

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงโรงไฟฟ้ากังหัน
ลมกับสถานีไฟฟ้าลำตะคอง

ANALYSIS OF STABILITY IN POWER SYSTEM CONNECTED
WIND TURBINE POWER PLANT WITH EGAT'S LAM TA KHONG
HYDRO POWER PLANT

นายชนธิษฏ์ จันเงิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงโรงไฟฟ้ากังหัน
ลมกับสถานีไฟฟ้าลำนาคอง

นายชนธิษฐ์ จันเงิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงโรงไฟฟ้า กัณฑ์ลมกับสถานีไฟฟ้าล้าตะคอง
ชื่อ-นามสกุล	นายชนสิทธิ์ จันเงิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงโรงไฟฟ้ากัณฑ์ลมกับสถานีไฟฟ้าล้าตะคอง ก่อนการติดตั้งใช้งานเพื่อพิจารณาผลกระทบของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของโรงไฟฟ้ากัณฑ์ลม

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสและการควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติโรงไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อรักษาผลกระทบของความถี่และแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าน้อยอยู่ในค่าจำกัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและต่ออุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ายัดหยุ่นแบบขนานเพื่อเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญกับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและการควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติโดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/PSAT

ผลการจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบกับกัณฑ์ลมไฟฟ้าขนาด 20.5MW เพิ่มอุปกรณ์ชดเชยรีแอกทีฟซิงโครไนซ์แบบสถิตย์มีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าดีกว่าผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าจริง 13.1854 ต่อหน่วย ผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 15.7333 ต่อหน่วย และผลการจำลองการควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติเมื่อมีการปลดโหลดค่ากำลังไฟฟ้าจริง 1 MW และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 0.5MVar ออกจากระบบ เพิ่มอุปกรณ์ชดเชยรีแอกทีฟซิงโครไนซ์แบบสถิตย์มีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าดีกว่าผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าจริง 0.05016 ต่อหน่วย ผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 0.03773 ต่อหน่วย การเปลี่ยนแปลงของความถี่อยู่ระหว่าง ± 2.10 Hz

คำสำคัญ: กัณฑ์ลมเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าการควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติ

Thesis Title	Analysis of Voltage Stability in Power System Connected Wind Turbine Power Plant with EGAT'S LAM TA KHONG Hydro Power Plant
Name-Surname	Mr. Chanasith Janngurn
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This thesis proposes the analysis of voltage stability in power system in case of the connection between wind turbine power plant and EGAT'S LAM TA KHONG hydro power plant, before actual installation. The study focuses on the voltage stability and voltage variation in power system that effects to the operation of wind turbine power plant.

Generally, the voltage stability keeps every voltage buses in power system constant. The automatic generation control (AGC) was the system that supplied the electrical power and controlled stability of frequency, electrical voltage to keep the minimum variation in power system by connecting the Flexible AC Transmission System (FACTS) to the buses system to automatically control the reactive power. The voltage stability and AGC were studied in this thesis using MATLAB/PSAT environment.

The simulation results showed that the analysis of voltage stability of power system with wind turbine 20.5 MW by connecting the STATCOM to the power system gave higher voltage stability than the power system which connected to the SVC. The active and reactive power of total generation is 13.1854p.u. and 15.7333p.u., respectively. The AGC has fluctuated to desynchronizes with 1 MW 0.5 MVAR load capacity. The similar results were found, the system which connected to the STATCOM also showed higher voltage stability than the SVC system. The active and reactive power of total generation is 0.05016p.u. and 0.03773p.u., respectively. The frequency variation is ± 2.10 Hz.

Keywords: wind turbine, voltage stability, automatic generation control (AGC)

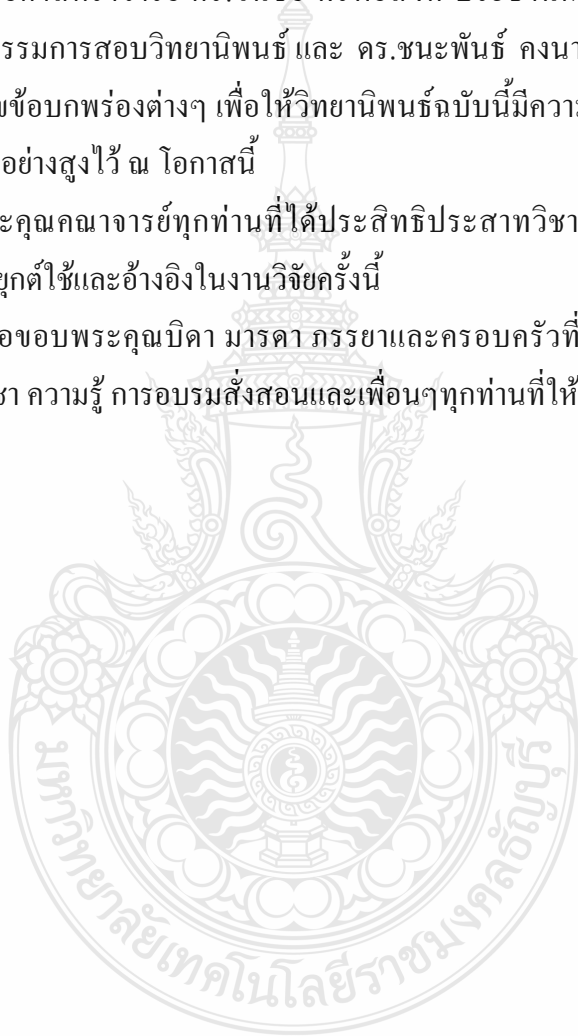
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำรวมถึง ประสพการณ์ต่างๆที่เป็นแนวทางทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ชนะพันธ์ คงนาม ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้ คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นซึ่งผู้วิจัยขอ กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถ นำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ภรรยาและครอบครัวที่ทำให้กำลังใจตลอดจนครูบา อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ การอบรมสั่งสอนและเพื่อนๆทุกท่านที่ทำให้กำลังใจเสมอมา

ชนสิทธิ์ จั่นเงิน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	3
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.2 ระบบ IEEE 14 BUS.....	51
3.3 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	52
3.4 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ IEEE 14 Bus เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในระบบที่เหมาะสม.....	52
3.5 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ IEEE 14 Bus ที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบกับความเร็วคงที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วยและเพิ่มขนาด 1.5 เมกะวัตต์ จำนวน 12 หน่วย.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลอง	63
4.1 กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14BUS.....	63
4.2 กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14 BUS ที่มีการเชื่อมโยง กับโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อน สองทาง (Doubly Fed Induction Generator).....	66
4.3 กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14BUS ในข้อ 2 เพิ่มติดตั้ง อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยัดหยุ่น 2 ชนิดคือ SVC และ STATCOM.....	70
4.4 กรณีวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับ โรงไฟฟ้าลำตะคอง.....	75
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก ข้อมูล Source Code ของโปรแกรมในงานวิจัย.....	100
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	126
ประวัติผู้เขียน.....	159

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเชื่อมต่อโดยตรงค่าความเร็วคงที่.....	8
2.2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเชื่อมต่อโดยตรงค่าความเร็วปรับเปลี่ยนได้	9
2.3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางค่าความเร็วปรับเปลี่ยนได้.....	9
2.4	กัณฑ์ลมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทางกับ Machine Side และ Line Side Converter.....	10
2.5	วงจรมุมลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง.....	11
2.6	วงจรมุมลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางในสภาวะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส	12
2.7	แผนภาพเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ 2 BUS	15
2.8	ตัวอย่างบัสในระบบไฟฟ้ากำลังพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	17
2.9	แผนผังแสดงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า.....	22
2.10	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส	24
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง	25
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนของค่าทำนายกับแวกเตอร์ที่สัมผัสผิวของสมการ	27
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนของค่าแก้ไขที่ได้รับจากแวกเตอร์ที่ตั้งฉากภายในของสมการ	28
2.14	กราฟ CPF ที่ขั้นตอนของค่าทำนายได้รับจากเป้าหมายของค่าพารามิเตอร์เฉพาะที่.....	29
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริงโดยวิธี CPF	30
2.16	ลักษณะของการติดตั้ง SVC	33
2.17	วงจรมุมลของ SVC.....	34
2.18	แบบจำลองของ SVC.....	34
2.19	คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ SVC.....	35
2.20	การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัว.....	36
2.21	ลักษณะของการติดตั้ง STATCOM.....	37
2.22	วงจรมุมลของ STATCOM.....	38
2.23	คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ STATCOM.....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.24 แบบจำลองของ STATCOM.....	39
2.25 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ STATCOM ในสภาวะคงตัว.....	40
2.26 พื้นที่ควบคุมที่เชื่อมโยงกันจะประกอบด้วยกลุ่มย่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเข้าระบบ	41
2.27 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติแบบสองพื้นที่.....	42
2.28 บล็อกไดอะแกรมของการไหลของกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่ 1 ไปที่ 2.....	43
2.29 รูปแบบ Tie Line Model	44
2.30 รูปแบบ Turbine Governor Type 2 Model.....	45
2.31 รูปแบบ Excitation Type 2 Model	46
3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม PSAT วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้า	48
3.2 ขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรม PSAT วิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง	50
3.3 ระบบของ IEEE 14 Bus	51
3.4 ระบบของ IEEE 14 Bus เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์ ใช้ในโปรแกรม PSAT.....	54
3.5 ระบบของ IEEE 14 Bus เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์ ใช้ในโปรแกรม PSAT.....	54
3.6 ระบบของ IEEE 14 Bus เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์และติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหยุน SVC ที่บัส 4 ใช้ในโปรแกรม PSAT.....	56
3.7 ระบบของ IEEE 14 Bus เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์และติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหยุน STATCOM ที่บัส 4 ใช้ในโปรแกรม PSAT	57
3.8 กระแสลมเปลี่ยนแปลงตามเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 15 m/s โดยใช้ Mexican Hat	59
3.9 ระบบไฟฟ้า 3 บัส ใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า	59
3.10 ระบบไฟฟ้า 3 บัสและปลดโหลดที่บัส 7 ออกใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า.....	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.11 ระบบไฟฟ้า 3 บัสเพิ่ม SVC ที่บัส 5 และปลดโหลดที่บัส 7 ออกใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า.....	61
3.12 ระบบไฟฟ้า 3 บัสเพิ่ม STATCOM ที่บัส 5 และปลดโหลดที่บัส 7 ออกใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า.....	62
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกำลังไฟฟ้าจริงกับองค์ประกอบโหลดของระบบ IEEE 14 BUS ของวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow)	64
4.2 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS	65
4.3 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS.....	65
4.4 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้งในระบบ	66
4.5 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง.....	67
4.6 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง.....	67
4.7 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ ติดตั้งในระบบ	68
4.8 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง.....	69
4.9 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง.....	69
4.10 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์และ SVC ติดตั้งในระบบ.....	71
4.11 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ และ SVC ติดตั้งในระบบ.....	71
4.12 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ และ SVC ติดตั้งในระบบ.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์และSTATCOM ติดตั้งในระบบ	73
4.14 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์และ STATCOM ติดตั้งในระบบ	74
4.15 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์และ STATCOM ติดตั้งในระบบ	74
4.16 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ติดตั้งในช่วง STARTUP.....	76
4.17 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วง STARTUP.....	77
4.18 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วง STARTUP.....	77
4.19 ขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงช่วง Start Up ในระบบ	79
4.20 ขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงช่วง Start Up ในระบบช่วงเวลา 0 ถึง 20 วินาที	79
4.21 ขนาดของความถี่และแรงดันที่บัส 3 ที่เปลี่ยนแปลงช่วง Start Up ในระบบช่วงเวลา 0 ถึง 20 วินาที	80
4.22 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้งในระบบ	81
4.23 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบ	82
4.24 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบ ..	82
4.25 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่บัส 2, 3, 4 ช่วงปลดโหลดออกจากระบบ.....	84
4.26 ขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกั้นหม้อผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง	84
4.27 การเปลี่ยนแปลงขนาดของความถี่ที่บัส 3 ช่วงปลดโหลดออกจากระบบ	85
4.28 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์และ SVC ติดตั้งในระบบ.....	86
4.29 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS มี SVC ติดตั้งในระบบก่อนปลดโหลดออก.	87
4.30 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS มี SVC ติดตั้งในระบบก่อนปลดโหลดออก	87

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.31 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่บัส 2, 3, 4 ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลด ออกจากระบบเมื่อมี SVC ติดตั้งในระบบ	89
4.32 การเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกั้นห้ามผลิตไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี SVC ติดตั้งในระบบ.....	89
4.33 การเปลี่ยนแปลงขนาดของความถี่ที่บัส 3 ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดจากระบบ เมื่อมี SVC ติดตั้งในระบบ	90
4.34 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของ กำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์และ STATCOM ติดตั้งในระบบ ..	91
4.35 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้งในระบบ	91
4.36 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบ เมื่อมี STATCOM ติดตั้งในระบบ.....	92
4.37 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่บัส 2,3,4 ของระบบไฟฟ้า 3 BUSช่วงปลดโหลด ออกจากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้งในระบบ.....	93
4.38 การเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกั้นห้ามผลิตไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้ง.....	94
4.39 การเปลี่ยนแปลงขนาดของความถี่ที่บัส 3 ของระบบไฟฟ้า 3 BUSช่วงปลดโหลดออก จากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้ง	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลที่ใช้ในอุตสาหกรรมเริ่มขาดแคลนมากขึ้นทำให้ต้นทุนของสินค้าและบริการสูงขึ้นไปด้วยสำหรับพลังงานไฟฟ้าปริมาณการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยคาดว่า ในอีก 20 ปี คือระหว่างปี 2553 ถึง 2573 กำลังการผลิตไฟฟ้าจะสูงสุดถึง 58,890 เมกะวัตต์ ขณะที่เชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าปัจจุบันมาจากก๊าซธรรมชาติมากถึงร้อยละ 72.5 เป็นสัดส่วนที่มากเกินไป กระทรวงพลังงานจึงต้องเร่งเพิ่มสัดส่วนเชื้อเพลิงหมุนเวียนอื่น ในอีก 20 ปี ข้างหน้า ก๊าซธรรมชาติอาจไม่เพียงพอผลิตกระแสไฟฟ้าจนเกิดเป็นวิกฤตพลังงานได้

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เป็นองค์กรที่อยู่ภายใต้การบริหารงานของกระทรวงพลังงานมีโครงการลดปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลลง เช่น โครงการที่ติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่น D6-1250 ที่ผลิตในประเทศจีน ขนาดกำลังผลิต 1,250 กิโลวัตต์ จำนวน 2 ชุด รวมกำลังผลิต 2,500 กิโลวัตต์ เป็นกังหันลมชนิดแกนนอน กังหันลมติดตั้งที่บริเวณอ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ติดตั้งเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบการจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2552 ใช้ขบดำเนินการประมาณ 145 ล้านบาท สามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณปีละ 4.60 ล้านหน่วยทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงได้ 1.1 ล้านลิตรต่อปีลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุภาวะโลกร้อนได้ถึง 2,300 ตันต่อปีซึ่งเป็นโครงการนำร่อง [1]

กฟผ. มีโครงการจะติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพิ่มเติมโดยมีขนาดกำลังผลิต 1,500 กิโลวัตต์ จำนวน 12 ชุด รวมกำลังผลิต 18 เมกะวัตต์ โดยคณะรัฐมนตรี (ครม.) อนุมัติเมื่อวันที่ 18 มกราคม 2554 โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าลำตะคองระยะที่ 2 วงเงินลงทุน 1,741.40 ล้านบาทและให้กระทรวงพลังงานดำเนินการเกี่ยวกับรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อม (อีไอเอ) (ตามความเห็นชอบของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม) [2]

การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าระยะที่ 1 และ 2 รวมกำลังผลิต 20.5 เมกะวัตต์จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายของโรงไฟฟ้าย่อยลำตะคองใหม่ทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นสามารถรับการเปลี่ยนแปลงจากภาระโหลดในระบบได้มากขึ้น

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability) เป็นส่วนหนึ่งของเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability) ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า (Power System

Reliability) เมื่อระบบขาดความสมดุลของกำลังงานรีแอกทีฟ (Reactive Power) จะส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบ หากระบบต้องจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟจำนวนมากๆ จนทำให้เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) การจ่ายกำลังงานที่ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนถึงค่าแรงดันพังทลายนั้นมีค่าน้อย สถานีไฟฟ้านั้นจะมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดการพังทลายของแรงดัน จะต้องเพิ่มเสถียรภาพให้มากขึ้น โดยการปรับปรุงเพิ่มขนาดของสถานีไฟฟ้าให้สามารถจ่ายพลังงานได้มากขึ้น หรือ ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นเข้าในระบบ

กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ทางกฟผ.ติดตั้งแล้วและมีโครงการจะติดตั้งเพิ่มเติมที่ท่าตะคองจะเป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed Wind Turbine) จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ซึ่งจะมีการดูดกลืนกำลังงานรีแอกทีฟจากระบบที่เชื่อมต่อจึงต้องหาอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟ (Reactive Power) เข้ามาชดเชยให้กับระบบ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) และอุปกรณ์ชดเชยกำลังงานไฟฟ้ายืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS) เพื่อปรับปรุงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพและมั่นคงมากขึ้น โดยรักษาระดับค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ทุกสภาวะของโหลดตามลักษณะการนำไปใช้งาน

วิทยานิพนธ์นี้เห็นความสำคัญของปัญหาการเกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ในระบบไฟฟ้า เมื่อนำกังหันลมผลิตไฟฟ้ามาเชื่อมต่อในระบบเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยนำเสนอการวิเคราะห์ระบบมาตรฐาน IEEE 14 Bus ที่เชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) และเพิ่มการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นแบบขนาน 2 ชนิดคือ Static Var Compensator (SVC) และ Static Synchronous Compensator (STATCOM) ส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability) ของระบบอย่างไรและศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าท่าตะคอง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย กับขนาด 1.5 เมกะวัตต์ จำนวน 12 หน่วย

1.2.2 เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่น ที่เหมาะสมกับระบบที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิต

1.2.3 เพื่อศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าถ่านหิน

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 Bus ที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าจำนวน 2 ชุดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และมีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชดเชยเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างไร และการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าถ่านหินจะส่งผลอย่างไรกับการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.25 เมกะวัตต์จำนวน 2 หน่วย กับขนาด 1.5 เมกะวัตต์จำนวน 12 หน่วย

1.4.4 วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบชดเชย 2 ชนิดที่เหมาะสมกับระบบที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1.4.3 วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของระบบกับกำลังไฟฟ้าจริงของการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าถ่านหิน

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรม MATLAB/PSAT ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 Bus

1.5.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและโรงไฟฟ้าถ่านหิน

1.5.3 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย

1.5.4 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย และขนาด 1.5 เมกะวัตต์ จำนวน 12 หน่วย

1.5.5 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชดเชย (SVC และ STATCOM) ที่เหมาะสม

1.5.6 ศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าลำตะคอง

1.5.7 วิเคราะห์การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

1.5.8 สร้างและทดสอบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมพร้อมปรับปรุง

1.5.9 สรุปวิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผลการวิจัย

1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า 2 ชุด ที่ต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐานและเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชดเชย (SVC และ STATCOM) และศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าลำตะคอง

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 การสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรม MATLAB/PSAT

1.7.2 ศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในด้านเสถียรภาพแรงดัน

1.7.3 ใช้วางแผนการปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหลดเพื่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้าโดยรวมของประเทศ

1.7.4 การเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและวารสารด้านความพลังงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกันผลิตไฟฟ้ากับสถานีไฟฟ้าล้าตะกอง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาจากบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้พิจารณาหลักการพื้นฐาน ทฤษฎี แนวทางการวิเคราะห์ ที่สอดคล้องกับงานวิจัยฉบับนี้ เพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ได้ศึกษาและสรุปพอสังเขปดังนี้

2.1.1 นิพนธ์ เกตุจ้อย [3] ได้นำเสนอเทคโนโลยีพลังงานลมว่า พลังงานลมทั่วโลกเป็นแหล่งศักยภาพพลังงานที่มีอยู่อย่างมหาศาล โดยเฉพาะในพื้นที่ชายฝั่งของทวีปยุโรปมีพลังงานจลน์จากลมถึง 2,500 เทอราวัตต์ชั่วโมงต่อปีคิดเป็น 85 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในยุโรปในปี ค.ศ. 1997 แหล่งศักยภาพพลังงานลมที่มีกำลังเฉลี่ยทั้งปีตั้งแต่ระดับ 1.3 ถึง 2 มีความเร็วลม 4.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปที่สูง 50 เมตรเช่นภาคใต้ตอนบนบริเวณอ่าวไทยชายฝั่งตะวันตกตั้งแต่เพชรบุรี จนถึงสุราษฎร์ธานี บริเวณเทือกเขาในภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่ เพชรบูรณ์ เลยและบริเวณเทือกเขาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมผิวพื้นที่มีระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไป ความเร็วลม (พลังงานจลน์) ที่ผลิตได้จากกังหันลมจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลมชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่นิยมติดตั้งกันมากคือ ชนิดแกนนอน (Horizontal Axis Type Wind Turbine ,HAWT) มีอยู่ 3 ชนิดคือ

- 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเชื่อมต่อโดยตรงมีความเร็วคงที่
- 2) กำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเชื่อมต่อโดยตรงมีความเร็วปรับเปลี่ยนได้
- 3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางมีความเร็วปรับเปลี่ยนได้

2.1.2 วัฒนะ สืบกนิร และ บัลลังก์ เนียมมณี [4] ได้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทาง ในสภาวะคงตัวขณะที่ทำงานในเงื่อนไขของการทำงานในสภาวะซิงโครนัส โดยโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางต่ออุปกรณ์แปลงผันด้านเครื่องจักรกล และ อุปกรณ์แปลงผันด้านที่เชื่อมต่อกับระบบ ซึ่ง อุปกรณ์แปลงผันด้านเครื่องจักรกลสามารถปรับได้ทั้งขนาดแรงดัน และ ความถี่ อย่างอิสระ โดยที่ความถี่ที่ป้อนให้โรเตอร์เมื่อรวมกับ

ความเร็วของโรเตอร์แล้ว ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ที่โรเตอร์ กับ สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ซึ่งจะทำให้สามารถรักษาความถี่ที่สเตเตอร์ให้คงที่ โดยที่ความเร็วของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่โรเตอร์และสเตเตอร์ ทำได้โดยการปรับขนาดของแรงดันที่โรเตอร์ และการควบคุมนี้สามารถควบคุมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ โดยพิจารณาที่ ค่าความสูญเสียต่ำที่สุด การควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทางได้โดยการปรับมุมระหว่างแรงดันที่โรเตอร์และสเตเตอร์ ให้ความถี่ที่สเตเตอร์คงที่ ควบคุมค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ด้วยการปรับความเร็วของโรเตอร์ซึ่งมีช่วงที่กว้างสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทางจึงเป็นที่นิยมใช้งาน

2.1.3 J C. Munoz, C.A. Canizares [5] ได้นำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 BUS โดยการเปรียบเทียบและเปลี่ยนตำแหน่งการทดลองระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางที่บัส 2 พบว่าขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานแรงดันบัสที่ 14 ไม่เสถียรภาพจะเกิดการออสซิลเลชัน และเมื่อติดตั้งลมผลิตไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางเข้าแทนที่โดยการทำงานของกังหันควบคุมด้วยแรงดันที่จุดต่อ (Terminal Voltage Control) พบว่าแรงดันบัสที่ 14 มีค่า 1.09 p.u. ไม่มีการออสซิลเลชันเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางสามารถจ่ายค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบและมีอัตราหน่วง (Damping Ratio) มากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.1.4 จักรินทร์ วิเศษยา, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักตติพิชญ์ [6] ได้นำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 14 BUS โดยใช้โปรแกรม PSAT(Power System Analysis Toolbox) พัฒนาโดย Prof.Dr.Federico Milano หากำลังประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) ก่อนถึงสภาวะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ด้วยวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (Continuation Power Flow, CPF) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้า ทำให้สามารถรู้ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดและทราบตำแหน่งบัสที่เหมาะสมของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังและการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยัดหยุ่น STATCOM ขนาด $\pm 100\text{MVA}$ 13.8KV 50Hz ที่บัส 14 ทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแรงดัน

2.1.5 N. Mithulananthan, A.Sode-Yome, N.Acharya, S.Phichaisawat [7] ได้นำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย และการเพิ่มเสถียรภาพในระบบโดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟทั้ง ชุดตัวเก็บประจุ และ อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยัดหยุ่น โดยการวิเคราะห์จากค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดก่อนที่ระบบพังทลาย จากผลการวิจัยพบว่า

สถานที่จังหวัดเชียงใหม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุดเมื่อมีการเพิ่มโหลดอย่างต่อเนื่อง หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหยุ่นเข้าไปในระบบนี้สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ 20 – 30% โดยที่ STATCOM สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าอุปกรณ์อื่นๆ แต่ยังไม่ได้วิเคราะห์ถึงระบบที่เชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

2.1.6 ZengqiangMi [8] การใช้ตัวชดเชยการชังโครไนไซส์แบบสถิตย์ (STATCOM) สำหรับการรวมความสามารถการผลิตให้สูงขึ้นกับฟาร์มกังหันลมไฟฟ้าแบบ DFIG ถูกนำเสนอมาใช้กับแผนการควบคุมร่วมด้านกำลังงานรีแอกทีฟสำหรับฟาร์มกังหันลมไฟฟ้ารูปแบบไดนามิกทั้งหมด สำหรับระบบกำลังกังหันลมแบบความถี่คงที่ ปรับความเร็วได้ และชุด STATCOM จะถูกติดตั้งด้วย โดยความจริงแล้วเป้าหมายของแผนการควบคุมเป็นการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ถูกกำหนดอยู่ที่จุดของการเชื่อมต่อร่วม และจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟที่เหมาะสมสำหรับระบบกริดสายส่ง การทำให้ฟาร์มกังหันลมไฟฟ้าปรับตัวขึ้นไปอยู่บนระบบกริดสายส่งได้จะทำให้เกิดเศรษฐกิจที่เหมาะสมและส่งเสริมการกระทำแบบไดนามิกให้ดีขึ้น เมื่อระบบเกิดฟลอทขึ้นกำลังงานรีแอกทีฟที่ให้กับกังหันลมไฟฟ้าแบบ DFIG จะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์

2.1.7 Adil Usman, BP Divakar [9] การเปลี่ยนแปลงของโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นเหตุผลที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ซึ่งส่งผลกระทบต่อความถี่และแรงดันจากค่าที่ปกติค่าความสูญเสียของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการทริปของสายส่งและเหตุการณ์ของการเกิด Blackout ขึ้นในระบบผลกระทบของความถี่และแรงดันสามารถจะรักษาให้มีค่าที่น้อยและรักษาให้อยู่ภายในค่าจำกัดของความคลาดเคลื่อนด้วยการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control) ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือการควบคุมความถี่ของโหลด (Load Frequency Control) และ การปรับแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator) สามารถศึกษาด้วยการซิมูเลชันเพื่อให้เกิดความเข้าใจการทำงานของกรควบคุมความถี่ของโหลด ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

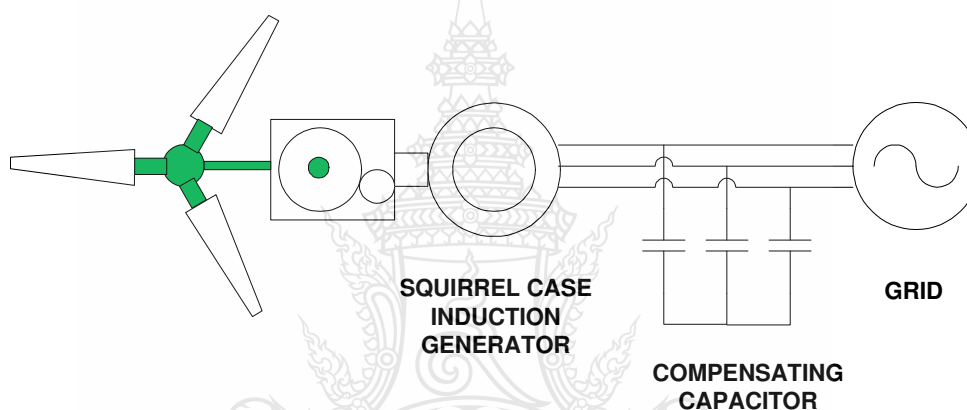
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือกังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Type Wind Turbine ,VAWT) และกังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Type Wind Turbine ,HAWT) กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ

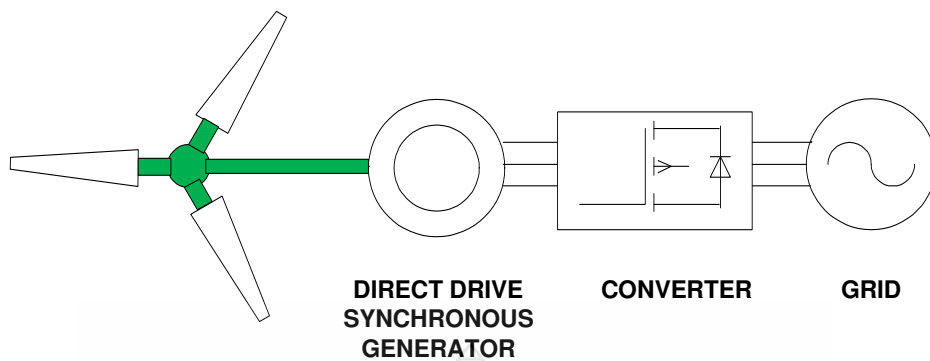
1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเชื่อมต่อโดยตรงมีความเร็วคงที่DFIG จะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์

กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Turbine) ประกอบไปด้วย ใบพัด ก่อ่งเกียร์ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel-Cage Induction Generator) ชุดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า (ภาพที่ 2.1) มีค่าสลลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Slip) ไม่คงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ศิระ หงษ์นภา, 2544) การเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมาก เพียง 1 - 2 % จึงเรียกกังหันลมแบบนี้ว่าเป็นแบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำมักจะดึงพลังงาน (Reactive Power) จากสายส่งมาใช้ จะทำให้ระบบสายส่งไม่มีเสถียรภาพซึ่งสามารถแก้ไขโดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยพลังงานคือตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้งอยู่ในตัวกังหันลมผลิตไฟฟ้า



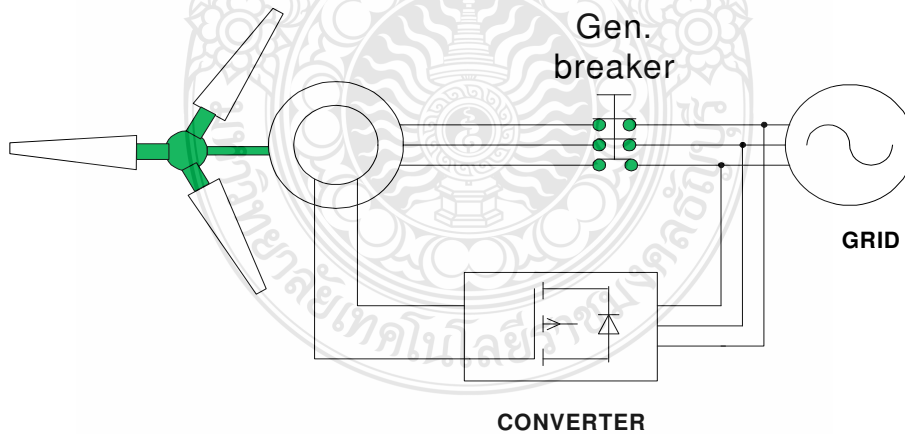
ภาพที่ 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเชื่อมต่อโดยตรงค่าความเร็วคงที่

2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเชื่อมต่อโดยตรงมีความเร็วปรับเปลี่ยนได้ กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (Variable Speed Turbine With Direct Drive) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัดเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง (Gearless) และมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ภาพที่ 2.2) [3]



ภาพที่ 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเชื่อมต่อโดยตรงค่าความเร็วปรับเปลี่ยนได้

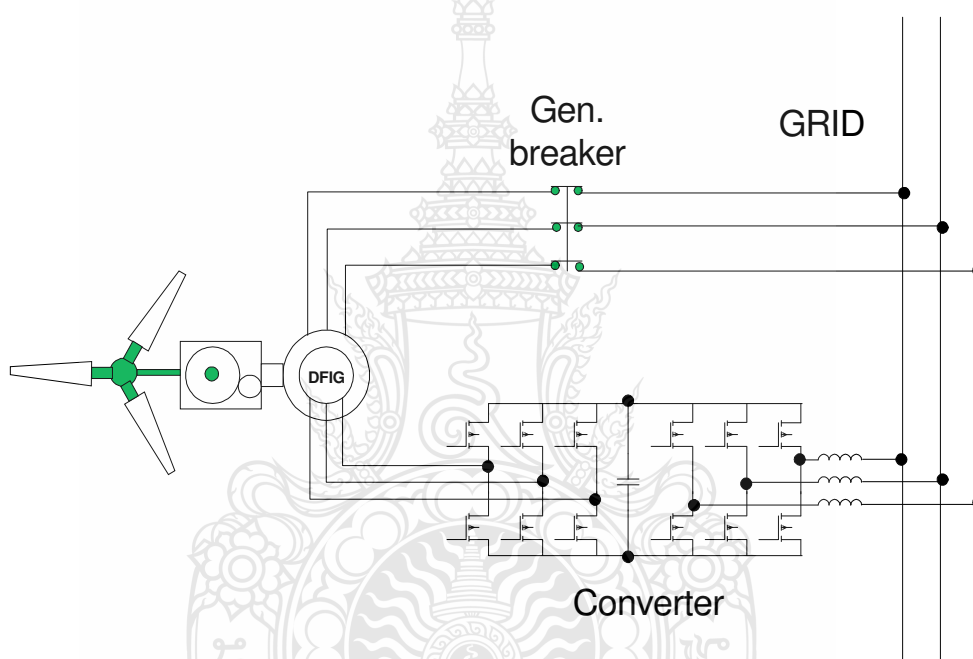
3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางมีความเร็วปรับเปลี่ยนได้กั้นล้มแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed Turbine) ประกอบไปด้วย ใบพัด ก่อตั้งเกียร์เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิลเฟ็ด (Doubly Fed Induction Generator) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ชุดสเตรเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า กั้นล้มชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ (ภาพที่ 2.3)



ภาพที่ 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางค่าความเร็วปรับเปลี่ยนได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางโดย Slip Ring ต่ออยู่กับ Machine Side Converter และ Line Side Converter ภาพที่ 2.4 แบ่งการทำงานออกเป็นสองแบบคือ [4]

1) สเตเตอร์ต่อกับกริด เฉพาะเมื่อเวลาที่ โรเตอร์มีความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส ส่วนวงจรรของโรเตอร์ต่ออย่างถาวรกับกริด การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเริ่มทำงาน ที่ความเร็วของโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสประมาณ 20% โดยที่โรเตอร์จะรับพลังงานไฟฟ้าบางส่วนจากกริด ส่วนสเตเตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริด ถ้าความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสในช่วงประมาณ 20% โรเตอร์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าคืนกลับให้กริด โดยที่สเตเตอร์ก็ยังคงจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกริดตามปกติ



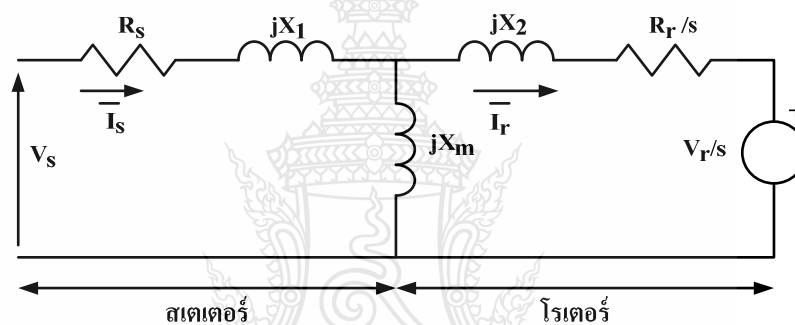
ภาพที่ 2.4 กังหันลมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทางกับ Machine Side และ Line Side Converter

2) สเตเตอร์และโรเตอร์ต่ออยู่กับ Line Side Converter และ Machine Side Converter ต่ออยู่ด้วยกันตลอดตามลำดับ โดยในตอนเริ่มต้นจะยังไม่ต่อกับกริด เมื่อเริ่มหมุนที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด Machine Side Converter จะสร้างความถี่ที่เรียกว่า f_{rotor} ซึ่งความถี่ที่สร้างขึ้นนี้จะตอบสนองกับ $f_{rotation} + f_{rotor} = 50\text{Hz}$ ซึ่งคือความถี่ของ กริด ขณะที่โรเตอร์มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส machine Converter จะสร้างความถี่ที่ตอบสนองกับ $f_{rotation} - f_{rotor} = 50\text{Hz}$ สเตเตอร์และโรเตอร์จะต่อกับกริดเมื่อแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครไนซ์กับกริดนั้นคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงดันและความถี่

คงที่ในขณะที่ความเร็วของโรเตอร์ไม่คงที่ซึ่งสองวิธีนั้น Machine Side Converter จะทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เอาท์พุทคืออยู่ในช่วง 0-10 Hz

2.2.2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางจะมีลักษณะเป็นโหลดบัสหรือบัสของแหล่งจ่ายขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุม ซึ่งมีการควบคุมอยู่ 2 ลักษณะคือการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง และการควบคุมแรงดันที่บัส เมื่อใช้การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นโหลดบัสแต่ถ้าใช้การควบคุมแรงดันที่บัส บัสของเครื่องกำเนิดจะมีลักษณะเป็นบัสของแหล่งจ่ายและมีการจำกัดขอบเขตของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ [10]



ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

จากภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางเมื่อ R_s คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์, R_r คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์, X_1 คือค่ารีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์, X_2 คือค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์, s คือ ค่าสลิป, I_s คือค่ากระแสในสเตเตอร์, I_r คือ ค่ากระแสในขดลวดโรเตอร์ และ V_r คือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกจากโรเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดที่จะจ่ายออกไปยังระบบไฟฟ้า จากวงจรสมมูลสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางได้ ดังนี้

$$V_s = R_s I_s + jX_1 I_s + jX_m (I_s + I_r) \quad (2.1)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + jX_2 I_r + jX_m (I_s + I_r) \quad (2.2)$$

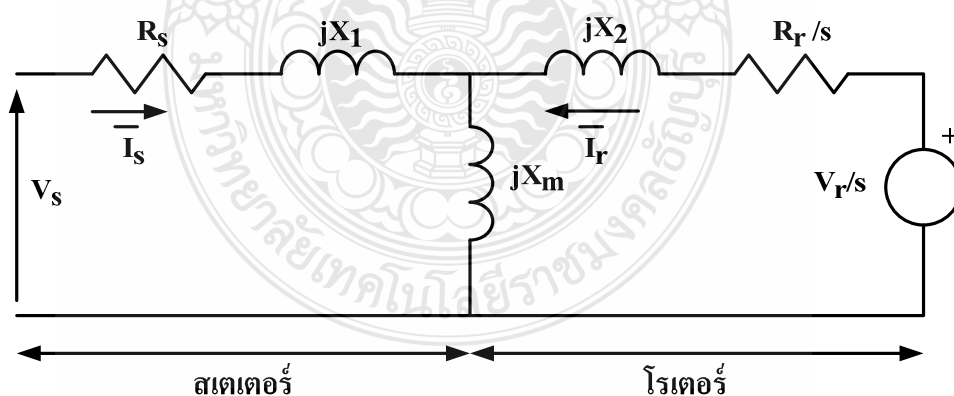
สมการที่ 2.1 และ 2.2 คือสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่ขดลวดสเตเตอร์ และขดลวดโรเตอร์ ตามลำดับ โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จะมีค่าของสลิป (s) เข้ามาเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดคือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจากสเตเตอร์และโรเตอร์ตามสมการที่ 2.3, 2.4 และ 2.5 เมื่อ P_s คือ กำลังไฟฟ้าจริงของขดลวดสเตเตอร์, Q_s คือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของขดลวดสเตเตอร์, P_r คือ กำลังไฟฟ้าจริงของขดลวดโรเตอร์, Q_r คือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของขดลวดโรเตอร์ และ P คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ

$$P_s + jQ_s = 3V_s I_s \quad (2.3)$$

$$P_r + jQ_r = 3V_r I_r \quad (2.4)$$

$$P = P_s + P_r \quad (2.5)$$

ในสถานะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะส่งผลต่อตัวแปร 3 ส่วนคือ สลิป (s) ขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์, แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ V_r และมุมระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (α) วงจรสมมูลในสถานะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางในสถานะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

ค่ากระแสที่สเตเตอร์และโรเตอร์แสดงดังสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$\bar{I}_s = I_s (\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1) \quad (2.6)$$

$$\bar{I}_r = I_r (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) \quad (2.7)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สเตเตอร์

$$P_s = \text{Re}[\bar{V}_s \bar{I}_s^*] \quad (2.8)$$

$$Q_s = \text{Im}[\bar{V}_s \bar{I}_s^*] \quad (2.9)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โรเตอร์

$$P_r = \text{Re}\left[\frac{V_r}{s} (\cos \alpha + j \sin \alpha) \bar{I}_r^*\right] \quad (2.10)$$

$$Q_r = \text{Im}\left[\frac{V_r}{s} (\cos \alpha + j \sin \alpha) \bar{I}_r^*\right] \quad (2.11)$$

ค่ากำลังทางกลที่ขับโรเตอร์ P_m

$$P_m = -3 \left[(P_s - I_s^2 R_s) + (s P_r - I_r^2 R_r) \right] \quad (2.12)$$

หรือ

$$\begin{aligned} P_m = & 3 \frac{(1-s)X_m^2}{D} \left[\frac{V_r^2}{s^2} R_s - V_s^2 \frac{R_r}{s} \right] \\ & + 3(1-s)X_m \frac{V_s V_r}{sD} \left[\cos \alpha \left(\frac{R_r}{s} (X_1 + X_m) - R_s (X_2 + X_m) \right) \right. \\ & \left. + \sin \alpha \left(\frac{R_s R_r}{s} + X_1 X_2 + X_m (X_1 + X_2) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

