0	0.02762
Bus 07	Bus 08	20	-0.00018	-0.34503	0	0.02004

#### GLOBAL SUMMARY REPORT

##### TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 3.8603  
 REACTIVE POWER [p.u.] 2.0467

##### TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 3.626  
 REACTIVE POWER [p.u.] 1.1396

##### TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 0.23425  
 REACTIVE POWER [p.u.] 0.90709





RMUTCON  
Rajamangala University of Technology  
Bangkok Thailand 10130

## Abstract

The 4<sup>th</sup> Rajamangala University of Technology International Conference  
"Technology & Innovation Development for Sustainability"



July 15-16, 2013

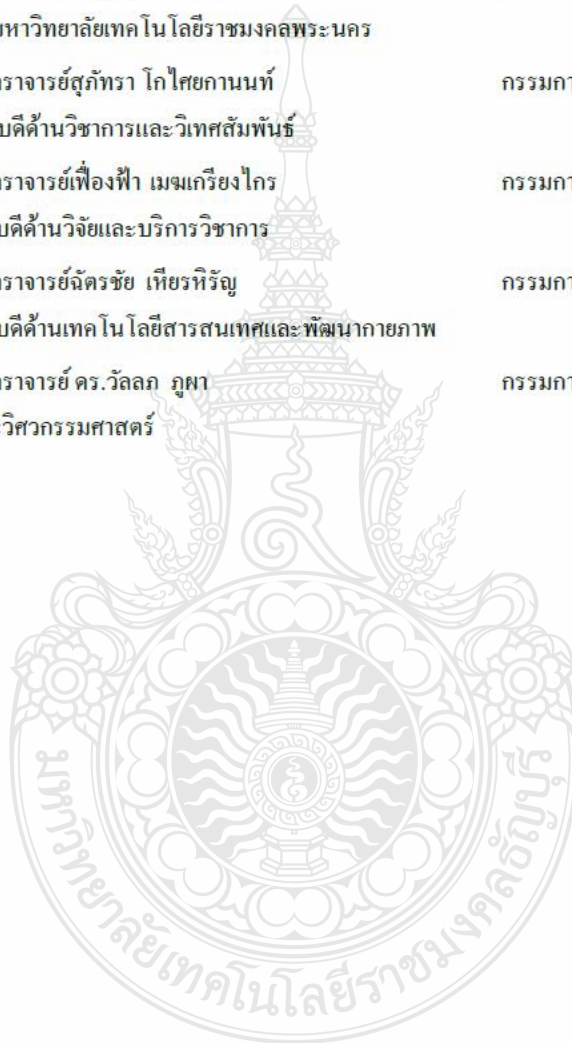
Bangkok Convention Centre

Centara Grand at CentralWorld, Bangkok, Thailand



### คณะกรรมการอำนวยการจัดงาน EENET2013

- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ดวงสุดา เตโชติรส<br>อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร            | ประธานกรรมการ       |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภัทรา โกไศยกานนท์<br>รองอธิการบดีด้านวิชาการและพิเศษสัมพันธ์        | กรรมการ             |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฟื่องฟ้า เมฆเกรียงไกร<br>รองอธิการบดีด้านวิจัยและบริการวิชาการ       | กรรมการ             |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย เขียวหิรัญ<br>รองอธิการบดีด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและพัฒนาคุณภาพ | กรรมการ             |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ ภูผา<br>คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์                              | กรรมการและเลขานุการ |





## คณะกรรมการวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

- |   |                     |
|---|---------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล                       | ประธานกรรมการ       |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.ชัช เกิดชื่น<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน                       | กรรมการ             |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ | กรรมการ             |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ พงศ์พฤชธาตุ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย            | กรรมการ             |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน             | กรรมการ             |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี     | กรรมการ             |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสิทธิ์ นางทิน<br>สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน                             | กรรมการ             |
| 8. อาจารย์ ดร.สุริยา แก้วอาษา<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน                           | กรรมการ             |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา                  | กรรมการ             |
| 10. อาจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ               | กรรมการ             |
| 11. อาจารย์ ดร.นัฐ โชติ รักษ์ไทยเจริญชีพ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร               | กรรมการ             |
| 12. อาจารย์ประหยัด กองสุข<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก                            | กรรมการ             |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ         | กรรมการและเลขานุการ |





## คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ประจำเครือข่าย

- |   |               |
|---|---------------|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ ภูพา<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร        | ประธานกรรมการ |
| 2. อาจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร             | กรรมการ       |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วารุณี ศรีสงคราม<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ | กรรมการ       |
| 4. อาจารย์ ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน       | กรรมการ       |
| 5. อาจารย์ ดร.สายชล ชูคเจ้อจิ้น<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ           | กรรมการ       |
| 6. อาจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี            | กรรมการ       |
| 7. อาจารย์ณรงค์ นันทกุศล<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา                   | กรรมการ       |
| 8. อาจารย์ ดร.วิวัฒน์ ทิพย์จรรย์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา           | กรรมการ       |
| 9. อาจารย์พิทักษ์ บุญนุ่น<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา                  | กรรมการ       |
| 10. อาจารย์ณรงค์ฤทธิ์ ทิมพิ์คำวงศ์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา         | กรรมการ       |
| 11. อาจารย์จิระยุทธ เนื่องรินทร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน            | กรรมการ       |
| 12. อาจารย์วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ          | กรรมการ       |
| 13. อาจารย์ภัทรพงศ์ อัญชันภาติ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก           | กรรมการ       |



- |   |                     |
|---|---------------------|
| 14. อาจารย์ ดร.ประสพโชค ให่ทองคำ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ | กรรมการ             |
| 15. อาจารย์ปฎิวัติ บุญมา<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ           | กรรมการ             |
| 16. อาจารย์ทศพร พรหมสิทธิ์<br>สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน                        | กรรมการ             |
| 17. อาจารย์ ดร.นัฐ โชติ รักไทยเจริญชีพ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร | กรรมการและเลขานุการ |

#### คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านประชาสัมพันธ์

- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1. อาจารย์ ดร.ฉัฐพงศ์ พันธนะ             | ประธานกรรมการ       |
| 2. อาจารย์ยุทธนา สรวลสวรรค์              | กรรมการ             |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิศักดิ์ วรรคิชู | กรรมการ             |
| 4. อาจารย์อภิษฐา ทองรักษ์                | กรรมการ             |
| 5. อาจารย์ ดร.อดิศร ก้อนวัน              | กรรมการ             |
| 6. นายสมยศ แสงจันทร์                     | กรรมการ             |
| 7. อาจารย์เกรียงไกร เหลืองอำพล           | กรรมการและเลขานุการ |

#### คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านบทความ

- |   |               |
|---|---------------|
| 1. อาจารย์ ดร.นัฐ โชติ รักไทยเจริญชีพ   | ประธานกรรมการ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์โกศล นิธิโสภาน     | กรรมการ       |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์ วัฒนีกำธร | กรรมการ       |
| 4. อาจารย์ ดร.อดิศร ก้อนวัน             | กรรมการ       |
| 5. อาจารย์เกรียงไกร เหลืองอำพล          | กรรมการ       |
| 6. อาจารย์จตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล       | กรรมการ       |
| 7. อาจารย์พูนศรี วรรณการ                | กรรมการ       |



8. อาจารย์พนา คูตีตากร	กรรมการ
9. อาจารย์อดิศักดิ์ วิริยกรรม	กรรมการ
10. อาจารย์นิลमित นิลาศ	กรรมการ
11. อาจารย์ธนะกิจ วัฒนิกำธร	กรรมการ
12. อาจารย์สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์	กรรมการและเลขานุการ

### คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านจัดทำเล่มบทความ

1. อาจารย์อรุณ ชลิ่งสุทธิ	ประธานกรรมการ
2. อาจารย์สมเกียรติ ทองแก้ว	กรรมการ
3. นายสมยศ แสงจันทร์	กรรมการ
4. อาจารย์มนัส บุญเทียรทอง	กรรมการ
5. อาจารย์เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ	กรรมการ
6. อาจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	กรรมการและเลขานุการ

### คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านสถานที่

1. อาจารย์ทง ลานธารทอง	ประธานกรรมการ
2. อาจารย์อดิศักดิ์ วิริยกรรม	กรรมการ
3. อาจารย์พูนศรี วรรณการ	กรรมการ
4. อาจารย์จตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	กรรมการ
5. อาจารย์สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์	กรรมการ
6. อาจารย์พนา คูตีตากร	กรรมการ
7. อาจารย์มนัส บุญเทียรทอง	กรรมการและเลขานุการ



### คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านต้อนรับ

1. นางจุรีพร แสนสัง	ประธานกรรมการ
2. นางอัจฉรา เหลือพงษ์	กรรมการ
3. อาจารย์อภิชญา ทองรักษ์	กรรมการ
4. นางสาววรรณรัฐ ประจิมนอก	กรรมการ
5. นางนงเยาว์ เขียววิจิตร	กรรมการ
6. นางสาวนงนภัศ สายแก้ว	กรรมการ
7. นางสาวสุภาภรณ์ ลาทุม	กรรมการและเลขานุการ

### คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านงานทั่วไป

1. อาจารย์สมเกียรติ ทองแก้ว	ประธานกรรมการ
2. นายสมยศ แสงจันทร์	กรรมการ
3. นางสาวศิริกุล ภู่อานงค์	กรรมการ
4. นายไพฑูรย์ อาราเบีย	กรรมการ
5. นายกิตติศักดิ์ กิ่งแก้ว	กรรมการ
6. นายปิยะพันธ์ บำเรอจิตร	กรรมการ
7. นางกัญญ์ชิสตา ธัญสิประเสริฐ	กรรมการและเลขานุการ

### คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านทะเบียน

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพียรประสิทธิ์	ประธานกรรมการ
2. นางวิไลวรรณ คำปาน	กรรมการ
3. นางนวพร พานอุป	กรรมการ
4. นางสาวเนตรนภา แสงเงิน	กรรมการ
5. นางสมศรี จันทร์ชนะ	กรรมการ
6. นางสาวแสงเดือน พุทธิง	กรรมการและเลขานุการ



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5  
*Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET2013)*



## คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2013 ด้านติดตามและประเมินผล

1. นางรศนา เหล่าสินชัย
2. นางกุสุมา ระจับภัย

ประธานกรรมการ  
กรรมการและเลขานุการ







การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 5  
THE 5<sup>TH</sup> ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK OF RAJAMANGALA  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ( EENET2013 )



- PW01** การจัดรูปแบบสายป้อนในระบบจำหน่ายที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายชนิด เพื่อลดความสูญเสียโดยใช้วิธีการเชิงพันธุกรรม (บทความดีเด่น)
- PW02** การประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังเพื่อกำหนดวิธีการบำรุงรักษากรณีศึกษาของการไฟฟ้านครหลวง
- PW03** การหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลเพื่อลดกำลังงานสูญเสีย
- PW04** การประยุกต์ใช้วิธีพีชคณิตในการประเมินมูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องของกลุ่มพาณิชย์กรรมในประเทศไทย
- PW05** เครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบแรงดันไฟฟ้า สูงความถี่สูงกำลังไฟฟ้าต่ำ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าพร้อม
- PW06** การติดตั้ง AVR และตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิโดยใช้ NSGA-II
- PW07** การศึกษาแบบจำลองกับคิกไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV
- PW08** การวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งฟอลต์ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า
- PW09** การประเมินสมรรถนะไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 24 kV (บทความชมเชย)
- PW10** การติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยค่าที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิด้วยโปรแกรม PSO-TVAC
- PW11** การหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมของ AVR ในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิด้วย PSO
- PW12** การวิเคราะห์การวัดคริตีที่เหมาะสมสำหรับสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย
- PW13** การกำหนดค่าแห่งการติดตั้งฮาร์โมนิกส์มีเตอร์โดยใช้วิธีการปรับปรุงของ KCA



บทความสาขาไฟฟ้ากำลัง ( PW )





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5  
THE 5<sup>TH</sup> ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK OF RAJAMANGALA  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ( EENET2013 )



- FW14** การศึกษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย SVC แบบมีดีเอ็มโวลต์ปรับค่าได้
- FW15** ผลกระทบการแกว่งของความถี่ในระบบไฟฟ้า กำลังเมื่อโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง
- FW16** ผลกระทบของโหลดจำลองต่อการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในระบบจำหน่ายปริมภูมิ
- FW17** รดรางไฟฟ้าโดยใช้ดีเอ็นเออินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส
- FW18** การศึกษาการตรวจจับการเกิดดีซาร์บางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามหลักการปล่อยสัญญาณอะคูสติก ด้วยโปรแกรม Lab View (บทความชมเชย)
- FW19** การเปรียบเทียบอุปกรณ์ป้องกันสำหรับโทรศัพท์ของผู้ให้บริการเนื่องจากการเกิดฟอลต์และแรงดันสัฟไฟต์ผ่าในระบบ 22 กิโลโวลต์
- FW20** การวางแผนบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมโรงสีข้าว
- FW21** การศึกษาและเปรียบเทียบรูปทรงของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ในบริเวณพื้นที่สิ่งเปราะเปื้อน
- FW22** ตัวอย่างการประยุกต์การวิเคราะห์การวัดผลตอบสนองทางความถี่ ของหม้อแปลง



บทความสาขาไฟฟ้ากำลัง ( FW )







## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

### บทความวิจัย

- ไฟฟ้ากำลัง
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ไฟฟ้าสื่อสารและโทรคมนาคม
- ระบบควบคุมและการวัดคุม
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

### บทความวิชาการ

27-29 มีนาคม 2556 โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

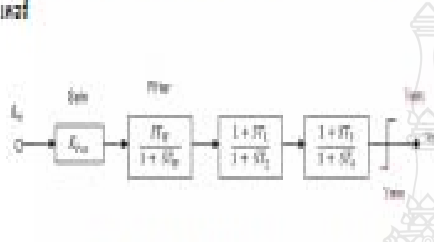
**EENET2013**



$$\frac{\Delta \delta}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(PU) - P_e(PU) \quad (2)$$

2.2 ตัวชี้วัดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (PSS)

ค่าเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Stability margin, SM) หรือ (SMC) เป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ และอื่น ๆ จะอยู่ในสถานะที่มั่นคงหรือไม่หรือไม่



รูปที่ 1 ส่วนหนึ่งของระบบควบคุมกำลังไฟฟ้า

สมการ (2) เป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (Automatic Voltage Regulator, AVR) ในการควบคุมของระบบไฟฟ้า ส่วนที่ 1 (2.2 - 2.0) หากเกิดการรบกวนในระบบจะเปลี่ยนค่าของตัวชี้วัด 18 โดยที่การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวชี้วัด

$$T(s) = K_s \frac{1+sT1}{1+sT2} \quad (4)$$

ค่าที่วางอยู่ที่ 18 และ 22 เป็นค่าของค่าในการคำนวณค่าตัวชี้วัดว่าเป็นการวัดที่มั่นคงของระบบหรือไม่หรือไม่

$$V_W = \frac{1}{T} \left[ -V_W + S_m \right]$$

$$V_2 = \frac{1}{T_2} \left[ -V_2 + K_s \left( 1 - \frac{T1}{T2} \right) u_1 \right]$$

2.3 ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง (TCSC)

แบบจำลองไฟฟ้า (VT, VC) และปฏิกิริยา



รูปที่ 2 ส่วนประกอบไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้ากำลัง

1. สมการที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบควบคุมด้วย TCSC มีดังนี้ (5)

$$\Delta \delta = a_1 \Delta \omega \quad (6)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_m - P_e) \quad (7)$$

$$E_q = \frac{1}{T_{do}} (-E_q + E_{fd}) \quad (8)$$

$$E_{fd} = \left( K_A (V_{ref} - V_t + U_{PSS}) - E_{fd} \right) T_A \quad (9)$$

$$P_e = V_{fd} I_d + V_{fd} I_q \quad (10)$$

$$V_t = V_{fd} + I_q X_q \quad (11)$$

$$V_{fd} = K_f I_q \quad (12)$$

$$V_{fd} = E_q - K_d I_d \quad (13)$$

2. สมการที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับระบบควบคุม

$$\Delta \delta = a_1 \Delta \omega \quad (14)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e - D \Delta \omega}{M} \quad (15)$$

$$\Delta E_q = \frac{\Delta E_{fd} - (X_d - X_d') \Delta I_d - \Delta E_d}{T_{do}} \quad (16)$$

$$\Delta E_{fd} = \left( K_A (\Delta V_{ref} - \Delta V_t + U_{PSS}) - \Delta E_{fd} \right) T_A \quad (17)$$

$$\Delta I_q = C_1 \Delta \delta + C_2 \Delta V_{TCSC} \quad (18)$$

$$\Delta P_i = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q + K_3 \Delta V_{TCSC} \quad (22)$$

$$\Delta V_j = K_4 \Delta \delta + K_5 \Delta E_q + K_6 \Delta V_{TCSC} \quad (24)$$

#### 2.4 ตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้า (SSSC)

Static Synchronism Series Compensator (SSSC) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าตามค่าตัวนำประจุ และมีการเพิ่มค่าความต้านทานด้านขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าของสายส่งการปฏิบัติงานของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับฐานของที่การอินเวอร์เตอร์แรงดัน (VSI) ซึ่งใช้วิธีการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าเชิงไดโอด



รูปที่ 2 ฐานสัมพันธ์ระหว่างพหุคูณ SSSC

สมการพหุคูณ SSSC

$$V_{SSSC\ ref} = \frac{(X_m - x_1) K_2 I_d}{T_b + x_2 + V_{SSSC\ co}} \quad (25)$$

$$V_q = R_f I_q - x_f I_d + h_1 E_b \cos \delta + h_2 E_b \sin \delta - V_{SSSC} \cos \delta \quad (26)$$

$$V_d = x_d I_d - R_f I_q + h_3 E_b \cos \delta + h_4 E_b \sin \delta - V_{SSSC} \sin \delta \quad (27)$$

#### 2.5 แบบจำลองของไหล

ที่สถานะของเสถียรของไหล ๓ เวลาใด ๆ ของเวลาเป็นที่ยอมรับโดยกันดีของปริมาณแรงดันคงที่ของแรงดันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (Q) ดังนั้น และเนื่องด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงของไหลระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (Q) ลักษณะทั่วไปมีดังนี้ (2)

$$P = P_0 (\bar{V})^a \quad (28)$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^b \quad (29)$$

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad (30)$$

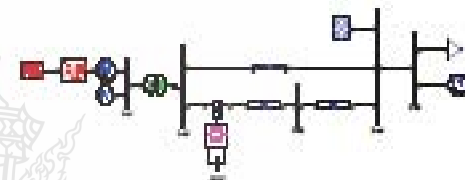
#### 3.1 วิธีหาค่าเชิงตัวเลข-ราฟสัน (Newton-Raphson method)

วิธีการหาค่าเชิงตัวเลขในรูปแบบที่เรากำลังใช้คือการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ในการหาค่าของระบบเปิดและวิธีนี้ใช้เพื่อหาค่าเป็นฟังก์ชันของ P-Q ลักษณะของนิวตัน-ราฟสันสามารถพิจารณาได้ซึ่งสมการการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (Q) (3)

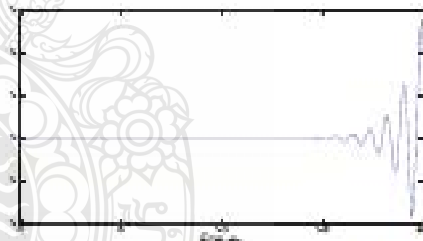
$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (31)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (32)$$

สมการกำลังไฟฟ้าจริง (31) และ (32) เป็นสมการไม่เชิงเส้นในส่วนที่เกี่ยวข้องกับ δ และประกอบไปด้วยสมการของแรงดันไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณเป็นผล



รูปที่ 3 ฐานสัมพันธ์ระหว่างพหุคูณ SSSC, P, Q, V, δ



รูปที่ 4 ฐานสัมพันธ์ระหว่างพหุคูณของไหล

จากรูปที่ ๓ แสดงให้เห็นถึงการแปรของแรงดันไฟฟ้าของแรงดันเนื่องจากค่าของตัวนำประจุของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏ (Q) ของแรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏ (Q) ลักษณะทั่วไปมีดังนี้ (2)



การควบคุมการแกว่งความถี่ต่ำของระบบเชื่อมโยงพลังงานทดแทนในชนบท  
Control of Low Frequency Oscillations of Grid-connected Renewable Power System  
in Rural Area

อมร อ้นกรอง\* กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์  
ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 025493571

บทคัดย่อ

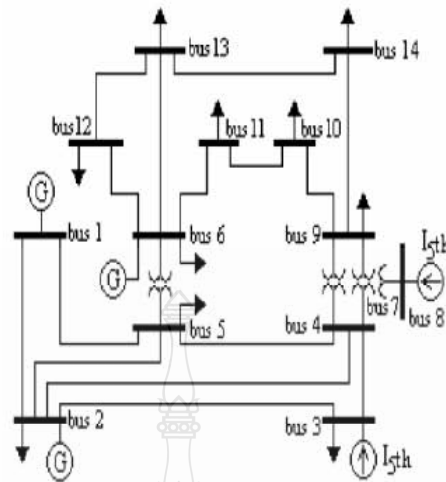
บทความนี้นำเสนอการศึกษาการรักษาเสถียรภาพการชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นในระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำโดยใช้โปรแกรม PSAT เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพในระบบเมื่อเกิดฟลอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยได้จำลองระบบตามมาตรฐาน IEEE 14 บัสเป็นกรณีศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแกว่งของความถี่จะเลือกอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นมา 2 แบบคือ 1. Static Synchronous Series Compensator (SSSC) 2. Unified Power Flow Controller (UPFC) ผลการวิเคราะห์จะแสดงผลออกมา 2 รูปแบบ คือ เทียบกับเวลา (Time Domain) และดูผลของค่าเสถียรภาพ ของระบบ (Eigen Value) จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่าอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นสามารถชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำและรักษาเสถียรภาพในระบบกำลังไฟฟ้าได้

คำสำคัญ: Static Synchronous Series Compensator (SSSC) , Unified Power Flow Controller (UPFC), การรักษาเสถียรภาพ, การแกว่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

1. บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำรงชีวิต และมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่สำหรับระบบไฟฟ้าหากเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ เช่น เกิดสภาวะทรานเซียนต์ขึ้นในระบบเช่น การเกิดฟลอลต์ในระบบ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ การเกิดสัญญาณรบกวนฮาร์โมนิกส์ จะทำให้ระบบล้มและเกิดไฟฟ้าดับ ดังนั้นการวิเคราะห์และการรักษาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว คือการวิเคราะห์ที่สำคัญในการทำงานของระบบไฟฟ้าเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นบนเครือข่ายระบบไฟฟ้าเป็นหนึ่งในหลักเป้าหมายของการวิเคราะห์นี้คือการรวบรวมข้อมูลที่สำคัญเช่นเวลาว่างที่สำคัญของเบรกเกอร์วงจรสำหรับความผิดปกติในระบบ[1] การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวได้กลายเป็นหนึ่งของการวิเคราะห์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าเพื่อให้มั่นใจเสถียรภาพของระบบที่จะทนต่อการรบกวนที่สำคัญผลของการชั่วคราวปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่ความผิดปกติของอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า[2]

บทความนี้จะศึกษาผลการเกิดทรานเซียนต์และเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังโดยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น 2 ชนิด คือ 1. Unified Power Flow Controller (UPFC) 2. Static Synchronous Series Compensator (SSSC) ในระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อหาค่าองค์ประกอบของไฟฟ้ากำลังและองค์ประกอบของโหลด ตั้งข้อสรุปและข้อเสนอแนะต่างสำหรับงานวิจัยที่จะกล่าวต่อไป



รูปที่ 1 ระบบมาตรฐาน 14 บัส

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การแกว่งของระบบไฟฟ้า

โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อถูกสัญญาณรบกวนในสภาวะ ทราเนเซียนต์ เช่น การเกิดฟอลต์ในระบบ โรเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัต (Dynamic motation) โดยจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดมีความเร่งและการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบนี้ว่า การแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง (Swing Equation) และที่สภาวะคงตัว (Stedy State Condition) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยที่ไม่คิดค่าสูญเสียภายในเครื่องกำเนิดจะพบว่าระบบไฟฟ้าจะสมดุลย์ เมื่อแรงบิด (Torque) ทางกลจะเท่ากับทางกำลังไฟฟ้าดังสมการ [3]

$$T_e = T_m \quad (1)$$

เมื่อ

$T_e$  คือ แรงบิดทางไฟฟ้า

$T_m$  คือ แรงบิดทางกล

ในขณะที่มีการรบกวนในระบบจะพิจารณาแล้วพบว่า  $T_e \neq T_m$  ขึ้นอยู่กับลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้นและมีแรงบิดที่ (Accelerating Torque,  $T_a$ ) เกิดขึ้นที่บนโรเตอร์ แบ่งเป็น Accelerating ( $T_m > T_e$ ) และ Decelerating ( $T_m < T_e$ )

$$T_a = T_m - T_e \quad (2)$$

$$j \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} T_a = T_m - T_e \quad (3)$$

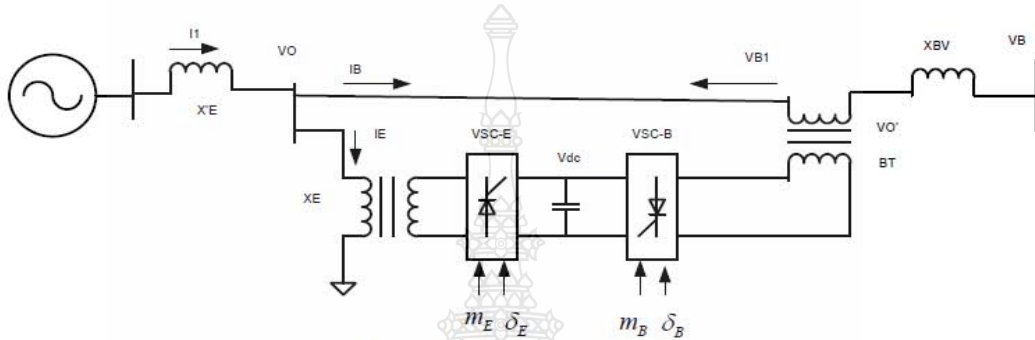
### 2.2 ระบบเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า

ระบบเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าใช้สำหรับสำหรับการปรับปรุงพลังงานความเสถียรของระบบคือบล็อกเพิ่มเติมในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าการควบคุมการกระตุ้นที่ช่วยปรับปรุงระบบไฟฟ้าโดยรวมประสิทธิภาพการทำงานแบบไดนามิกหรือการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัต[3]

### 2.3. อุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

#### 1. Unified Power Flow Controller (UPFC)

Unified Power Flow Controller (UPFC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมระบบไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission Systems Device, FACTS) อีกชนิดหนึ่ง เป็นการรวมตัวกันของอุปกรณ์ static synchronous compensator (STATCOM) และ static synchronous series compensator (SSSC) ซึ่งเป็นคู่ผ่านการเชื่อมโยง dc ร่วมกันเพื่อให้สองทิศทางไหลเวียนของพลังที่แท้จริงระหว่างขั้วเอาต์พุตของ SSSC และขั้วเอาต์พุตของ STATCOM และโดยถูกควบคุมเพื่อให้จริงพร้อมกันและชุดชดเชยปฏิกิริยาสายส่งโดยไม่ต้องแหล่งพลังงานไฟฟ้าภายนอก[4]

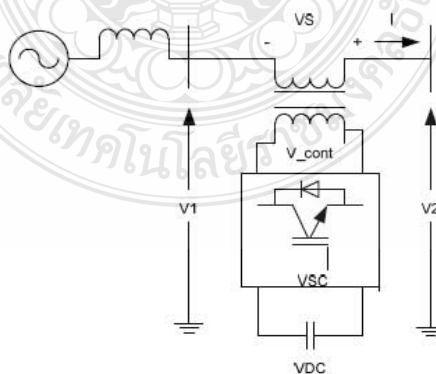


รูปที่ 2 Unified Power Flow Controller (UPFC)

UPFC จัดได้ว่าป็นอุปกรณ์ที่ซับซ้อนมากที่สุดและทันสมัยมากที่สุด ประกอบไปด้วย หม้อแปลง 2 ตัว และคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว ทั้งคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม (series converter) และ คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน (shunt converter) หม้อแปลงขนาน (shunt transformer) และ หม้อแปลงอนุกรม (series transformer) โดยคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวนี้ต่อถึงกันผ่านทางคาปาซิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยคาปาซิเตอร์นี้จะทำหน้าที่เป็นส่วนที่จะส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริง ระหว่างคอนเวอร์เตอร์อนุกรม และ คอนเวอร์เตอร์ขนาน โดยขนาด และ มุมของแรงดันจากหม้อแปลงอนุกรม (series transformer)

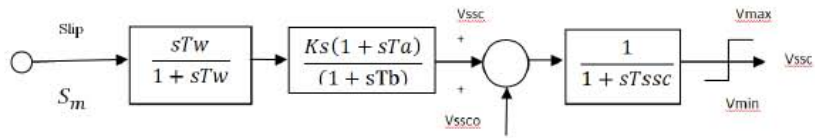
#### 2. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

Static Synchronous Series Compensator (SSSC) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้ามากกว่าตัวเก็บประจุ และการเหนี่ยวนำขนาดค่าความต้านทานของกระแสไฟฟ้าของสายส่งการปฏิบัติจริงของอุปกรณ์อยู่บนพื้นฐานของที่มาอินเวอร์เตอร์แรงดัน (VSI) ซึ่งใช้เดียวกันแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัส



รูปที่ 3 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)





รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุม SSSC

### สมการการควบคุมแบบ SSSC

$$V_{sssc_{ref}} = \frac{(S_m - x_1) K_2 T_a}{T_b + x_2 + V_{sssc_o}} \quad (4)$$

$$V_q = R_e I_q - x_e I_d + h_1 E_b \cos \delta + h_2 E_b \sin \delta - V_{sssc} \cos \beta \quad (5)$$

$$V_d = x_e I_q + R_e I_d + h_2 E_b \cos \delta + h_1 E_b \sin \delta - V_{sssc} \cos \beta \quad (6)$$

### 3.การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบใช้ตามมาตรฐาน IEEE 14 บัสตั้งแสดงในรูปที่ 1 จะใช้สำหรับการศึกษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้า โดยการทดสอบวิจัยจะพิจารณาจากที่มีและไม่มีอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขในการศึกษาที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดสภาวะทรานเซียนต์ บัสที่ 1 ในระบบไฟฟ้าและปฏิกิริยาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตั้งแสดงใน

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลระบบ 14 บัส

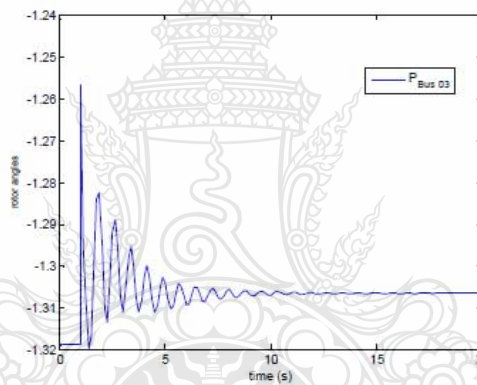
Line	From bus	To bus	Line (P.U)		Half Line (P.U)	MVA
			Re	Ra		
1	1	2	0.019	0.059	0.026	120
2	1	5	0.054	0.223	0.021	65
3	2	3	0.046	0.197	0.018	36
4	2	4	0.058	0.176	0.024	65
5	2	5	0.056	0.173	0.017	50
6	3	4	0.067	0.171	0.017	65
7	4	5	0.013	0.024	0.006	45
8	4	7	0	0.209	0	55
9	4	9	0	0.556	0	32
10	5	6	0	0.252	0	45
11	6	11	0.094	0.198	0	11
12	6	12	0.122	0.255	0	32
13	6	13	0.066	0.130	0	32
14	7	8	0	0.176	0	32
15	7	9	0	0.110	0	32

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลระบบ 14 บัส(ต่อ)

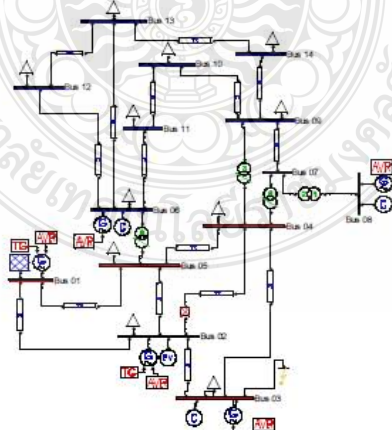
Line	From bus	To bus	Line (P.U)		Half Line (P.U)	M V A
			Re	Ra		
16	9	10	0.031	0.084	0	32
17	9	14	0.127	0.270	0	32
18	10	11	0.082	0.192	0	12
19	12	13	0.220	0.199	0	12
20	13	14	0.170	0.348	0	12

#### 4.วิธีการทดสอบและผลการทดลอง

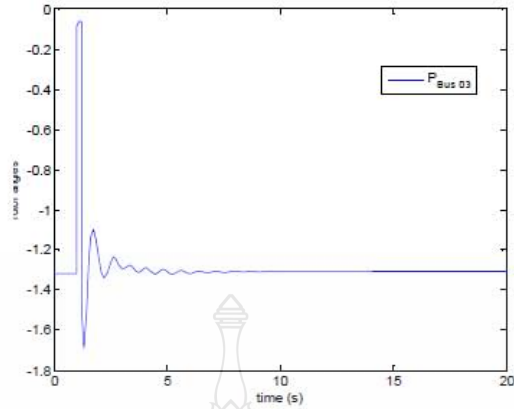
ผลการทดลองโดยการใช้โปรแกรม PSAT เป็นโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB SIMMULINK โดยโปรแกรม PSAT สามารถจำลองและวิเคราะห์หาค่าของระบบได้หลายรูปแบบ เช่น นิวตัน-ราฟส์ (NR) การไหลของกระแสไฟฟ้า(CPF) การไหลของกำลังไฟฟ้า (PF)



รูปที่ 5 ความเร็วเชิงมุมเมื่อยังไม่เกิดฟลัดในระบบ

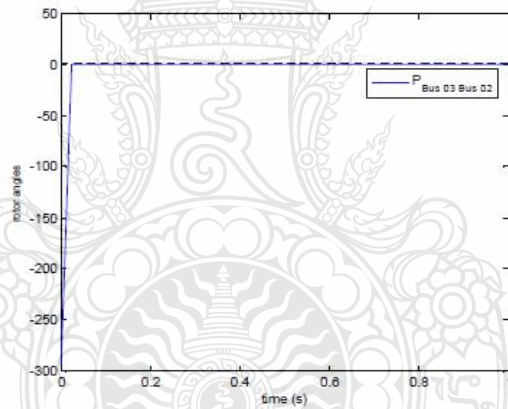


รูปที่ 6 จำลองการเกิดฟลัดในระบบ 14 บัส

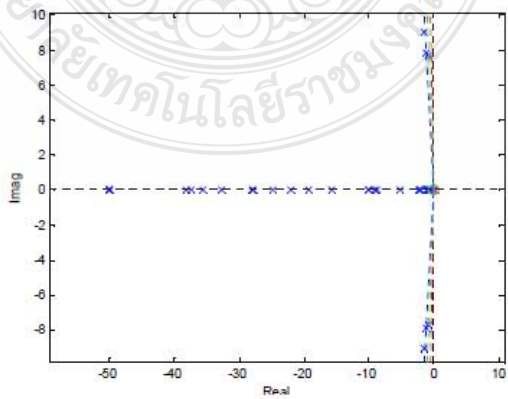


รูปที่ 7 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบ

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความไม่เสถียรภาพของระบบ เมื่อมีการเกิดฟอลต์ขึ้นในบัสที่ 3 โดย ผลของโรเตอร์จะเกิดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง จึงทำให้ต้องมีอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังแบบยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยจะใช้ตัวควบคุมแบบ UPFC และ SSSC

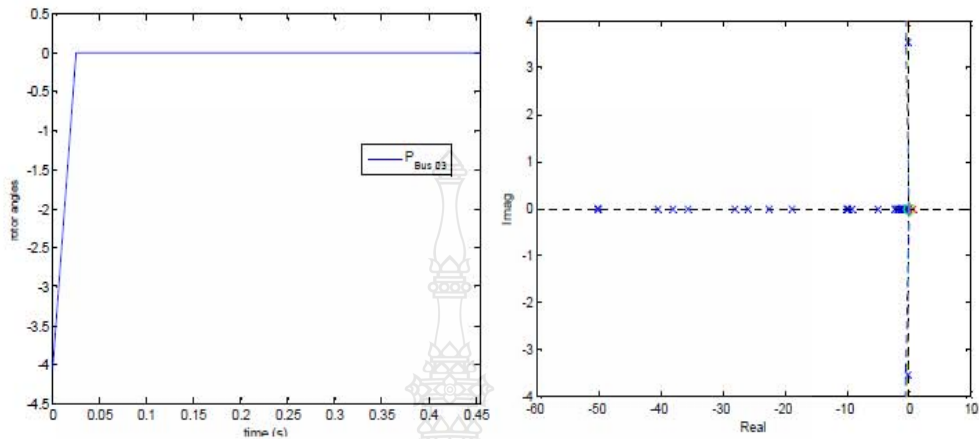


รูปที่ 8 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบโดยใช้ SSSC



รูปที่ 9 ค่าไอเกนของระบบเมื่อใช้อุปกรณ์ SSSC

จากรูปที่ 8 และ 9 เป็นการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์แบบหยัดหุ่นแบบ SSSC ระบบจะยังไม่เสถียรภาพเมื่อดูจากค่าไอเก้นบนระบบ s-plan ยังไม่เข้าสู่ศูนย์ (Eigen Value)