แรงบิดของสนามแม่เหล็กหมุน T_e

$$T_e = -\frac{3}{\omega} \left[\frac{X_m^2 V_s^2}{D s^2} R_s - \frac{X_m^2 V_s^2}{D} \frac{R_r}{s} \right] - \frac{3 V_s V_r}{\omega s D} X_m \left[\cos \alpha \left(\frac{R_r}{s} (X_1 + X_m) - R_s (X_2 + X_m) \right) + \sin \alpha \left(\frac{R_s R_r}{s} + X_1 X_2 + X_m (X_1 + X_2) \right) \right] \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สเตเตอร์ และ โรเตอร์ และค่าตัวประกอบกำลังสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ โดยใช้อุปกรณ์แปลงผันเป็นอุปกรณ์ควบคุม

2.2.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบที่เป็นโครงข่ายเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพโดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในโครงข่ายเป็นเรื่องยุ่งยากมาก การคำนวณจะมีประโยชน์ต่อการควบคุม การวางแผนการใช้การจ่ายโหลดที่ประหยัดและเหมาะสมกับระบบรวมทั้งการขยายระบบเพิ่มเติม

สมการของระบบโครงข่ายนิยมนเขียนอยู่ในรูปของสมการโหนดแรงดันไฟฟ้ามีสัมพันธกับแอดมิตแตนซ์ของโหนดเป็นระบบเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แต่ในระบบโครงข่ายค่าที่ต้องการเป็นกำลังไฟฟ้าทำให้สมการกำลังไฟฟ้าเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นใช้วิธีของเกาส์ไซด์ัล (Gauss Seidal Method) จุดเด่นคือในไอเทอเรชันที่ k เดียวกันจะมีการแทนค่าประมาณของตัวแปรอิสระที่ทราบค่าแล้วลงในสมการของตัวแปรอิสระที่ยังไม่ทราบค่าทุกสมการ

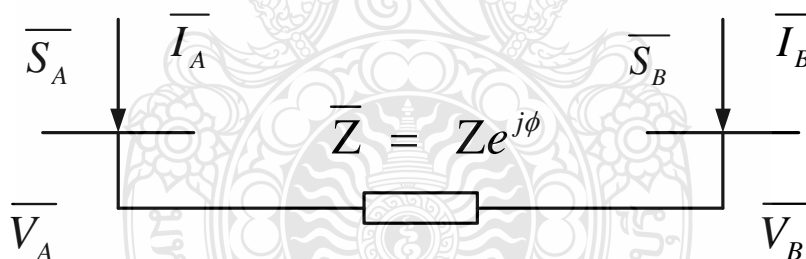
สมการกำลังไฟฟ้าเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นการคำนวณจะใช้แบบวนซ้ำ ผลคำตอบของการคำนวณจะได้สถานะของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System State) ซึ่งประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้าทุกๆ บัสในสถานะโหลดที่กำหนดและค่าการไหลของโหลดหรือกำลังไฟฟ้าในแต่ละส่วนแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ [11]

1) วิธีของนิวตันราฟสัน (Newton Raphson Method) เป็นการคำนวณและปรับคำตอบทุกๆ บัสไปพร้อมๆ กันทำให้จำนวนการวนรอบคำนวณไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนบัสของระบบ มีความน่าเชื่อถือสูง การหาค่าคำตอบของสมการมีลักษณะเป็นรูปกำลังสอง การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนในทุกๆ รอบของการคำนวณจะใช้เวลามากในการคำนวณมากขึ้นเมื่อระบบมีขนาดใหญ่

2) วิธีการแยกเร็ว (Fast Decouple Power Flow Solution) พัฒนาจากวิธีของนิวตันราฟสัน จากสายส่งมีอัตราส่วนของค่ารีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานสูงซึ่งส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อขนาดของแรงดันไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่จะไวต่อมุมของแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยให้ค่า $j_2 = j_3 = 0$ วิธีนี้ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีของนิวตันราฟสันจำนวนรอบของการแก้ไขปัญหามากกว่า ไม่ต้องคำนวณจาโคเบียนเมทริกซ์ใหม่ นิยมใช้การวิเคราะห์แบบออนไลน์และเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้น (Contingency Analysis)

3) วิธีพิจารณาแบบกระแสไฟฟ้าตรง (DC Power Flow) เป็นการพิจารณาตัดส่วนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและแรงดันไฟฟ้าออกไป คำตอบที่ได้จะได้เฉพาะค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ทำให้การหาค่าเป็นสมการแบบเชิงเส้นไม่ต้องหาคำตอบแบบวนซ้ำ นิยมใช้วิเคราะห์เหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้น (Contingency Analysis) เพื่อศึกษาป้องกันให้ระบบมีความปลอดภัย

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยการตั้งสมมติฐานว่าระบบไฟฟ้ากำลังทำงานอยู่ในสถานะอยู่ตัวและสมดุลในการคำนวณจะใช้แผนภาพเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) เช่นการคำนวณหาปริมาณของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่าน BUS A และ BUS B ผ่านสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ \bar{Z} โดยที่ $\bar{Z} = Z e^{j\phi} = R_{line} + jX_{line}$ [12]



ภาพที่ 2.7 แผนภาพเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ 2 BUS

กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้า BUS A

$$\bar{S}_A = \bar{V}_A \bar{I}_A^* \quad (2.15)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลไปยัง BUS B

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{V}_A - \bar{V}_B}{\bar{Z}} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.15 และ 2.16

$$\overline{S}_A = \frac{V_A^2}{Z} e^{j\phi} - \frac{V_A V_B}{Z} e^{j(\phi + \theta_A - \theta_B)} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 จะได้

$$P_A = \frac{V_A^2}{Z} \cos(\phi) - \frac{V_A V_B}{Z} \cos(\phi + \theta_A - \theta_B) \quad (2.18)$$

$$Q_A = \frac{V_A^2}{Z} \sin(\phi) - \frac{V_A V_B}{Z} \sin(\phi + \theta_A - \theta_B) \quad (2.19)$$

กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้า BUS B

$$\overline{S}_B = \overline{V}_B \overline{I}_B^* \quad (2.20)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลไปยัง BUS A

$$\overline{I}_B = \frac{\overline{V}_B - \overline{V}_A}{Z} = -\overline{I}_A \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$\overline{S}_B = -\frac{V_B^2}{Z} e^{j\phi} + \frac{V_A V_B}{Z} e^{j(\phi + \theta_B - \theta_A)} \quad (2.22)$$

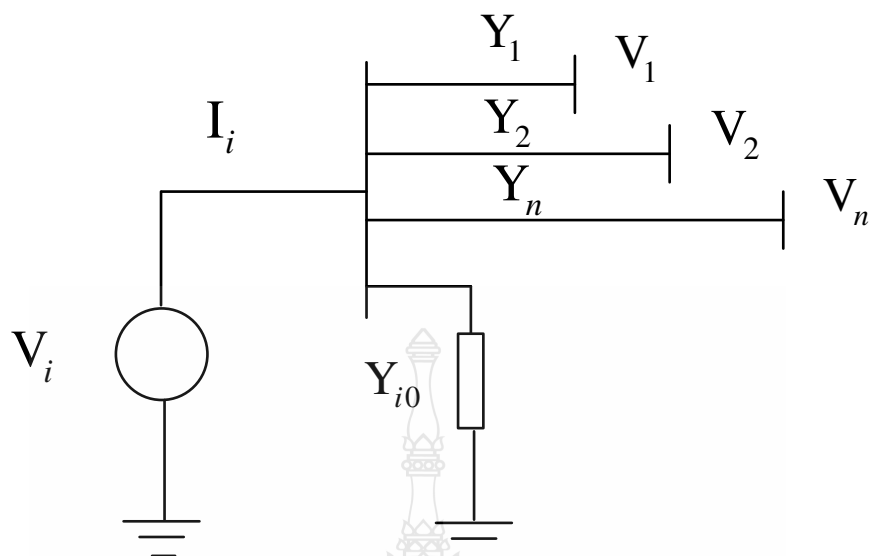
จากสมการที่ 2.22 จะได้

$$P_B = -\frac{V_B^2}{Z} \cos(\phi) + \frac{V_A V_B}{Z} \cos(\phi + \theta_B - \theta_A) \quad (2.23)$$

$$Q_B = -\frac{V_B^2}{Z} \sin(\phi) + \frac{V_A V_B}{Z} \sin(\phi + \theta_B - \theta_A) \quad (2.24)$$

การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

$$\overline{S}_{loss} = P_{loss} + jQ_{loss} = \overline{S}_A + \overline{S}_B \quad (2.25)$$



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างบัสในระบบไฟฟ้ากำลังพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า

สมการกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนของ BUS ใดๆ ที่ i

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i + \bar{I}_i^* \quad (2.26)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ BUS ใดๆ ที่ i

$$\bar{V}_i = V_i e^{j\phi_i} \quad (2.27)$$

กระแสที่ฉีดเข้าที่บัส i

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} \bar{V}_k \quad (2.28)$$

$$Y_{ik} = Y_{ik} e^{j\alpha_{ik}} \quad (2.29)$$

แทนค่าสมการที่ 2.28 ลงในสมการที่ 2.26 จะได้

$$\bar{S}_i = \sum_{k=1}^n V_i e^{j\phi_i} V_k e^{-j\phi_k} Y_{ik} e^{-j\alpha_{ik}} \quad (2.30)$$

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad (2.31)$$

สมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ BUS ที่ i

$$P_i^{cal} = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.32)$$

สมการกำลังไฟฟารีแอกทีฟของ BUS ที่ i

$$Q_i^{cal} = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.33)$$

ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (Active Power Mismatches)

$$\Delta P_i = P_i^{cal} - P_i^{sche} \quad (2.34)$$

ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power Mismatches)

$$\Delta Q_i = Q_i^{cal} - Q_i^{sche} \quad (2.35)$$

ค่ามุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสรับสามารถคำนวณได้จาก

$$\theta_r = -\sin^{-1} \left(\frac{\bar{P}_k \bar{X}_{line}}{V_s \bar{V}_r} \right) \quad (2.36)$$

จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเริ่มจากการคาดคะเนค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าสมมุติให้บัสรับมีค่า 1.10 p.u. บัสรับจะมีค่าแรงดันน้อยกว่าประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นคำนวณค่ามุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสรับตามสมการที่ 2.36 นำค่าแรงดันและมุมเฟสไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าตามสมการที่ 2.32 และ 2.33 และไปหาค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟตามสมการที่ 2.34 และ 2.35 ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าเป็นศูนย์

ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าจะเป็นคำตอบที่แท้จริง หากไม่เป็นศูนย์จะต้องคาดคะเนใหม่หาค่าที่ได้อยู่ในช่วงของความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ค่าของขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้านั้นเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงวิธีการนี้ก็ยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด

วิธีของนิวตันราฟสัน (Newton Raphson Method) เป็นการคำนวณและปรับคำตอบทุกๆ บัสไปพร้อมกันทำให้จำนวนการวนรอบคำนวณไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนบัสของระบบ โดยจะพิจารณากระแสไฟฟ้าเข้าบัส i ตามภาพที่ 2.8 เขียนอยู่ในเทอมของเมทริกของบัสแอดมิตแตนซ์ [12]

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \bar{V}_j \quad (2.37)$$

สมการกระแสในรูปเชิงขั้วของบัสที่ i และบัส j

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \quad (2.38)$$

กำลังไฟฟ้าที่บัส i หาค่าได้จากสมการ

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.39)$$

นำสมการที่ 2.38 แทนในสมการที่ 2.39 จะได้

$$P_i - jQ_i = V_i \angle(-\delta_i) \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \quad (2.40)$$

สามารถแยกเป็นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟคือ

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.41)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.42)$$

สมการที่ 2.41 และ 2.42 จะประกอบด้วยชุดสมการตัวเลขไม่เป็นเชิงเส้นโดยเทอมของตัวแปรอิสระไม่เกี่ยวข้องกันซึ่งประกอบด้วยขนาดของแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าต่อหน่วยและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเรเดียน นิวตันกราฟเส้นอาศัยให้ค่าความผิดพลาดของฟังก์ชัน $f(x)$ เข้าสู่ศูนย์โดยการปรับค่าตัวแปร Δx ให้อนุกรมของเทเลอร์ (Taylor's Series) เพื่อขยายส่วนฟังก์ชันของ x^0

$$f(x^0) = \frac{df(x^0)}{dx} \Delta x + \varepsilon = k \quad (2.43)$$

ถ้าส่วนความผิดพลาดเป็นศูนย์ จะได้

$$\Delta x = \left[\frac{df(x^0)}{dx} \right] [k - f(x^0)] \quad (2.44)$$

เมื่อสมการที่ 2.44 เทียบกับสมการที่ 2.41 และ 2.41 จะได้

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (2.45)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (2.46)$$

จากสมการข้างบนนี้ให้บัสที่ 1 เป็นบัสตั้งต้นเขียนอยู่ในรูปแมทริกและใช้สมการจาโคเบียนแมทริก (Jacobian Matrix) เป็นส่วนทำให้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสมการเชิงเส้นซึ่งเป็นการสัมพันธ์ของส่วนเล็กๆของมุมของแรงดันไฟฟ้าและขนาดของแรงดันไฟฟ้ากับส่วนเล็กๆของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และกำลังไฟฟารีแอกทีฟสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

ส่วนของ J_1 จะประกอบด้วย

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad J \neq 1 \quad (2.49)$$

ส่วนของ J_2 จะประกอบด้วย

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i Y_{ij} \cos(\theta_{ij}) + \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad J \neq 1 \quad (2.51)$$

ส่วนของ J_3 จะประกอบด้วย

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad J \neq 1 \quad (2.53)$$

ส่วนของ J_4 จะประกอบด้วย

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_i Y_{ij} \sin(\theta_{ij}) - \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad J \neq 1 \quad (2.55)$$

ส่วนของ $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ หาได้จาก

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.56)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.57)$$

ส่วนของมุมของแรงดันไฟฟ้าและขนาดของแรงดันไฟฟ้าในรอบใหม่หาได้จาก

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.58)$$

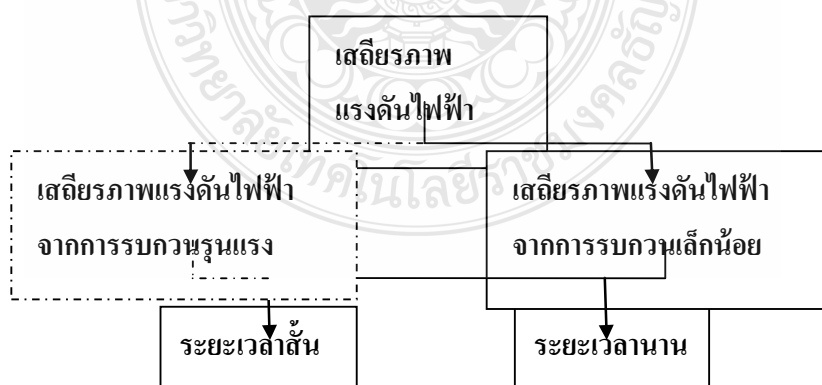
$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \Delta V_i^{(k)} \quad (2.59)$$

เมื่อจบการคำนวณผลการคำนวณจะดูเข้าหาคำตอบให้แสดงผลลัพธ์แรงดันและมุมเฟสของทุกๆบัสพร้อมทั้งคำนวณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟซึ่งไหลในสายส่งแต่ละเส้นและค่าการสูญเสียรวมทั้งหมด

2.2.4 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability) หมายถึงระบบที่มีการเคลื่อนที่ใดๆจะสามารถคงอยู่ในสภาวะปกติได้ ไม่ว่าระบบจะทำงานอยู่ภายใต้สภาวะปกติหรือแม้แต่ว่าระบบจะต้องเจอกับสิ่งรบกวนใดๆก็ตาม

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจาก เกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ ความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจาก การสูญเสียที่โหลดหรือการสูญเสียในสายส่งตามภาพที่ 2.9 [10]



ภาพที่ 2.9 แผนผังแสดงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเรียกอีกอย่างว่าเสถียรภาพ โหลดซึ่งกล่าวถึงความสามารถของระบบที่ควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ระดับยอมรับได้ การขาดเสถียรภาพของแรงดันเกิดจากระบบขาดความสมดุลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งส่วนใหญ่จะใช้การควบคุมเฉพาะจุด เช่น การควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การปรับแทปของหม้อแปลงไฟฟ้า (Onload Tap Changer) การปรับอุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ายัดหยุ่นหรือการปรับเปลี่ยนโหลดให้เหมาะสมเป็นต้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าใช้ได้ทั้งสภาวะคงตัวและไดนามิกแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ

1) เสถียรแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนรุนแรง (Large Disturbance Voltage Stability) คือระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความสามารถในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าทุกๆ บัสคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ เช่น การเกิดความผิดปกติในระบบ (Faults) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบตัวใดตัวหนึ่งเสียหาย การศึกษาสถานะนี้จะศึกษาตั้งแต่ช่วงเวลาวินาทีจนถึงเวลา 10 นาทีจะต้องใช้การจำลอง โหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง

2) เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนเพียงเล็กน้อย (Small Disturbance Voltage Stability) คือระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความสามารถในการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการรบกวนหรือมีความผิดปกติในระบบเพียงเล็กน้อย เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้า เป็นต้น การวิเคราะห์จะใช้การวิเคราะห์แบบสถิต (Static Analysis) เพื่อจำแนกสภาวะการขาดเสถียรภาพของแรงดัน

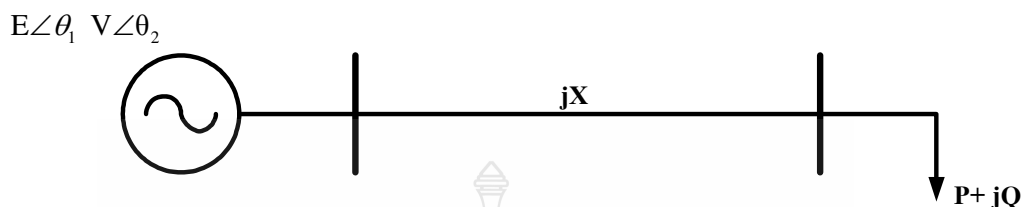
กรอบเวลาสำหรับปัญหาด้านเสถียรภาพแรงดันของระบบส่วนมากจะเริ่มจากวินาทีไปจนถึง 10 นาที เพราะฉะนั้นเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือระยะเวลาด้านสั้นๆ (Short-Term) และระยะเวลานาน (Long-Term)

- เสถียรภาพแรงดันในระยะเวลาด้านสั้นๆคือส่วนประกอบของโหลดที่มีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมโหลดและอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า กระแสตรง คาบเวลาการศึกษาจะมีหน่วยเป็นวินาที

- เสถียรภาพแรงดันในระยะเวลานานคืออุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆเช่นการควบคุมความถี่ของโหลด ควบคุมความถี่ของโหลด และการจำกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คาบเวลาของการศึกษาจะมีหน่วยเป็นนาที [10]

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเบื้องต้นจะศึกษารูปไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัสในภาพที่ 2.10 โดยที่ $E \angle \theta_1$ คือ แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sending End

Bus), $V\angle\theta_2$ คือแรงดันที่จุดต่อของโหลด (Receiving End Bus), jX คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสาย และ $P+jQ$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดคงที่เขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน



ภาพที่ 2.10 ไลอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส

จากภาพที่ 2.10 เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้จากสมการที่ 2.60 และ 2.61

$$P = \frac{EV}{X} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.60)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.61)$$

จากสมการที่ 2.60 และ 2.61 จะได้สมการกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส คือ

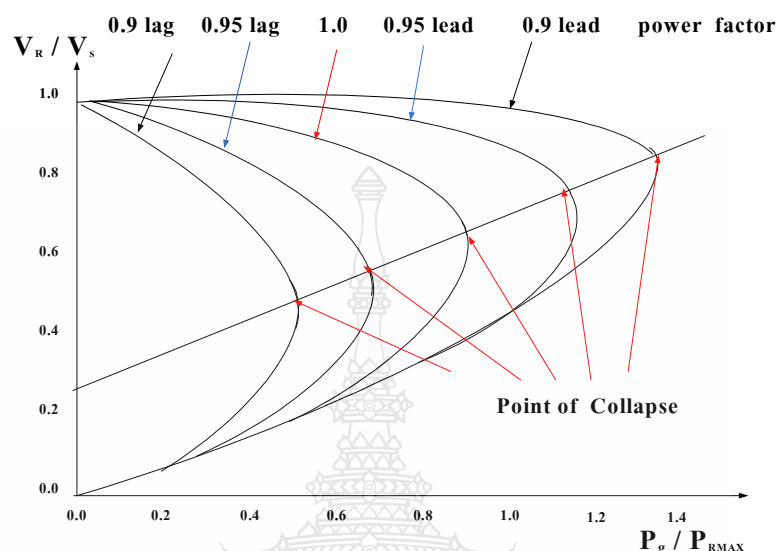
$$V^2 = \frac{PX}{E} + \left[\frac{QX + V^2}{E} \right] \quad (2.62)$$

แรงดันที่โหลดจะมีค่าดังสมการที่ 2.63

$$V = \sqrt{\frac{E^2 - 2QX \pm \sqrt{(E^2 - 2QX)^2 - 4(P^2 + Q^2)X^2}}{2}} \quad (2.63)$$

จากสมการที่ 2.62 ถ้ากำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดคงที่ และ ค่าของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลดเปลี่ยนแปลงไป (P) เราจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ที่แสดงในภาพที่ 2.11 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังล้าหลังจะมีค่าองค์ประกอบโหลด

สูงสุดของระบบลดลง เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้าค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบจะเพิ่มมากขึ้น [13]



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

การคำนวณหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบกำลังไฟฟ้าสามารถออกได้ 3 วิธีคือ

1) วิธีโดยตรง (Direct Method) เป็นการคำนวณของค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ โดยใช้สูตรเป็นวิธีธรรมดาที่สุด เช่น กลุ่มของสมการไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งรวมถึงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและเงื่อนไขที่ถูกตั้งตามที่กำหนดของแบบ Saddle Node และ Limit Induced Bifurcation วิธีโดยตรงมีความยากที่จะพิสูจน์และไม่มีความสนใจในทางปฏิบัติ ใช้เทคนิคพื้นฐานของโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสูตรหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดเช่น ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเนื่องจากสมมุติฐานอยู่ไกลเกินกว่าที่จะแสดงให้เห็นค่าสถานะโหลดสูงสุดได้ [13-14]

Bifurcation points ความสนใจในการวิเคราะห์โดยการแบ่งออกเป็นสองส่วนของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่นำไปสู่จุดของการพังทลาย เช่นระดับที่อยู่เหนือกว่าค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดซึ่งสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าไม่มีสูตรหาค่าได้วิธีการนี้จะมีอยู่ 2 แบบคือ

1. แบบ Saddle node Bifurcation เป็นการรวบรวมค่าปริมาณสูงสุดของระบบตั้งและอยู่ในรูปสมการกำลังสองของการไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งจะเป็นเพียงจุดหนึ่งของการพังทลาย

2. แบบ Limit Induced Bifurcation เทียบได้กับการสำรองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งส่วนที่วิกฤตและส่วนที่ไม่วิกฤต โดยเฉพาะค่าวิกฤตจะเป็นจุดหลายจุดของการพังทลาย

2) วิธี Homotopy เป็นประเภทของลำดับขั้นตอนการแก้ไขปัญหาประเภทหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและความไว้วางใจของการคำนวณค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งจะประกอบด้วยการกำหนดแผนผังของ Homotopy และสมการการต่อเนื่องที่มีเมทริกซ์จาโคเบียนไม่เป็นซิงกูลาร์ที่จุดต่างๆของ Bifurcation ดังนั้นจะมีความแข็งแกร่งทางตัวเลข โดยเฉพาะการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่องจะเป็นวิธี Homotopy แบบบังคับซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนของการทำนายและการแก้ไข ขั้นตอนของการทำนายจะได้รับจากเวกเตอร์ที่สัมผัสผิวของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและขั้นตอนการแก้ไขจะได้รับจากส่วนที่ตั้งฉากของเวกเตอร์ที่สัมผัสผิวของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ากับสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

3) วิธี N-1 Contingency Analysis ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดจะถูกพิจารณาอย่างละเอียด เช่นการวัดระยะทางการพังทลายของจุดการทำงานของปัจจุบันและไม่เป็นเส้นทางอื่นที่อยู่รอบๆนั้น คือรวมจำนวนของโหลดที่ระบบจ่ายก่อนที่จะเกิดการพังทลายซึ่งการนำไปใช้งานมีความสำคัญที่สุดของเทคนิค CPF ของวิธี N-1 Contingency Analysis การกำหนดกลุ่มของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้น การวิเคราะห์ CPF จะทำให้ระดับของค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดไปแต่ละกลุ่มของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้น ถ้ากลุ่มของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นมีคุณลักษณะระดับ Lading สูงสุดอยู่ต่ำกว่าสถานะการทำงานปัจจุบัน กลุ่มของเหตุการณ์นั้นเป็นไปได้ ถ้ากลุ่มของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นมีคุณลักษณะระดับ lading สูงสุดอยู่ต่ำกว่าจินตภาพที่กำหนด กลุ่มของเหตุการณ์นั้นจะวิกฤต ทั้งสองประเภทนี้การทำงานของระบบจะถูกนำไปให้การกระทำของแก้ไขเพื่อปรับปรุงความปลอดภัยของระบบ [a]

วิธี Continuation Power Flow (CPF) ที่ใช้งานในโปรแกรม PSAT เป็นวิธี Homotopy ประกอบด้วยขั้นตอนของการทำนายและการแก้ไข ขั้นตอนของการทำนายจะได้รับจากเวกเตอร์ที่สัมผัสผิวของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและขั้นตอนการแก้ไขจะได้รับจากส่วนที่ตั้งฉากของเวกเตอร์ที่สัมผัสผิวของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ากับสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

ขั้นตอนของการทำนาย (Predictor Step) ที่จุดสมดุลทั่วไป จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$g(y_p, \lambda_p) = 0 \Rightarrow \left. \frac{d_g}{d_\lambda} \right|_p = 0 = \nabla_y g \Big|_p \frac{d_y}{d_\lambda} \Big|_p + \left. \frac{\partial g}{\partial \lambda} \right|_p \quad (2.64)$$

เวกเตอร์ที่สัมผัสผิวสามารถประมาณค่าด้วย

$$\tau_p = \left. \frac{d_y}{d_\lambda} \right|_p \approx \frac{\Delta y_p}{\Delta \lambda_p} \quad (2.65)$$

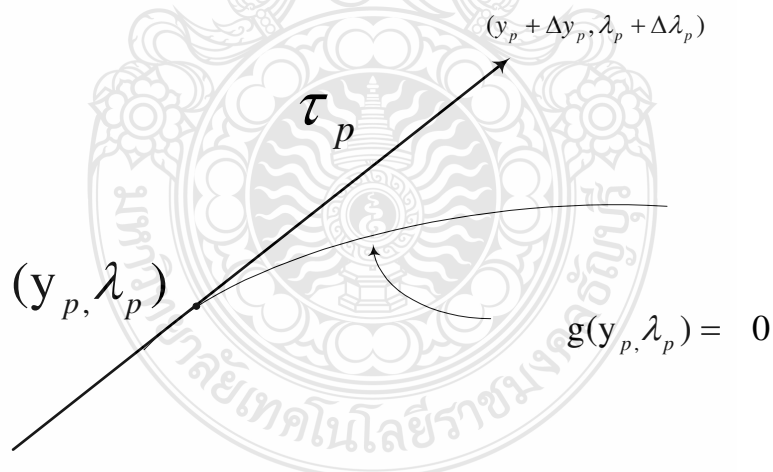
จากสมการที่ 2.64 และ 2.65 จะได้ว่า

$$\tau_p = - \left. \nabla_y g \right|_p^{-1} \left. \frac{\partial g}{\partial \lambda} \right|_p \quad (2.66)$$

$$\Delta y_p = \tau_p \Delta \lambda_p \quad (2.67)$$

การควบคุมขนาดของขั้น (k) จะถูกเลือกแสดงถึงการเพิ่มขึ้น Δy_p และ $\Delta \lambda_p$ ตามค่าปกติ เพื่อเป็นบรรทัดฐานเพื่อหลีกเลี่ยงขั้นตอนที่มีขนาดใหญ่ เมื่อ $|\tau_p|$ มีขนาดใหญ่

$$\Delta \lambda_p \triangleq \frac{k}{|\tau_p|} \quad \Delta y_p \triangleq \frac{k \tau_p}{|\tau_p|} \quad (2.68)$$



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนของค่าทำนายกับเวกเตอร์ที่สัมผัสผิวของสมการ

เมื่อ $k = \pm 1$ เป็นสัญญาณถึงถึงการเพิ่มหรือการลดของ λ ตามภาพที่ 2.12 แสดงถึงขั้นตอนการทำนาย

ขั้นตอนของค่าแก้ไข (Corrector Step) ในกลุ่มของสมการ $n+1$ จะถูกพิสูจน์ได้ดังนี้

$$g(y, \lambda) = 0$$

$$p(y, \lambda) = 0 \quad (2.69)$$

ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนของค่าแก้ไขที่ได้รับจากเวกเตอร์ที่ตั้งฉากภายในของสมการ

เมื่อการแก้ไขของ g ต้องอยู่ภายในความหลากหลายของ Bifurcation (Bifurcation Manifold) และ p เป็นสมการการเพิ่มขึ้นที่ประกนกลุ่มที่ไม่เป็นซิงกูลาร์ที่จุดของ Bifurcation การเลือก p จะมีอยู่ 2 เลือกคือเส้นที่ตั้งฉากภายในและค่าพารามิเตอร์เฉพาะที่ (Local Parametrization)

ในส่วนเส้นที่ตั้งฉากภายในตามภาพที่ 2.14 จะได้

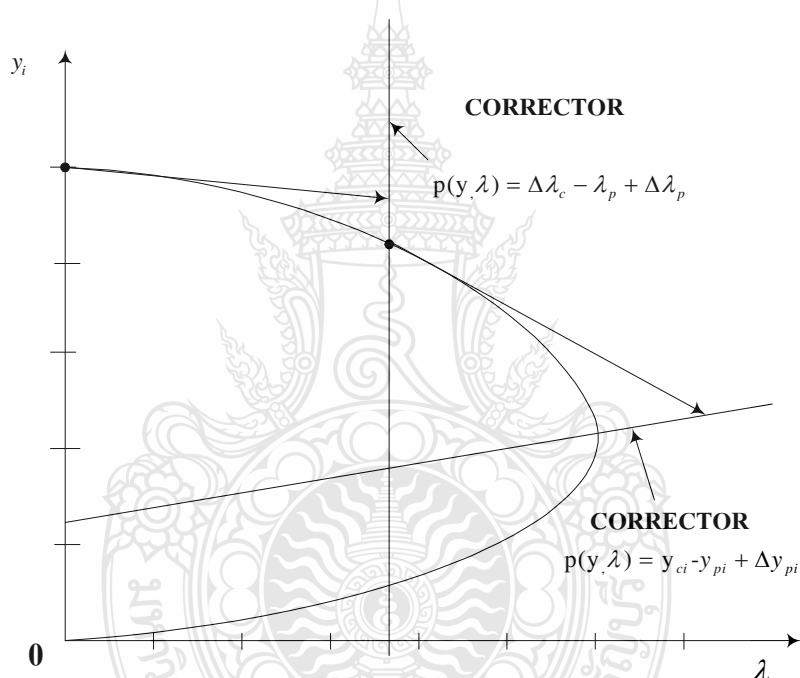
$$p(y, \lambda) = \begin{bmatrix} \Delta y_p \\ \Delta \lambda_p \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} y_c - (y_p + \Delta y_p) \\ \Delta \lambda_c - (\lambda_p + \Delta \lambda_p) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.70)$$

ค่าพารามิเตอร์เฉพาะที่ (Local Parametrization) ทั้งพารามิเตอร์ λ และตัวแปร y จะถูกบังคับให้เป็นค่าคงที่

$$p(y, \lambda) = \Delta\lambda_c - \lambda_p + \Delta\lambda_p \quad (2.71)$$

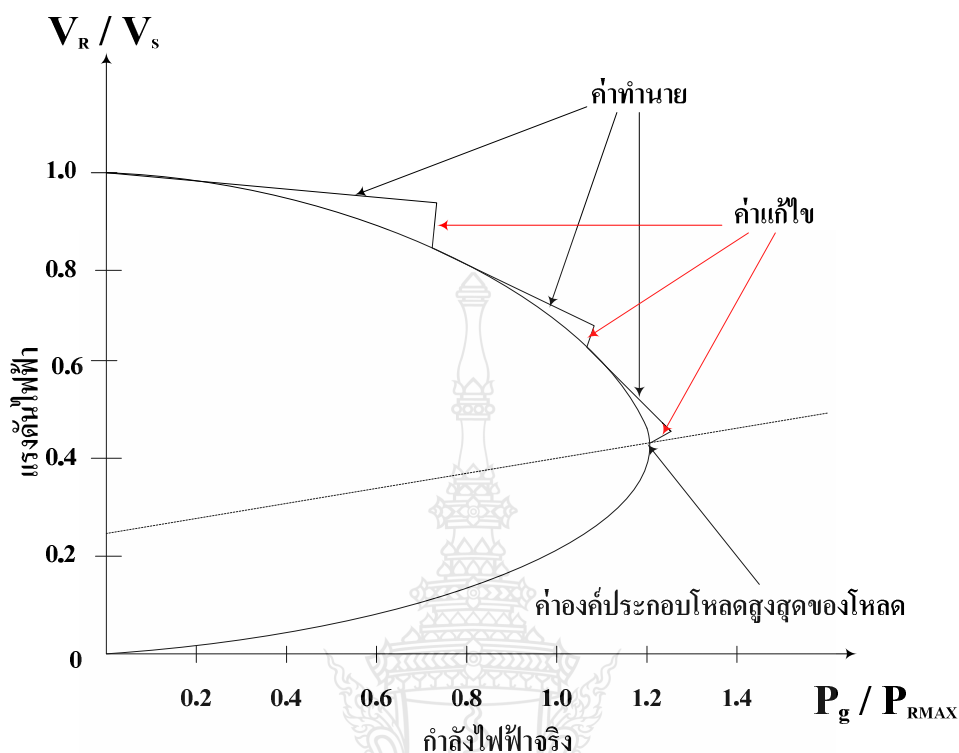
$$p(y, \lambda) = y_c - y_p + \Delta y_p \quad (2.72)$$

ในการเลือกค่าตัวแปรให้คงที่ขึ้นอยู่กับความหลากหลายของ Bifurcation (Bifurcation Manifold) ของ g ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 กราฟ CPF ที่ขั้นตอนของค่าทำนายได้รับจากเป้าหมายของค่าพารามิเตอร์เฉพาะที่

วิธี Continuation Power Flow (CPF) คือวิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริงทั้งบนและล่างเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุด วิธีการของ CPF จะทำงานซ้ำไปเป็นขั้นๆ คือเส้นค่าทำนายเป็นเส้นสัมผัสของเส้นกราฟที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริงตามสมการที่ 2.77 และเส้นค่าแก้ไขจะเป็นเส้นตั้งฉากกับเส้นค่าทำนายตามสมการที่ 2.80 ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริงโดยวิธี CPF

พื้นฐานสมการของ CPF มีลักษณะคล้ายกับการวิเคราะห์โหลดโพล้วแต่จะมีการเพิ่มโหลดคือเพิ่มค่าพารามิเตอร์ (λ) ต่อท้ายสมการ โหลดโพล้ว สำหรับการเริ่มต้นของการเพิ่มโหลดสามารถเขียนสมการได้

$$\lambda K - f(\delta, V) = 0 \quad (2.73)$$

หรือ

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.74)$$

เมื่อ K คือ ลักษณะของโหลด และ λ คือ ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าโหลดสูงสุด จากสมการที่ 2.74 เขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\frac{\partial f}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial f}{\partial V} dV + \frac{\partial f}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (2.75)$$

จากสมการที่ 2.75 มีตัวแปรหนึ่งที่ไม่ทราบค่าคือ λ ซึ่งจะทำให้มีตัวแปรมากกว่าสมการ ดังนั้นเราต้องเพิ่มสมการอีกหนึ่งสมการคือ

$$e_k \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \pm 1 \quad (2.76)$$

เมื่อ e_k คือแถวของเวกเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าจะมีค่าเป็น 1 ค่าพารามิเตอร์ของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า (λ) จะมีค่าเป็นบวกเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นและค่าแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในสภาวะตามการเพิ่มขึ้นของโหลดจะมีค่าเป็นลบ เมื่อค่าของแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจากจุดที่ระบบสามารถรับโหลดได้สูงสุด ค่าทำนายหาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{\text{predicted}} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ \dots \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & & & \\ & J_{LF} & & \\ & & \vdots & K \\ & & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & [e_k] & \dots \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

และ σ คือขนาดของขั้นการเปลี่ยนแปลงในการทำนายครั้งต่อไป ที่ค่าการเพิ่มขึ้นของโหลด $dx_k = 1$ จะได้

$$X_k^{\text{predicted}} = X_{k0} + \sigma \quad (2.79)$$

วิธีการคำนวณหาค่าแก้ไข หาได้จากสมการ

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.80)$$

$$x_k - x_k^{\text{predicted}} = 0 \quad (2.81)$$

เมื่อ x_k คือ ค่าพารามิเตอร์ของความต่อเนื่องที่เลือกใช้ [10]

การศึกษาวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญของการวางแผนและการออกแบบสำหรับการขยายระบบกำลังไฟฟ้าในอนาคต ข้อมูลหลักที่ใช้ในการคำนวณคือขนาดและมุมเฟสของแรงดันแต่ละบัสและค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในแต่ละสายส่ง มาแยกชนิดของบัส เงื่อนไขบังคับและการแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Method) ที่อาศัยให้ค่าความผิดพลาดของฟังก์ชัน $f(x)$ เข้าสู่ศูนย์โดยใช้การปรับค่าตัวแปร Δx และใช้อนุกรมของเทเลอร์ (Taylor's Series) ในการคำนวณและปรับค่าคำตอบทุกๆบัสไปพร้อมๆ กัน ทำให้จำนวนการวนรอบคำนวณไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนบัสของระบบ [12]

การนำแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ค่าตัวประกอบคงที่มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กันจะเป็นวิธีใช้ในการกำหนดความสามารถของระบบในการจ่ายโหลดที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นการหาค่าองค์ประกอบสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage Collapse)

2.2.5 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นตามคำจำกัดความของมาตรฐาน IEEE คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและอุปกรณ์ควบคุมอยู่กับที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเพิ่มความสามารถและสมรรถนะในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเพิ่มความสามารถและสมรรถนะในการจ่ายกำลังไฟฟ้า จากนั้นเราสามารถกำหนดวัตถุประสงค์ในการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ได้ 2 กรณี คือ

- 1) เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ
- 2) เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

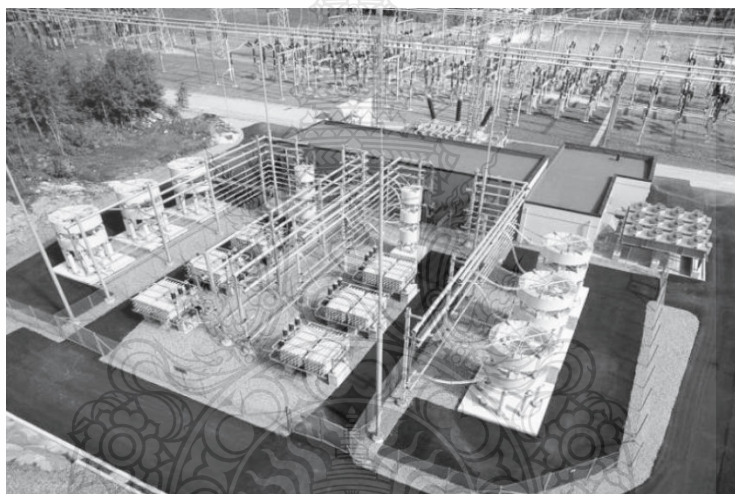
ในปัจจุบันอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นแบ่งออกตามลักษณะของการเชื่อมต่อกับระบบและการควบคุมนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน [10]

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานกับระบบ ได้แก่ Static Var Compensator และ Static Synchronous Compensator

1) Static Var Compensator (SVC)

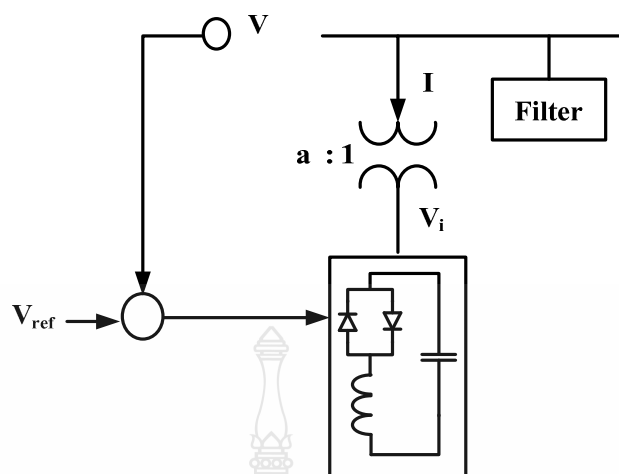
SVC ถูกใช้งานเป็นครั้งแรกในเตาหลอมไฟฟ้าเมื่อปี 1979 และถูกนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ในปี 1979 ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา SVC ได้ถูกนำมาใช้งานกันเพิ่มมากขึ้นและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันตามภาพที่ 2.16