รูปที่ 10 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบโดยใช้ UPFC

รูปที่ 11 ค่าไอเก้นของระบบเมื่อใช้อุปกรณ์ UPFC

จากรูปที่ 10 และ 11 เป็นการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์แบบหยัดหุ่นแบบ UPFC ระบบจะยังไม่เสถียรภาพเมื่อดูจากค่าไอเก้นบนระบบ s-plan ยังไม่เข้าสู่ศูนย์มากเท่าที่ควร (Eigen Value) แต่เมื่อนำอุปกรณ์หยัดหุ่นทั้งสองนำมาเปรียบเทียบจากการวิเคราะห์โดยวิธีการนิวตัน-ราฟสัน อุปกรณ์หยัดหุ่นแบบ UPFC จะควบคุมได้ดีกว่า SSSC เมื่อมีการเกิดฟอลต์ในระบบเนื่องจากว่าระบบโหลดเป็นสมการไม่เชิงเส้น โดยใช้โปรแกรม PSAT ช่วยในการวิเคราะห์ ดังแสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบ 14 บัส

อุปกรณ์	ค่าเจาะจง	ความถี่	อัตราการหน่วง
UPFC	-0.12318 ±3.5551	0.56615	0.56581
SSSC	-1.7137±9.9931	1.6137	1.5905

## 5. สรุปผล

บทความนี้เป็นการวิเคราะห์และการศึกษาการควบคุมการแกว่งความถี่ต่ำของระบบเชื่อมโยงพลังงานทดแทนในชนบทโดยจำลองระบบ IEEE 14 บัส ขดเคเบิลการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าหยัดหุ่นในระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำเมื่อเกิดฟอลต์หรือทรานเซียนต์ในระบบที่อาจจะทำให้ระบบไฟฟ้าล้มได้ ผลการทดสอบดังตารางที่ 2 โดยใช้ อุปกรณ์ควบคุม 2 แบบคือ 1. Static Synchronous Series Compensator (SSSC) 2. Unified Power Flow Controller (UPFC) โดยที่ อุปกรณ์ควบคุมแบบ UPFC จะควบคุมได้ดีกว่า แบบ SSSC เพราะค่าความถี่ของ UPFC อยู่ที่ 0.56615 P.U. และอัตราการหน่วงอยู่ที่ 0.56581 P.U. แต่อุปกรณ์ควบคุมแบบ SSSC ค่าความถี่อยู่ที่ 1.6137 P.U. อัตราการหน่วงอยู่ที่ 1.5905 P.U. จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ควบคุมแบบ UPFC จะควบคุมได้ดีกว่า SSSC เนื่องจากว่าค่าอัตราหน่วงและค่าความถี่มีน้อยกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Arfah Marini Mohamad "Transient Stability Analysis on Sarawak's Grid using Power System Simulator for Engineering (PSS/E)" Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2011 IEEE Symposium on( Date of Conference: 25-28 Sept. 2011)
- [2] N. Hashim, N. Hamzah, M.F. Abdul Latip "Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Test System Using Dynamic Computation for Power Systems (DCPS), 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulati on(Date of Conference: 8-10 Feb. 2012)
- [3] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง"( 1 ธันวาคม 2553),ISBN 978-616-7326-20-7
- [4] Mr.N.K.Sharma , Prof.P.P.Jagtap "Modelling and application of Unified Power Flow Controller (UPFC)" Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2010 3rd International Conference (Date of Conference: 19-21 Nov. 2010)



# การชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วย FACTS

## Compensation of Low Frequency Oscillation on Power System using FACTS

อมร อินทรอง<sup>1</sup> กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม่แกม อำเภอเมือง จังหวัดดาก 63000 โทร 055-612517

<sup>2</sup>ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 025493571

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แนะนำเสนอการศึกษาวิเคราะห์การชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS) ในระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ โดยใช้โปรแกรม PSAT เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพในระบบมาตรฐาน IEEE 14 เมื่อเกิดสภาวะทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยได้จำลองระบบตามมาตรฐาน IEEE 14 บัสเป็นกรณีศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแกว่งของความถี่จะเลือกอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นมาชนิดเป็นแบบอนุกรมคือ SSSC และ TCSC ผลการวิเคราะห์จะแสดงผลออกมา 2 รูปแบบ คือ เทียบกับเวลา (Time Domain) และดูผลของค่าไอเก้น (Eigen Value) ของระบบ จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่า อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นสามารถชดเชยการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบกำลังไฟฟ้าได้

คำสำคัญ: เสถียรภาพ สภาวะทรานเซียนต์ อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่น การแกว่งของความถี่ต่ำ

### Abstract

This research presents analysis, compensation oscillations of low frequency in the power system with the controller power flexible (Flexible AC Transmission System, FACTS) in the low frequency power system using the PSAT to help determine value, stability in the standard IEEE 14 when the motor transients in power systems by simulation of standard IEEE 14-bus system as a case study. Equipment used to control the oscillation frequency will control power flexibility to type a serial is the SSSC and TCSC analysis to display the second form is compared to the time (Time Domain), and the resulting value. Eigen (Eigen Value) of the results of simulation work to see that the power control flexibility can compensate for the low frequency oscillations in power systems

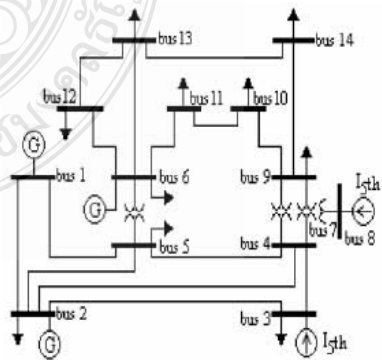
Keywords: Stability, transients, power control devices, of low frequency oscillations

### 1. บทนำ

ปัจจุบันการเชื่อมต่อบริเวณไฟฟ้าจะเกิดการแกว่งของระบบไฟฟ้าขึ้น โดยที่ระบบไฟฟ้าเป็นระบบไม่เชิงเส้นจึงทำให้ไม่มีความแน่นอนในระบบถ้าเกิดสภาวะทรานเซียนต์ขึ้นในระบบเช่น การเกิดฟลัดในระบบ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ การเกิดสัญญาณรบกวนฮามอน

นิกส์ จะทำให้ระบบล่มและเกิดไฟฟ้าดับได้โดยแบ่งออกเป็นสามกรณี ความถี่ แรงดันและมุมเฟส [1] การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว คือการวิเคราะห์ที่สำคัญในการทำงานของระบบไฟฟ้าเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นบนเครือข่ายระบบไฟฟ้าเป็นหนึ่งในหลักเป้าหมายของการวิเคราะห์นี้คือการรวบรวมข้อมูลที่สำคัญเช่นเวลาที่สำคัญของบรคเกอร์ วงจรสำหรับตรวจจับความผิดปกติในระบบ[8] การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวได้กลายเป็นหนึ่งของการวิเคราะห์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าเพื่อให้มั่นใจเสถียรภาพของระบบที่จะทนต่อการรบกวนที่สำคัญผลของการชั่วคราวปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่ความผิดปกติของอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า [8]