SVC จะมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายและโหลดทางไฟฟ้าเพราะสามารถจ่ายและรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบได้ และจะช่วยในการรักษาระดับของแรงดันในระบบเมื่อแรงดันที่บัลลคลงหรือเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบส่งจ่าย SVC จะประกอบไปด้วย สวิตซ์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงานและ สวิตซ์ตัดต่อตัวเหนี่ยวนำ ต่อขนานเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

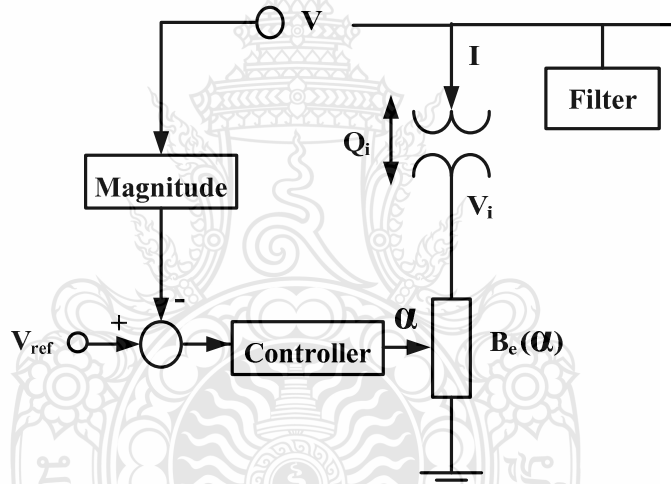


ภาพที่ 2.16 ลักษณะของการติดตั้ง SVC [10]

วงจรมุมูลและแบบจำลองการควบคุมเสถียรภาพของ SVC แสดงในภาพที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ

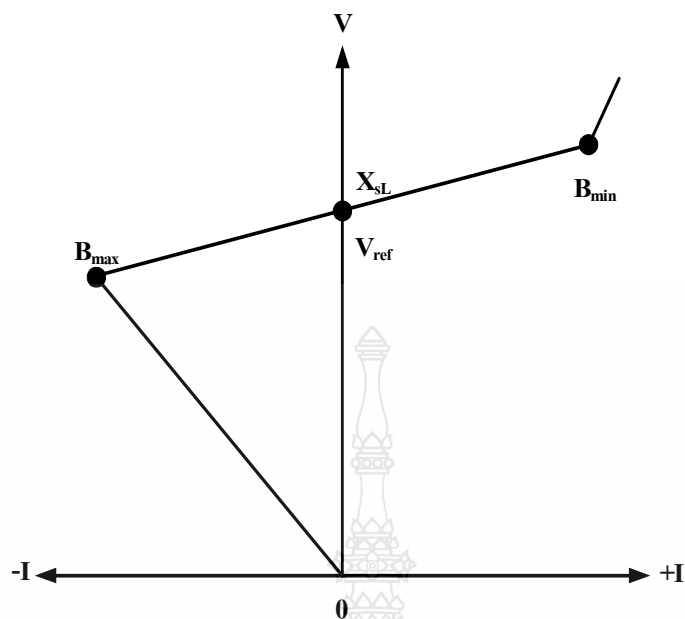


ภาพที่ 2.17 วงจรสมมูลของ SVC [10]



ภาพที่ 2.18 แบบจำลองของ SVC [10]

SVC สามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานได้ดังภาพที่ 2.17 โดย SVC จะสามารถควบคุมแรงดันที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังได้ จากภาพที่ 2.18 SVC จะใช้การควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์การรับหรือจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มุมการจุดชนวนนี้จะอยู่ในช่วง $90^\circ \sim 180^\circ$ คุณลักษณะเฉพาะของ SVC แสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ SVC

ภาพที่ 2.14 การทำงานของ SVC ขึ้นอยู่กับแรงดันที่บัส ขอบเขตของค่าสูงสุดและต่ำสุดของ SVC ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ที่จุด B_{max} คือตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเก็บประจุทำงานจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟตามขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ และที่จุด B_{min} คือตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเหนี่ยวนำทำงานรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากระบบตามพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ

ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังส่วนประกอบในการควบคุมของ SVC มีความสำคัญมากในแบบจำลองของ SVC ซึ่งเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนั้นสมการ 2.82 และ 2.83

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, V, V_{ref}) \quad (2.82)$$

$$0 = \underbrace{\begin{bmatrix} B_c - \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L/X_C)}{\pi X_L} \\ I - V_i B_c \\ Q_i - V_i^2 B_c \end{bmatrix}}_{g(\alpha, V_i, I, Q, B_c)} \quad (2.83)$$

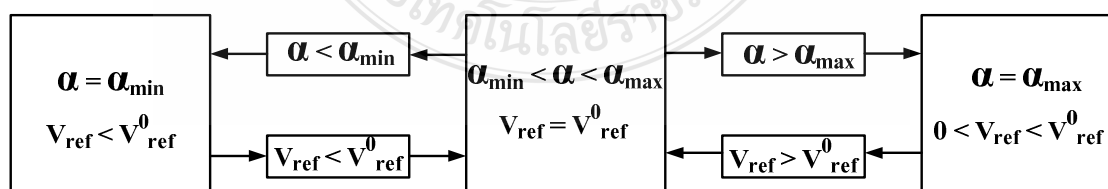
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าจะต้องกำหนดค่าให้ชัดเจนในภาพที่ 2.19 โดยที่ X_c และ $f(\cdot)$ ยังคงอยู่ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ ซึ่งจะไม่มีการกำหนดขอบเขตของสมการยกเว้นมุมการจุดชนวน (α), โดยเฉพาะกระแส (I), การควบคุมแรงดัน (V) และ แรงดัน SVC (V_i) เช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

จากสมการที่ 2.82 และ 2.83 แบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัวสามารถเขียนแทนได้ดังสมการที่ 2.32

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL} I \\ g(\alpha, V, V_i, I, Q_i, B_c) \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

เราสามารถใช้อุปกรณ์การไหลของกำลังไฟฟ้าในการหาขอบเขตที่เหมาะสมของมุมจุดชนวนจากสมการที่ 2.83 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช้สลับแดนซ์ (B_c) และมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ (α), กระแส (I) และ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q)

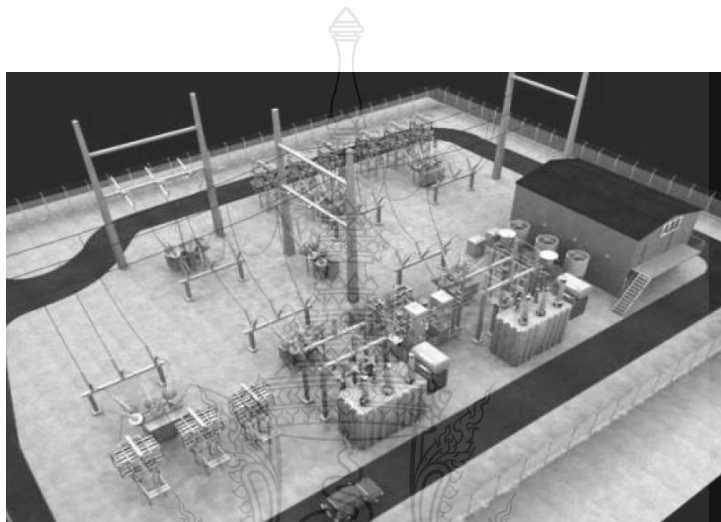
ขอบเขตของการควบคุม SVC คือ การควบคุมค่าของมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ซึ่งอยู่ในช่วง $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$ เมื่อ α_m และ α_M คือ มุมจุดชนวนน้อยที่สุดและมุมจุดชนวนมากที่สุดตามลำดับ ถ้าเราไม่รู้วิธีหาขอบเขตมุมจุดชนวน ให้กำหนดมุมจุดชนวนให้คงที่และเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} วิธีการของการจัดการควบคุมขอบเขตแสดงดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัว

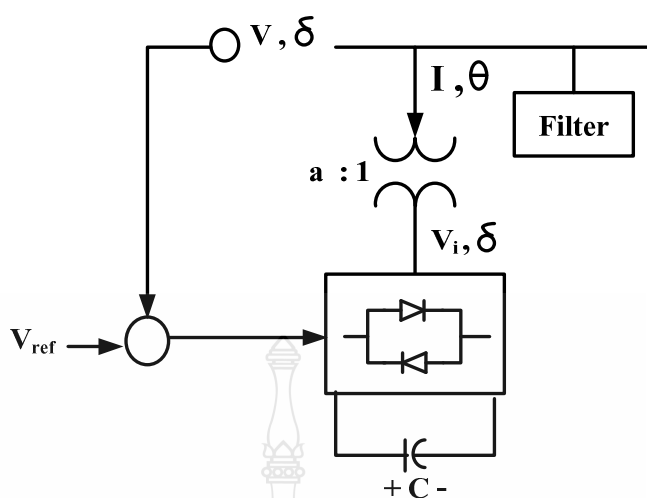
2) Static Synchronous Compensator (STATCOM)

ในปี 1999 SVC ถูกนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า แล้วเรียกกันว่า“STATCOM” มีลักษณะคล้ายกันกับ ซิงโครไนส์คอนเดนเซอร์แต่เป็นการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และมีหม้อแปลงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กับ บัส STATCOM สามารถควบคุมแรงดันที่บัส โดยการควบคุมการจ่ายหรือรับกำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกำลังไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 2.21

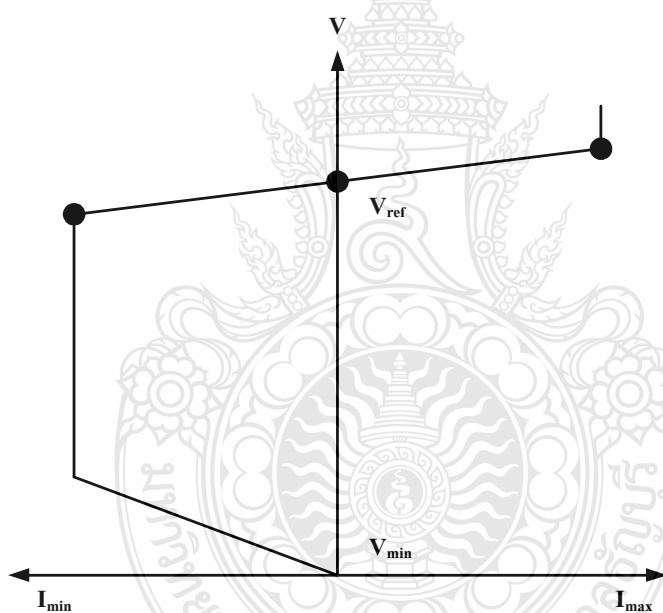


ภาพที่ 2.21 ลักษณะของการติดตั้ง STATCOM [10]

วงจรสมมูลของ STATCOM และคุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ STATCOM แสดงในภาพที่ 2.22 และ 2.23 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันจากวงจรแปลงผัน ซึ่งวงจรแปลงผันจะทำหน้าที่ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีการควบคุมระดับความถี่เท่ากับระบบที่เชื่อมต่อ และชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามความต้องการของระบบ จากรูปจะตัดการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก จากแผนผังของการควบคุมจะใช้การควบคุมมอดูเลต

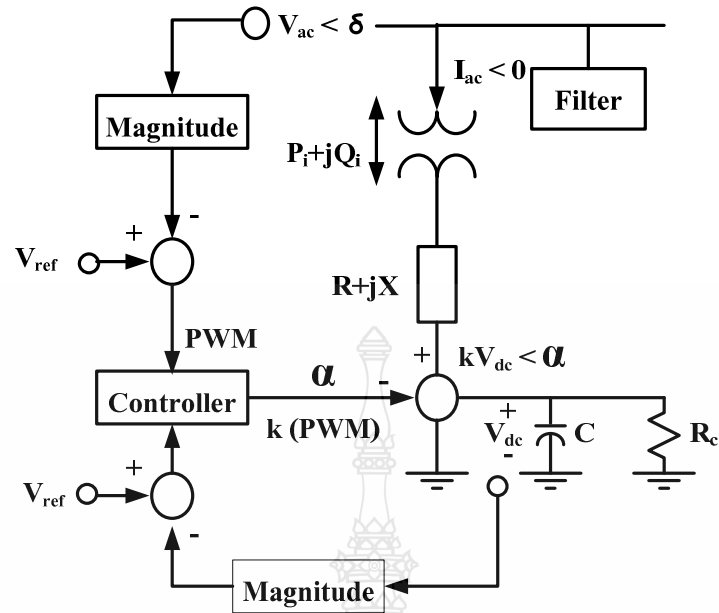


ภาพที่ 2.22 วงจรสมมูลของ STATCOM



ภาพที่ 2.23 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ STATCOM

การควบคุม STATCOM มี 2 วิธี วิธีแรก คือการควบคุมมุมเฟส เป็นการควบคุมการเลื่อนมุมเฟส (β) ที่ควบคุมขนาดแรงดันของ STATCOM และอีกวิธีหนึ่งคือการควบคุมโดยการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมขนาดแรงดันของ STATCOM และมุมเฟส ในกรณีนี้จะแยกการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



ภาพที่ 2.24 แบบจำลองของ STATCOM

แบบจำลองของ STATCOM ตามภาพที่ 2.24 มีข้อจำกัดระหว่างการควบคุมและการทำงาน ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมให้แบบจำลองของ STATCOM มีลักษณะเดียวกับเครื่องจักรกลเชิงโครนัส สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลอง STATCOM ในรูปเปอร์ยูนิต คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dc,ref}) \quad (2.85)$$

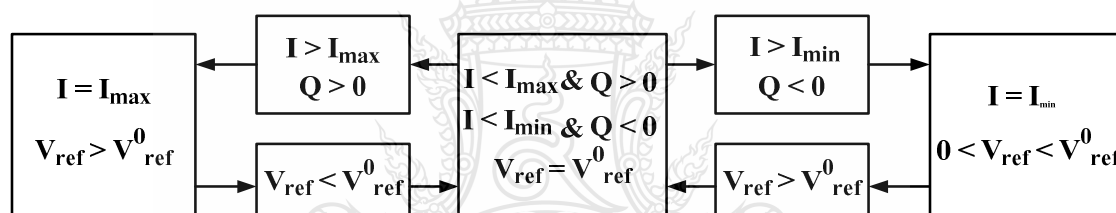
$$V_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{R_c C} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (2.86)$$

$$0 = \underbrace{\begin{bmatrix} P_i - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q_i - VI \sin(\delta - \theta) \\ P_i - V^2 G_c + kV_{dc} V G_c \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} V B_e \sin(\delta - \theta) \\ Q_i + V^2 B_e + kV_{dc} V B_e \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} V G_c \sin(\delta - \theta) \end{bmatrix}}_{g(\alpha(k, V, V_{dc}, \delta, \theta, P_i, Q_i))} \quad (2.87)$$

เมื่อ m คือค่ามอดูเลชันของอุปกรณ์แปลงผัน และ X_c และ $f(\cdot)$ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ แบบจำลองของ STATCOM จากสมการที่ 2.85 – 2.87 จะได้สามารถเขียนแทนได้

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} \pm X_{SL} I \\ V_{dc} - V_{dc,ref} \\ P_i - V_{dc}^2 / R_c - RI^2 \\ g(\alpha(k, V, V_{dc}, \delta, \theta, P_i, Q_i)) \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

เราสามารถใช้อุปกรณ์การไหลของกำลังไฟในการหาการจำกัดขอบเขตที่เหมาะสม, การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบที่มี STATCOM ในสถานะคงตัว การจำกัดขอบเขตกระแสของแบบจำลองในสถานะคงตัวที่ได้นั้น อัตราส่วนของการมอดูเลชัน k หรือ มุมเฟสของแรงดันสามารถทำงานรวมกันได้ในแบบจำลองที่นำเสนอในภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ STATCOM ในสถานะคงตัว

2.2.6 การควบคุมโหลดกับความถี่อัตโนมัติสำหรับพื้นที่หลายแห่ง (Automatic Load Frequency Control for Multi Area)

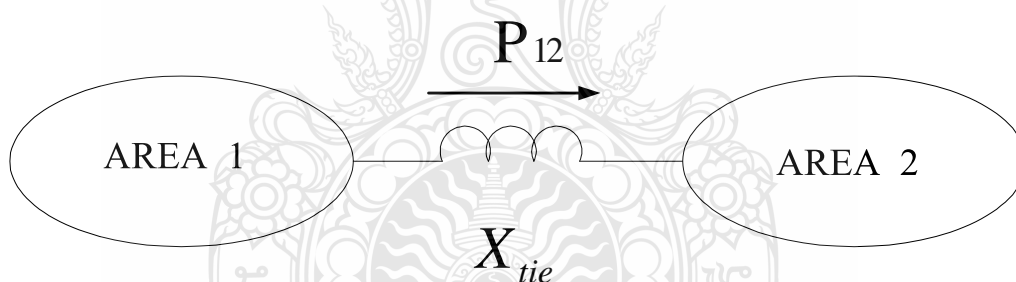
การไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในโครงข่ายระบบกำลังไฟฟ้าซึ่งแต่ละที่จะมีอิสระแยกจากกันจะถูกกำหนดให้มีการควบคุมที่แตกต่างกันไป การควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับการควบคุมความถี่และการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความลดตัวของความถี่และแรงดันไฟฟ้าเป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญที่แสดงถึงคุณภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

การกระทำเบื้องต้นของการควบคุมความเร็ว เช่น การเปลี่ยนแปลงโหลดในระบบจะเป็นผลทำให้ความถี่ในสถานะคงที่นั้นมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ Governor Droop และการตอบสนองต่อความถี่ของโหลดโดยทุกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีอุปกรณ์ควบคุมความเร็วส่งการ

เปลี่ยนแปลงทั้งหมดในการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยไม่คำนึงถึงพื้นที่ที่อยู่ของโหลดที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นวิธีการเบื้องต้นเป็นการควบคุมเครื่องส่งกำลังให้มีความพอดีกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบตามความต้องการ โดยผ่านจุดตั้งค่าเปรียบเทียบโหลด (Load Reference Setpoint) ที่มีไว้ควบคุมของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างความต้องการของโหลดและการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วัตถุประสงค์แรกของการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติเป็นการปรับความถี่ไปที่ค่าปกติเฉพาะและรักษากำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระหว่างพื้นที่ควบคุมตามปริมาณที่กำหนด โดยการปรับเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกเลือกไว้ ฟังก์ชันนี้เทียบเป็นการควบคุมโหลดกับความถี่ (Load Frequency Control) วัตถุประสงค์ที่สองเป็นการกระจายการเปลี่ยนความต้องการในจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดเพื่อให้ต้นทุนการทำงานมีค่าต่ำสุด

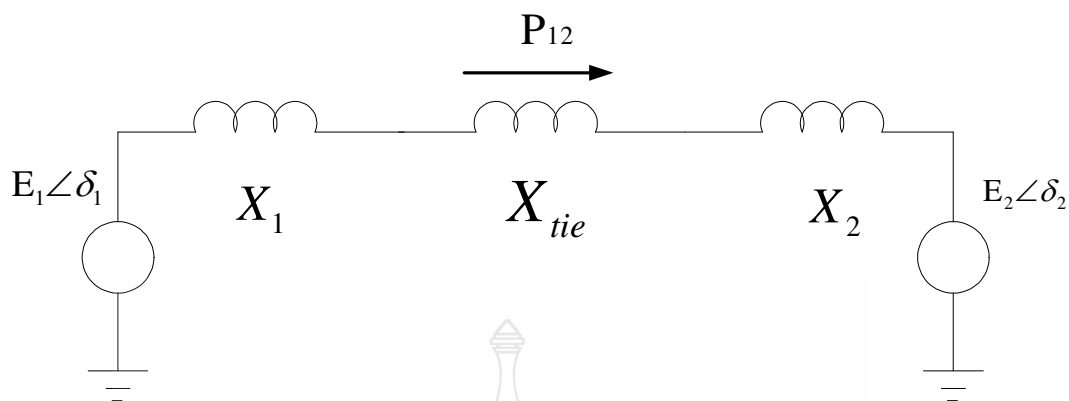
เมื่อพิจารณาถึงระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในซึ่งประกอบด้วยสองพื้นที่ต่อถึงกันโดยผ่านค่ารีแอกแตนซ์ของสายเชื่อมต่อ (Tie Line Of Reactance) X_{tie} ตามภาพที่ 2.26 [15]



ภาพที่ 2.26 พื้นที่ควบคุมที่เชื่อมโยงกันจะประกอบด้วยกลุ่มย่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเข้าระบบ

การศึกษาโหลดกับความถี่แต่ละพื้นที่จะถูกนำเสนอด้วยหลักการกระทำทั้งหมดของวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รูปแบบที่ประกอบด้วยหลายส่วนถูกยอมรับเนื่องจากเราจะไม่เกี่ยวข้องกับการออสซิลเลทภายในเครื่องจักรภายในแต่ละพื้นที่

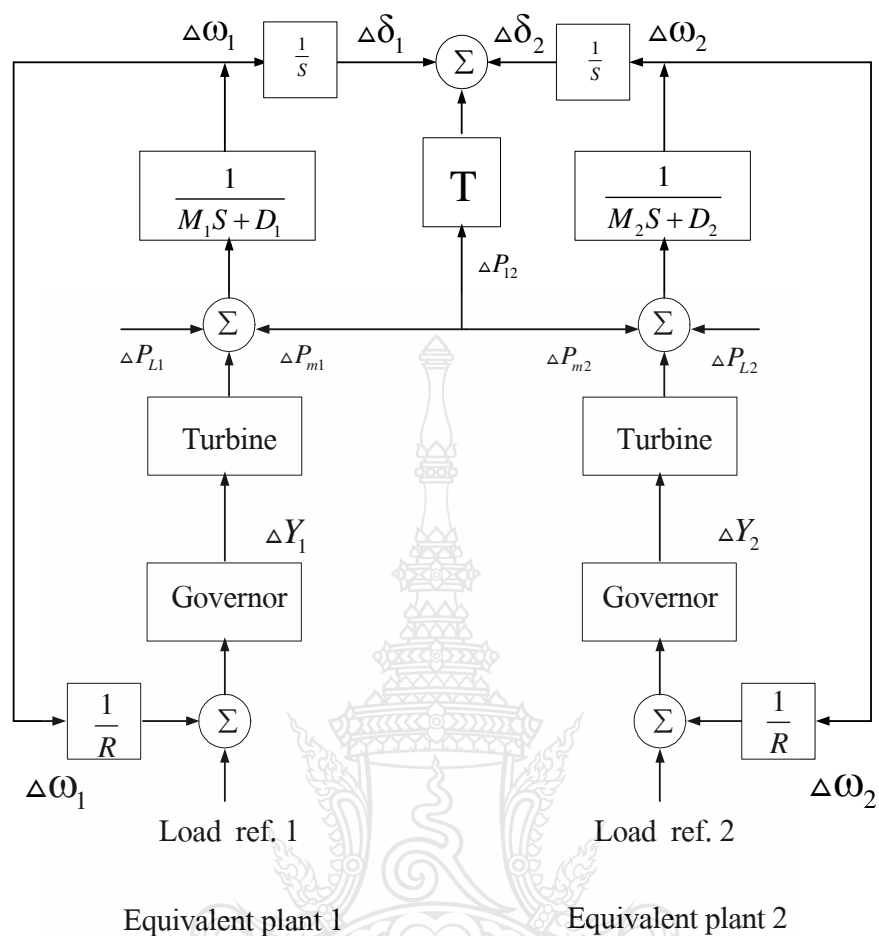
วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบด้วยแต่ละพื้นที่แสดงด้วยแหล่งจ่ายแรงดันที่อยู่ด้านหลังค่ารีแอกแตนซ์สมมูลที่เห็นได้จากบัสเชื่อมต่อตามภาพที่ 2.27 [15]



ภาพที่ 2.27 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติแบบสองพื้นที่

ตามภาพที่ 2.28 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบกำลังไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ที่จะแสดงด้วยความเฉื่อยสมมูล (Inertia M) ค่าคงที่การหน่วงเวลาของโหลด (Load Damping Constant D) กังหัน (Turbine) และระบบควบคุมกำลังไฟฟ้า (Governig System) กับ Effective Speed Droop R โดยสายเชื่อมต่อจะถูกแทนด้วยสัมประสิทธิ์แรงบิดซิงโครไนซ์ (Synchronizing Torque Coefficient T) และ แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านจากพื้นที่ที่ 1 ไปยังพื้นที่ที่ 2





ภาพที่ 2.28 บล็อกไดอะแกรมของการไหลของกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่ 1 ไปที่ 2

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin (\delta_1 - \delta_2) \quad (2.89)$$

การไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่เนื่องจากมีสิ่งรบกวน

$$P_{12} + \Delta P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin (\delta_1 + \Delta \delta_1 - \delta_2 - \Delta \delta_2) \quad (2.90)$$

เมื่อมีการขยายและการจัดเรียงใหม่ในการไหลของเส้นเชื่อมต่อสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\Delta P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (2.91)$$

เทอมของค่าคงที่ที่รู้จักกันคือค่าสัมประสิทธิ์การซิงโครไนซิงหรือค่าคงที่ความถี่ของสาย
เชื่อมต่อ (T12)

$$\Delta P_{12} = T_{12} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (2.92)$$

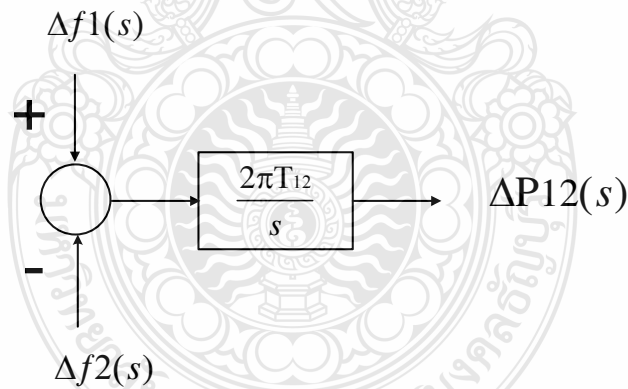
$$\Delta \omega = 2\pi \Delta f = \frac{d}{dt} (\Delta \delta) \quad (2.93)$$

$$\Delta P_{12} = 2\pi T_{12} \left[\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt \right] \quad (2.94)$$

Take Laplace Transform

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (2.95)$$

จากสมการข้างบนสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ 2.29 [15]



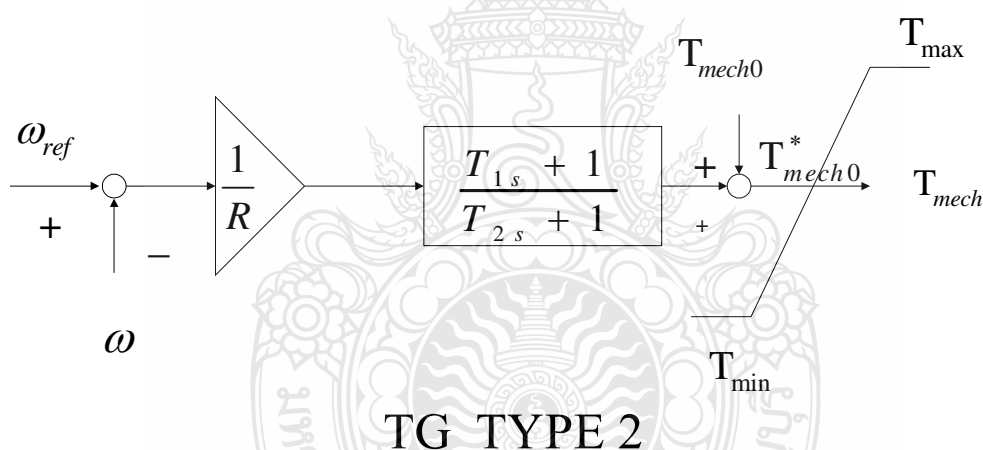
ภาพที่ 2.29 รูปแบบ Tie Line Model

$$(P_{21})_{p.u.} = \frac{-(P_{12})_{MW}}{P_{B2}} = \frac{-(P_{12})_{p.u.} P_{B1}}{P_{B2}} \quad (2.96)$$

$$\text{เมื่อ } a_{12} = \frac{-P_{B1}}{P_{B2}}$$

$$\Delta P_{21} = a_{12} \Delta P_{12} \quad (2.97)$$

2.2.7 ระบบ Turbine Governor เป็นระบบควบคุมความถี่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามภาพที่ 2.30 เป็น Turbine Governor Type 2 Model จะใช้งานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำซึ่งเมื่อค่าความถี่ของระบบ (ω) เกิดการเปลี่ยนแปลงเข้ามาที่ชุดระบบควบคุมความถี่ (Turbine Governor) จะเปรียบเทียบกับค่าความถี่ที่ตั้งไว้เปรียบเทียบ (Speed Setter ω_{ref}) ค่าผลต่างจะเข้าสู่ชุด Droop เพื่อลดทอนสัญญาณตามเปอร์เซ็นต์ของชุด Droop ที่ตั้งไว้จะเปลี่ยนแปลงตามความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยฟังก์ชันการทำงานชุดควบคุมความถี่ประกอบด้วยค่าคงที่ของเวลาชุดควบคุมความถี่ (T_2) กับค่าคงที่ของสัญญาณทรานเซียนต์ (T_1) ผลการตอบสนองระบบได้ดีและเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดของการหมุนกึ่งหันเริ่มต้น (T_{mech0}) และจะถูกจำกัดค่าแรงบิดให้อยู่ในย่านที่ต้องการของค่าแรงบิดต่ำสุดและสูงสุดของการหมุนกึ่งหัน [13]



ภาพที่ 2.30 รูปแบบ Turbine Governor Type 2 Model

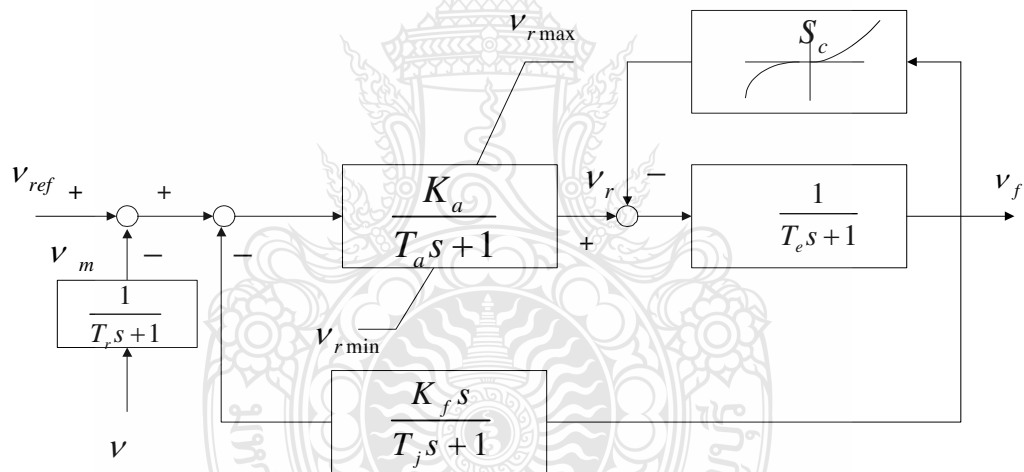
ค่าเวลาชุดควบคุมกึ่งหัน

$$t_g = \left(\frac{1}{R} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (\omega_{ref} - \omega) - t_g \right) / T_2 \quad (2.98)$$

ค่าแรงบิดของการหมุนกึ่งหันเริ่มต้น

$$T_{mech0}^* = t_g + \frac{1}{R} \frac{T_1}{T_2} (\omega_{ref} - \omega) + T_{mech0} \quad (2.99)$$

2.2.8 ระบบ Excitation เป็นระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดฟิลต์คอยล์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามภาพที่ 2.31 เป็น Excitation Type 2 Model ใช้งานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำซึ่งเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบ (v) เกิดการเปลี่ยนแปลงเข้ามาที่ชุดระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า(Excitation) จะเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งไว้เปรียบเทียบ (Voltage Setter v_r) ค่าผลต่างจะเข้าสู่ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบ PI (Proportional Integral) ซึ่งจะถูกจำกัดแรงดันขั้วต่ำสุดและสูงสุดเพื่อไม่ให้เกิดสนามแม่เหล็กมากเกินไปและเข้าสู่ชุดควบคุมฟิลต์คอยล์แบบ PI (Proportional Integral) ที่ควบคุมตามคุณสมบัติของฟิลต์คอยล์และชุดควบคุมแบบป้อนกลับเป็นชุดเสถียรภาพของฟิลต์คอยล์ ให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้ดี [15]



ภาพที่ 2.31 รูปแบบ Excitation Type 2 Model

ค่าแรงดันตกคร่อมชุดวัดค่าแรงดัน

$$\dot{v}_m = (V - v_m) / T_r \quad (2.100)$$

ค่าแรงดันตกคร่อมชุด PI ที่ 1

$$\dot{v}_{r1} = (K_a (v_{ref} - v_m - v_{r2} - \frac{K_f}{T_f} v_f) - v_{r1}) / T_a \quad (2.101)$$

ค่าแรงดันเอาต์พุตของชุด PI ที่ 1

$$v_r = \begin{cases} v_{r1} & v_{r\min} \leq v_{r1} \leq v_{r\max} \\ v_{r\max} & v_{r1} > v_{r\max} \\ v_{r\min} & v_{r1} < v_{r\min} \end{cases} \quad (2.102)$$

ค่าแรงดันตกคร่อมชุด Stability Feedback

$$v_{r2} = -\left(\frac{K_f}{T_f} v_f + v_{r2}\right) / T_f \quad (2.103)$$

ค่าแรงดันตกคร่อมชุด ควบคุมฟีดแบ็คคอยล์แบบ PI Stability Feedback

$$v_f^* = -(v_f(1 + S_e(v_f)) - v_r) / T_e \quad (2.104)$$

2.2.9 การใช้งานโปรแกรม Power System Analysis Toolbox (PSAT) ผลการจำลองการทำงาน

โปรแกรม Power System Analysis Toolbox (PSAT) เป็นกล่องเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB สามารถส่งข้อมูลและติดต่อสื่อสารระหว่างโปรแกรมทั้งสอง ใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและจำลองการทำงานของระบบวิเคราะห์แบบสถิต (Statistic Model) และการวิเคราะห์แบบพลวัต (Dynamic Model) สามารถวิเคราะห์การไหลของกำลัง (Power Flow, PF) ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (Continuous Power Flow, CPF) ความเหมาะสมการไหลของกำลัง (Optimal Power Flow, OPF) เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Stability Analysis, SSSA) การจำลองในเชิงเวลา (Time Domain Simulation, TDS) และการหาตำแหน่งของของการติดตั้งหน่วยเครื่องวัดเฟสเซอร์ที่เหมาะสม (Phase Measurement Unit, PMU) องค์ประกอบการจำลองทั้งแบบสถิต (Statistic Model) และการวิเคราะห์แบบพลวัต (Dynamic Model) จะอยู่ใน PSAT Simulink Library ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับไหลของกำลัง ความต่อเนื่องและความเหมาะสมการไหลของกำลังจุดเด่นของโปรแกรมเทียบกับโปรแกรมต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระบบกำลังคือ วิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (Continuous Power Flow, CPF) ความเหมาะสมการไหลของกำลัง (Optimal Power Flow, OPF) และสามารถทำ (GUI) ได้ [13]

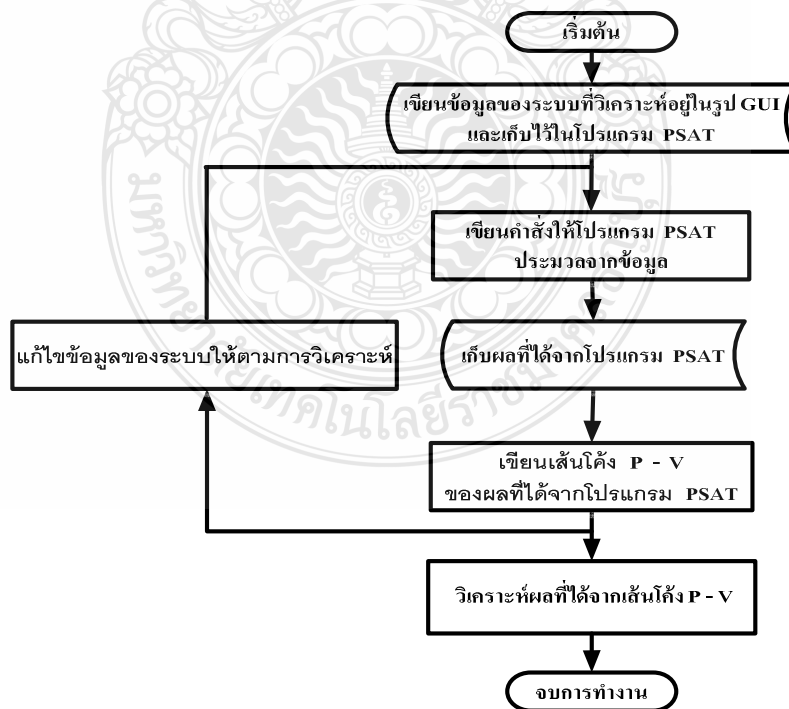
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม PSAT[13] เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าและการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น คือ SVC และ STATCOM และวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าล้าตะกองซึ่งได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 การศึกษาเสถียรภาพของระบบใช้โปรแกรม PSAT เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าในระบบซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าโหลดที่เปลี่ยนแปลง มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

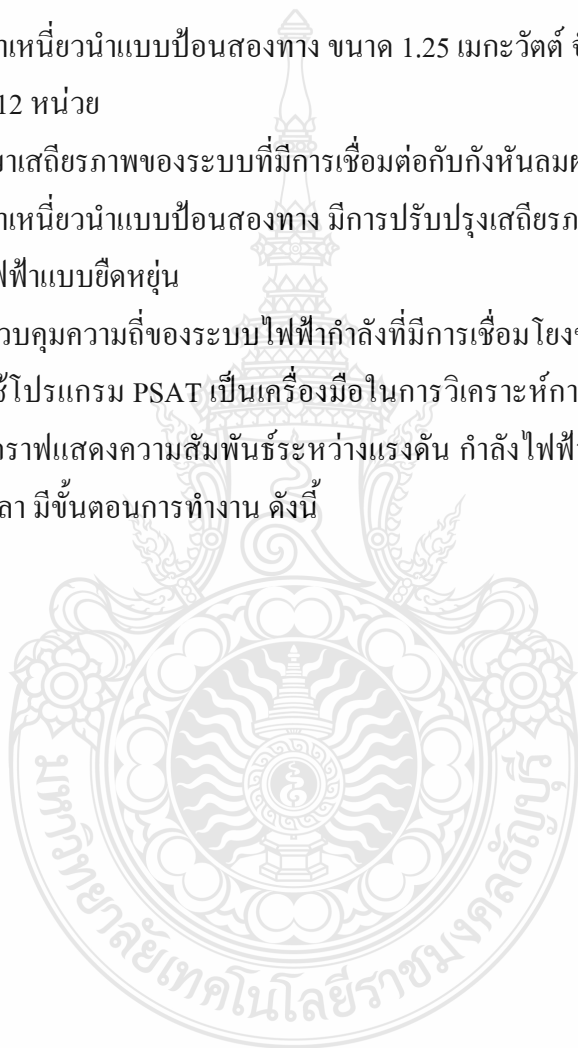


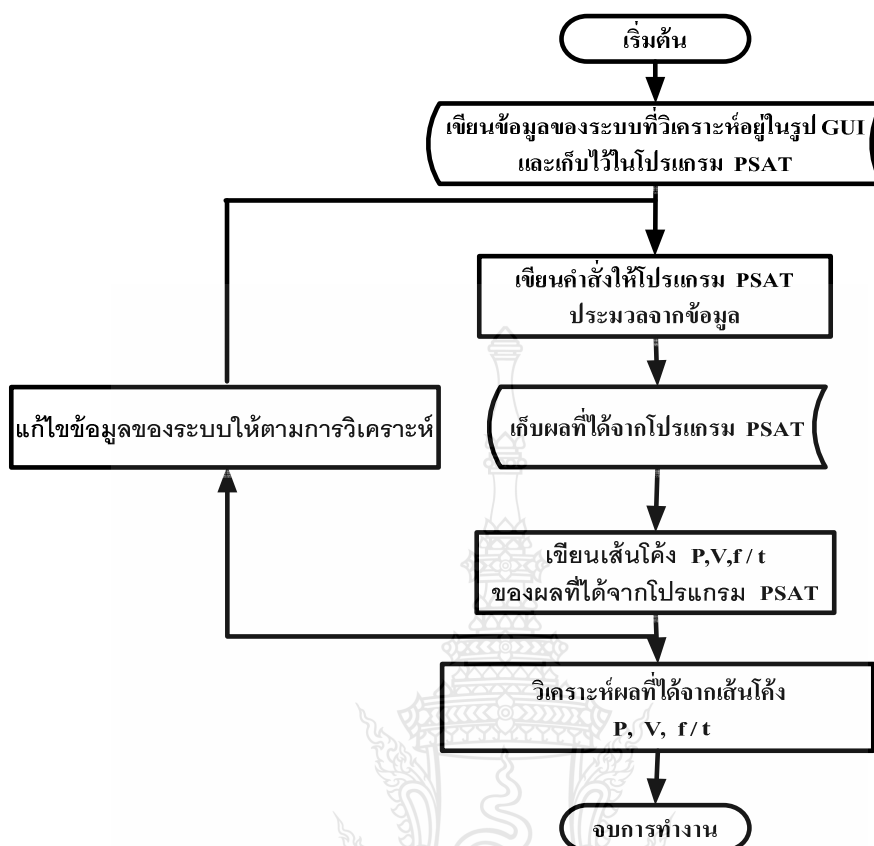
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม PSAT วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้า

จากภาพที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม PSAT จะนำข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์มาเขียนให้อยู่ในรูปของ GUI (Graphic Unit Interface) โดยจะมีการจัดค่า configuration และค่า Setting Bias สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่ต้องการและให้โปรแกรมทำงานเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบในกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่นำมาใช้ในงานวิจัย
- 2) การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย กับขนาด 1.5 เมกะวัตต์ จำนวน 12 หน่วย
- 3) การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง มีการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

3.1.2 การศึกษาควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าลำตะคองใช้โปรแกรม PSAT เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กำลังไฟฟ้าและความถี่ในระบบซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้



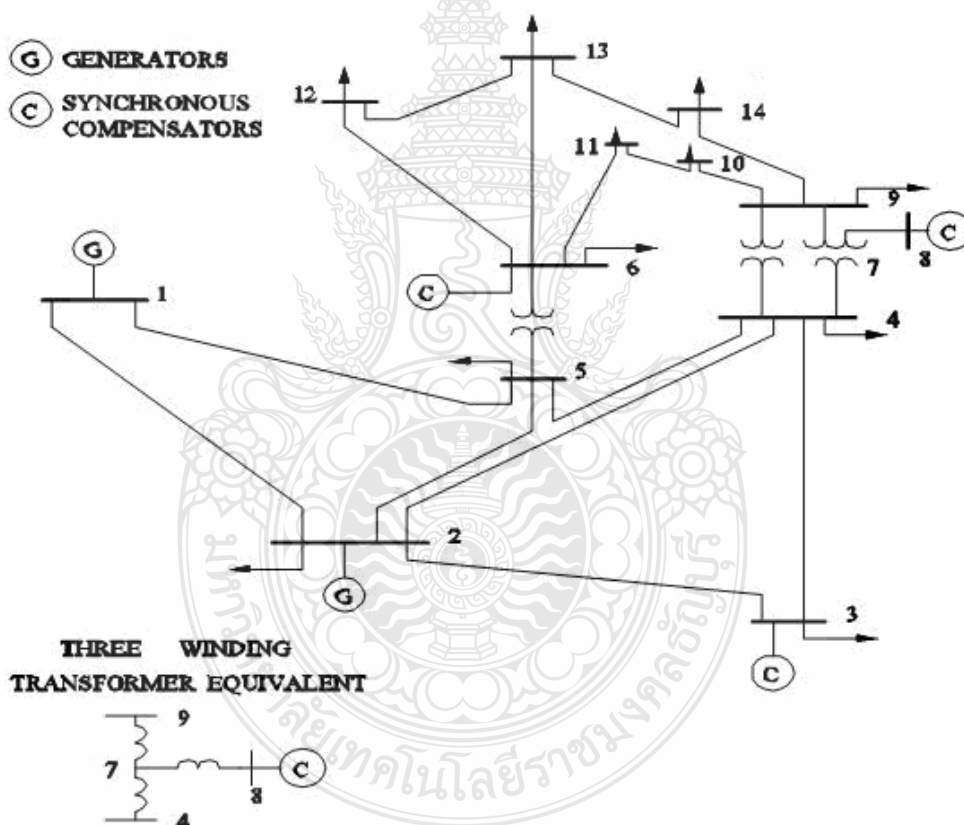


ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม PSAT วิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากภาพที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม PSAT จะนำข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์มาเขียนให้อยู่ในรูปของ GUI (Graphic Unit Interface) โดยจะมีการจัดค่า configuration และค่า Setting Bias สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่ต้องการและให้โปรแกรมทำงานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กำลังไฟฟ้าและความถี่ในระบบซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเพื่อศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าถ้าจะคงด้วยวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้า

3.2 ระบบ IEEE 14 BUS

ระบบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือระบบของ IEEE 14 Bus ดังภาพที่ 3.3 ประกอบด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 5 เครื่อง ได้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เครื่อง มีสายส่ง 20 สายและมีบัส 14 บัส มีโหลดทั้งหมด 259 MW และ 81.4 MVAR เป็นระบบมาตรฐานที่นิยมใช้เปรียบเทียบเพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มผลที่จะเกิดขึ้น เมื่อนำไปใช้งานจริงที่มีโหลดใกล้เคียงกัน ข้อมูลต่างๆของระบบมาใช้ในโปรแกรม PSAT เพื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง เพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะการพังทลาย และหาบัสที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุด



ภาพที่ 3.3 ระบบของ IEEE 14 Bus

3.3 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกักเก็บผลิตไฟฟ้า

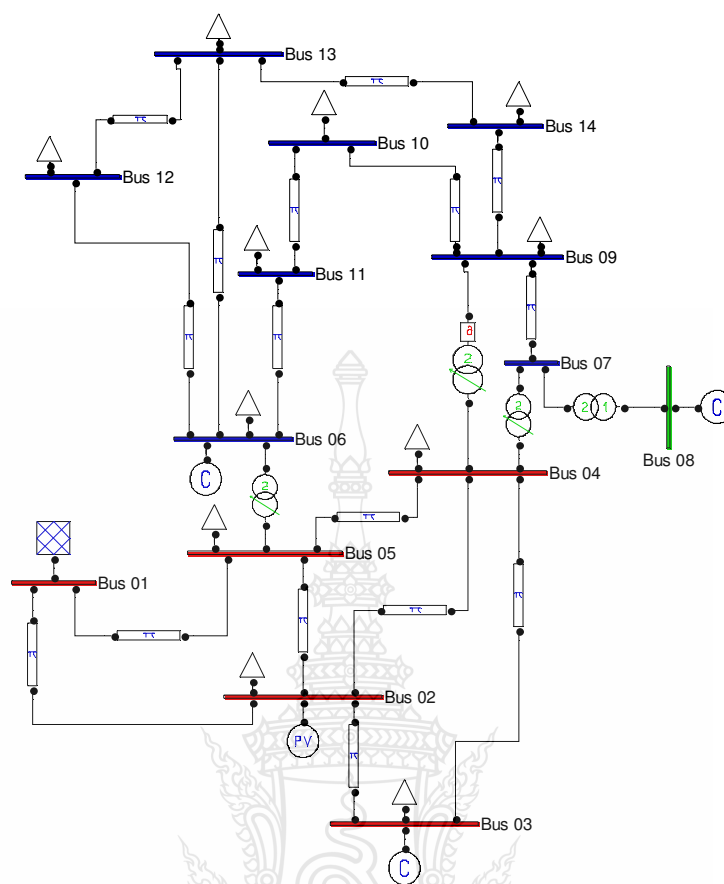
หัวข้อนี้จะการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 14 Bus เมื่อมีการเชื่อมโยงกับ กักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง กักเก็บผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในกรณีศึกษามีขนาด 2.5 MW (1p.u.) 13.8 KV. มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ± 0.7 p.u. และ 20.5 MW มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ± 0.7 p.u.

ค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองจะใช้ค่าตัวแปร ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [9] ประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้

- ค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ ($R_s = 0.0048$ p.u)
- ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ($R_r = 0.00549$ p.u)
- ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ ($X_l = 0.09241$ p.u)
- ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ ($X_2 = 0.09955$ p.u)
- ค่าความเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดฟลัก ($X_m = 3.95327$ p.u)

3.4 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ IEEE 14 Bus เพื่อหาค่าตำแหน่งติดตั้งกักเก็บผลิตไฟฟ้าในระบบที่เหมาะสม

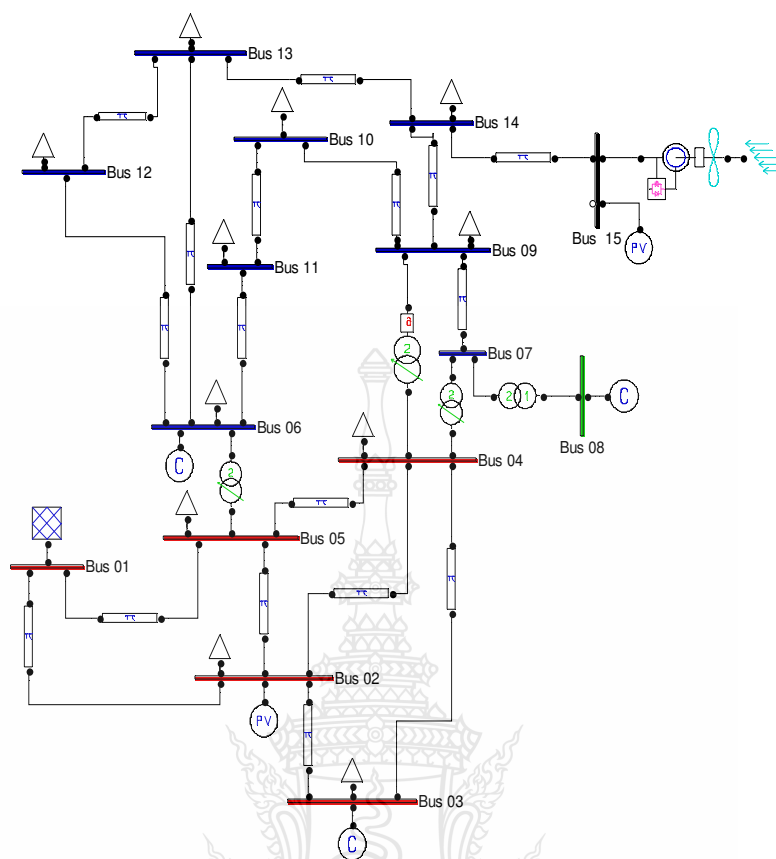
การหาค่าตำแหน่งติดตั้งกักเก็บผลิตไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 Bus นั้นจะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 BUS โดยใช้โปรแกรม PSAT ดังภาพที่ 3.4 ด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) จะได้ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดจะเป็นตำแหน่งติดตั้งกักเก็บผลิตไฟฟ้าแรงดัน



ภาพที่ 3.4 ระบบของ IEEE 14 Bus ใช้ในโปรแกรม PSAT

3.5 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ IEEE 14 Bus ที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบกับความเร็วคงที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วยและเพิ่มขนาด 1.5 เมกะวัตต์ จำนวน 12 หน่วย

3.5.1 เชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 BUS ได้บัสที่ 14 มีการเปลี่ยนแปลงจากแรงดันมากที่สุดจะเป็นตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า เขียนโปรแกรม PSAT ระบบ IEEE 14 BUS ที่มีการเชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์ (1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย) ดังภาพที่ 3.5 ใช้โปรแกรม PSAT ด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ Bus



ภาพที่ 3.5 ระบบของ IEEE 14 Bus เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์ ใช้ในโปรแกรม PSAT

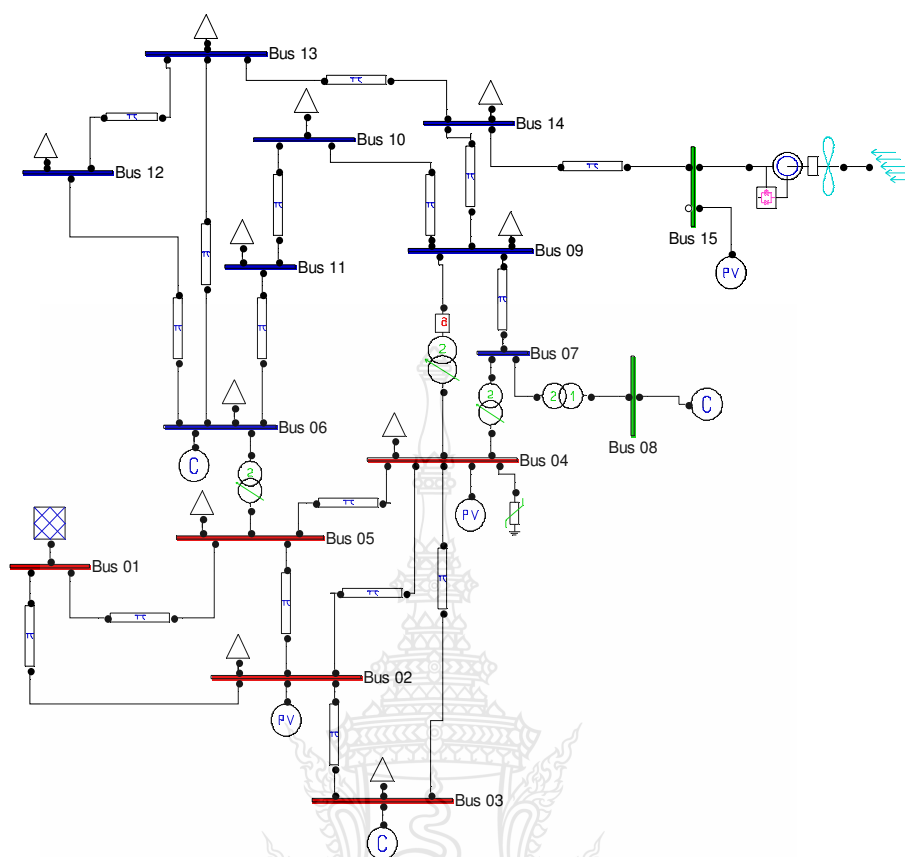
3.5.2 เชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย กับขนาด 1.5 เมกะวัตต์ จำนวน 12 หน่วย จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 BUS ได้บัสที่ 14 มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดจะเป็นตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า เขียนโปรแกรม PSAT ระบบ IEEE 14 BUS ที่มีการเชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์ (1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วย และ 1.5 เมกะวัตต์ จำนวน 12 หน่วย) ดังภาพที่ 3.5 ใช้โปรแกรม PSAT ด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ

3.5.3 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ IEEE 14 Bus ที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง มีการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของ

ระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น การหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

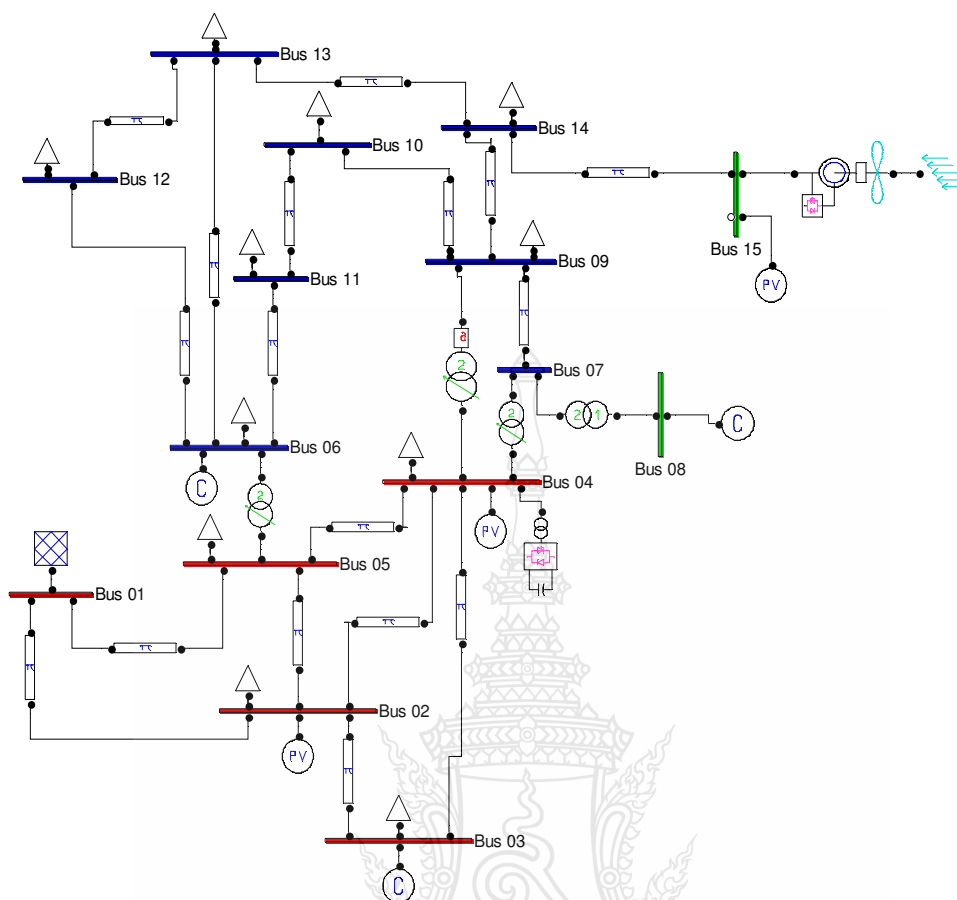
จากสมมุติฐานเบื้องต้นว่าเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางยังคงเกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) อยู่จึงจะใส่อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นเข้าไปช่วยเพิ่มชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบให้ไม่เกิดการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) แต่เมื่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบดีเมื่อใส่อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นแบบ SVC และ STATCOM จะส่งอย่างไรกับระบบบ้าง ในที่นี้จะพิจารณาจุดจะติดตั้งจากการหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE 14 BUS บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงมากรองจากบัสที่ 14 คือบัสที่ 4 เพื่อการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบจะเป็นอย่างไร

1) การศึกษาเสถียรภาพเมื่อใส่อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นแบบ SVC (Static Var Compensator) จากคุณสมบัติ SVC เป็นแหล่งจ่ายและรับโหลดทางไฟฟ้าเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สามารถจ่ายและรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบได้ เพื่อรักษาระดับแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้น ในที่นี้จะใช้ SVC ขนาด 100 MVA 69KV 50Hz Regulation Time Constant Tr 0.02s Regulation Gain Kr 1 [p.u./p.u.] Reference Voltage 1.0 p.u. B_max and B_min [1.50 -0.30.] [p.u. p.u.] ดังภาพที่ 3.6 และใช้โปรแกรม PSAT ด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ



ภาพที่ 3.6 ระบบของ IEEE 14 Bus เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์และติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น SVC ที่บัส 4 ใช้ในโปรแกรม PSAT

2) การศึกษาเสถียรภาพเมื่อใส่อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นแบบ STATCOM (Static Synchronous Compensator) จากคุณสมบัติ STATCOM เป็นแหล่งจ่ายเหมือน Synchronous Condenser เป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับและสามารถควบคุมความถี่ให้เท่ากับระบบที่เชื่อมต่อทำให้สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามความต้องการของระบบ ในที่นี้จะใช้ STATCOM ขนาด 100MVA 69KV 50Hz Regulation Time Constant T_r 0.1s Regulation Gain K_r 1.5 [p.u./p.u.] Max and Min Current [1.5 - 0.3] [p.u. p.u.] [6] ดังภาพที่ 3.7 และใช้โปรแกรม PSAT ด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ



ภาพที่ 3.7 ระบบของ IEEE 14 Bus เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์และติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหยุน STATCOM ที่บัส 4 ใช้ในโปรแกรม PSAT

3.5.4 การศึกษาควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าล่าตะกองใช้โปรแกรม PSAT เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กำลังไฟฟ้าและความถี่ในระบบซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ในที่นี้จะใช้ระบบกำลัง 3 บัส มีส่วนประกอบดังนี้

1) บัสที่ 1 จะติดตั้ง Slack Bus และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำแบบ Synchronous Machine ประกอบด้วย

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ มี Parameter คือ ขนาด 160 MVA 16.5KV 50Hz
2. Machine Dynamic Order = 5.3
3. Resistance r_a and leakage reactance x_l [p.u. p.u.] = [0.0018 0.2396]

4. d – axis reactance X_d, X'_d, X''_d [p.u. p.u. p.u.] = [0.99 0.20 0.18]
5. d – axis open circuit time constant T'_{d0} and T''_{d0} [s,s] = [11.9 0.08]
6. q – axis reactance X_q, X'_q, X''_q [p.u. p.u. p.u.] = [0.646 0.646 0.4]
7. q – axis open circuit time constant T'_{q0} and T''_{q0} [s,s] = [0.001 0.033]
8. Inertia ($M = 2H$) and Damping [s, p.u.] = [2*5.148 2.00]
9. Turbine Governor Block มี parameter คือ
10. Turbine Governor Type = 2
11. Reference speed [p.u.] = 1.00
12. Droop R [p.u./p.u.] = 0.04
13. Maximum torque [p.u.] = 1.3
14. Minimum torque [p.u.] = -3
15. Pole Time Constant T_2 [s] = 0.01
16. Zero Time Constant T_2 [s] = 0.45

2) บัสที่ 8 จะติดตั้ง Slack Bus ประกอบด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 2.5MW 20.5MW 690V 50Hz มี Parameter คือ

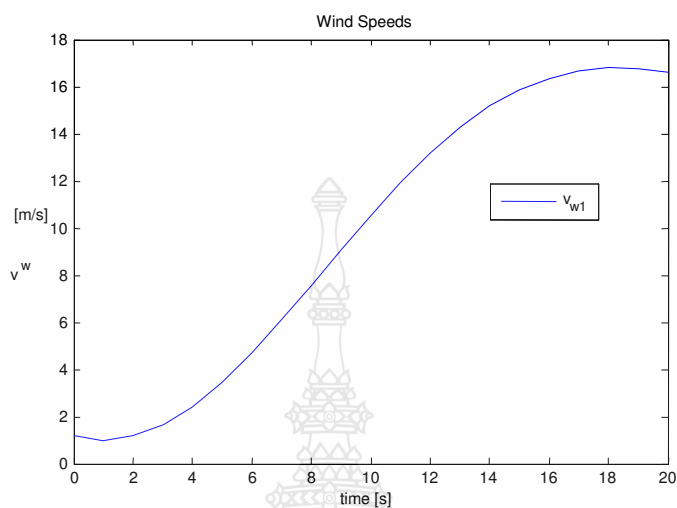
1. ค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ ($R_s = 0.0084$ p.u)
2. ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ($R_r = 0.0083$ p.u)
3. ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ ($X_l = 0.167$ p.u)
4. ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ ($X_2 = 0.1323$ p.u)
5. ค่าความเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดฟลัก ($X_m = 5.419$ p.u)

3) บัสที่ 3 เป็นบัสโหลด PQ มีขนาด 100MVA 22KV

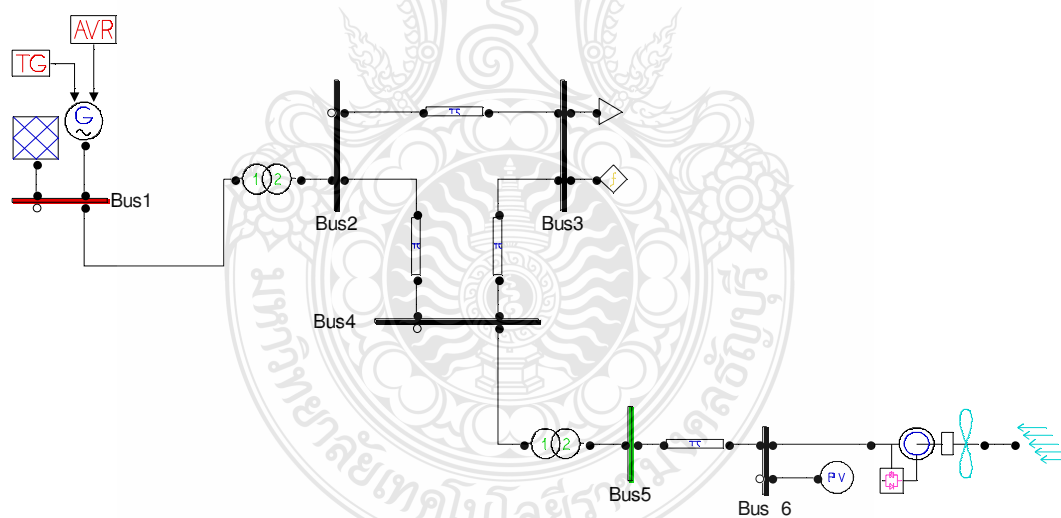
1. Active and Reactive Powers [p.u. p.u.] = 0.040 0.030
2. Maximum and Minimum Allowable Voltage [p.u. p.u.] = 1.2 0.8

การวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า 3 บัส ขนาด 22KV เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ ขนาด 160MVA 16.5KV 50Hz กับ โหลด PQ ขนาด 4MW 30MVAR ที่บัส 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 15m/s ตามภาพที่ 3.8 ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าอย่างไรและหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าใช้โปรแกรม PSAT หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation

Power Flow) และ ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรโดยใช้โปรแกรม PSAT ตามภาพที่ 3.9



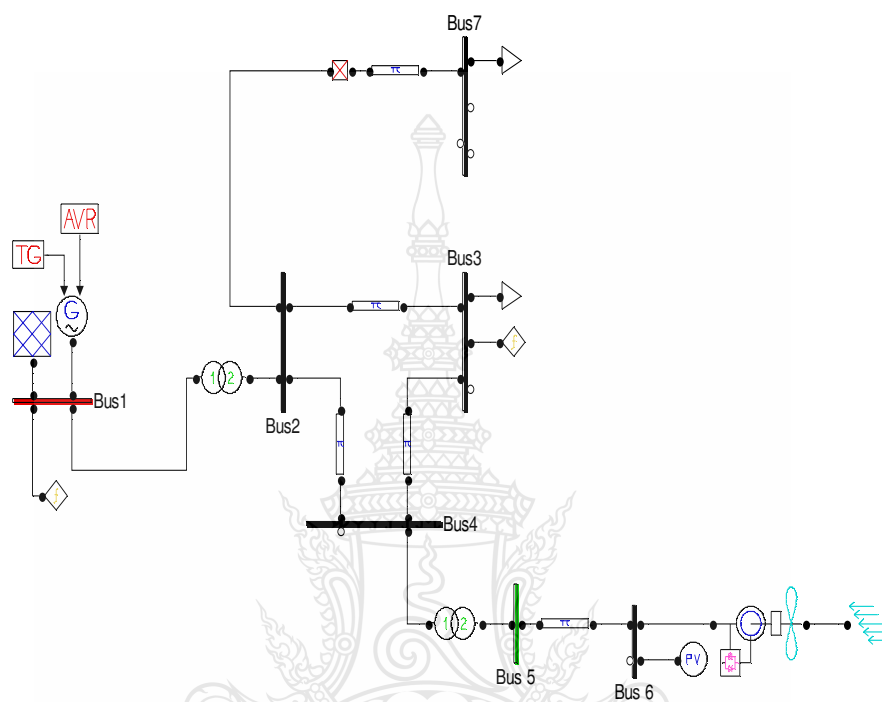
ภาพที่ 3.8 กระแสลมเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแต่ 0 ถึง 15 m/s โดยใช้ Mexican Hat



ภาพที่ 3.9 ระบบไฟฟ้า 3 บัส ใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า

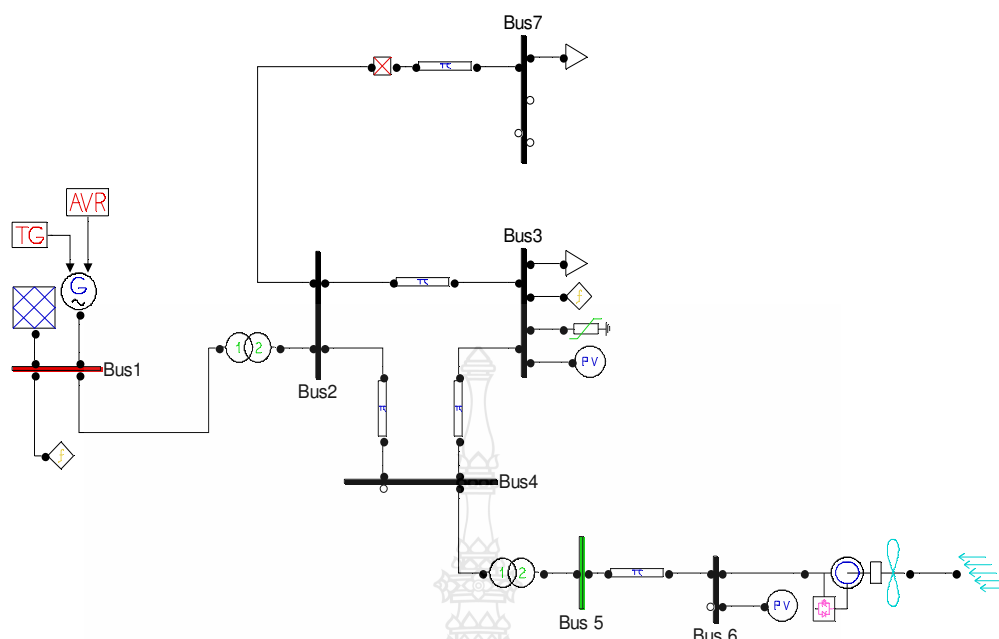
การวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า 3 บัส ขนาด 22KV เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ ขนาด 160MVA 16.5KV 50Hz กับโหลด PQ ขนาด 4MW 30MVAR ที่บัส 3 และเพิ่มโหลดขนาด PQ ขนาด MW 0.5MVAR ที่บัส 7 ใช้

โปรแกรม PSAT หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) และปลดโหลด ที่บัส 7 ออก ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยใช้โปรแกรม PSAT ตามภาพที่ 3.10



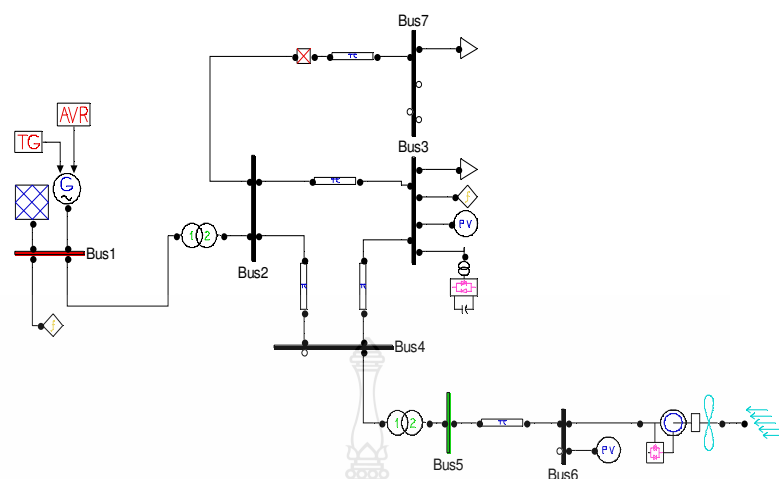
ภาพที่ 3.10 ระบบไฟฟ้า 3 บัสและปลดโหลดที่บัส 7 ออกใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า

การวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า 3 บัส ขนาด 22KV เชื่อมโยงกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำขนาด 160MVA 16.5KV 50Hz มีโหลด PQ ขนาด 4MW 30MVAR ที่บัส 3 และเพิ่มโหลดขนาด PQ ขนาด 1MW 0.5MVAR ที่บัส 7 และใส่อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น SVC ขนาด 10MVA 22KV 50Hz Regulation Time Constant T_r 0.02s Regulation Gain K_r 0.10 [p.u./p.u.] Reference Voltage 1.0 p.u. B_{max} and B_{min} [1.50 -0.30] [p.u. p.u.] เข้าที่บัส 3 ใช้โปรแกรม PSAT หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) ขณะปลดโหลดขนาด PQ ขนาด 1MW 0.5MVAR ที่บัส 7 ออก ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยใช้โปรแกรม PSAT ตามภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ระบบไฟฟ้า 3 บัสเพิ่ม SVC ที่บัส 5 และโหลดที่บัส 7 ออกใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า

การวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า 3 บัส ขนาด 22KV เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ ขนาด 160MVA 16.5KV 50Hz มีโหลด PQ ขนาด 4MW 30MVAR ที่บัส 3 และเพิ่มโหลดขนาด PQ ขนาด 1MW 0.5MVAR ที่บัส 7 ใส่อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น STATCOM ขนาด 10MVA 22KV 50Hz Regulation Time Constant T_r 0.02s Regulation Gain K_r 0.5 [p.u./p.u.] B_{max} and B_{min} [0.1 -0.30] [p.u. p.u.] เข้าที่บัส 3 ใช้โปรแกรม PSAT หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบด้วยวิธีหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง CPF (Continuation Power Flow) และโหลดขนาด PQ ขนาด 1MW 0.5MVAR ที่บัส 7 ออก ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรโดยใช้โปรแกรม PSAT ตามภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ระบบไฟฟ้า 3 บัส เพิ่ม STATCOM ที่บัส 5 และโหลดที่บัส 7 ออกใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า



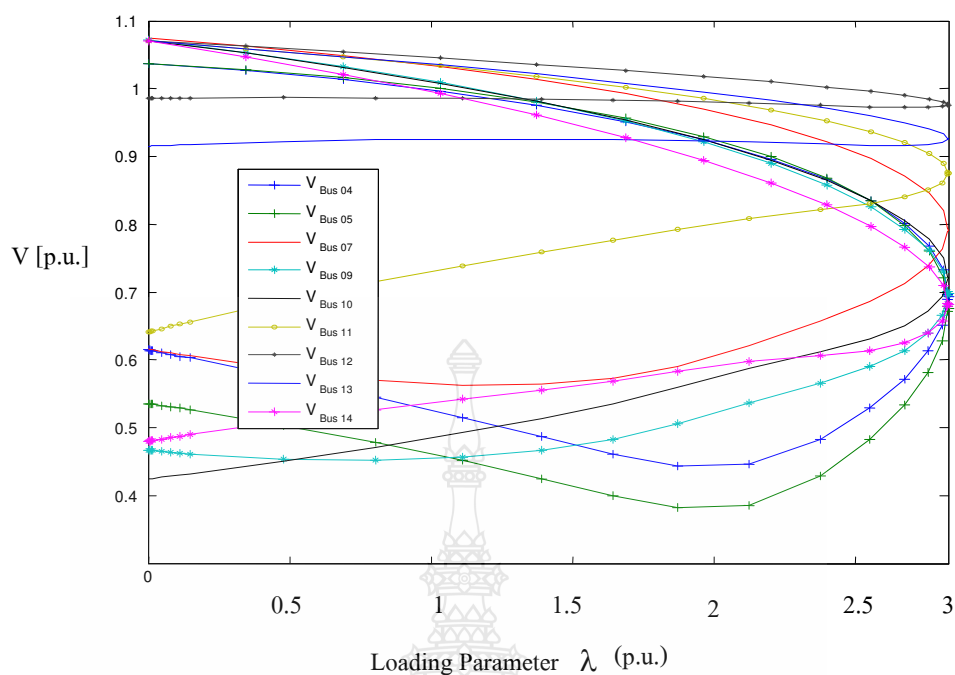
บทที่ 4

ผลการทดลอง

รายละเอียดของบทนี้ได้แสดงถึงผลการจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14BUS ด้วยโปรแกรมกล่องเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง Power System Analysis Toolbox (PSAT) โดยแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 4 หัวข้อหลักประกอบด้วย 1. กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14BUS 2. กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14 BUS ที่มีการเชื่อมโยงกับโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator ขนาด 1.25 เมกะวัตต์ จำนวน 2 หน่วยและขนาด 1.5 เมกะวัตต์จำนวน 12 หน่วย 3. กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14BUS ในข้อ 2 เพิ่มติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยึดหยุ่น 2 ชนิดคือ SVC และ STATCOM 4. กรณีวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าถ่านหิน

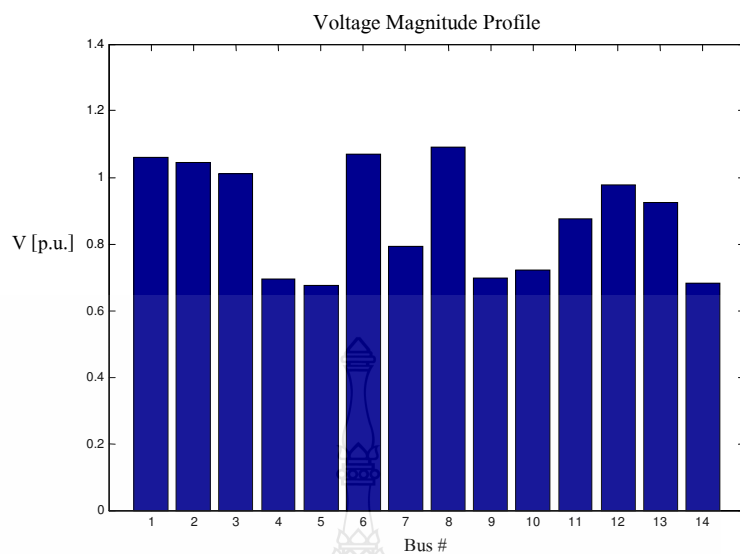
4.1 กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14BUS

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSAT ของระบบ IEEE 14 BUS ด้วยวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow) ผลที่ของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้เกิดสภาวะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 2.8286 บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดคือบัสที่ 14 ดังภาพที่ 4.1

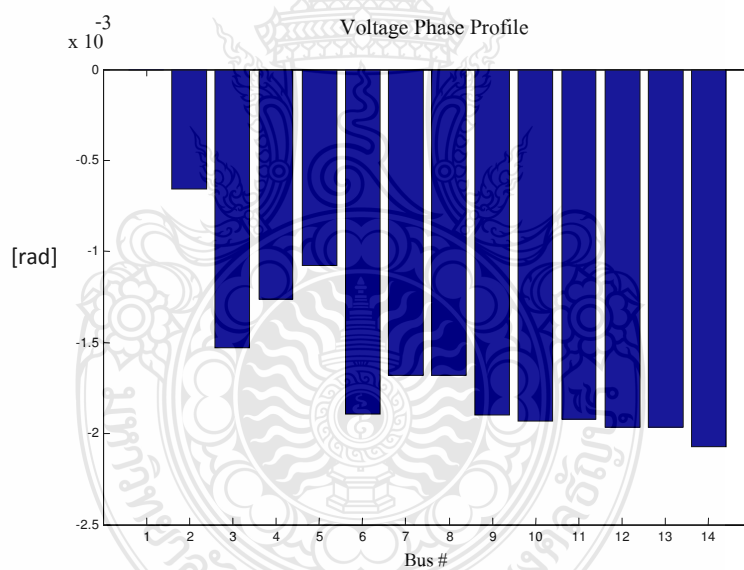


ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกำลังไฟฟ้าจริงกับองค์ประกอบโหลดของระบบ IEEE 14 BUS ของวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow)

ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1, 2, 3, 6, 8 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.06, 1.045, 1.01, 1.07, 1.09 p.u. ดังภาพที่ 4.2 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและมุมเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. คือบัสที่ 1 ดังภาพที่ 4.3 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 16.1623 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 26.5324 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 10.2565 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 3.2235 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 5.9058 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 23.3089 p.u.



ภาพที่ 4.2 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS



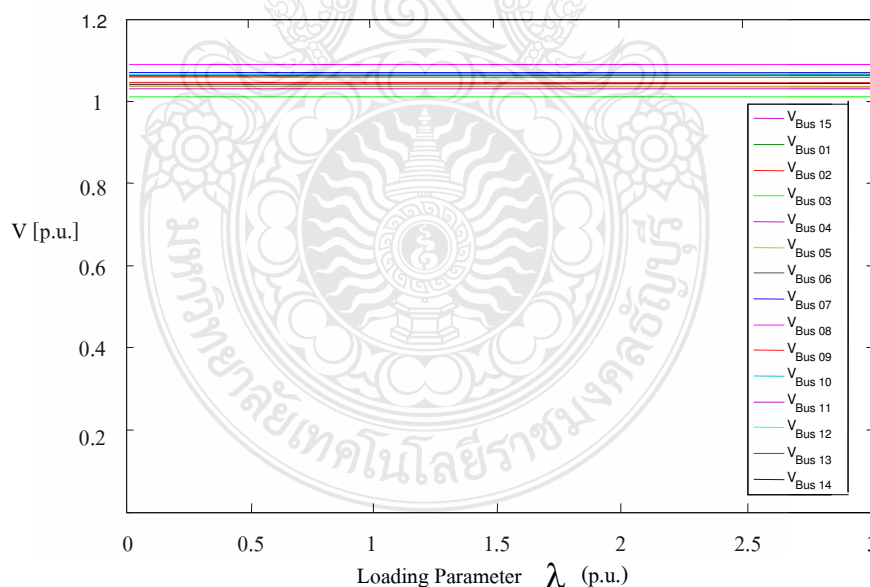
ภาพที่ 4.3 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT ของระบบ IEEE 14 BUS พบว่ามีสภาพการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) บัสที่อ่อนแอที่สุดคือบัสที่ 14 มีขนาดแรงดันเท่ากับ 0.68148 p.u. และขนาดมุมเฟสเท่ากับ -0.2695 p.u.

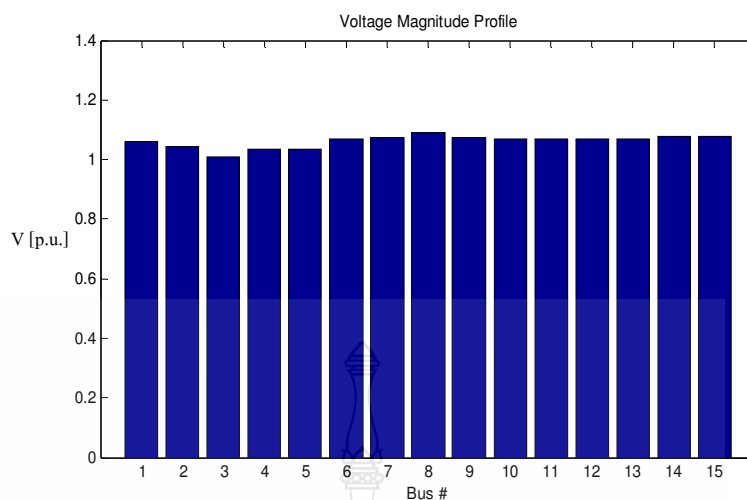
4.2 กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14 BUS ที่มีการเชื่อมโยงกับโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator)

4.2.1 โรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ขนาด 1.25 เมกะวัตต์จำนวน 2 หน่วย มีขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์ จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 14 BUS ข้อ 4.2 พบว่ามีการพังทลายของแรงดันบัสที่อ่อนแอที่สุดคือบัสที่ 14 ดังนั้นตำแหน่งติดตั้งของโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) ทั้งหมดอยู่ที่บัสที่ 14

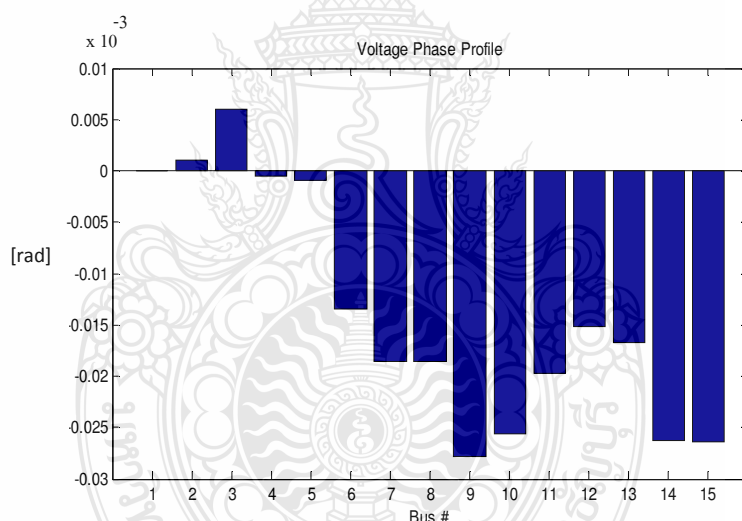
ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 2, 3, 4, 5 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.0 - 1.045 p.u. ดังภาพที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad คือบัสที่ 3 ดังภาพที่ 4.6 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.0996 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ -0.21745 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 0.09065 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 0.02849 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 0.00895 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ -0.24594 p.u.