บทความนี้จะศึกษาผลการเกิดทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น 2 ชนิดคือ 1.ระบบเสถียรภาพกำลังไฟฟ้า(Power System Stabilizer, PSS) 2. ตัวเก็บประจุควบคุมด้วยไทรสเตอร์(Thyristor Controlled Series Capacitors ,TCSC) โดยการใช้วิธีการไหลอย่างต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้า( Continuation power flow) ในระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อหาค่าองค์ประกอบของไฟฟ้ากำลังและองค์ประกอบของโหลด ค้างข้อสรุปและข้อเสนอแนะต่างสำหรับงานวิจัยที่จะกล่าวต่อไป



รูปที่ 1 ระบบ 14 บัส

## 2. การแกว่งของระบบไฟฟ้า

โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อถูกสั่นถูกรบกวนในสภาวะ ทรานเซียนต์ เช่น การเกิดฟอลต์ในระบบ โรเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัต (Dynamic motation) โดยจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดมีความเร่งและการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เรียกว่าการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง (Swing Equation) และที่สภาวะคงตัว (Steady State Condition) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยที่ไม่เกิดค่าสูญเสียภายในเครื่องกำเนิดจะพบว่าการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะสมดุลย์ เมื่อแรงบิด (Torque) ทางกลจะเท่ากับทางกำลังไฟฟ้าดังสมการ [2]

$$T_e = T_m \quad (1)$$

เมื่อ  $T_e$  = แรงบิดทางไฟฟ้า  $T_m$  คือ แรงบิดทางกลเมื่อมีการรบกวนในระบบจะพิจารณาแล้วพบว่า  $T_e \neq T_m$  ขึ้นอยู่กับลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้นและมีแรงบิดที่ (Accelerating Torque,  $T_a$ ) เกิดขึ้นที่บนโรเตอร์ แบ่งเป็น Accelerating ( $T_m > T_e$ ) และ Decelerating ( $T_m < T_e$ )

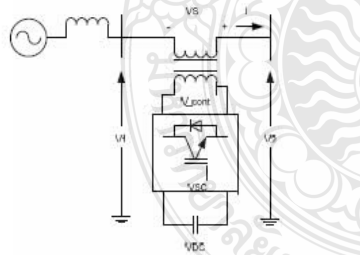
$$T_a = T_m - T_e \quad (2)$$

$$j \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} T_a = T_m - T_e \quad (3)$$

## 3. ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น

### 3.1 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

อุปกรณ์ Static Synchronous Series Compensator (SSSC) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าโดยมีการเริ่มต้นในปี 1989 โดยการใช้นิวตันแรงแปลงต้นแบบเดียวกับสำหรับการต่อขนานและอนุกรม จะใช้ในการควบคุมมุมของสายส่ง การทำงานขั้นพื้นฐานของ SSSC สามารถอธิบายโดยการอ้างอิงการต่ออนุกรมของคาปาซิเตอร์ [3]



รูปที่ 2 การต่อ Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

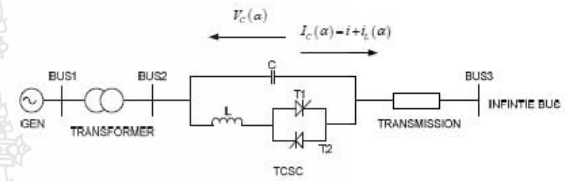
$$V_{SSSCref} = \frac{(S_m - x_1) K_2 T_a}{T_b + x_2 + V_{SSSCo}} \quad (4)$$

$$V_q = R_e I_q - x_e I_d + h_1 E_b \cos \delta + h_2 E_b \sin \delta - V_{SSSC} \cos \beta \quad (5)$$

$$V_d = x_e I_q - R_e I_d + h_2 E_b \cos \delta + h_1 E_b \sin \delta - V_{SSSC} \cos \beta \quad (6)$$

### 3.2 Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)

การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของความต้านทานสายส่ง และเป็นอุปสรรคควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง การแกว่งระหว่างพื้นที่ และการปรับปรุงเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับสื่อนั้นควบคุมด้วย TCSC เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบไปด้วยความผันผวนและโรเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันภายในเครื่อง รูปแบบกำลังนี้มีสามระดับที่ต้องการในการศึกษาความถี่ต่ำเพราะความเรียบง่าย และการปรับปรุงเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับสื่อนั้นควบคุมด้วย TCSC, เป็นอุปสรรคของการต่อวงจรขนาน  $I_C$  พิจารณาจากค่าความจุของ  $X_C$  [6]



รูปที่ 3 การต่อ Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)

1) สมการ ไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับสื่อนั้นควบคุมด้วย TCSC มีดังนี้ [4]

$$\dot{\delta} = \omega \Delta \omega \quad (7)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_m - P_e) \quad (8)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{do}} (-E'_q + E_{fd}) \quad (9)$$

$$\dot{E}'_fd = K_A (V_{ref} - V_t + U_{PSS}) - E'_fd / T_A \quad (10)$$

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \quad (11)$$

$$V_t = V_d + j V_q \quad (12)$$

$$V_d = X_q I_q \quad (13)$$

$$V_q = E'_q - E'_d I_d \quad (14)$$

2) สมการเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่อเข้ากับสื่อนั้น

$$\Delta \dot{\delta} = \omega \Delta \omega \quad (15)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e - D \Delta \omega}{M} \quad (16)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{\Delta E_{fd} - (X_d - X'_d) \Delta i_d - \Delta E'_d}{T_{do}} \quad (17)$$

$$\Delta \dot{E}'_fd = K_A (\Delta V_{ref} - \Delta V_t + U_{PSS}) - \Delta E'_fd / T_A \quad (18)$$

$$\Delta I_g = C_7 \Delta \delta + C_8 \Delta X_{TCSC} \quad (19)$$

$$\Delta I_d = C_9 \Delta \delta + C_{10} \Delta E'_g + C_{11} \Delta X_{TCSC} \quad (20)$$

$$\Delta P_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_g + K_3 \Delta X_{TCSC} \quad (21)$$

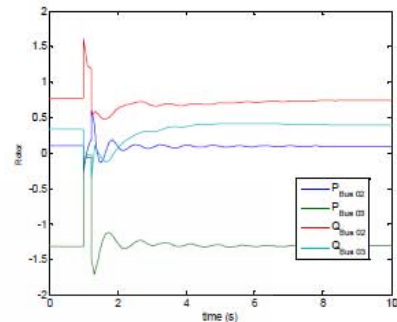
$$\Delta V_1 = K_4 \Delta \delta + K_5 \Delta E'_g + K_6 \Delta X_{TCSC} \quad (22)$$

#### 4. ระบบที่ออกแบบ

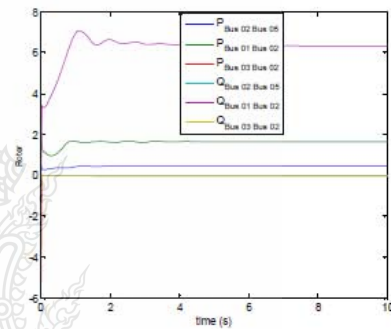
การออกแบบระบบใช้ตามมาตรฐาน IEEE 14 บัสดังแสดงในรูปที่ 1 จะประกอบด้วย เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 5 เครื่อง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เครื่อง มีสายส่ง 20 สาย และมีบัส 14 บัส มีโหลดทั้งหมด 259 MW และ 81.4 MVAR จะใช้สำหรับการศึกษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้า โดยการจำลองเมื่อเกิดสภาวะทรานเซียนต์บัสที่ 3 ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อระบบเกิดการทรานเซียนต์ขึ้นหรือฟลัดจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ เพราะฉะนั้นจึงต้องอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าชดเชยในระบบขึ้น [9]