ภาพที่ 4.4 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้งในระบบ



ภาพที่ 4.5 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง

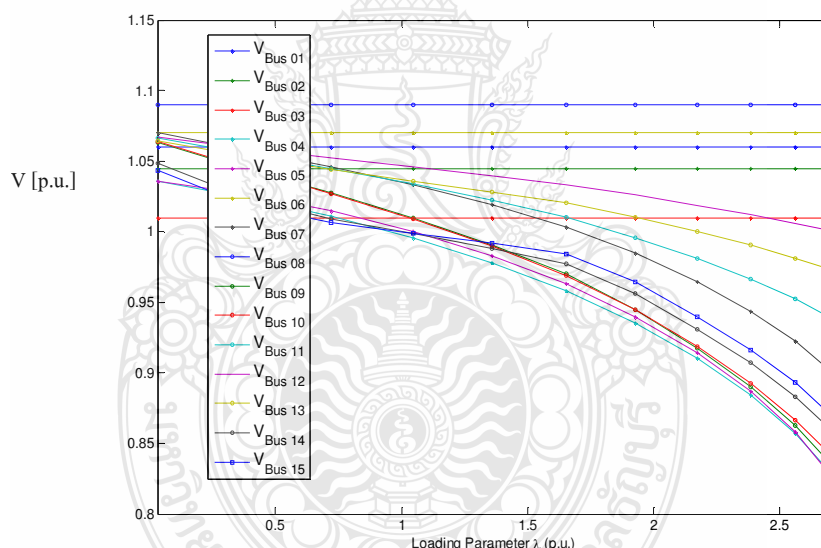


ภาพที่ 4.6 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT ของระบบ IEEE 14 BUS ที่มีการเชื่อมโยงกับโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ขนาดรวม 2.5 เมกะวัตต์ พบว่าการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริงลดลง การจ่ายค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟลดลง ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียและค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของการสูญเสียลดลง

ระบบมีเสถียรภาพแรงดัน ขนาดแรงดันค่าใกล้เคียงเท่ากับ 1.0 p.u. และขนาดมุมเฟสใกล้เคียงเท่ากับ 0 rad ด้านลบทุกบัส กังหันลมไฟฟ้าติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งเหมาะสมสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบทำให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของระบบลดลงเนื่องจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ากังหันลม

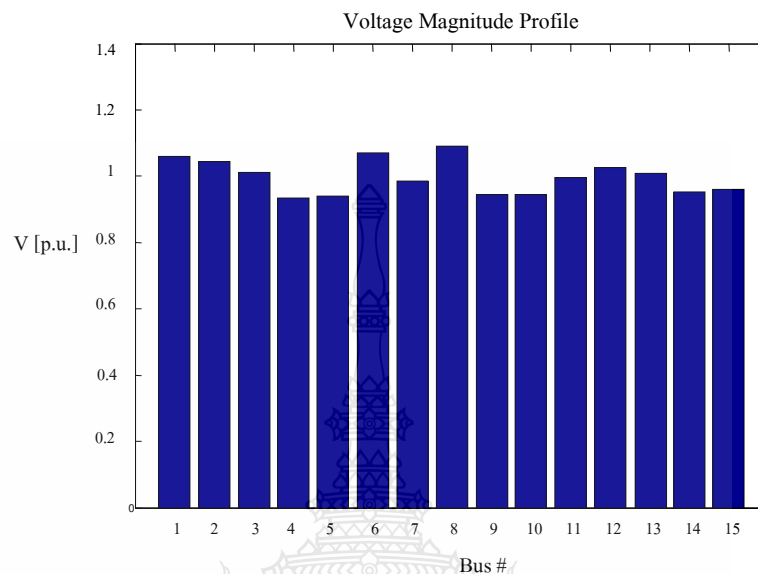
4.2.2 โรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ขนาด 1.25 เมกะวัตต์จำนวน 2 หน่วย และขนาด 1.5 เมกะวัตต์จำนวน 12 หน่วย มีขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์ จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 14 BUS พบว่ามีสภาพการพังทลายของแรงดันแรงดัน (Voltage Collapse) ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 2.7033 บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดคือบัสที่ 5 ดังภาพที่ 4.7



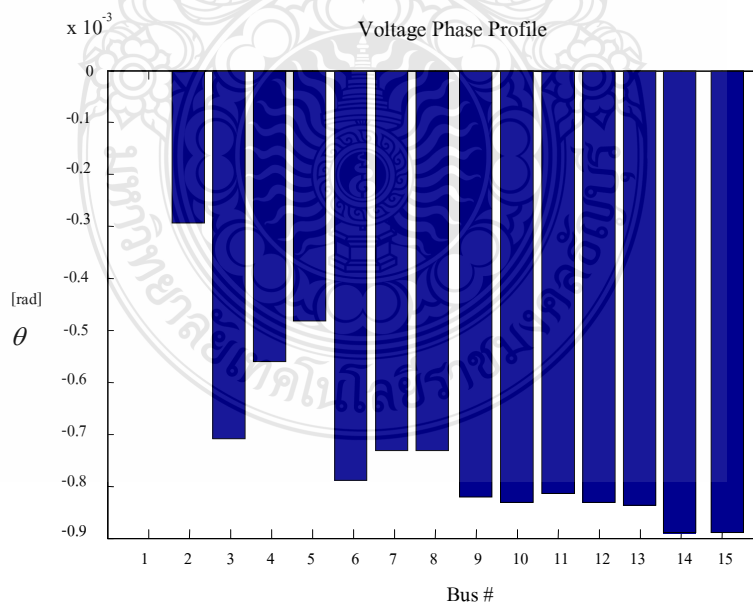
ภาพที่ 4.7 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ ติดตั้งในระบบ

ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1, 2, 3, 6, 8, 12 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.0 - 1.09 p.u. ดังภาพที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. คือบัสที่ 1 ดังภาพที่ 4.9 ได้ผลรวมของระบบกำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 8.2118 p.u. กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 6.9652 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ

6.9255 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 2.1766 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 1.2863 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 4.7886 p.u.



ภาพที่ 4.8 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง



ภาพที่ 4.9 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ ติดตั้ง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT ของระบบ IEEE 14 BUS ที่มีการเชื่อมโยงกับโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์ พบว่าการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริงลดลง การจ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟลดลง ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของการสูญเสียลดลง

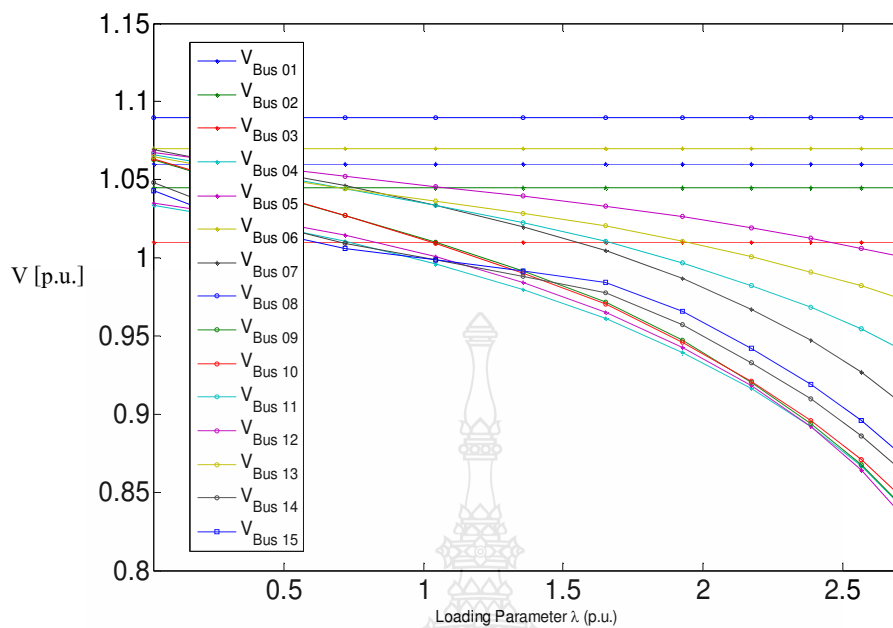
ระบบมีเสถียรภาพแรงดัน มีขนาดแรงดันใกล้เคียงเท่ากับ 1.0 p.u. และขนาดมุมเฟสเข้าใกล้ 0 rad. ลดลงจากระบบ IEEE 14 BUS เกินครึ่งเกือบทุกบัส กังหันลมไฟฟ้าติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งเหมาะสมสามารถจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบให้มากกว่าเนื่องจากมีขนาดของการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่มากกว่าจึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันเพิ่มขึ้น

4.3 กรณีวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEEE-14BUS ในข้อ 2 เพิ่มติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยึดหยุ่น 2 ชนิดคือ SVC และ STATCOM

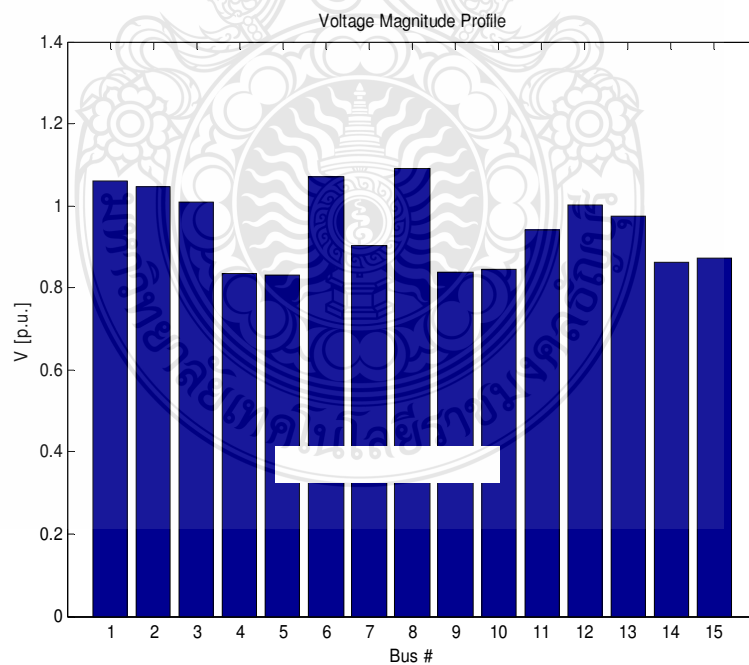
โรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์เชื่อมโยกับระบบ IEEE 14 BUS เมื่อเพิ่มติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยึดหยุ่น

4.3.1 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยึดหยุ่น SVC เพิ่มติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบหยึดหยุ่น ในที่นี้จะใช้อุปกรณ์SVC มีขนาดประมาณ 100MVA เชื่อมต่อเข้าบัสที่ 4 เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 14 BUS พบว่ามีสภาพการพังทลายของแรงดันแรงดัน (Voltage Collapse) ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 2.7063 บัส ที่มีแรงดันและมุมเฟสที่น้อยที่สุดคือบัสที่ 5 และบัสที่มีแรงดันและมุมเฟสน้อยรองลงมาประกอบด้วยบัสที่ 4, 5, 9, 10, 14, 15, 11 และ 13

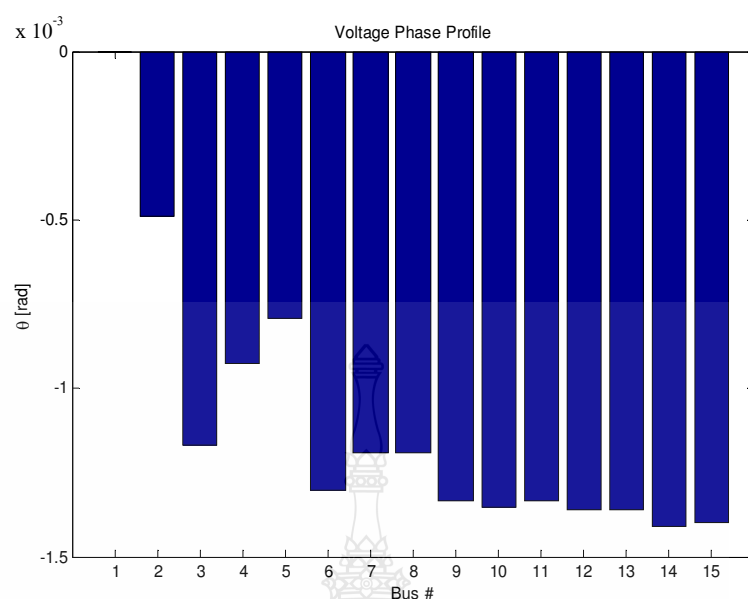
ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันมีขนาด 1.0 - 1.07 p.u. ดังภาพที่ 4.10และ4.11 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและเฟสแรงดันมีค่าใกล้เคียง 0 rad. คือบัสที่ 1 ดังภาพที่ 4.12 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 13.1763 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่ากับ 15.8544 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 9.8125 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 2.968 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 3.3638 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 12.8864 p.u.



ภาพที่ 4.10 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์และ SVC ติดตั้งในระบบ



ภาพที่ 4.11 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ และ SVC ติดตั้งในระบบ

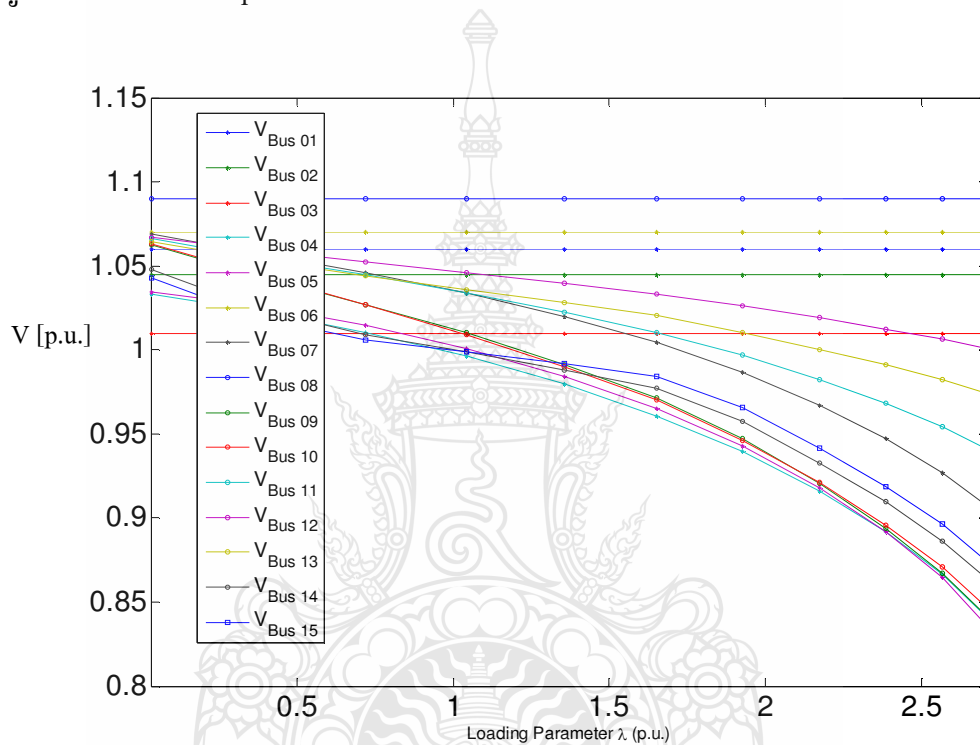


ภาพที่ 4.12 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ และ SVC ติดตั้งในระบบ

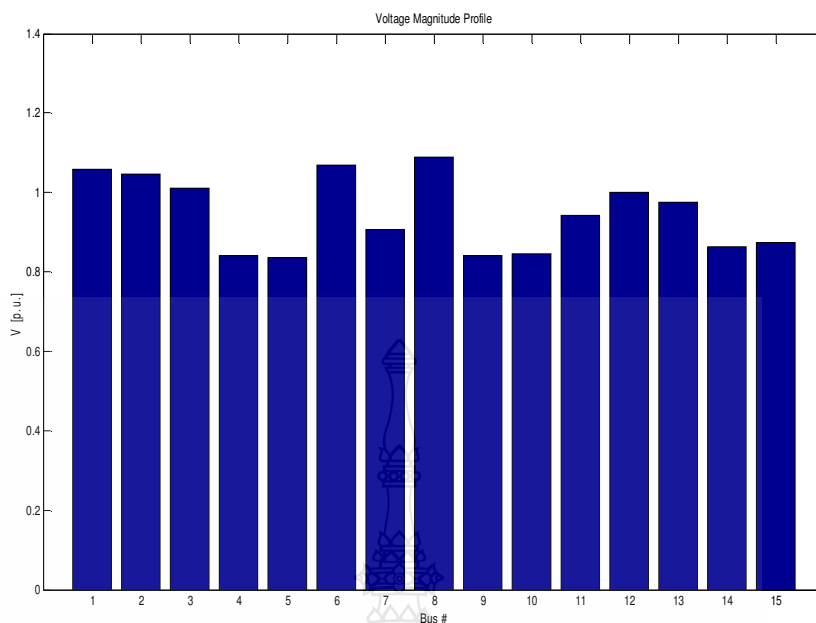
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT ของระบบ IEEE 14 BUS ที่มีการเชื่อมโยงกับโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์ เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ในที่นี้จะใช้อุปกรณ์ SVC มีขนาดประมาณ 100 MVA เชื่อมต่อเข้าบัสที่ 4 พบว่าการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริงและการจ่ายค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟลดลงกว่าเดิม ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของการสูญเสียมีลดลงกว่าเดิมและระบบมีเสถียรภาพแรงดันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4.3.2 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น STATCOM การเพิ่มอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ในที่นี้จะใช้อุปกรณ์ STATCOM มีขนาดประมาณ 100 MVA เชื่อมต่อเข้าบัสที่ 4 เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 14 BUS พบว่ามีสภาพการพังทลายของแรงดันแรงดัน (Voltage Collapse) ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 2.7115 บัส ที่มีแรงดันและมุมเฟสที่น้อยที่สุดคือบัสที่ 5 และบัสที่มีแรงดันและมุมเฟสน้อยรองลงมาประกอบด้วยบัสที่ 4, 5, 9, 10, 14, 15, 11, 7 และ 13

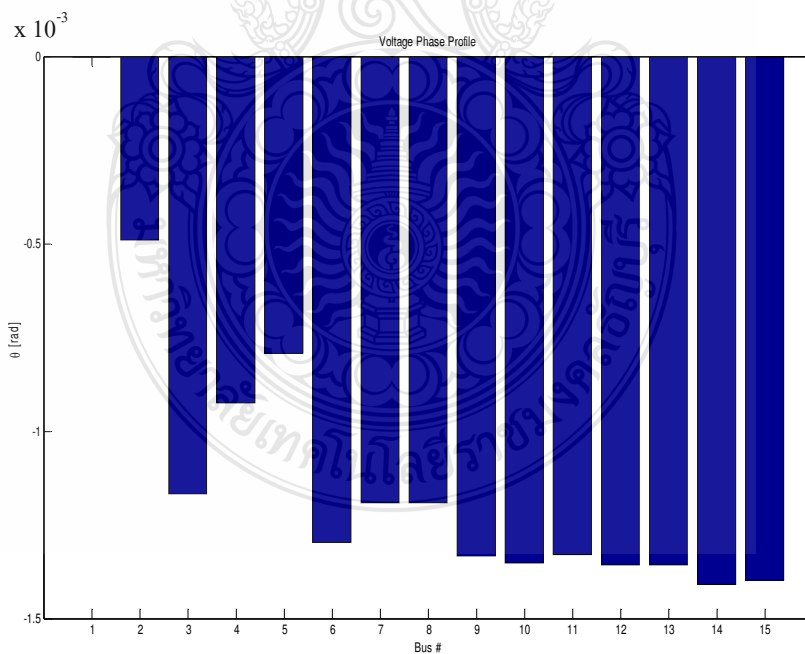
ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันมีขนาด 1.0 - 1.07 p.u. ดังภาพที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและเฟสแรงดันมีค่าใกล้เคียง 0 rad. คือบัสที่ 1 ดังภาพที่ 4.12 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 13.1854 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 15.7333 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 9.8302 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 2.8873 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 3.3552 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 12.8461 p.u.



ภาพที่ 4.13 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์และ STATCOM ติดตั้งในระบบ



ภาพที่ 4.14 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ และ STATCOM ติดตั้งในระบบ



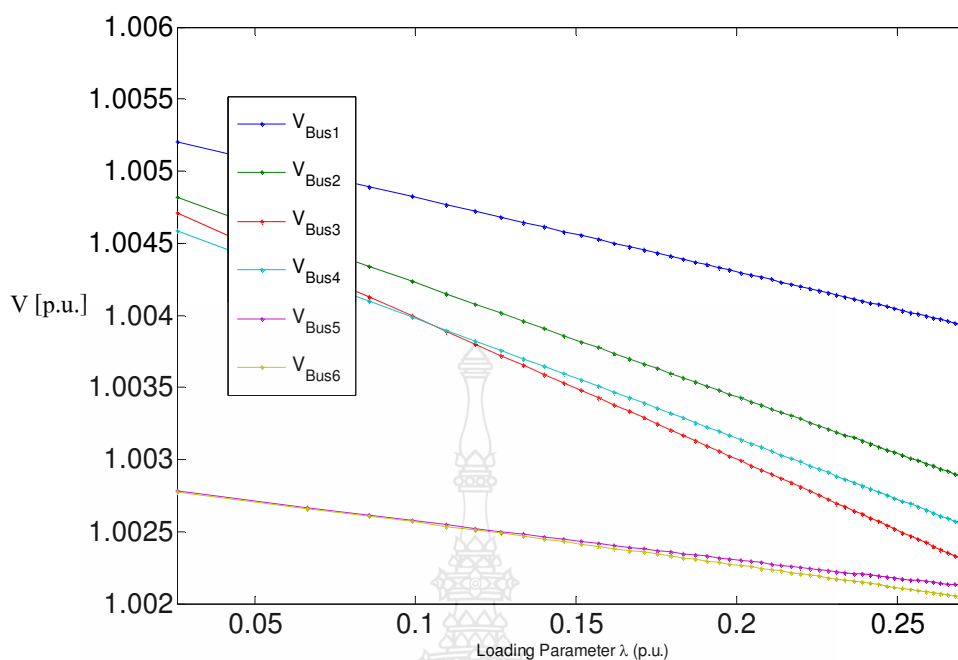
ภาพที่ 4.15 ขนาดมุมเฟสที่บัสของระบบ IEEE 14 BUS เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ และ STATCOM ติดตั้งในระบบ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT เสถียรภาพแรงดันที่มีการเชื่อมโยงกับโรงไฟฟ้ากังหันลม (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) ขนาดรวม 20.5 เมกะวัตต์และเพิ่มติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ในที่นี้จะใช้อุปกรณ์ STATCOM มีขนาดประมาณ 100MVA เชื่อมต่อเข้าบัสที่ 4 พบว่าการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริงและการจ่ายค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟลดลงกว่าเดิม ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของการสูญเสียมีลดลงกว่าเดิมและระบบมีเสถียรภาพแรงดันเพิ่มขึ้นมากกว่าติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น SVC เล็กน้อย

4.4 กรณีวิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าลำตะคอง

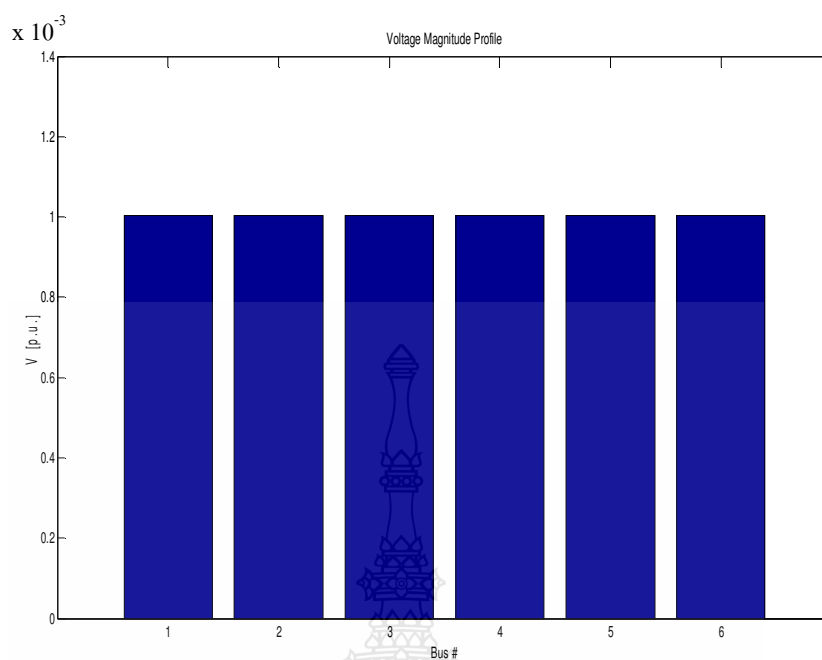
การเชื่อมโยงของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 2.5 เมกะวัตต์ กับโรงไฟฟ้าลำตะคองขนาด 167 เมกะวัตต์ เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส โดยใช้การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามความเร็วของลมอยู่ระหว่าง 3 – 12 m/s เป็นตัวกระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ โดยมีโรงไฟฟ้าลำตะคองจ่ายโหลดอยู่ในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อรักษาผลกระทบของความถี่และแรงดันให้มีค่าน้อยและให้อยู่ภายในค่าจำกัดของความคลาดเคลื่อนด้วยการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control) ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือการควบคุมความถี่ของโหลด (Load Frequency Control) และ การปรับแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator)

4.4.1 วิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้าช่วง STARTUP การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้า 3 BUS ด้วยวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow) ผลของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้เกิดสภาวะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ดังภาพที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 0.27245

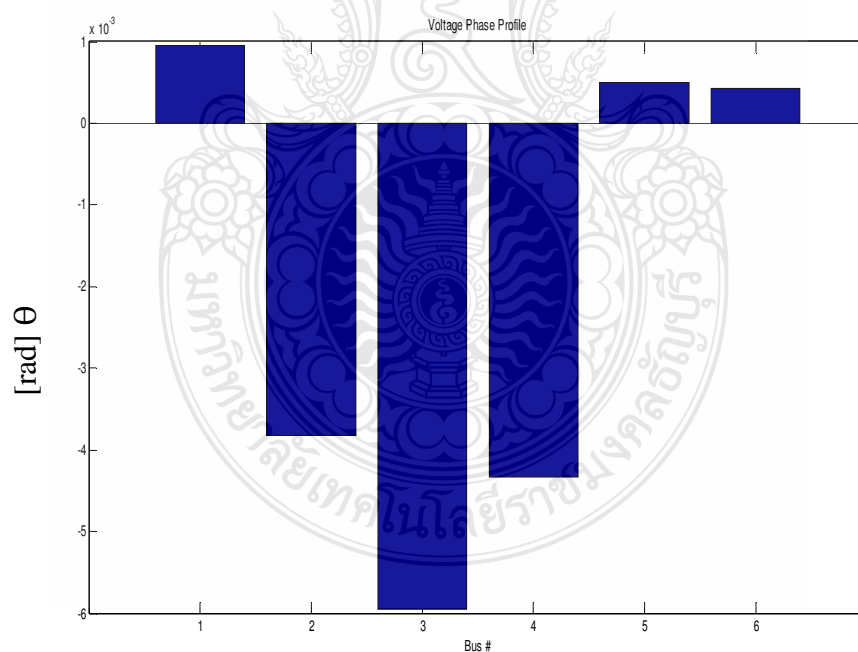


ภาพที่ 4.16 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF มี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ติดตั้งในช่วง STARTUP

ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.00 p.u. และเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. ดังภาพที่ 4.17 และ 4.18 คือบัสที่ 6 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.0109 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 0.00527 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 0.0109 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 0.00817 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 0 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ -0.0029 p.u.



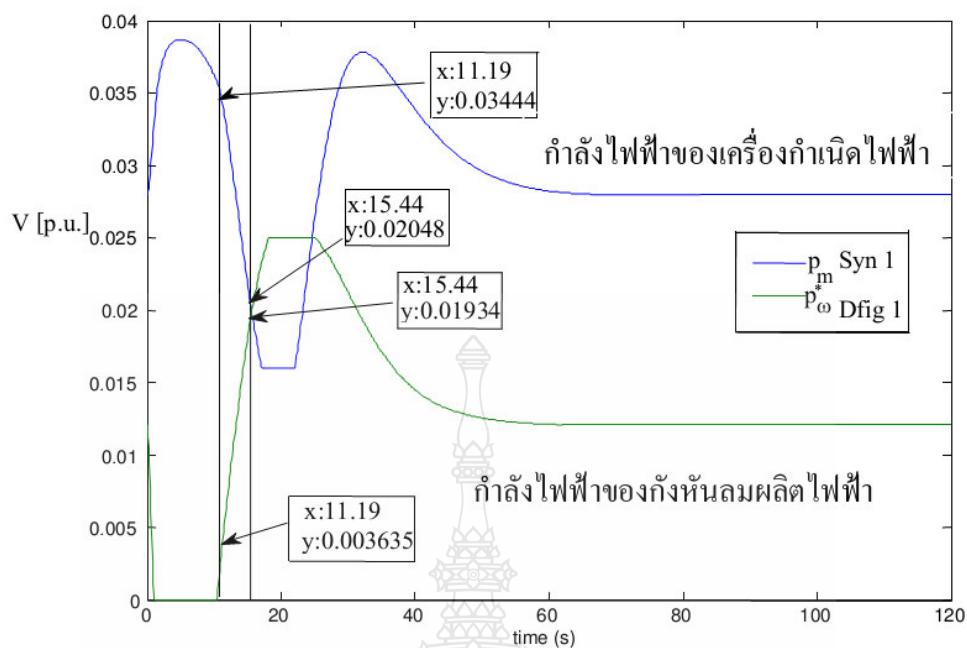
ภาพที่ 4.17 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วง STARTUP



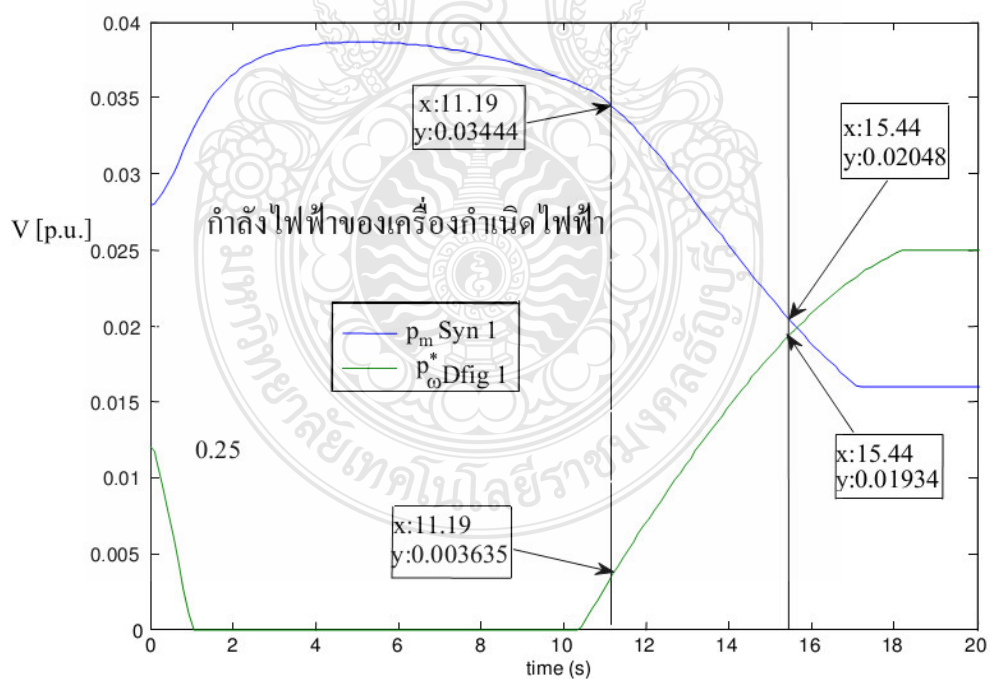
ภาพที่ 4.18 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วง STARTUP

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้า 3 BUS พบว่าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มีสภาพการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) บัสที่อ่อนแอที่สุดคือบัสที่ 3 มีขนาดแรงดันเท่ากับ 0.99496 p.u. และขนาดมุมเฟสเท่ากับ -0.00595 p.u.

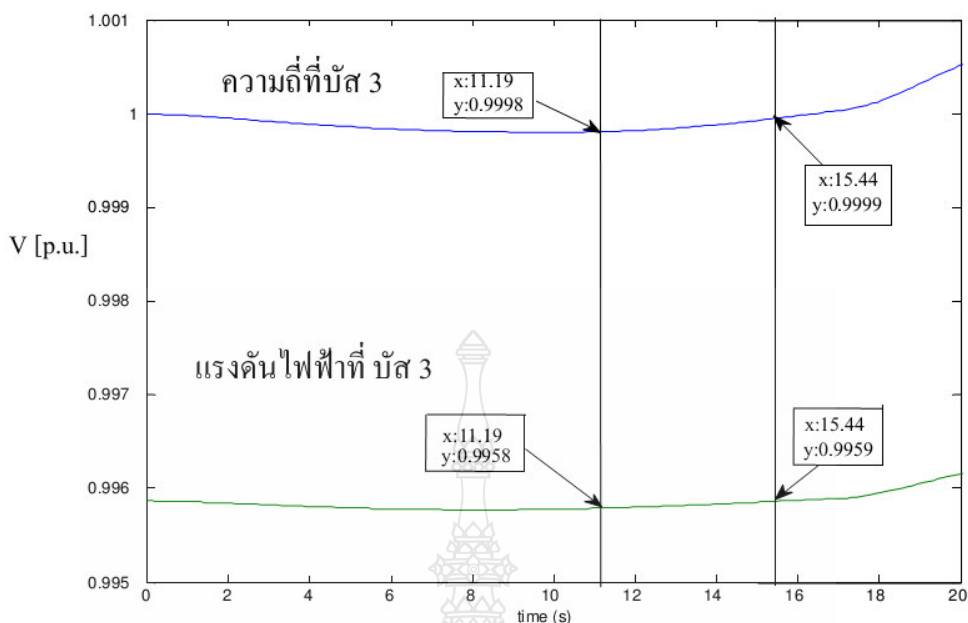
กังหันลมไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความถี่ขึ้น โดยพลังงานลมมีการเปลี่ยนแปลงจากศูนย์จนถึงค่าที่ลมมีความเร็วคงที่ 12 m/s ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าช่วงเวลา 11.19 s ถึง 15.44 s เป็นช่วง STARTUP ของ กังหันลมไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบและโดยพลังงานลมมีการเปลี่ยนแปลงจากศูนย์จนถึงค่าที่ลมมีความเร็วคงที่ 12 m/s ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบร่วมกับ โรงไฟฟ้าล่าตะกองทำให้กำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าล่าตะกองเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เปลี่ยนไปในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติสำหรับพื้นที่หลายแห่ง (Automatic Load Frequency Control For Multi Area) จะเป็นการปรับความถี่ไปที่ค่าปกติเฉพาะและรักษากำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระหว่างพื้นที่ควบคุมตามปริมาณที่กำหนดโดยการปรับเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกเลือกไว้ การเปลี่ยนแปลงโหลดในระบบจะเป็นผลทำให้ความถี่ในสถานะคงที่นั้นมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ Governor Droop ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะควบคุมความถี่และขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามค่า Droop ที่ตั้งไว้ 4 % คือการเปลี่ยนแปลงของความถี่ 2 Hz จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 100% ชุดควบคุมความถี่พยายามปรับลดขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟาลงมาเพื่อให้สมดุลกับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่เหลือและการตอบสนองต่อความถี่ของโหลดเป็นการควบคุมเครื่องส่งกำลังให้มีความพอดีกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบตามความต้องการ โดยผ่านจุดตั้งค่าเปรียบเทียบกับโหลด (Load Reference Setpoint) ที่มีไว้ควบคุมของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงเวลา 11.19 s ถึง 15.44 s กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงลดลง 0.01396 p.u. กำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.015705 p.u. ความถี่ในระบบมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.0001 p.u. ดังภาพที่ 4.19 และ 4.20 และการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นถูกควบคุมด้วยชุดระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Excitation) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความสมดุลตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งไว้เปรียบเทียบ (Voltage Setter v_r) ที่ช่วงเวลา 11.19 s ถึง 15.44 s การเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันเพิ่มขึ้น 0.0001 p.u. และขนาดความถี่เพิ่มขึ้น 0.0001 p.u. ดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.19 ขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงช่วง Start Up ในระบบ



ภาพที่ 4.20 ขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงช่วง Start Up ในระบบ ช่วงเวลา 0 ถึง 20 วินาที



ภาพที่ 4.21 ขนาดของแรงดันและความถี่ที่บัส 3 ที่เปลี่ยนแปลงช่วง Start Up ในระบบช่วงเวลา 0 ถึง 20 วินาที

จากภาพที่ 4.19 และ 4.21 ขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดของแรงดันและความถี่ที่บัส 3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงช่วง Start Up สามารถสรุปข้อมูลได้ดังนี้คือ

จากกราฟค่า $\Delta_{\text{Hydro Power}} = 0.02048 - 0.03444 = -0.01396$

จากกราฟค่า $\Delta_{\text{DFIG Power}} = 0.01934 - 0.003635 = 0.015705$

จากกราฟค่า $\Delta_{\text{Time}} = 15.44 - 11.19 = 4.25$

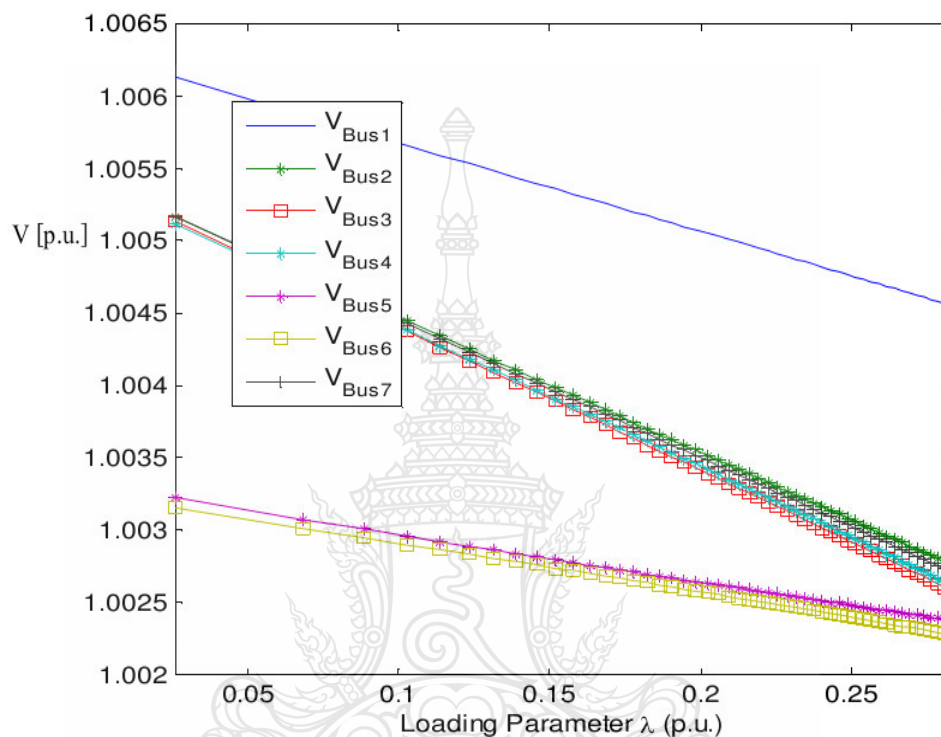
จากกราฟค่า $\Delta_{\text{Frequency}} = 0.9999 - 0.9998 = 0.0001$

จากกราฟค่า $\Delta_{\text{voltage bus}} = 0.9959 - 0.9958 = 0.0001$

4.4.2 วิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้าช่วงปลดโหลดออกจากระบบ การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังกรณีที่ปลดโหลดขนาด 1 เมกกะวัตต์ 0.5 เมกกะวัตต์ที่บัส 7 ออกจากระบบที่เวลา 61.083s ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ

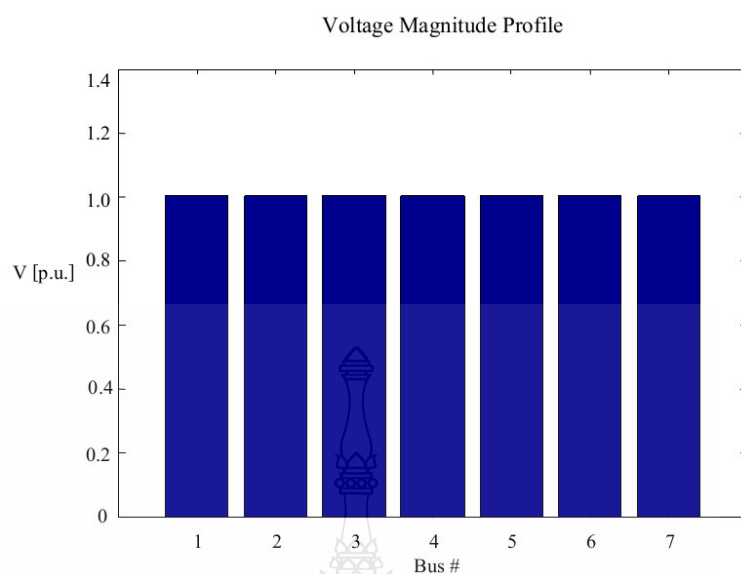
การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow) ผลของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้

เกิดสภาวะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ดังภาพที่ 4.22 ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 0.28344

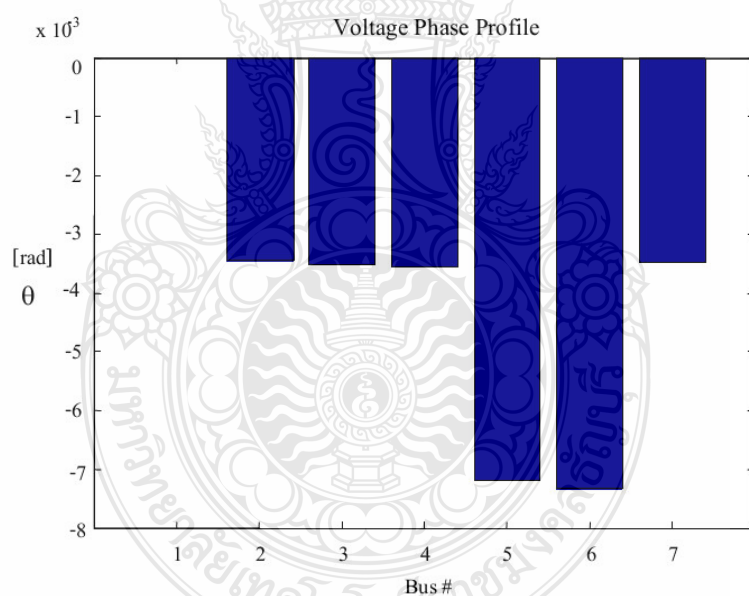


ภาพที่ 4.22 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์ ติดตั้งในระบบ

ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.0023 - 1.0046 p.u. ดังภาพที่ 4.23 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. คือบัสที่ 1 ดังภาพที่ 4.23 และ 4.24 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.01134 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 0.01005 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 0.01134 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 0.00992 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 0 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 0.00013 p.u.