#### 5. ผลการทดลอง

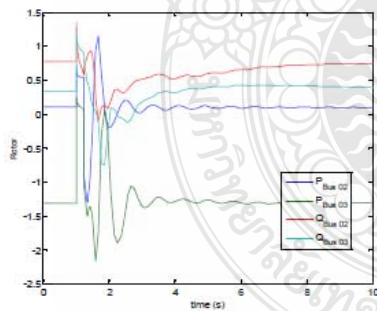
ผลการทดลอง โดยการจำลองการทำงานของระบบใช้โปรแกรม Psat ทำงานกับโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรม PSAT สามารถจำลองโดยการนำอุปกรณ์ชดเชยไฟฟ้ากำลังแบบหัตถ์ยูนิตเข้าไปต่อขนานในระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างบัส 2 และ 3 คือ SSSC กับ TCSC การต่อดังรูปที่แสดง 2 และ 3 โดยโปรแกรม PSAT ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าของระบบด้วยวิธีการ นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) การไหลของกระแสไฟฟ้า (Continuation power flow)



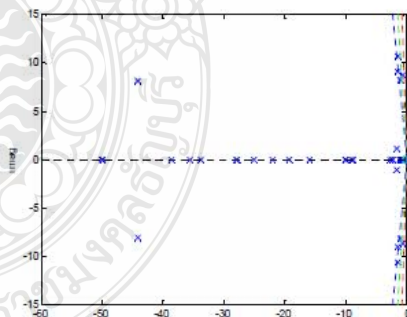
รูปที่ 5 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟลัดในระบบ



รูปที่ 6 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟลัดในระบบอุปกรณ์ SSSC



รูปที่ 4 ความเร็วเชิงมุมเมื่อยังไม่เกิดฟลัดในระบบ

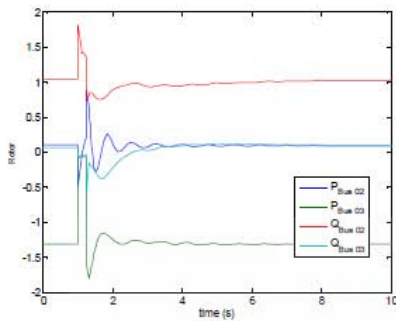


รูปที่ 7 ค่าไอเก้น (Eigen Value) ของระบบเมื่อเกิดฟลัด เมื่อติดตั้ง SSSC

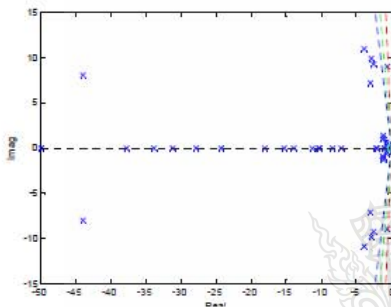
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงความไม่เสถียรภาพของระบบเมื่อเกิดฟลัดที่บัสที่ 3 ทำให้เกิดแรงดันเกินที่บัส 2 และ 3 ขึ้น โดยผลของโรเตอร์จะเกิดการแกว่งของระบบไฟฟ้ากำลัง จึงทำให้ต้องมีอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังแบบหัตถ์ยูนิตเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6 และ 7 เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ อุปกรณ์ควบคุม SSSC ระบบจะยังไม่เสถียรภาพเนื่องจาก ค่าไอเก้น (Eigen Value) บน S-Plan โดยมีความถี่อยู่ที่ 1.2915 Hz และมีอัตราส่วนที่ 7.1389 P.U





รูปที่ 8 ความเร็วเชิงมุมเมื่อเกิดฟลัดในระบบอุปกรณ์ TCSC



รูปที่ 9 ค่าไอเก้น (Eigen Value) ของระบบเมื่อเกิดฟลัดควบคุมเป็น TCSC

จากรูปที่ 9 ถึง 10 จากการวิเคราะห์การเสถียรภาพเมื่อระบบเกิดฟลัด ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้ การควบคุมอุปกรณ์แบบหัตถ์ยืนแบบ TCSC จะสามารถควบคุมได้ดีกว่าระบบ SSSC เมื่อมีการเกิดฟลัดในระบบเนื่องจากว่าระบบ โหลดเป็นสมการไม่เชิงเส้น โดยใช้โปรแกรม PSAT ช่วยในการวิเคราะห์ ดังแสดงผลในตาราง

ตารางที่ 1 เมื่อเกิดฟลัดในระบบ

อุปกรณ์	ค่าเจาะจง	ความถี่	อัตราส่วน
AVR	$\pm 8.0266$	1.2775	7.1017
SSSC	$\pm 8.1148$	1.2915	7.1389
TCSC	$\pm 8.0214$	1.2766	7.1037

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การศึกษารหัสเซชการแกว่งของความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าชนิดหัตถ์ยืนในระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำเมื่อเกิดฟลัดหรือทรานเซียนต์ในระบบ ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1 คือ เมื่อต่ออุปกรณ์ควบคุม SSSC

เข้าไปในระบบ จะมีอัตราส่วนที่ 7.1389 P.U และเมื่อต่ออุปกรณ์ควบคุม TCSC เข้าไปในระบบจะมีอัตราส่วนที่ 7.1037 P.U จะเห็นได้ว่าระบบที่ต่ออุปกรณ์ TCSC เข้าไปในระบบจะสามารถควบคุมการแกว่งของระบบและมีเสถียรภาพมากกว่าระบบที่ต่ออุปกรณ์แบบ SSSC

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Rogers, *Power System Oscillations*, (Kluwer: Massachusetts, 2000).
- [2] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง”( 1 ธันวาคม 2553),ISBN 978-616-7326-20-7.
- [3] จักรินทร์ วิเศษยา, “การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค”,สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554
- [4] Saeid jalilzadeh , Reza noroozian, M.Reza Safari Tirtashi and Peyman Farhang “Comparison of TCSC and PSS State Feedback controller Performances on Damping of Power System Oscillation usind PSO”in Electrical Engineering (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on( 17-19 May 2011).
- [5] T.R.Jyothsna, Member, IEEE, and K. Vaisakh, Member, IEEE “MOEP Based Design of PSS and FACTS for Transient Stability Improvement under Symmetrical and Unsymmetrical Fault
- [6] Conditions”in TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference” ( 19-21 Nov. 2008).
- [7] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, (McGraw-Hill: New York, 1994).
- [8] F. Milano “An Open Source Power System AnalysisToolbox” *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), (August 2005), 1199-1206.
- [9] N. Hashim, N. Hamzah, M.F. Abdul Latip “Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Test System Using Dynamic Computation for Power Systems (DCPS), 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation (Date of Conference: 8-10 Feb. 2012).
- [10] LIU Qing,WANG Zengping and ZHENG Zhenhua. “Study and Simulation of SSSC and TCSC Transient Control Performance” Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on(Date of Conference: 12-15 Oct. 2008)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย อมร อ้นกรอง
วัน เดือน ปี	4 พฤศจิกายน 2528
ที่อยู่	91/1 หมู่ 2 ต.เมืองบางยม อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย 64110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยนคสุโขทัย เมื่อ พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก เมื่อ พ.ศ. 2550
ประวัติการทำงาน	อาจารย์
พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