ภาพที่ 4.23 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบ

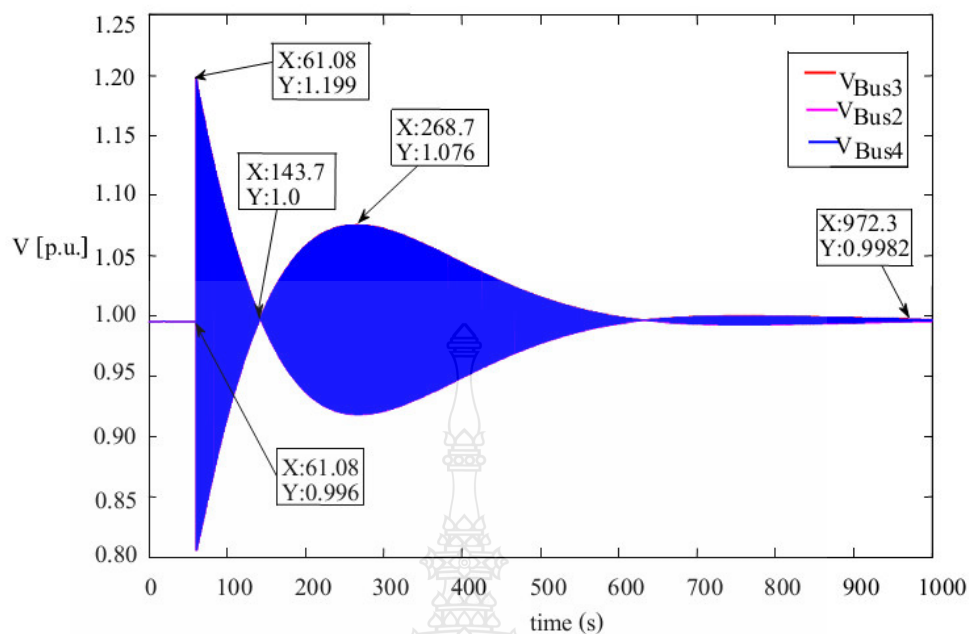


ภาพที่ 4.24 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบ

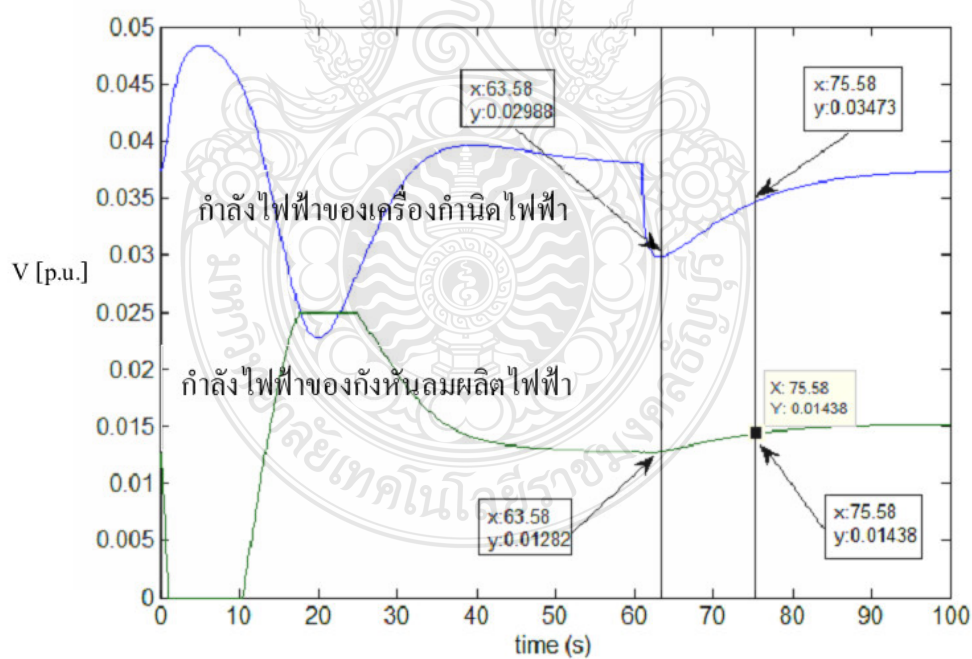
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้า 3 BUS พบว่าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มีสภาพการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) บัสที่อ่อนแอที่สุดคือบัสที่ 6 มีขนาดแรงดันเท่ากับ 1.0024 p.u. และขนาดมุมเฟสเท่ากับ -0.00721 p.u.

ระบบไฟฟ้ากำลังกรณีทีปลดโหลดขนาด 1 เมกะวัตต์ 0.5 เมกะวาร์ที่บัส 7 ออกจากระบบที่เวลา 61.083s ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและความถี่ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากการควบคุม โหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติสำหรับพื้นที่หลายแห่ง (Automatic Load Frequency Control For Multi Area) จะเป็นการปรับความถี่ไปที่ค่าปกติเฉพาะและรักษากำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระหว่างพื้นที่ควบคุมตามปริมาณที่กำหนดโดยการปรับเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกเลือกไว้ การเปลี่ยนแปลงโหลดในระบบจะเป็นผลทำให้ความถี่ในสภาวะคงที่นั้นมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ Governor Droop และการตอบสนองต่อความถี่ของโหลดเป็นการควบคุมเครื่องส่งกำลังให้มีความพอดีกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบตามความต้องการ โดยผ่านจุดตั้งค่าเปรียบเทียบกับ โหลด (Load Reference Set Point) ที่มีไว้ควบคุมของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นถูกควบคุมด้วยชุดระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Excitation) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าเกิดความสมดุลตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งไว้เปรียบเทียบ (Voltage Setter v_r) จากการทดลองพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสูงสุด ± 0.199 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีเสถียรภาพตั้งแต่วเวลา 972.3s เป็นต้นไปดังภาพที่ 4.25

ชุดควบคุมความถี่ (Governor Control) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะควบคุมความถี่และขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามค่า Droop ที่ตั้งไว้ 4% คือการเปลี่ยนแปลงของความถี่ 2 Hz จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 100% ชุดควบคุมความถี่พยายามปรับลดขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงมาเพื่อให้สมดุลกับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่เหลือนดังภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่บัส 2, 3, 4 ช่วงปลดโหลดออกจากระบบ



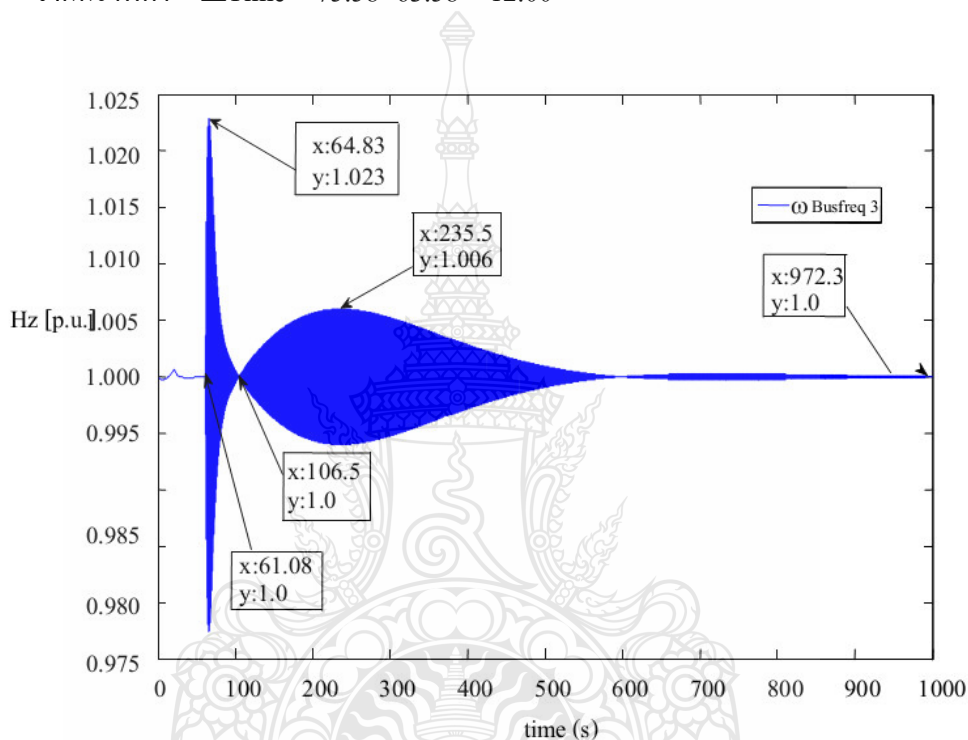
ภาพที่ 4.26 ขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

จากภาพที่ 4.26 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าลำตะคอง

จากกราฟค่า $\Delta_{\text{Hydro Power}} = 0.03473 - 0.02988 = 0.00485$

จากกราฟค่า $\Delta_{\text{DFIG Power}} = 0.01438 - 0.01282 = 0.00156$

จากกราฟค่า $\Delta_{\text{Time}} = 75.58 - 63.58 = 12.00$

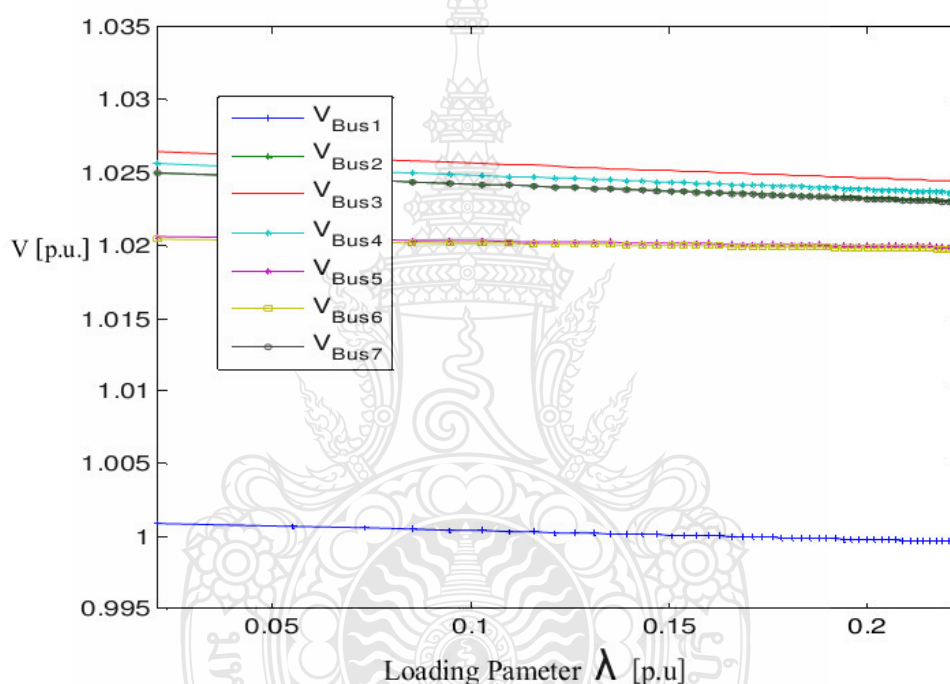


ภาพที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงขนาดของความถี่ที่บัส 3 ช่วงปลดโหลดออกจากระบบ

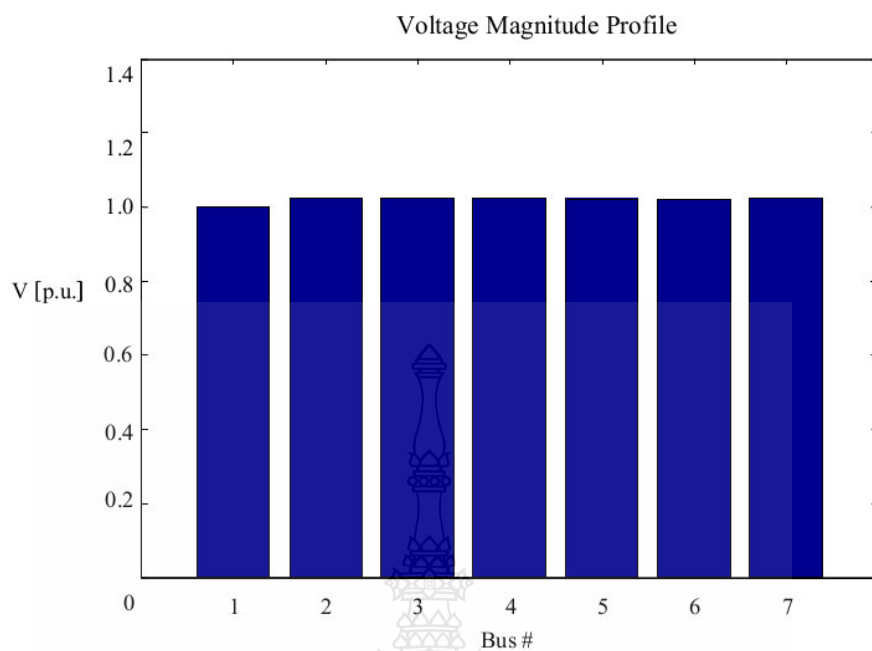
การเปลี่ยนแปลงของขนาดของความถี่ที่บัส 3 ช่วงปลดโหลดออกจากระบบที่บัส 7 ขนาดของความถี่ที่บัส 3 ขนาดของการสวิง ± 0.023 p.u. ที่เวลาประมาณ 61.08s และ ± 0.006 p.u. ที่เวลาประมาณ 235.5s ดังภาพที่ 4.27

4.4.3 วิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีอุปกรณ์ชดเชยรีแอกทีฟแบบสถิตย์ Static Var Compensator (SVC) ติดตั้งอยู่และปลดโหลดออกจากระบบการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังกรณีที่มี SVC ติดตั้งอยู่ที่บัส 3 และปลดโหลดขนาด 1 เมกะวัตต์ 0.5 เมกะวัตต์ที่บัส 7 ออกจากระบบที่เวลา 61.083s ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ

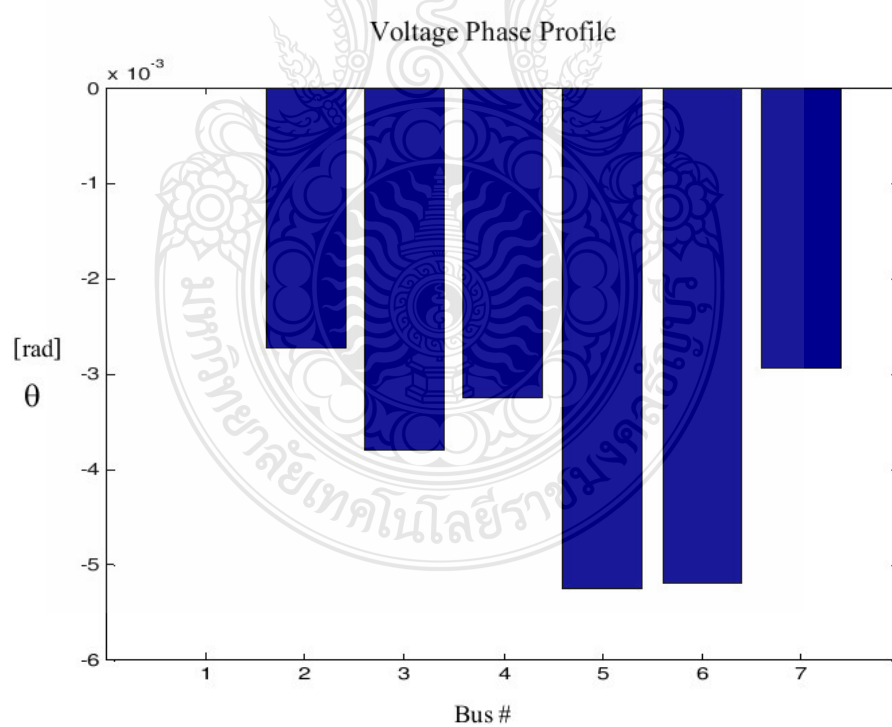
การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้า 3 BUS มี SVC ติดตั้งอยู่ที่บัส 3 ด้วยวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow) ผลที่ของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้เกิดสภาวะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 0.2234 บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดคือบัสที่ 5



ภาพที่ 4.28 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์และ SVC ติดตั้งในระบบ



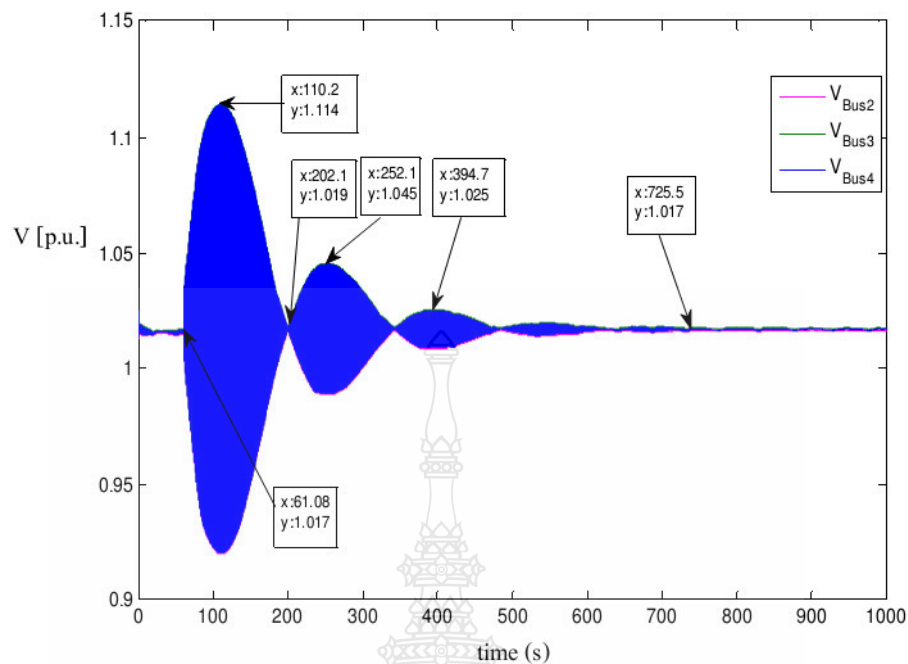
ภาพที่ 4.29 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS มี SVC ติดตั้งในระบบก่อนปลดโหลดออก



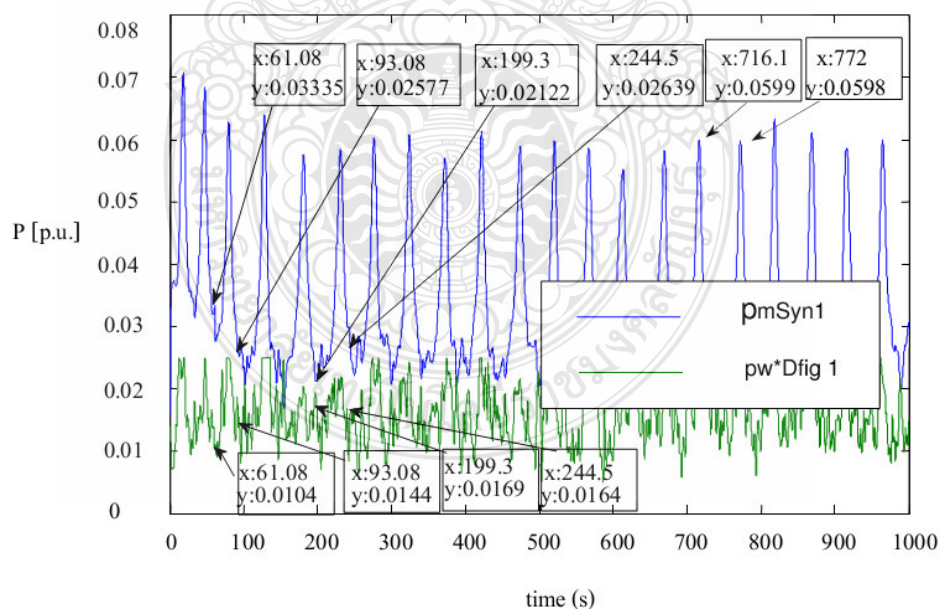
ภาพที่ 4.30 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS มี SVC ติดตั้งในระบบก่อนปลดโหลดออก

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้า 3 BUS มี SVC ติดตั้งอยู่พบว่าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มีสภาพการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) บัสที่อ่อนแอที่สุดคือบัสที่ 5 มีขนาดแรงดันเท่ากับ 1.0199 p.u. และขนาดมุมเฟสเท่ากับ -0.00527 p.u.

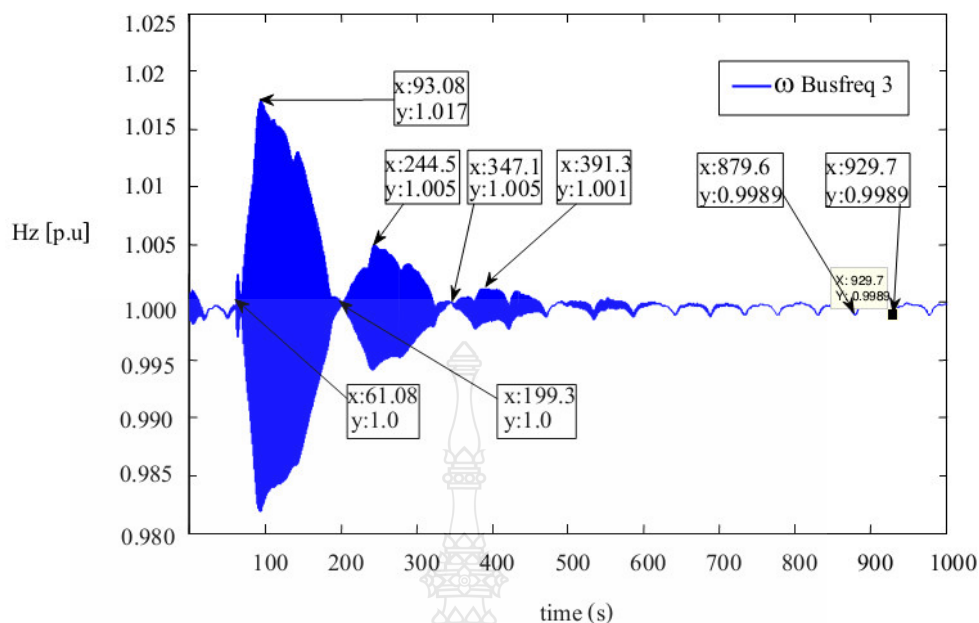
ระบบไฟฟ้ากำลังกรณีที่ปลดโหลดขนาด 1 เมกกะวัตต์ 0.5 เมกกะวัตต์ที่บัส 7 ออกจากระบบที่เวลา 61.083s ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและความถี่ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง การควบคุมโหลดกับความถี่อย่างอัตโนมัติสำหรับพื้นที่หลายแห่ง (Automatic Load Frequency Control for Multi Area) จะเป็นการปรับความถี่ไปที่ค่าปกติเฉพาะและรักษากำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระหว่างพื้นที่ควบคุมตามปริมาณที่กำหนดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ Governor Droop และมีชุดอุปกรณ์ SVC ที่ติดตั้งในระบบทำหน้าที่เพิ่มและลดกำลังไฟฟ้าย้อนกลับเพื่อรักษาระดับแรงดันให้มีเสถียรภาพตามภาพที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสูงสุด ± 0.114 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีเสถียรภาพตั้งแต่วันที่ 725.5 s และเป็นการปรับปรุงเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้สูงขึ้นส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามการทำงานของ SVC และกักเก็บผลผลิตไฟฟ้าช่วยลดการออสซิลเลชันของความถี่ของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ชุดควบคุมความถี่ (Governor Control) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานร่วมกับ SVC พยายามปรับลดขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงเพื่อให้สมดุลกับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่เหลือจะได้กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 0.03051 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้าของกักเก็บผลผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.0149 p.u. เวลาที่ SVC ใช้ควบคุมการทำงานทุกๆ 0.02 s ดังภาพที่ 4.32 จากการทำงานร่วมกันของ ALFC กับ SVC แรงดันของระบบมีเสถียรภาพ เวลาใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดให้สมดุลน้อยลงส่งผลให้ค่าขนาดของความถี่ที่เกิดขึ้นหลังจากปลดโหลดน้อยลง ความถี่ที่บัส 3 ช่วงปลดโหลดออกจากระบบขนาดของความถี่เกิดการสวิง ± 0.017 p.u. ที่เวลาประมาณ 93.08 s และ ± 0.005 p.u. ที่เวลาประมาณ 244.5 s ดังภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่บัส 2, 3, 4 ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี SVC ติดตั้งในระบบ



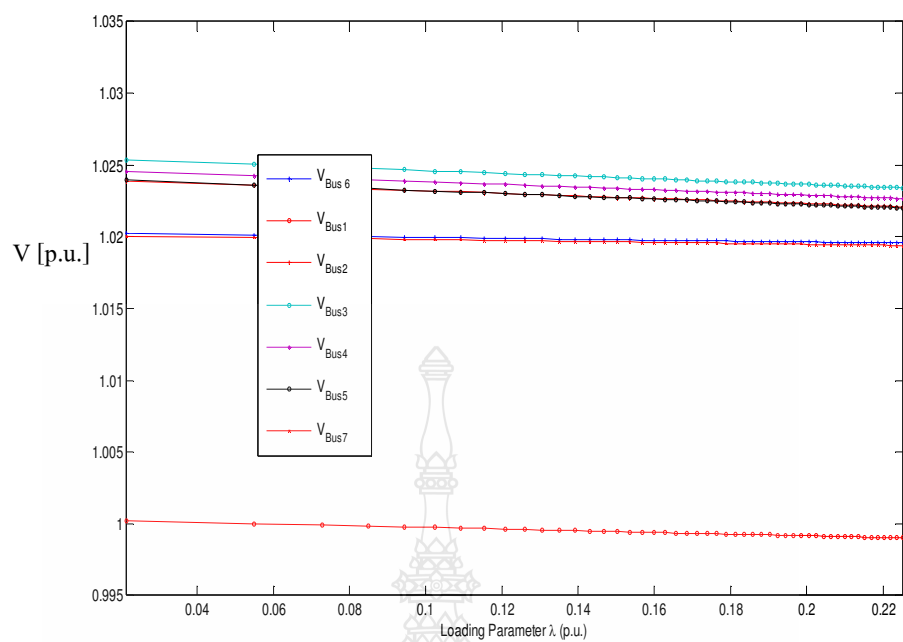
ภาพที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลมผลิตไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี SVC ติดตั้งในระบบ



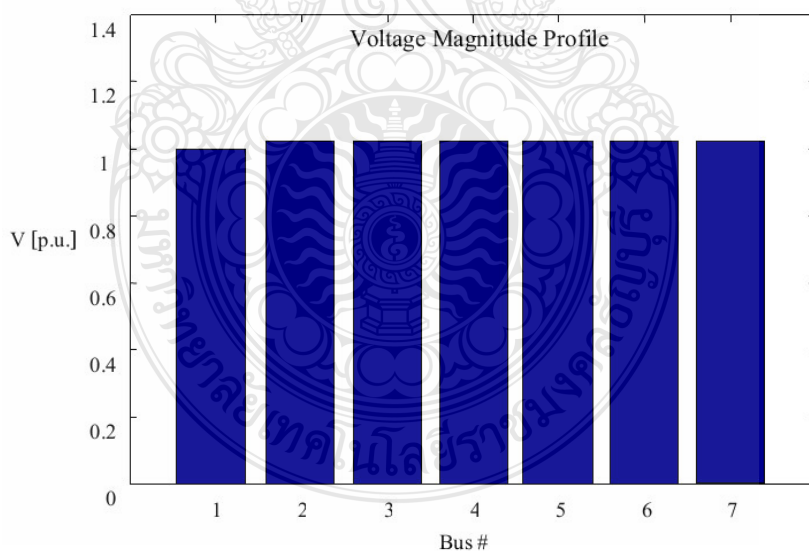
ภาพที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงขนาดของควมถี่ที่บัส 3 ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดจากระบบ
เมื่อมี SVC ติดตั้งในระบบ

4.4.4 วิเคราะห์การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีอุปกรณ์รีแอกทีฟซิงโครไนซ์แบบสถิตย์ Static Synchronous Compensator (STATCOM) ติดตั้งอยู่และปลดโหลดออกจากระบบการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังกรณีที่มี STATCOM ติดตั้งอยู่ที่บัส 3 และปลดโหลดขนาด 1 เมกกะวัตต์ 0.5 เมกกะวาร์ที่บัส 7 ออกจากระบบที่เวลา 61.083s ดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ

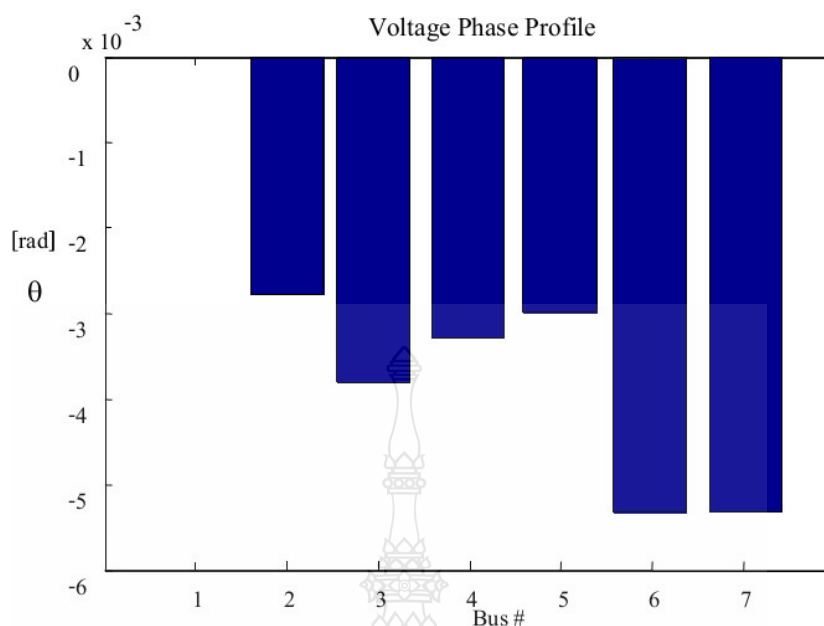
การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้า 3 BUS มี STATCOM ติดตั้งอยู่ที่บัส 3 ด้วยวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow) ผลลัพธ์ของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้เกิดสภาวะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 0.22512 บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดคือบัสที่ 6



ภาพที่ 4.34 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS จากวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF เมื่อมี Wind Turbine ขนาด 2.5 เมกะวัตต์และ STATCOM ติดตั้งในระบบ



ภาพที่ 4.35 ขนาดแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้งในระบบ

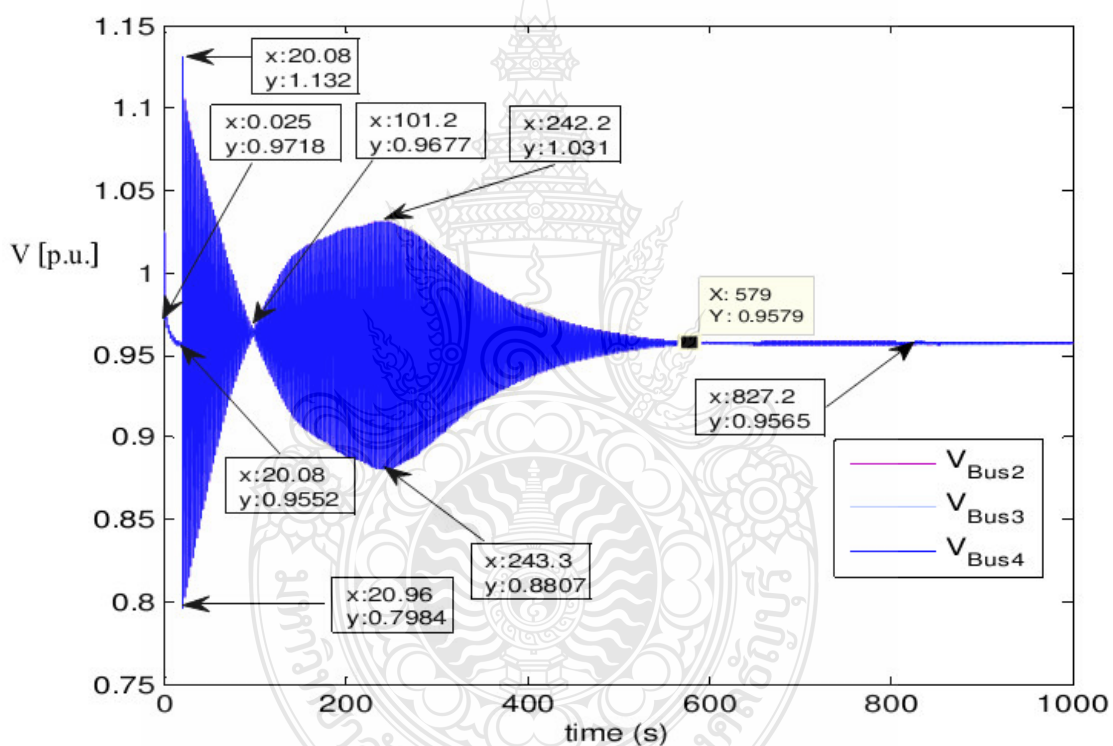


ภาพที่ 4.36 ขนาดมุมเฟสของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้า 3 BUS ก่อนปลดโหลดออกจากระบบ
เมื่อมี STATCOM ติดตั้งในระบบ

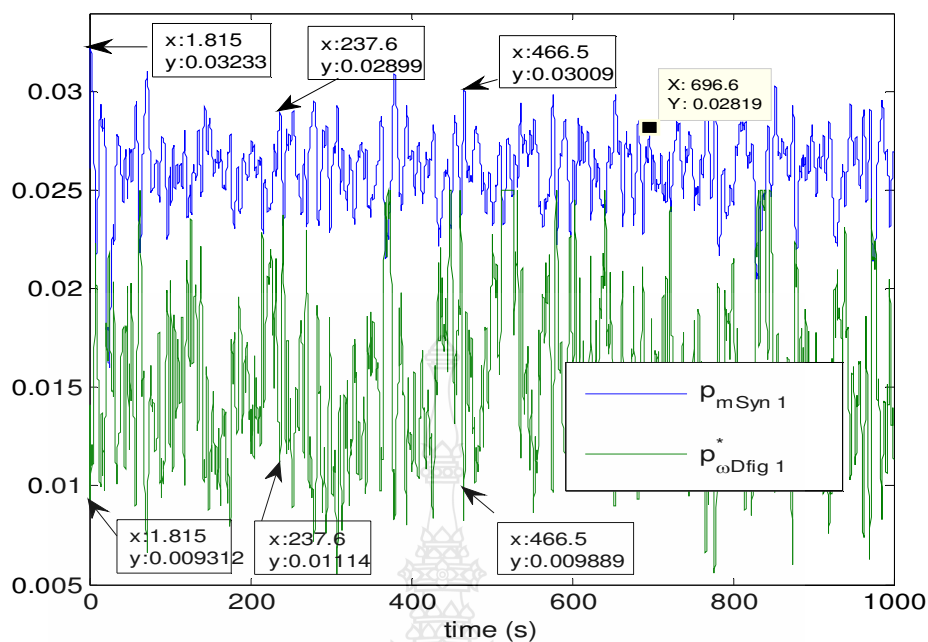
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT กับระบบไฟฟ้า 3 BUS มี STATCOM ติดตั้งอยู่พบว่าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มีสภาพการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) บัสที่อ่อนแอที่สุดคือบัสที่ 6 มีขนาดแรงดันเท่ากับ 1.0199 p.u. และขนาดมุมเฟสเท่ากับ -0.00527 p.u.

ระบบไฟฟ้ากำลังกรณีที่ปลดโหลดขนาด 1 เมกกะวัตต์ 0.5 เมกกะวาร์ที่บัส 7 ออกจากระบบที่เวลา 61.083s ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและความถี่ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง การควบคุมโหลดกับความถี่อัตโนมัติสำหรับพื้นที่หลายแห่ง (Automatic Load Frequency Control For Multi Area) จะเป็นการปรับความถี่ไปที่ค่าปกติเฉพาะและรักษากำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระหว่างพื้นที่ควบคุมตามปริมาณที่กำหนดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ Governor Droop และมีชุดอุปกรณ์ STATCOM ที่ติดตั้งในระบบทำหน้าที่เพิ่มและลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันให้มีเสถียรภาพตามภาพที่ 4.37 แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสูงสุด ± 0.1568 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีเสถียรภาพตั้งแต่วันที่ 579.0s และเป็นการปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้สูงขึ้นส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามการทำงานของ STATCOM และกักหนัผลผลิตไฟฟ้าช่วยลดการออกซิเดชันของความถี่ของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ชุดควบคุมความถี่

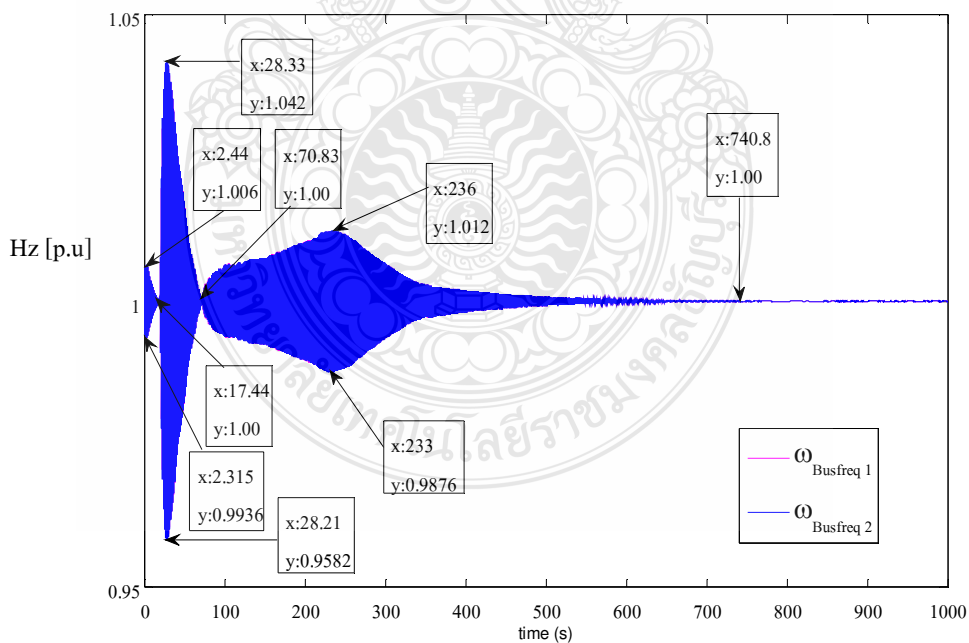
(Governor Control) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานร่วมกับ STATCOM พยายามปรับลดขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงมาให้สมดุลกับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่เหลือจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 0.02801p.u. ค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.011122p.u. เวลาที่ STATCOM ใช้ควบคุมการทำงานทุกๆ 0.02s ดังภาพที่ 4.38 จากการทำงานร่วมกันของ ALFC กับ STATCOM แรงดันของระบบมีเสถียรภาพ เวลาใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดให้สมดุลน้อยลงส่งผลให้ค่าขนาดของความถี่ที่เกิดขึ้นหลังจากปลดโหลดน้อยลง ความถี่ที่บัส 3 ช่วงปลดโหลดออกจากระบบขนาดของความถี่เกิดการสวิง ± 0.042 p.u. ที่เวลาประมาณ 20.08s และ ± 0.031 p.u. ที่เวลาประมาณ 242.5s ดังภาพที่ 4.39



ภาพที่ 4.37 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่บัส 2,3,4 ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลด ออกจากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้งในระบบ



ภาพที่ 4.38 การเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลมผลิตไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้ง



ภาพที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงขนาดของความถี่ที่บัส 3 ของระบบไฟฟ้า 3 BUS ช่วงปลดโหลดออกจากระบบเมื่อมี STATCOM ติดตั้ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Power System Analysis Toolbox (PSAT) ด้วยวิธีหาค่าความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF (Continuation Power Flow) ของระบบไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

5.1.1 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ มาตรฐาน IEEE 14 BUS ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้เกิดสถานะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 2.8286 เมื่อติดตั้งกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า(Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator ขนาด 20.5 เมกะวัตต์ที่บัสมีแรงดันไฟฟ้าอ่อนแอที่สุดคือบัสที่ 14 ผลของเสถียรภาพหาค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 2.7033 มีแรงดันไฟฟ้าที่เสถียรภาพดีขึ้นจำนวน 5 บัสแต่บางบัสมีแรงดันลดลง บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดคือบัสที่ 5 จึงติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น SVC และ STATCOM ขนาด 100 MVA เพื่อหาความแตกต่างของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากการติดตั้งที่บัสที่ 5 ของ SVC และ STATCOM โดยที่ SVC มีคุณสมบัติสามารถจ่ายและดูดกลืนค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟตามความต้องการของระบบและ STATCOM มีคุณสมบัติสามารถจ่ายและดูดกลืนค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟตามความต้องการของระบบและปรับมุมเฟสของค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ให้กับระบบ พบว่า STATCOM มีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าดีกว่าผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าจริง 13.1854 ต่อหน่วย ผลรวมของค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ 15.7333 ต่อหน่วย

5.1.2 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 BUS ติดตั้งกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine) ขนาด 1.25 เมกะวัตต์ช่วงปลดโหลดออกค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.28344 ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น SVC และ STATCOM ขนาด 10MVA พบว่า STATCOM มีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าดีกว่าค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าองค์ประกอบสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.22512 และเมื่อหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าพบว่า STATCOM รักษาเสถียรภาพ

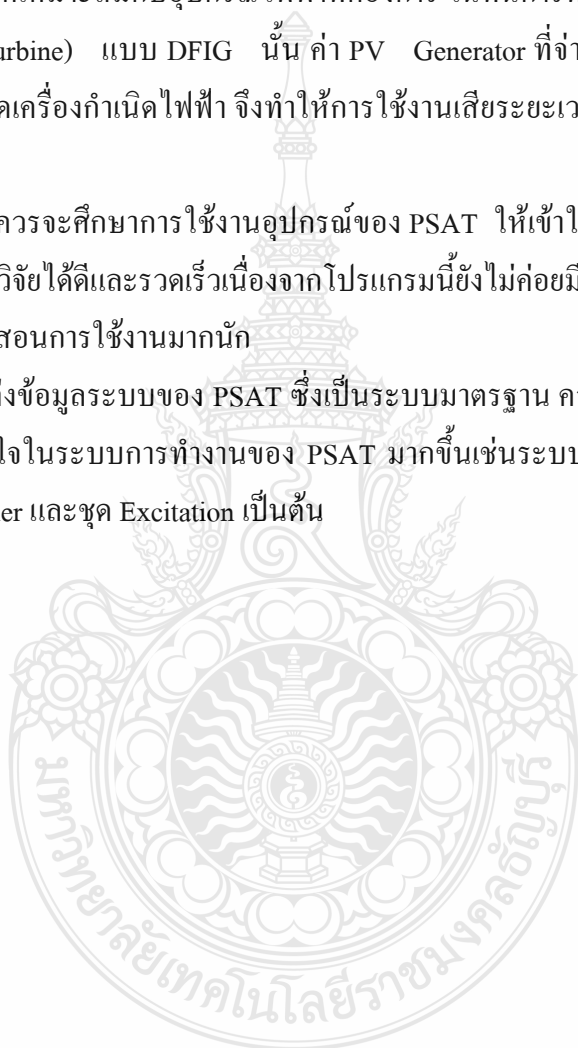
แรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่ามีค่า 1.1 ต่อหน่วย ในช่วงเวลา 579 วินาที ความถี่ที่เปลี่ยนแปลง ± 2.1 Hz ในช่วงเวลา 650 วินาที

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

5.2.1 ในส่วนของการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/PSAT นั้น จะมีปัญหาการใส่ค่า PV Generator ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการ ในที่นี้การทำงานในส่วนของกังหันลมผลิตไฟฟ้า(Wind Turbine) แบบ DFIG นั้น ค่า PV Generator ที่จ่ายนั้นจะมีผลต่อกระแสลมกระแสไฟฟ้าที่เลี้ยงชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงทำให้การใช้งานเสียระยะเวลาในการหาค่าที่เหมาะสมนั้นมาก

5.2.2 การทำวิจัยควรจะศึกษาการใช้งานอุปกรณ์ของ PSAT ให้เข้าใจเพื่อที่จะสามารถประยุกต์การใช้งานร่วมกับการวิจัยได้ดีและรวดเร็วเนื่องจากโปรแกรมนี้อยู่ไม่ค่อยมีใช้งานในประเทศไทยมากนักและไม่มีหนังสือที่สอนการใช้งานมากนัก

5.2.3 การปรับแต่งข้อมูลระบบของ PSAT ซึ่งเป็นระบบมาตรฐาน ควรหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องก่อนเพื่อศึกษาทำความเข้าใจในระบบการทำงานของ PSAT มากขึ้นเช่นระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีชุด Governor Controller และชุด Excitation เป็นต้น



รายการอ้างอิง

- [1] กังหันลมผลิตไฟฟ้าลำตะคอง สีคิ้ว นครราชสีมา หน่วยที่ 1, 2 วันที่เข้าถึง 15 พฤษภาคม 2553, http://www2.egat.co.th/re/egat_wind/egat_windlamtakhong/wind_lamtakhong.htm
- [2] กรม.อนุมัติ กฟผ.ลงทุนกังหันลมผลิตไฟฟ้า 1,741 ล้านบาท วันที่เข้าถึง 15 มีนาคม 2554, <http://www.thairath.co.th/content/eco/142346>
- [3] นิพนธ์ เกตุจ้อย, อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์, “เทคโนโลยีพลังงานลม,” **Naresuan University Journal**, 2004, หน้า57-73
- [4] วัฒนะ สืบกินร, บัลดังก์ เนียมมณี, “กังหันลม,” **วิศวกรรมสารเอเชียอาคเนย์**, 2550, หน้า48-60
- [5] J.C. . Munoz, C.A. Canizares, “Comparative Stability Analysis of DFIG based Wind Farm and Conventional Synchronous Generators,” **IEEE Power System Conference and Exposition (PSCE)**, 2011, pp. 1-7.
- [6] จักรินทร์ วิเศษยา, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, “ การศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSAT,” การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีครั้งที่ 3, 2553, หน้า110-114.
- [7] N. Mithulanathan, A.Sode-Yome, N.Acharya, S.Phichaisawat, “Application of FACTS Controllers in Thailand Power Systems,” **RTG Budget-Joint Research Project**, Fiscal-Year 2003, January 2005.
- [8] Zengqiang Mi, Yingjin Chen, Liqing Liu, Yang Yu, “**Dynamic Performance Improvement of Wind Farm with Doubly Fed Induction Generators Using STATCOM**,” Fiscal-Year 2010, 24-28 October 2010, pp. 1-6.
- [9] Adil Usman, BP Divakar, “Simulation Study of Load Frequency Control of Single and Two Area Systems,” **Global IEEE Humanitarian Technology Conference (GHTC)**, 2012, pp. 214-219.
- [10] ก่อเกียรติ อ้อดทรัพย์, บุญยัง ปลั่งกลาง, อาทิตย์ โสโตโยม, “การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า,” **วิทยานิพนธ์ปริญญาโทสาขาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**, 2552.
- [11] ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบกำลังไฟฟ้ากำลัง,” **บริษัททริปเพิล เอ็ดดูเคชั่นจำกัด**, 2552, หน้า37-62

- [12] พิชัย อารีย์, “การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง,” สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552, หน้า 39-130
- [13] F.Milano, “Power Analysis Toolbox. Documentation for PSAT version 2.0.0 7,” 2007, pp.27-275.
- [14] F.Milano, “Power System Modeling and Scripting,” Springer- Verlag London Limited, 2010, pp.103-130.
- [15] P.Kundur, “Power system stability and control,” **McGraw-Hill Inc.**, New York , USA, 1994, pp.581-641.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูล Source Code ของโปรแกรมในงานวิจัย



โปรแกรม IEEE 14 BUS

Bus.con = [...

1 69 1 0 4 1;
 2 69 1 0 4 1;
 3 69 1 0 4 1;
 4 69 1 0 4 1;
 5 69 1 0 4 1;
 6 13.8 1 0 2 1;
 7 13.8 1 0 2 1;
 8 18 1 0 3 1;
 9 13.8 1 0 2 1;
 10 13.8 1 0 2 1;
 11 13.8 1 0 2 1;
 12 13.8 1 0 2 1;
 13 13.8 1 0 2 1;
 14 13.8 1 0 2 1;
];

Line.con = [...

2 5 100 69 60 0 0 0.05695 0.17388 0.034 0 0 0 0 0 1;
 6 12 100 13.8 60 0 0 0.12291 0.25581 0 0 0 0 0 0 1;
 12 13 100 13.8 60 0 0 0.22092 0.19988 0 0 0 0 0 0 1;
 6 13 100 13.8 60 0 0 0.06615 0.13027 0 0 0 0 0 0 1;
 6 11 100 13.8 60 0 0 0.09498 0.1989 0 0 0 0 0 0 1;
 11 10 100 13.8 60 0 0 0.08205 0.19207 0 0 0 0 0 0 1;
 9 10 100 13.8 60 0 0 0.03181 0.0845 0 0 0 0 0 0 1;
 9 14 100 13.8 60 0 0 0.12711 0.27038 0 0 0 0 0 0 1;
 14 13 100 13.8 60 0 0 0.17093 0.34802 0 0 0 0 0 0 1;

7 9 100 13.8 60 0 0 0 0.11001 0 0 0 0 0 0 1;
 1 2 100 69 60 0 0 0 0.01938 0.05917 0.0528 0 0 0 0 0 1;
 3 2 100 69 60 0 0 0 0.04699 0.19797 0.0438 0 0 0 0 0 1;
 3 4 100 69 60 0 0 0 0.06701 0.17103 0.0346 0 0 0 0 0 1;
 1 5 100 69 60 0 0 0 0.05403 0.22304 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 5 4 100 69 60 0 0 0 0.01335 0.04211 0.0128 0 0 0 0 0 1;
 2 4 100 69 60 0 0 0 0.05811 0.17632 0.0374 0 0 0 0 0 1;
 4 9 100 69 60 0 5 0.005 0.55618 0 0.969 5 0 0 0 0 1;
 5 6 100 69 60 0 5 0 0.25202 0 0.932 0 0 0 0 0 1;
 4 7 100 69 60 0 5 0 0.20912 0 0.978 0 0 0 0 0 1;
 8 7 100 18 60 0 1.304348 0 0.17615 0 0 0 0 0 0 1;
];

SW.con = [...

1 100 69 1.06 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;
];

PV.con = [...

2 100 69 0.4 1.045 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;
 6 100 13.8 0 1.07 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;
 3 100 69 0 1.01 0.4 0 1.2 0.8 1 1;
 8 100 18 0 1.09 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;
];

PQ.con = [...

11 100 13.8 0.049 0.0252 1.2 0.8 0 1;
 13 100 13.8 0.189 0.0812 1.2 0.8 0 1;
 3 100 69 1.3188 0.266 1.2 0.8 0 1;
 5 100 69 0.1064 0.0224 1.2 0.8 0 1;

```

2 100 69 0.3038 0.1778 1.2 0.8 0 1;
6 100 13.8 0.1568 0.105 1.2 0.8 0 1;
4 100 69 0.6692 0.056 1.2 0.8 0 1;
14 100 13.8 0.2086 0.07 1.2 0.8 0 1;
12 100 13.8 0.0854 0.0224 1.2 0.8 0 1;
10 100 13.8 0.126 0.0812 1.2 0.8 0 1;
9 100 13.8 0.413 0.2324 1.2 0.8 0 1;
];

```

```
Bus.names = {...
```

```

'Bus 01'; 'Bus 02'; 'Bus 03'; 'Bus 04'; 'Bus 05';
'Bus 06'; 'Bus 07'; 'Bus 08'; 'Bus 09'; 'Bus 10';
'Bus 11'; 'Bus 12'; 'Bus 13'; 'Bus 14'};

```

โปรแกรม IEEE 14 BUS with Wind turbine 2.5 MW.

```
Bus.con = [ ...
```

```

1 13.8 1 0 1 1;
2 69 1 0 4 1;
3 69 1 0 4 1;
4 69 1 0 4 1;
5 69 1 0 4 1;
6 69 1 0 4 1;
7 13.8 1 0 2 1;
8 13.8 1 0 2 1;
9 18 1 0 3 1;
10 13.8 1 0 2 1;

```

11 13.8 1 0 2 1;
 12 13.8 1 0 2 1;
 13 13.8 1 0 2 1;
 14 13.8 1 0 2 1;
 15 13.8 1 0 2 1;
];

Line.con = [...

3 6 100 69 50 0 0 0.05695 0.17388 0.034 0 0 0 0 0 1;
 7 13 100 13.8 50 0 0 0.12291 0.25581 0 0 0 0 0 0 1;
 13 14 100 13.8 50 0 0 0.22092 0.19988 0 0 0 0 0 0 1;
 7 14 100 13.8 50 0 0 0.06615 0.13027 0 0 0 0 0 0 1;
 7 12 100 13.8 50 0 0 0.09498 0.1989 0 0 0 0 0 0 1;
 12 11 100 13.8 50 0 0 0.08205 0.19207 0 0 0 0 0 0 1;
 10 11 100 13.8 50 0 0 0.03181 0.0845 0 0 0 0 0 0 1;
 10 15 100 13.8 50 0 0 0.12711 0.27038 0 0 0 0 0 0 1;
 15 14 100 13.8 50 0 0 0.17093 0.34802 0 0 0 0 0 0 1;
 15 1 100 13.8 50 0 0 0.03181 0.0845 0 0 0 0 0 0 1;
 8 10 100 13.8 50 0 0 0 0.11001 0 0 0 0 0 0 1;
 3 2 100 69 50 0 0 0.01938 0.05917 0.0528 0 0 0 0 0 1;
 4 3 100 69 50 0 0 0.04699 0.19797 0.0438 0 0 0 0 0 1;
 4 5 100 69 50 0 0 0.06701 0.17103 0.0346 0 0 0 0 0 1;
 6 2 100 69 50 0 0 0.05403 0.22304 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 6 5 100 69 50 0 0 0.01335 0.04211 0.0128 0 0 0 0 0 1;
 3 5 100 69 50 0 0 0.05811 0.17632 0.0374 0 0 0 0 0 1;
 6 7 100 69 50 0 5 0 0.25202 0 0.932 0 0 0 0 1;
 5 10 100 69 50 0 5 0 0.55618 0 0.969 0 0 0 0 1;
 5 8 100 69 50 0 5 0 0.20912 0 0.978 0 0 0 0 1;
 9 8 100 18 50 0 1.304348 0 0.17615 0 0 0 0 0 0 1;

];

SW.con = [...

2 100 69 1.06 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;

];

PV.con = [...

1 100 13.8 0.01019 1.02 0.5 -0.5 1.2 0.8 1 1;

3 100 69 0.4 1.045 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;

7 100 13.8 0 1.07 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;

4 100 69 0 1.01 0.4 0 1.2 0.8 1 1;

9 100 18 0 1.09 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;

];

PQ.con = [...

12 100 13.8 0.035 0.018 1.2 0.8 0 1;

14 100 13.8 0.135 0.058 1.2 0.8 0 1;

4 100 69 0.942 0.19 1.2 0.8 0 1;

6 100 69 0.076 0.016 1.2 0.8 0 1;

3 100 69 0.217 0.127 1.2 0.8 0 1;

7 100 13.8 0.112 0.075 1.2 0.8 0 1;

5 100 69 0.478 0.04 1.2 0.8 0 1;

15 100 13.8 0.149 0.05 1.2 0.8 0 1;

13 100 13.8 0.061 0.016 1.2 0.8 0 1;

11 100 13.8 0.09 0.058 1.2 0.8 0 1;

10 100 13.8 0.295 0.166 1.2 0.8 0 1;

];

Dfig.con = [...

```
1 1 2.5 13.8 50 0.0048 0.09241 0.00549 0.09955 3.95327 3 10 3 10 0.01 75 4 3
0.011236 1 0 0.7 -0.7 1 1;
];
```

Wind.con = [...

```
2 15 1.225 4 0.1 20 2 5 15 1 5 15 0 50 0.01 0.2 50;
];
```

Bus.names = {...

```
'Bus 15'; 'Bus 01'; 'Bus 02'; 'Bus 03'; 'Bus 04';
```

```
'Bus 05'; 'Bus 06'; 'Bus 07'; 'Bus 08'; 'Bus 09';
```

```
'Bus 10'; 'Bus 11'; 'Bus 12'; 'Bus 13'; 'Bus 14'};
```

โปรแกรม IEEE 14 BUS with Wind turbine 20.5 MW.

Bus.con = [...

```
1 69 1 0 4 1;
```

```
2 69 1 0 4 1;
```

```
3 69 1 0 4 1;
```

```
4 69 1 0 4 1;
```

```
5 69 1 0 4 1;
```

```
6 13.8 1 0 2 1;
```

```
7 13.8 1 0 2 1;
```

```
8 18 1 0 3 1;
```

```
9 13.8 1 0 2 1;
```

```
10 13.8 1 0 2 1;
```

11 13.8 1 0 2 1;
 12 13.8 1 0 2 1;
 13 13.8 1 0 2 1;
 14 13.8 1 0 2 1;
 15 13.8 1 0 3 1;
];

Line.con = [...

2 5 100 69 60 0 0 0.05695 0.17388 0.034 0 0 0 0 0 1;
 6 12 100 13.8 60 0 0 0.12291 0.25581 0 0 0 0 0 0 1;
 12 13 100 13.8 60 0 0 0.22092 0.19988 0 0 0 0 0 0 1;
 6 13 100 13.8 60 0 0 0.06615 0.13027 0 0 0 0 0 0 1;
 6 11 100 13.8 60 0 0 0.09498 0.1989 0 0 0 0 0 0 1;
 11 10 100 13.8 60 0 0 0.08205 0.19207 0 0 0 0 0 0 1;
 9 10 100 13.8 60 0 0 0.03181 0.0845 0 0 0 0 0 0 1;
 9 14 100 13.8 60 0 0 0.12711 0.27038 0 0 0 0 0 0 1;
 14 13 100 13.8 60 0 0 0.17093 0.34802 0 0 0 0 0 0 1;
 7 9 100 13.8 60 0 0 0 0.11001 0 0 0 0 0 0 1;
 1 2 100 69 60 0 0 0.01938 0.05917 0.0528 0 0 0 0 0 1;
 15 14 100 13.8 50 0 0 0.01 0.044 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 3 2 100 69 60 0 0 0.04699 0.19797 0.0438 0 0 0 0 0 1;
 3 4 100 69 60 0 0 0.06701 0.17103 0.0346 0 0 0 0 0 1;
 1 5 100 69 60 0 0 0.05403 0.22304 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 5 4 100 69 60 0 0 0.01335 0.04211 0.0128 0 0 0 0 0 1;
 2 4 100 69 60 0 0 0.05811 0.17632 0.0374 0 0 0 0 0 1;
 4 9 100 69 50 0 5 0.005 0.55618 0 0.969 5 0 0 0 1;
 5 6 100 69 50 0 5 0 0.25202 0 0.932 0 0 0 0 1;
 4 7 100 69 50 0 5 0 0.20912 0 0.978 0 0 0 0 1;
 8 7 100 18 50 0 1.304348 0 0.17615 0 0 0 0 0 0 1;

];

SW.con = [...

1 100 69 1.06 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;

];

PV.con = [...

15 100 13.8 0.0059861 1 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;

2 100 69 0.4 1.045 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;

6 100 13.8 0 1.07 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;

3 100 69 0 1.01 0.4 0 1.2 0.8 1 1;

8 100 18 0 1.09 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;

];

PQ.con = [...

11 100 13.8 0.049 0.0252 1.2 0.8 0 1;

13 100 13.8 0.189 0.0812 1.2 0.8 0 1;

3 100 69 1.3188 0.266 1.2 0.8 0 1;

5 100 69 0.1064 0.0224 1.2 0.8 0 1;

2 100 69 0.3038 0.1778 1.2 0.8 0 1;

6 100 13.8 0.1568 0.105 1.2 0.8 0 1;

4 100 69 0.6692 0.056 1.2 0.8 0 1;

14 100 13.8 0.2086 0.07 1.2 0.8 0 1;

12 100 13.8 0.0854 0.0224 1.2 0.8 0 1;

10 100 13.8 0.126 0.0812 1.2 0.8 0 1;

9 100 13.8 0.413 0.2324 1.2 0.8 0 1;

];

Dfig.con = [...

```
15 1 20.5 13.8 50 0.0048 0.09241 0.00549 0.09955 3.95327 3 10 3 10 0.01 75 4 3
0.011236 1 0 0.7 -0.7 1 1;
];
```

Wind.con = [...

```
2 15 1.225 4 0.1 20 2 5 15 1 5 15 0 50 0.01 0.2 50;
];
```

Bus.names = {...

'Bus 01'; 'Bus 02'; 'Bus 03'; 'Bus 04'; 'Bus 05';

'Bus 06'; 'Bus 07'; 'Bus 08'; 'Bus 09'; 'Bus 10';

'Bus 11'; 'Bus 12'; 'Bus 13'; 'Bus 14'; 'Bus 15'};

โปรแกรม IEEE 14 BUS with Wind turbine 20.5 MW and SVC.

Bus.con = [...

1 69 1 0 4 1;

2 69 1 0 4 1;

3 69 1 0 4 1;

4 69 1 0 4 1;

5 69 1 0 4 1;

6 13.8 1 0 2 1;

7 13.8 1 0 2 1;

8 18 1 0 3 1;

9 13.8 1 0 2 1;

10 13.8 1 0 2 1;

11 13.8 1 0 2 1;
 12 13.8 1 0 2 1;
 13 13.8 1 0 2 1;
 14 13.8 1 0 2 1;
 15 13.8 1 0 3 1;
];

Line.con = [...

2 5 100 69 60 0 0 0.05695 0.17388 0.034 0 0 0 0 0 1;
 6 12 100 13.8 60 0 0 0.12291 0.25581 0 0 0 0 0 0 1;
 12 13 100 13.8 60 0 0 0.22092 0.19988 0 0 0 0 0 0 1;
 6 13 100 13.8 60 0 0 0.06615 0.13027 0 0 0 0 0 0 1;
 6 11 100 13.8 60 0 0 0.09498 0.1989 0 0 0 0 0 0 1;
 11 10 100 13.8 60 0 0 0.08205 0.19207 0 0 0 0 0 0 1;
 9 10 100 13.8 60 0 0 0.03181 0.0845 0 0 0 0 0 0 1;
 9 14 100 13.8 60 0 0 0.12711 0.27038 0 0 0 0 0 0 1;
 14 13 100 13.8 60 0 0 0.17093 0.34802 0 0 0 0 0 0 1;
 7 9 100 13.8 60 0 0 0 0.11001 0 0 0 0 0 0 1;
 1 2 100 69 60 0 0 0.01938 0.05917 0.0528 0 0 0 0 0 1;
 15 14 100 13.8 50 0 0 0.01 0.044 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 3 2 100 69 60 0 0 0.04699 0.19797 0.0438 0 0 0 0 0 1;
 3 4 100 69 60 0 0 0.06701 0.17103 0.0346 0 0 0 0 0 1;
 1 5 100 69 60 0 0 0.05403 0.22304 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 5 4 100 69 60 0 0 0.01335 0.04211 0.0128 0 0 0 0 0 1;
 2 4 100 69 60 0 0 0.05811 0.17632 0.0374 0 0 0 0 0 1;
 4 9 100 69 50 0 5 0.005 0.55618 0 0.969 5 0 0 0 1;
 5 6 100 69 50 0 5 0 0.25202 0 0.932 0 0 0 0 1;
 4 7 100 69 50 0 5 0 0.20912 0 0.978 0 0 0 0 1;
 8 7 100 18 50 0 1.304348 0 0.17615 0 0 0 0 0 0 1;

];

SW.con = [...

1 100 69 1.06 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;

];

PV.con = [...

15 100 13.8 0.005905 1 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;

4 100 69 0.1 1 99 -99 1.4 0.7 1 1;

2 100 69 0.4 1.045 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;

6 100 13.8 0 1.07 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;

3 100 69 0 1.01 0.4 0 1.2 0.8 1 1;

8 100 18 0 1.09 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;

];

PQ.con = [...

11 100 13.8 0.049 0.0252 1.2 0.8 0 1;

13 100 13.8 0.189 0.0812 1.2 0.8 0 1;

3 100 69 1.3188 0.266 1.2 0.8 0 1;

5 100 69 0.1064 0.0224 1.2 0.8 0 1;

2 100 69 0.3038 0.1778 1.2 0.8 0 1;

6 100 13.8 0.1568 0.105 1.2 0.8 0 1;

4 100 69 0.6692 0.056 1.2 0.8 0 1;

14 100 13.8 0.2086 0.07 1.2 0.8 0 1;

12 100 13.8 0.0854 0.0224 1.2 0.8 0 1;

10 100 13.8 0.126 0.0812 1.2 0.8 0 1;

9 100 13.8 0.413 0.2324 1.2 0.8 0 1;

];

```
Svc.con = [ ...
```

```
4 100 69 50 1 0.02 1 1 1.5 -0.3 0.001 0 1 0.01 0.2 0.1 1;
```

```
];
```

```
Dfig.con = [ ...
```

```
15 1 20.5 13.8 50 0.0048 0.09241 0.00549 0.09955 3.95327 3 10 3 10 0.01 75 4 3  
0.011236 1 0 0.7 -0.7 1 1;
```

```
];
```

```
Wind.con = [ ...
```

```
2 15 1.225 4 0.1 20 2 5 15 1 5 15 0 50 0.01 0.2 50;
```

```
];
```

```
Bus.names = {...
```

```
'Bus 01'; 'Bus 02'; 'Bus 03'; 'Bus 04'; 'Bus 05';
```

```
'Bus 06'; 'Bus 07'; 'Bus 08'; 'Bus 09'; 'Bus 10';
```

```
'Bus 11'; 'Bus 12'; 'Bus 13'; 'Bus 14'; 'Bus 15'};
```

โปรแกรม IEEE 14 BUS with Wind turbine 20.5 MW and STATCOM.

```
Bus.con = [ ...
```

```
1 69 1 0 4 1;
```

```
2 69 1 0 4 1;
```

```
3 69 1 0 4 1;
```

```
4 69 1 0 4 1;
```

```
5 69 1 0 4 1;
```

```
6 13.8 1 0 2 1;
```

```
7 13.8 1 0 2 1;
```

```
8 18 1 0 3 1;
```


9 13.8 1 0 2 1;
 10 13.8 1 0 2 1;
 11 13.8 1 0 2 1;
 12 13.8 1 0 2 1;
 13 13.8 1 0 2 1;
 14 13.8 1 0 2 1;
 15 13.8 1 0 3 1;
];

Line.con = [...

2 5 100 69 60 0 0 0.05695 0.17388 0.034 0 0 0 0 0 1;
 6 12 100 13.8 60 0 0 0.12291 0.25581 0 0 0 0 0 0 1;
 12 13 100 13.8 60 0 0 0.22092 0.19988 0 0 0 0 0 0 1;
 6 13 100 13.8 60 0 0 0.06615 0.13027 0 0 0 0 0 0 1;
 6 11 100 13.8 60 0 0 0.09498 0.1989 0 0 0 0 0 0 1;
 11 10 100 13.8 60 0 0 0.08205 0.19207 0 0 0 0 0 0 1;
 9 10 100 13.8 60 0 0 0.03181 0.0845 0 0 0 0 0 0 1;
 9 14 100 13.8 60 0 0 0.12711 0.27038 0 0 0 0 0 0 1;
 14 13 100 13.8 60 0 0 0.17093 0.34802 0 0 0 0 0 0 1;
 7 9 100 13.8 60 0 0 0.11001 0 0 0 0 0 0 1;
 1 2 100 69 60 0 0 0.01938 0.05917 0.0528 0 0 0 0 0 1;
 15 14 100 13.8 50 0 0 0.01 0.044 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 3 2 100 69 60 0 0 0.04699 0.19797 0.0438 0 0 0 0 0 1;
 3 4 100 69 60 0 0 0.06701 0.17103 0.0346 0 0 0 0 0 1;
 1 5 100 69 60 0 0 0.05403 0.22304 0.0492 0 0 0 0 0 1;
 5 4 100 69 60 0 0 0.01335 0.04211 0.0128 0 0 0 0 0 1;
 2 4 100 69 60 0 0 0.05811 0.17632 0.0374 0 0 0 0 0 1;
 4 9 100 69 50 0 5 0.005 0.55618 0 0.969 5 0 0 0 1;
 5 6 100 69 50 0 5 0 0.25202 0 0.932 0 0 0 0 1;

```

4 7 100 69 50 0 5 0 0.20912 0 0.978 0 0 0 0 1;
8 7 100 18 50 0 1.304348 0 0.17615 0 0 0 0 0 0 1;
];

```

SW.con = [...

```

1 100 69 1.06 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;
];

```

PV.con = [...

```

4 100 69 0.1 1 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;
15 100 13.8 0.005908 1 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;
2 100 69 0.4 1.045 0.5 -0.4 1.2 0.8 1 1;
6 100 13.8 0 1.07 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;
3 100 69 0 1.01 0.4 0 1.2 0.8 1 1;
8 100 18 0 1.09 0.24 -0.06 1.2 0.8 1 1;
];

```

PQ.con = [...

```

11 100 13.8 0.049 0.0252 1.2 0.8 0 1;
13 100 13.8 0.189 0.0812 1.2 0.8 0 1;
3 100 69 1.3188 0.266 1.2 0.8 0 1;
5 100 69 0.1064 0.0224 1.2 0.8 0 1;
2 100 69 0.3038 0.1778 1.2 0.8 0 1;
6 100 13.8 0.1568 0.105 1.2 0.8 0 1;
4 100 69 0.6692 0.056 1.2 0.8 0 1;
14 100 13.8 0.2086 0.07 1.2 0.8 0 1;
12 100 13.8 0.0854 0.0224 1.2 0.8 0 1;
10 100 13.8 0.126 0.0812 1.2 0.8 0 1;

```

```

9 100 13.8 0.413 0.2324 1.2 0.8 0 1;
];

```

```

Statcom.con = [ ...
4 100 69 50 1.5 0.1 1.5 -0.3 1;
];

```

```

Dfig.con = [ ...
15 1 20.5 13.8 50 0.0048 0.09241 0.00549 0.09955 3.95327 3 10 3 10 0.01 75 4 3
0.011236 1 0 0.7 -0.7 1 1;
];

```

```

Wind.con = [ ...
2 15 1.225 4 0.1 20 2 5 15 1 5 15 0 50 0.01 0.2 50;
];

```

```

Bus.names = {...
'Bus 01'; 'Bus 02'; 'Bus 03'; 'Bus 04'; 'Bus 05';
'Bus 06'; 'Bus 07'; 'Bus 08'; 'Bus 09'; 'Bus 10';
'Bus 11'; 'Bus 12'; 'Bus 13'; 'Bus 14'; 'Bus 15'};

```

โปรแกรม ALFC 3 BUS Wind Turbine 2.5 MW and Hydro Power Plant.

```

Bus.con = [ ...
1 16.5 1.06 0 4 1;
2 22 1 0 1 1;
3 22 1 0 1 1;

```

```

4 22 1 0 1 1;
5 0.69 1 0 1 1;
6 0.69 1 0 1 1;
];

```

Line.con = [...

```

2 3 100 22 50 0 0 0.01 0.1 0.001 0 0 0 0 0 1;
2 4 100 22 50 0 0 0.01 0.1 0.001 0 0 0 0 0 1;
3 4 100 22 50 0 0 0.01 0.1 0.001 0 0 0 0 0 1;
6 5 100 0.69 50 0 0 0.01 0.001 0 0 0 0 0 0 1;
4 5 50 22 50 0 31.8841 0 0.2 0 0 0 0 0 0 1;
1 2 100 16.5 50 0 0.75 0 0.17 0 0 0 0 0 0 1;
];

```

SW.con = [...

```

1 100 16.5 1 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;
];

```

PV.con = [...

```

6 100 0.69 0.0120202 1 0.9 -0.2 1.1 0.9 1 1;
];

```

PQ.con = [...

```

3 100 22 0.04 0.03 1.2 0.8 1 1;
];

```

```
Syn.con = [ ...
```

```
  1 160 16.5 50 5.3 0.2396 0.0018 0.99 0.2 0.18 11.9 0.08 0.646 0.646 0.4 0.001 0.033
10.296 2 0 0 1 1 0 0 0;
];
```

```
Tg.con = [ ...
```

```
  1 2 1 0.04 1.3 -3 0.1 0.45 0.5 0 0 1;
];
```

```
Exc.con = [ ...
```

```
  1 2 1.62 0 1 0.02 0.002 1 1 0.2 0.001 0.0006 0.9;
];
```

```
Dfig.con = [ ...
```

```
  6 1 2.5 0.69 50 0.0084 0.167 0.0083 0.1323 3 1 10 3 5 2 64 4 3 0.0185185 1 0 0.9 -
0.9 1 1;
];
```

```
Wind.con = [ ...
```

```
  4 12 1.225 2 1 0 0 0 12 1 0 12 1 0 0 0 0 1 10;
];
```

```
Busfreq.con = [ ...
```

```
  3 0.001 0.001 1;
];
```

```
Bus.names = {...
```

```
'Bus1'; 'Bus2'; 'Bus3'; 'Bus4'; 'Bus5';
'Bus6'};
```

โปรแกรม ALFC 3 BUS Wind Turbine 20.5 MW and Hydro Power Plant and reject load

Bus.con = [...

1 16.5 1.06 0 4 1;

2 22 1 0 1 1;

3 22 1 0 1 1;

4 22 1 0 1 1;

5 0.69 1 0 1 1;

6 0.69 1 0 1 1;

7 22 1 0 1 1;

];

Line.con = [...

2 3 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;

2 4 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;

3 4 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;

2 7 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;

6 5 100 0.69 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;

4 5 50 22 50 0 31.8841 0 0.2 0 0 0 0 0 0 1;

1 2 100 16.5 50 0 0.75 0 0.17 0 0 0 0 0 0 1;

];

Breaker.con = [...

4 2 100 22 50 1 61.083 4 1 0;

];

SW.con = [...

1 100 16.5 1 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;

];

PV.con = [...

6 100 0.69 0.01201 1 0.9 -0.2 1.1 0.9 1 1;

];

PQ.con = [...

3 100 22 0.03 0.03 1.2 0.8 1 1;

7 100 22 0.01 0.005 1.2 0.8 1 1;

];

Syn.con = [...

1 160 16.5 50 5.3 0.2396 0.0018 0.99 0.2 0.18 11.9 0.08 0.646 0.646 0.4 0.001 0.033

10.296 2 0 0 1 1 0 0 0;

];

Tg.con = [...

1 2 1 0.04 1.3 0.01 0.1 0.45 0.5 0 0 1;

];

Exc.con = [...

1 2 1.2 0 1 0.02 0.002 1 1 0.2 0.001 0.0006 0.9;

];

Dfig.con = [...

6 1 2.5 0.69 50 0.0084 0.167 0.0083 0.1323 3 1 10 3 5 2 64 4 3 0.0185185 1 0 0.9 -

0.9 1 1;

];

```
Wind.con = [ ...
  4 12 1.225 2 1 0 0 0 12 1 0 12 1 0 0 0 0 1 10;
];
```

```
Busfreq.con = [ ...
  3 0.001 0.001 1;
  1 0.001 0.001 1;
];
```

```
Bus.names = {...
  'Bus1'; 'Bus2'; 'Bus3'; 'Bus4'; 'Bus5';
  'Bus6'; 'Bus7'};
```

โปรแกรม ALFC 3 BUS Wind Turbine 2.5 MW SVC and Hydro Power Plant.

```
Bus.con = [ ...
  1 16.5 1.06 0 4 1;
  2 22 1 0 1 1;
  3 22 1 0 1 1;
  4 22 1 0 1 1;
  5 0.69 1 0 1 1;
  6 0.69 1 0 1 1;
  7 22 1 0 1 1;
];
```

```
Line.con = [ ...
  2 3 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
```



```

2 4 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
3 4 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
2 7 100 22 50 0 0 0.01 0.1 0.001 0 0 0 0 0 1;
6 5 100 0.69 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
4 5 50 22 50 0 31.8841 0 0.2 0 0 0 0 0 0 1;
1 2 100 16.5 50 0 0.75 0 0.17 0 0 0 0 0 0 1;
];

```

Breaker.con = [...

```

4 2 100 22 50 1 61.083 4 1 0;
];

```

SW.con = [...

```

1 100 16.5 1 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;
];

```

PV.con = [...

```

6 100 0.69 0.014 1.02 99 -99 1.25 0.9 1 1;
3 10 22 0.2 1.025 99 -99 1.4 0.7 1 1;
];

```

PQ.con = [...

```

3 100 22 0.04 0.03 1.2 0.8 1 1;
7 100 22 0.01 0.005 1.2 0.8 1 1;
];

```

Syn.con = [...

```

1 160 16.5 50 5.3 0.2396 0.0018 0.99 0.2 0.18 11.9 0.08 0.646 0.646 0.4 0.001 0.033
10.296 2 0 0 1 1 0 0 0;
];

```

Tg.con = [...

1 2 1 0.04 1.3 0.001 0.1 0.45 0.5 0 0 1;

];

Exc.con = [...

1 2 1.2 0 1 0.02 0.002 1 1 0.2 0.001 0.0006 0.9;

];

Svc.con = [...

3 10 22 50 1 0.02 0.1 1 1.5 -0.3 0.001 0 1 0.01 0.2 0.1 1;

];

Dfig.con = [...

6 1 2.5 0.69 50 0.0084 0.167 0.0083 0.1323 3 1 10 3 5 2 64 4 3 0.0185185 1 0 0.9 -
0.9 1 1;

];

Wind.con = [...

2 12 1.225 2 1 0 0 0 12 1 0 12 1 0 0 0 0 1 10;

];

Busfreq.con = [...

3 0.001 0.001 1;

1 0.001 0.001 1;

];

Bus.names = {...

```
'Bus1'; 'Bus2'; 'Bus3'; 'Bus4'; 'Bus5';
'Bus6'; 'Bus7'};
```

โปรแกรม ALFC 3 BUS Wind Turbine 2.5 MW STATCOM and Hydro Power Plant

```
Bus.con = [ ...
```

```
1 16.5 1.06 0 4 1;
2 22 1 0 1 1;
3 22 1 0 1 1;
4 22 1 0 1 1;
5 0.69 1 0 3 1;
6 0.69 1 0 1 1;
7 22 1 0 1 1;
];
```

```
Line.con = [ ...
```

```
2 3 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
2 4 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
3 4 100 22 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
2 7 100 22 50 0 0 0.01 0.1 0.001 0 0 0 0 0 1;
6 5 100 0.69 50 0 0 0.01 0.015 0 0 0 0 0 0 1;
4 5 50 22 50 0 31.8841 0 0.2 0 0 0 0 0 0 1;
1 2 100 16.5 50 0 0.75 0 0.17 0 0 0 0 0 0 1;
];
```

```
Breaker.con = [ ...
```

```
4 2 100 22 50 1 20.083 4 1 0;
```

];

SW.con = [...

1 100 16.5 1 0 9.9 -9.9 1.2 0.8 2.324 1 1 1;

];

PV.con = [...

6 100 0.69 0.01408 1.02 99 -99 1.25 0.9 1 1;

3 100 22 0.01 1.025 99 -99 1.4 0.7 1 1;

];

PQ.con = [...

3 100 22 0.04 0.03 1.2 0.8 1 1;

7 100 22 0.01 0.005 1.2 0.8 1 1;

];

Syn.con = [...

1 160 16.5 50 5.3 0.2396 0.0018 0.99 0.2 0.18 11.9 0.08 0.646 0.646 0.4 0.001 0.033
10.296 2 0 0 1 1 0 0 0;

];

Tg.con = [...

1 2 1 0.04 1.3 0.01 0.1 0.45 0.5 0 0 1;

];

Exc.con = [...

1 2 1.2 0 1 0.02 0.002 1 1 0.2 0.001 0.0006 0.9;

];

```
Statcom.con = [ ...  
 3 10 22 50 0.5 0.02 0.1 -0.3 1;  
];
```

```
Dfig.con = [ ...  
 6 1 2.5 0.69 50 0.0084 0.167 0.0083 0.1323 3 1 10 3 5 2 64 4 3 0.0185185 1 0 0.9 -  
0.9 1 1;  
];
```

```
Wind.con = [ ...  
 2 12 1.225 2 1 0 0 0 12 1 0 12 1 0 0 0 0 1 10;  
];
```

```
Busfreq.con = [ ...  
 3 0.001 0.001 1;  
 1 0.001 0.001 1;  
];
```

```
Bus.names = { ...  
 'Bus1'; 'Bus2'; 'Bus3'; 'Bus4'; 'Bus5';  
 'Bus6'; 'Bus7'};
```





ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ข.1 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 6 BUS เชื่อมต่อกังหันลม

Electrical Engineering Network 2012 of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



CONFERENCE TOPICS

GROUP 1 (PE)

Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

GROUP 2 (PW)

Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

GROUP 3 (RE)

Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

GROUP 4 (TE)

Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

GROUP 5 (CP)

Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

GROUP 6 (GN)

Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.



GRAND PARADISE HOTEL
Nong Khai, THAILAND
April 3-5, 2012

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

รายชื่อผู้พิจารณาบทความการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

รศ. ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

รศ. ดร.วิจิตร กิมเรศ

รศ. ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์

รศ. ดร.เวทิน ปิยะรัตน์

รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง

รศ. ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก

รศ. ดร.เสถียร ธัญญศิริรัตน์

ผศ. ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

ผศ. ดร.อภิรักษ์ อรุโศภณ

ผศ. ดร.วรวัฒน์ เสรียมวิบูล

ผศ. ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม

ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ

ผศ. ดร.กองพล อารีรักษ์

ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ

ดร.นิวัฒน์ อังควศิษฐพันธ์

รศ.ดร.โกศล โอฟารไพโรจน์

ดร.อุเทน คำน่าน

นายณรงค์ นันทกุล

ผศ.กฤษดา ยิ่งขยัน

นายเอกทัศน์ พฤษวรรณ

ดร.จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน

ผศ.ชาญชัย เดชธรรมรงค์

ดร.จักรกฤษณ์ เกื้อบัววัง

นายสมนึก เสือสอน

นายทัศนัย ถมทอง

นายณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์

ผศ.อภิศักดิ์ ชันแก้วหล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ผศ.สุรสิทธิ์ แสนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายเอกลักษณ์ สุ่มนพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายปรีชา มหาไม้	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายก่อเกียรติ อีอัครทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
รศ.ดร.ชัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.พินิจ ศรีธรร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ประเสริฐ เผื่อนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.พันธ์พงษ์ อภิชาติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.สุทธินันท์ ตันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ศิริชัย ลาภาสระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายกิตติวุฒิ จินนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายรุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายเอกจิต คุ้มวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นางอุษา คงเมือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายชิตสิทธิ์ วิจิโต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายบุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายวุฒิวัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายชูศักดิ์ กมลขันติธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายวินัย เมธาวีฑิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายชาญฤทธิ์ ชาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพจ.กรุงเทพฯ
นายประยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายภัทรพงศ์ อัญชันภาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายสมพล โสศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายทัศนพันธ์ สุวรรณทัต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายจตุรงค์ จตุรเขตรชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ดร.ณัฐพงษ์ พันธนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นัฐโชติ ธิปไตยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิติพันธ์ คุณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายทง ถานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายสมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.พิชญ์ ดาราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายมนัส บุญเกียรติทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพนา คูสีดากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.กิจจา ลักขณ์อำนวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.โกศล นิธิโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิลमित นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายเกรียงไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายวัฒนพันธ์ วิวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายณัฐวัชรินทร์ ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.ศรีศักดิ์ น้อยไร่ภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
นางสาวพัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.สรายุทธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.กระจำจ พัทธ์ยวงษ์วิทยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ศรีสุภา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.นภัทร วิจันทพิรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.สมพันธ์ อำพาวิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.ชวงค์ วัฒนศักดิ์ภูบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ผศ.วิสุทธิ พงศ์พฤษภาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.เมธา ทศกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ศศ.วิชัย ครอบกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายเอกวิทย์ หายกวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระ ชันยาภิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายรัก สกุลพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายนครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤตดา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายจงเจริญ คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤษฏา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายจิระพงษ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระชัย จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายเฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ศศ.ดร.ปรีชา สาครรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ดร.ภักต์วัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายไพบูลย์ เกียรติสุขคนธรร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
รศ.พันธ์ พิริยะวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศศ.ประวิช เปரியบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศศ.ประยงค์ เสาร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศศ.จักรวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุระ ตันดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ณรงค์ สีหาจ้อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศศ.ดร.สมชัย หิริญาโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศศ.ดร.วันชัย ทวีทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศศ.วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศศ.ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศศ.ณัฐวุฒิ โสมะเกษตรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภคิตพชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐภัทร	พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายสมชาย	เบียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพร้อมศักดิ์	อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายนิติพงษ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัฐพล	หาอุปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.จินตนา	นาคะสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ปราชญ์	ดาบบัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไพฑูรย์	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวิโรจน์	ไพราจเนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพงษ์ศักดิ์	อำภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายบุญยัง	นบนอบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายอภิรดา	นามแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุทินัน	พรอนุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วินัย	วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กิตติวัฒน์	นัมเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.อิฐอรรณู	ปิติม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัชดิพงษ์	อุทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

PW16	Optimal Reactive Power Control in Power System with Particle Swarm Optimization	212
PW17	การศึกษาและเปรียบเทียบการลดการใช้ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดีเซลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ ด้วยอัตราปรับตั้งระบบ TOD และ TOU	216
PW18	การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 6 BUS เชื่อมกับกังหันลม	220
PW19	การออกแบบอัลกอริธึม สำหรับค้นหาตำแหน่งความผิดพลาดของระบบจำหน่าย 22 kV	224
PW20	การระบุตำแหน่งจุดลัดวงจรของสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	229
PW21	การเปรียบเทียบการลดความชื้นในอากาศระหว่างสนามไฟฟ้ากับขดลวดความร้อน	233
PW22	การเปรียบเทียบคุณภาพไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหลอดประหยัดพลังงาน	237
PW23	การศึกษามลของอุณหภูมิและบัลลาสต์ที่มีต่ออายุการใช้งานของหลอดฟลูออเรสเซนต์	241
PW24	การวางแผนเพื่อยกระดับเสถียรภาพแรงดันสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี	245
PW25	การควบคุมความถี่-โหลดของระบบไฟฟ้าเชื่อมโยงโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลลจิก	249
PW26	การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟในย่านพลวัตด้วย SVC	253
PW27	การติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยค่าที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย 33 บัส แบบเรเดียล ด้วยโปรแกรม PSO	257
PW28	การเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าช่วงด้วยสแตตคอม	261
PW29	การควบคุมวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีด้วยสมการสถานะ	265
PW30	ตู้แช่เยลีสถิตที่พลังงานแสงอาทิตย์	269
PW31	การวิเคราะห์การกักความร้อนของแท่งกรวดกสิบมะเฟืองเนื่องจากสภาพดิน และฟ้าผ่าในเขตพื้นที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 1 ภาคกลาง	273
PW32	มูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟดับของผู้ใช้ไฟประเภทอุตสาหกรรมโรงสีข้าว	277
PW33	ตรวจจับแรงดันตกโดยวิธีการหาค่ายอด	281

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 6 BUS เชื่อมกับกังหันลม

Study to the voltage Stability of IEEE 6 BUS Power System connected by Wind Turbine

ชนสินธุ์ จันเงิน และ กฤษณ์ชนันท์ ภูมิภักดีพิชญ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3571 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: chanasith@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลเกิดการขาดแคลน หากโรงไฟฟ้าพลังงานเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลเกิดขาดแคลนเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบลดลงจนอาจเกิดแรงดันพังทลายขึ้น เมื่อกังหันลมไฟฟ้า DFIG เชื่อมเข้าระบบไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละ BUS มีค่าใกล้เคียงกับ 1 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าของระบบของโหลดและการสูญเสียลดลงทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดัน โดยใช้วิธีวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (CPF) กับระบบมาตรฐาน IEEE 6 BUS หากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริงช่วงไม่มีและมีกังหันลมไฟฟ้าเชื่อมต่อเพื่อหาค่าองค์ประกอบสูงสุดด้วยโปรแกรม PSAT ทำให้ทราบถึงจุดที่จะเกิดการพังทลายของแรงดันและจุดที่จะติดตั้งกังหันลมไฟฟ้า DFIG

คำสำคัญ: กังหันลม, เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า, วิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง, กล่องเครื่องมือวิเคราะห์ระบบกำลังไฟฟ้า

Abstract

Currently, the fossil fuel power plant will affect the stability of the system voltage decreases as the voltage collapse may occur. When the DFIG wind power into electricity to power the BUS is close to 1 p.u. and the power of the system. The loss of load and decreasing the system voltage stability. By analyzing the continuous flow of power (CPF) with the standard IEEE 6 BUS relationship between voltage and power real-time and with wind power connected to the highest cost component with the PSAT to get to the point to the voltage and the erosion of the installed wind power DFIG.

Keywords: Wind Turbine, Voltage stability, Continuation Power Flow(CPF), Power System Analysis Toolbox (PSAT)

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลในอุตสาหกรรมต่างๆจำนวนมากทำให้เกิดการขาดแคลนส่งผลให้ต้นทุนของสินค้าและระบบโลจิสติกส์สูงขึ้นไปด้วย ประเทศไทยมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยคาดว่าจะในปี 2573 ความต้องการกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงถึง 58,890 เมกกะ

วัตต์ ทำให้มีการหาพลังงานทางเลือกเข้าทดแทน [1] หากโรงไฟฟ้าเกิดขาดพลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตกำลังไฟฟ้าจะทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบลดลงจนทำให้เกิดแรงดันพังทลายขึ้นในระบบ หากนำกังหันลมไฟฟ้าพลังงานสะอาดเชื่อมกับระบบไฟฟ้าแล้วเสถียรภาพแรงดันเพิ่มขึ้นไม่เกิดแรงดันพังทลาย บทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ากับระบบมาตรฐาน IEEE 6 BUS และกังหันลมไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator DFIG) โดยใช้โปรแกรม (Power System Analysis Toolbox, PSAT) พัฒนาโดย Prof. Dr. Federico Milano

กังหันลมไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางสามารถผลิตและดูดกลืนพลังงานรีแอกแตนซ์ [2] ทำงานในย่านของความถี่ที่มากกว่าความถี่เชิงซ้อนประมาณ 30% [3] เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าข้างจึงมีการศึกษาจุดแรงดันพังทลายในโครงข่ายระบบส่งใช้โปรแกรม PowerworldSimulato [4] ทำให้เกิดงานวิจัยนี้

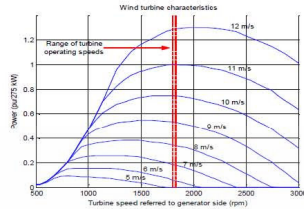
องค์ประกอบของการนำเสนอบทความนี้ประกอบด้วยลำดับแรกจะกล่าวถึงถึงจำกัดความของกังหันลมไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (CPF) หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง เพื่อหาองค์ประกอบสูงสุด โปรแกรม PSAT และการนำโปรแกรม PSAT ไปวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 6 BUS สุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆสำหรับงานวิจัยลำดับต่อไป

2. กังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะแปรผันตามความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถเขียนเป็นสมการ

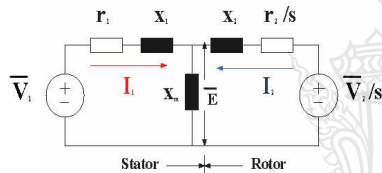
$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (1)$$

เมื่อกระแสลมมีความหนาแน่น (ρ) ความเร็วลม (V) พัดผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) มีสัมประสิทธิ์กำลังงาน C_p (Power Coefficient) จะเห็นได้ว่าความเร็วลมจะมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลมไฟฟ้า ดังรูปที่ 1 [5]



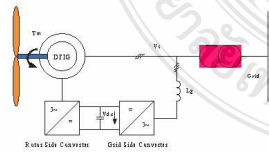
รูปที่ 1 คุณสมบัติความเร็วของจุดกึ่งตันเทียบกับกำลังงานไฟฟ้า

กังหันลมไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator DFIG) มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด (Wound Rotor Induction Generator WRIGs) ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ประกอบด้วยขดลวดตัวนำสามเฟส วงจรสมมูลของ DFIG ที่ปรับปรุงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ ได้ดังรูปที่ 2 [6]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของ DFIG

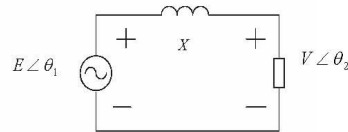
ขณะที่ทำงานในสภาวะคงตัวในเงื่อนไขของ Synchronous operation โดยโรเตอร์ต่อกับ machine side converter และ line side converter ซึ่ง machine side converter สามารถปรับได้ทั้งขนาดแรงดันและความถี่อย่างอิสระ โดยความถี่ที่ป้อนให้โรเตอร์เมื่อรวมกับความเร็วของโรเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ Synchronize กับสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำให้สามารถรักษาความถี่ที่สเตเตอร์ได้คงที่โดยความเร็วของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง การควบคุมเพาเวอร์แฟกเตอร์จะควบคุมที่การปรับขนาดของแรงดันทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ดังรูปที่ 3 [6]



รูปที่ 3 การขับเคลื่อนกังหันลม DFIG

3. เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจาก เกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ ความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการสูญเสียที่โหลดหรือการสูญเสียในสายส่งทำให้เกิดสภาวะแรงดันทั้งหลาย [7]



รูปที่ 4 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส

จากรูปที่ 4 $E\angle\theta_1$ คือแรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sending End Bus), $V\angle\theta_2$ คือแรงดันที่จุดต่อของโหลด (Receiving End Bus), X คือค่ารีแอกแตนซ์ของสาย สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยที่ δ มีค่าเท่ากับ $\theta_1 - \theta_2$ เมื่อ $\theta_1 = 0$ จะได้สมการที่ (2) และ (3)

$$P = \frac{EV}{X} \sin\delta \tag{2}$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos\delta \tag{3}$$

ถ้ากำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดคงที่ และ ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเปลี่ยนแปลงไป (P) เราจะได้กราฟที่แสดงในรูปที่ 5 [8]

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยวิธี CPF

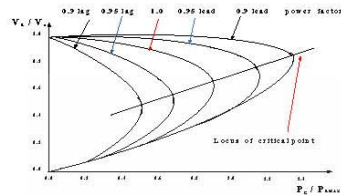
การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า เพื่อหาขีดจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการหาค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสภาวะแรงดันที่ตกลง แรงดันที่บัสแต่ละจุดลดลงเมื่อความต้องการโหลดเพิ่มมากขึ้น การใส่กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าไปแต่ละบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_j - \delta_i + \delta_j) \tag{6}$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_j - \delta_i + \delta_j) \tag{7}$$

เมื่อ P_i และ Q_i เป็นกำลังไฟฟ้าที่ออกไปที่บัส i , $|Y_{ij}|$ และ θ_j คือค่ายอดและมุมเฟสระหว่างบัส i และ j ที่เป็นองค์ประกอบเมตริกซ์ $|V_i|$ และ δ_i คือค่ายอดและมุมเฟสของแรงดันที่บัส i เพื่อแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า เมื่อมีการคำนวณสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้วิธี Continuation Power Flow (CPF) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธี CPF

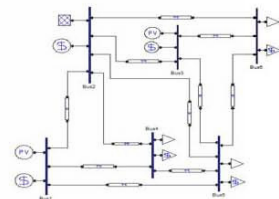
วิธี Continuation Power Flow (CPF) คือ วิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง ทั้งบนและล่าง เพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุด วิธีการของ CPF จะทำงานเข้าไปเป็นขั้นๆ คือการทำนายค่า (Predictor) และการหาค่าแก้ไข (Corrector) โดยสมการจะคล้ายสมการ โหลดโพลีวัตต์มีการเพิ่ม โหลดคือการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ (λ) ต่อท้ายสมการ โหลดโพลีวัตต์ สำหรับการเริ่มต้นของการเพิ่มโหลด สามารถเขียนสมการได้ [7]

5. ผลการจำลองการทำงาน

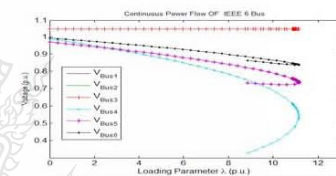
โปรแกรม Power System Analysis Toolbox (PSAT) เป็นกล่องเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB สามารถส่งข้อมูลและติดต่อสื่อสารระหว่าง โปรแกรมทั้งสอง ใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและจำลองการทำงานของระบบวิเคราะห์แบบสถิต (Statistic Model) และการวิเคราะห์แบบพลวัต (Dynamic Model) สามารถวิเคราะห์การไหลของกำลัง (Power Flow, PF) ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (Continuous Power Flow, CPF) ความเหมาะสมการไหลของกำลัง (Optimal Power Flow, OPF) เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Stability Analysis, SSSA) การจำลองในเชิงเวลา (Time Domain Simulation, TDS) และการหาตำแหน่งขององศาการติดตั้งหน่วยเครื่องวัดเฟสเซอร์ที่เหมาะสม (Phase Measurement Unit, PMU) องค์ประกอบ การจำลองทั้งแบบสถิต (Statistic Model) และการวิเคราะห์แบบพลวัต (Dynamic Model) จะอยู่ใน PSAT Simulink Library ไม่ว่าจะเป็นอย่างกรณีที่ใช้กับผลของกำลัง ความต่อเนื่องและความเหมาะสมการไหลของกำลังจุดเด่นของ โปรแกรมเทียบกับ โปรแกรมต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระบบกำลังคือวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (Continuous Power Flow, CPF) ความเหมาะสมการไหลของกำลัง (Optimal Power Flow, OPF) และสามารถทำ (GUI) ได้ บทความนี้ นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF โดยเลือก ระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 6 บัสมาจำลอง [9]

6. ผลและการอภิปรายผล

บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม PSAT ของระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 6 BUS ด้วยวิธี CPF ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 11.1607 บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดคือบัสที่ 6 ดังรูปที่ 7 จะเห็นว่าบัสที่ 6 เป็นบัสอ่อนแอที่สุดเนื่องจากบัสนี้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันใกล้สถานะแรงดันพังทลายมากที่สุด

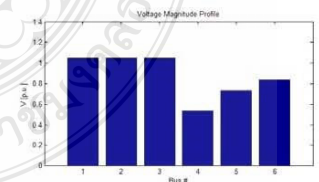


รูปที่ 6 ระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 6 BUS



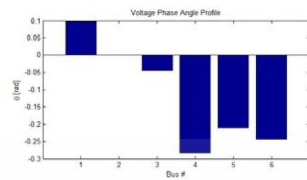
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกำลังไฟฟ้าจริงกับ องค์ประกอบโหลดมาตรฐาน IEEE 6 BUS

ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1, 2, 3 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.05 p.u. ดังรูปที่ 8 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. คือบัสที่ 2 ดังรูปที่ 9 ได้ผลรวมของระบบกำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 11.4153 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่ากับ 11.6658 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของ โหลดเท่ากับ 8.9384 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ โหลดเท่ากับ 5.2854 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 2.4769 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 6.3804 p.u.



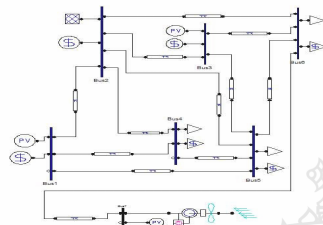
รูปที่ 8 ขนาดแรงดันที่บัส

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555



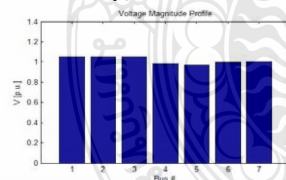
รูปที่ 9 ขนาดเฟสที่บัส

ทำการเชื่อมโยงกังหันลม DFIG ขนาด 10MVA 400V 50Hz ที่บัสที่ 7 เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 6 BUS ดังรูปที่ 10

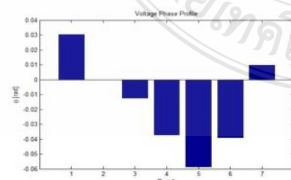


รูปที่ 10 ระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE 6 BUS เชื่อมโยงกับกังหันลม

ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1, 2, 3 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.05 p.u. ดังรูปที่ 10 ซึ่งค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. มากที่สุดและเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. คือบัสที่ 2 ดังรูปที่ 11 ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 2.8887 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 1.5738 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 2.8 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 1.9 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 0.08868 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ -0.32617 p.u.



รูปที่ 11 ขนาดแรงดันที่บัส



รูปที่ 12 ขนาดเฟสที่บัส

6. สรุป

บทความนี้เมื่อระบบ IEEE 6 BUS มีสภาพแรงดันทั้งหลายเชื่อมกับกังหันลม DFIG แล้วทำให้ไม่มีสภาพแรงดันทั้งหลายโดยแรงดันไฟฟ้าในแต่ละ BUS มีค่าใกล้เคียงกับ 1 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ ของ โหลดและการสูญเสียลดลงทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดัน โดยใช้วิธีวิเคราะห์ความถี่เนื่องการไหลของกำลัง(CPF) ด้วยโปรแกรม PSAT กับระบบช่วงไม่มีและมีกังหันลม DFIG เชื่อมต่อเพื่อหาค่าองค์ประกอบสูงสุดทำให้ทราบถึงจุดที่จะเกิดการพังทลายของแรงดันและจุดที่จะติดตั้งกังหันไฟฟ้าในระบบ โดยที่ DFIG จ่ายโหลดได้ตามขนาดกำลังไฟฟ้า ความเร็วของลมคงที่

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฝ่ายประชาสัมพันธ์, “คณะรัฐมนตรีอนุมัติ กฟผ.ลงทุนกังหันลมผลิตไฟฟ้าโครงการที่ 2” ข่าวสัปดาห์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 15 มกราคม 2554
- [2] Y. Chi, Y. Liu, W. Wang and H. Dai, Voltage Stability Analysis of Wind Farm Integration into Transmission Network, International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006, pp. 1-7, 22-26 October 2006.
- [3] S. Muller, M. Deicke and Rik W. De Doncker: Doubly Fed Induction Generator systems for Wind Turbines, IEEE Industry and Applications Magazine, May/June 2002 pp26-33.
- [4] I.S.Naser, Olimpo Anaya-Lara, K.L.Lo, Study of the Impact of Wind Generation on Voltage Stability in Transmission, Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technology(DRPT), 2011 4th International Conference On 6-9 July 2011, pp. 39 - 44
- [5] ก่อเกียรติ อ็อคน้อย, ไพศาล บุญเจียม, บุญปลั่งกลาง และ อาทิตย์ ไสตรโยม, “การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าที่มีเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า” การประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1
- [6] วัฒนา สืบกินร, บัณฑิตก์ เนียมมณี, “กังหันลม Wind Turbine” วิศวกรรมเอเชียอาคเนย์ ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มิถุนายน – พฤศจิกายน 2550
- [7] จักรินทร์ วิเศษยา, ถุณณ์ชนม์ ภูมิภคดิพิชญ์, “การศึกษากาการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSAT” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (RMUTCON-3)
- [8] ก่อเกียรติ อ็อคทรัพย์, บุญยัง ปลั่งกลาง, อาทิตย์ ไสตรโยม, “การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552.
- [9] F.Milano, M. 2007, Power Analysis Toolbox. Documentation for PSAT version 2.0.0 7.

๓.2 Study to the Voltage Stability of 22KV PEA BUS connected by Lamtakong Wind Turbine

10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

Energy Technology, Environmental
and Social Impact, Nanotechnology
and Material Technology, Energy
Economic and Management, Nuclear
Technology, New Technology and
Other topics related to energy field.

On December 5-8, 2012
Sunee grand hotel,
Ubon-ratchathani

Organized by



Co-organized by



10th EMSES 2012

International Scientific Advisory Committee:

General Chair:

Assoc.Prof.Dr. Namyoot SONGTHANAPITAK RMUTT, Thailand

General Co-Chair:

Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Asst.Prof.Dr. Panpetch CHININTORN RMUTT, Thailand

Organizing Chair:

Asst. Prof. Dr.Sommai PIVSA-ART RMUTT, Thailand

Prof. Dr. Takeshi YAO Kyoto Uni., Japan

Organizing Co-Chair:

Prof. Dr. Hideaki OHGAKI Kyoto Uni., Japan

International Scientific Committees:

Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO TU, Thailand

Prof. Dr. Shiro SAKA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Hitomi OHARA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo STADLER FH Koeln, Germany

Prof. Dr. Young S. CHAI Korea

Prof. Dr. Nipon TANGTHAM KU, Thailand

Prof. Dr. Masayoshi OKUBO Osaka Uni, Japan

Prof. Dr. Somchai WONGWISES KMUTT, Thailand

Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN UQ, Australia

Prof. Dr. Yukio OGATA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Yuichi ANADA Hokkaido Info. Uni., Japan

Prof.Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Bandit FUNGTAMMASAN KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY IIT-Madras, India

Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN IUPUI, USA

Assoc. Prof. Dr. Per B ZETTERLUND Australia

Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI Japan

Assoc. Prof. Dr. Thawatch KERDCHEUN RMUTI, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT SWU, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA Nakaoga Uni., Japan

Assoc.Prof.Dr. Kawee SRIKULKIT CU, Thailand

Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI KMUTNB, Thailand

Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPIITAK KU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW RMUTT, Thailand

Asst.Prof.Dr.Supakit SUTTIRUENGWONGSU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Vallop PHUPA RMUTP, Thailand

Asst.Prof.Dr.Pramook UNAHALEKHAKA RMUTSB, Thailand

10th EMSES 2012

Dr.Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
ASEAN Committee:	
Prof. Dr. Yoyok Wahyu Subroto	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Wega TRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
General Secretary:	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
Technical Program Chair:	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Area: Energy Technology(ET)	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
Area: Environmental and Social Impact(ES)	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
Area: Nanotechnology and Materials Science(NM)	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
Area: Energy Economic and Management(EM)	
Assoc.Prof.Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
Area: New Energy Technology(NT)	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
Area: Nuclear Technology(NU)	
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

10th EMSES 2012

Exhibition Chair:

Dr. Amnoiy REUNGWAREE RMUTT, Thailand
 Dr. Winai CHANPENG RMUTT, Thailand

Local Arrangement Chair

Dr. Sorapong PAVASUPREE RMUTT, Thailand
 Dr. Natee SRISAWAT RMUTT, Thailand

Registration and Finance Chair

Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand
 Dr. Supaporn THOMSORN RMUTT, Thailand
 Weeraporn PIVSA-ART RMUTT, Thailand

Publicity Chair

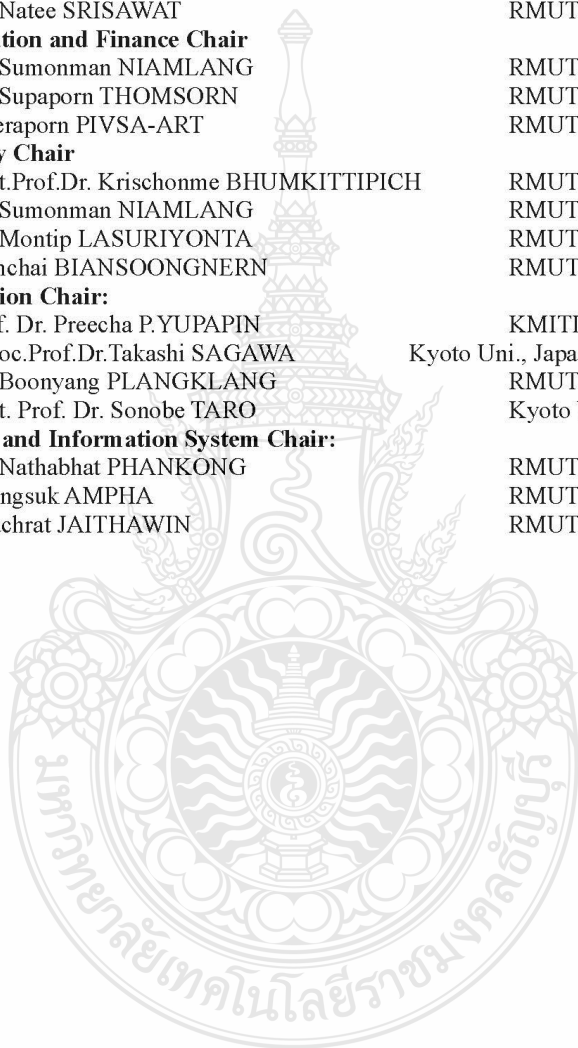
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH RMUTT, Thailand
 Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand
 Dr. Montip LASURIYONTA RMUTT, Thailand
 Somchai BIANSONGNERN RMUTT, Thailand

Publication Chair:

Prof. Dr. Preecha P.YUPAPIN KMUTL, Thailand
 Assoc.Prof.Dr.Takashi SAGAWA Kyoto Uni., Japan
 Dr. Boonyang PLANGKLANG RMUTT, Thailand
 Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO Kyoto Uni., Japan

Website and Information System Chair:

Dr. Nathabhat PHANKONG RMUTT, Thailand
 Phongsuk AMPHA RMUTT, Thailand
 Deachrat JAITHAWIN RMUTT, Thailand



CONTENT

ET13	Numerical Simulation of a Solar-biomass Hybrid Cooling System: Model Validation <i>Boonrit Prasartkaew</i>	32
ET14	Mathematic Model and Experiment of Temperature Effect on Discharge of Lead-Acid Battery for PV Systems <i>Pornchai Pornharuthai Boonyang Plangklang and Sompol kohsri</i>	33
ET15	Recycling CO ₂ in Bio-gas by Green Microalgae for Lipid Production <i>Wassa Tongprawhan and Benjamas Cheirsilp</i>	34
ET16	Double-Sided Linear Induction Motor Control Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique <i>Aunnon Bua-sre and Wanchai Subsingha</i>	35
ET17	Performance Evaluation of the Desiccant Bed Solar Dryer <i>Wisut Chramsard, Sirinuch Jindaruksa, Chatchai Sirisumpunwong, Sorawit Sonsaree</i>	36
ET18	Performance Evaluation of 35 kW LiBr – H ₂ O Solar Absorption Cooling System in Thailand <i>Nipon Ketjoy Rawipa yongphayoon and Kongrit Mansiri</i>	37
ET19	Study to the Voltage Stability of 22kv Pea Bus Connected by Lamtakong Wind Turbine <i>J.Chanasith and K. Bhumkittipich</i>	38
ET20	Modeling of PEM Fuel Cell with DC/DC Buck Converter by MATLAB/Simulink <i>P. Prommin and W. Subsingha</i>	39
ET21	Applicability of Pressure Retarded Osmosis Power Generation Technology in Sri Lanka <i>H.D.S.S.Karunaratne and S.Walpolage</i>	40
ET22	Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance and Emission of a Dual Producer Gas – Diesel Engine <i>Pisarn Sombatwong, Prachasanti Thaiyasuit and Kulachate Pianthong</i>	41

Study to the Voltage Stability of 22KV PEA BUS connected by Lamtakong Wind Turbine

J.Chanasith and K. Bhunkittipich

Power and Energy System Research Centre, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110
E-mail: chanasith@hotmail.com

Abstract—This paper presents the Study to the Voltage Stability of 22KV PEA BUS connected by Lamtakong Wind Turbine. DFIG Lumtakong wind turbine have the total 2.5MW which connected to the 22KV. radial distribution system of the Sikhio 's power stations at the maximun load. This paper is to study the voltage stability which use the continuation power flow analysis (CPF) with PSAT Software in the before and after condition of the Lumtakong windturbine connection. Under maximum load without Lumtakong wind turbine condition. The system voltage result is the voltage collapse .When the Lumtakong wind connected to the 22KV. radial distribution system. The voltage stability will stabilize the system.

Keywords—wind turbine, voltage stability analysis, Continuation Power Flow (CPF), power system analysis toolbox.

1. INTRODUCTION

Genera of fossil fuel shortages, the cost of production is consumption of electrical power have increased steadily. Electricity Generating Authority of Thailand has installed two wind turbine generators at Kao Yai Tiang Klong Sikhio Nakornratchasima province which connected with the voltage of 22KV. PEA's Sikhio power station at FEEDER NO.6 to a pilot study for the use of renewable energy. [1] This paper presents to study to the voltage stability of 22KV. PEA Bus Connected Lumtakong wind turbines which was the two Doubly Fed Induction Generator (DFIG) and solve the non-linear power load flow equations with Newton Raphson method with program (Power System Analysis Toolbox, PSAT) developed by Prof. Dr. Federico Milano [2].

This article contains the first presentation will discuss the definition of the two wind power generators type. The radial transmission line. Voltage stability analysis. Solving the power load flow equations. and used PSAT to analyze the voltage stability of PEA 22KV final conclusions are discussed and suggestions. For the

next researcher.

2.POWER WIND TURBINE

Wind turbines are devices that convert the kinetic energy of the wind into mechanical energy. The power output of wind turbines varies according to the wind speed changes. Can be written as an equation.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \tag{1}$$

When the current density (ρ) ve (V) swept through the cross-sectional area (A) is the coefficient of power C_p shows that the wind velocity will affect the

power of the wind turbine generator is shown in Figure 1 [3].

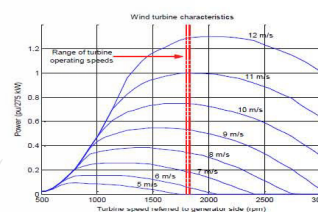


Figure 1 Characteristic Curve of the turbines speed reference to generator

Doubly Fed Induction Generator(DFIG) is structured based on the Wound Rotor Induction Generator (WRIGs). Both stator and rotor winding consisted the three-phase inductor coils and the equivalent circuit of DFIG updated from the induction generator is shown in Figure 2 [4].

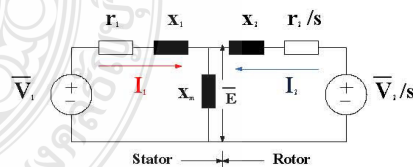


Figure 2 The equivalent circuit of DFIG

While working in a steady state terms of Synchronous operation, the rotor connect to the machine side converter and the line side converter which machine side converter can adjust the voltage and frequency by the frequency feeding to the rotor and combined with the rotor speed to built the magnetic field when synchronize the stator magetic field to maintain the stable stator frequency can change the rotor speed in a wide range. Power factor

controller will control to adjust the voltage magnitude to the optimize efficiency performance are shown in Figure 3 [4].

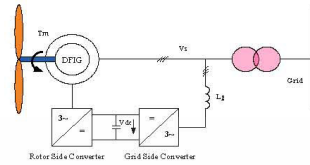


Figure 3 The Schematic Diagram of DFIG

3. RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM.

The radial distribution system is the easiest power distribution network. The power distribution supplied the electrical power to the one direction and the power load flow be same. This system can be adapted to the loops distributed system. The 22KV.voltage 's Sikhio Power station at the FEEDER NO.6 connected Lumtakong windturbine which was the 8-bus radial distribution system is shown in Figure 4 [5].

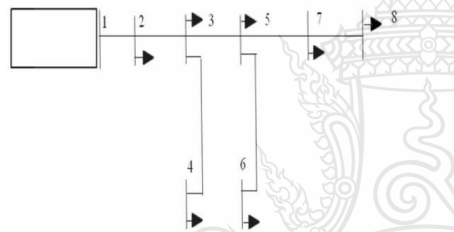


Figure 4 The Single Diagram of the 8-bus radial distribution system

Considering the flowed currents i bus was the admittance matrix terms of the buses is shown in Figure 5 [6].

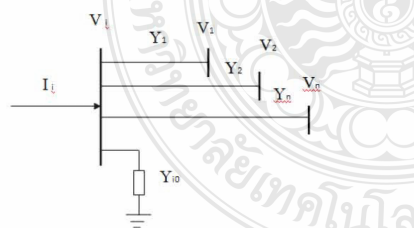


Figure 5 The example admittance bus for find the power load flow

The equation of the flowed currents i bus arranged in polar form, as demolishing (2)

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \tag{2}$$

4. VOLTAGE STABILITY ANALYSIS

Voltage stability is the ability of the system to maintain a constant voltage at all buses in the system after the problems happened within the system. This will depend on the ability to maintain a balance between the load and the power supply system. The voltage stability of the power system found the limits of the power system with the maximum load finding that the system can be paid prior to voltage collapse. The bus voltage will gradually decrease as the load increases. Real power and reactive power loads was enter to the each bus of the power system. Can be expressed as equation (3), (4) and (5).

$$P_i - jQ_i = V_i \angle(-\delta) \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \tag{3}$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{4}$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{5}$$

P_i and Q_i were the real and reactive power at bus i , $|Y_{ij}|$ and $|\theta_{ij}|$ were the bus admittance matrix for the network and phase angle between bus i and j , $|V_i|$ and $|\theta_i|$ were the voltage peak magnitude and phase angle of the bus voltage. To show the relationship between voltage and power. When calculating the non-linear equations in the terms of variables unrelated which consist the voltage magnitude per unit and phase angle of the voltage was radial.[6]

5. SOLVING THE POWER FLOW EQUATIONS

The power flow analysis is the important part of planning and design for power system expansion in the future. The calculated Data were the magnitude and phase angle of the each bus voltage and the real power and reactive power flow in the each transmission line. To seperated the type of bus, Constraint and solving the power flow equations was non-linear with Newton Raphson Method which used the value of the error function $f(x)$ to zero by adjusting the Δx parameters. Taylor's Series used to calculate and adjust the answers to each bus simultaneously made the number of the calculated cycles depended on the number of bus systems.[6]

The variable power factor of voltage and real power plotted the relative graph to determine the ability of the system which distributed the load. System was the stability voltage to determine the maximum parameter at the power system can distributed before the voltage collapse state.

The Continuation Power Flow (CPF) method is a graph showing the relationship between voltage and real power of both the upper and lower values for the maximum load. CPF operation worked to the repeat step function was the predictor and the corrector operation as shown in Figure 6 [7]

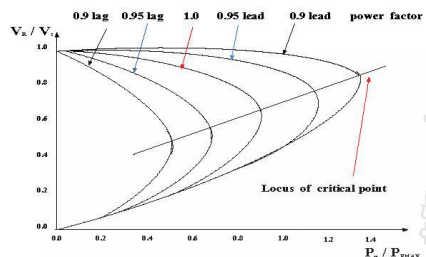


Figure 6 The relation curve between voltage and real power of the CPF

This paper presents the Continuation Power Flow (CPF) method used the distribute power data from the PEA's Sikhio power station at FEEDER NO.6 Nakornratchasima to Lumtakong wind turbine of the Planning and operating system division northeast region PEA is replicated in Table 1 [5]

Start and Final Bus	Distance (KML)	Active (MW)	Reactive (MVAR)	Power Factor
Sikhio power station - Mobil Gas station	3.8	2.86	0.83	0.986
Mobil Gas station - Weight check station	5.6	6.47	2.61	0.9725
Weight check station - Nongbua Village	3.6	2.07	0.89	0.968
Weight check station - Kao Yai Thing entrance	8.8	3.72	2.09	0.9455
Kao Yai Thing entrance - Train Station	3.4	7.3	4.64	0.981
Kao Yai Thing entrance - Lumtakong Windturbine	5.5	1.2	0.69	0.943

Table 1 The maximum load at the 22KV. radial distribution system of the Sikhio 's power stations connected the Lumtakong windturbine

Load data in Table 1, it is a state with the 2.5 MW Lumtakong wind turbine connected to PEA's Sikhio power station at the Feeder NO.6 The simulation procedure is as follows:

1. Find the power load flow with the Continuation Power Flow (CPF) of the data in Table 1, unconnected Lumtakong wind turbine with the PSAT.
2. Find the power load flow with the Continuation Power Flow (CPF) of the data in Table 1, connected Lumtakong wind turbine with the PSAT.
3. The result of NO. 1 and 2 summarize the results of the simulations.

6. SIMULATION RESULT

The Power System Analysis Toolbox (PSAT) is a MATLAB tool for electric power system analysis and control. The applications can send data and communication between the two programs. The power systems analysis and simulation of statistic type analyzed

system and the dynamic type analyzed system can analyze the power flow (PF) Continuation Power Flow (CPF) Optimal Power Flow (OPF) Small Signal Stability Analysis(SSSA) Time Domain Simulation (TDS) and find the installed position location of Phase Measurement Unit(PMU), simulate elements both statistic and the dynamic model. All operations can be assessed by means of Graphical User Interfaces (GUIs) and a Simulink-based library provided an user friendly tool for network design.

7. RESULT AND DISCUSSION

This article presents the voltage stability analysis of system to use PSAT for 22KV. radial distribution system of the Sikhio 's power stations as shown in Figure 7.

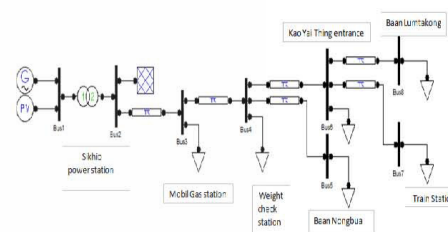


Figure 7 22KV. radial distribution system before install the Lumtakong wind turbines

Before install the Lumtakong wind turbine simulate with CPF find the load parameters changes to the Maximum Loading Parameter(Max.LP) is equal to 4.0354 . The relationship between the real power voltage with load elements of 22KV radial distribution system as shown in Figure 8.

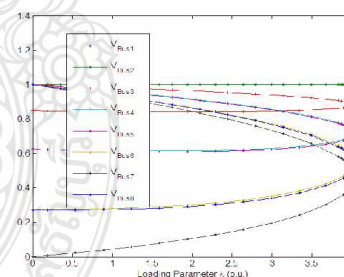


Figure 8 The relationship between the real power voltage with load elements of 22KV radial distribution system

Simulation results by CPF find the proper voltage was have the 1.00 pu. voltage magnitude at Bus NO.1,2 as shown in Figure 9 and the 0 rad voltage phase at Bus NO.2 as shown in Figure10

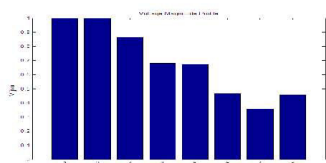


Figure 9 The buses voltage magnitude before install the Lumtakong wind turbines

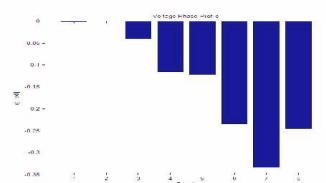


Figure 10 The phase of bus before install the Lumtakong wind turbines

The total of the real power is equal to 1.5217 pu. The reactive power is equal to 1.3587 pu. the total real power of the load is equal to 0.92156 pu, and the reactive power of the load is equal to 0.45844 pu. The total of the real power loss is equal to 0.60019 pu, and the reactive power loss is equal to 0.90029 pu. The most voltage bus has changed at the bus NO. 7.

Connecting the DFIG Lumtakong wind turbine (2.5MVA 690V 50Hz) to bus No.8. As shown in Figure 11

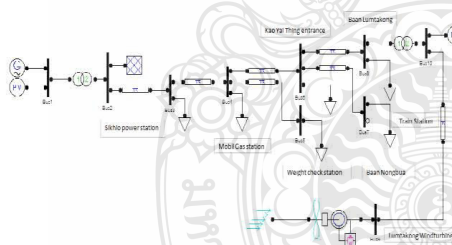


Figure 11 The phase of bus after install the Lumtakong wind turbines

After the install the Lumtakong wind turbines simulate with CPF find the load parameters changes to the Maximum Loading Parameter(Max.LP) is equal to 0.88369. Simulation results by CPF find the proper voltage was have the 1.00 pu. voltage magnitude at Bus NO.1to 10 as shown in Figure 12 and the 0 rad voltage phase at Bus NO.3 as shown in Figure 13

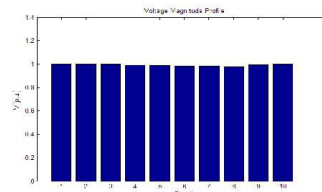


Figure 12 The buses voltage magnitude before install the Lumtakong wind turbines

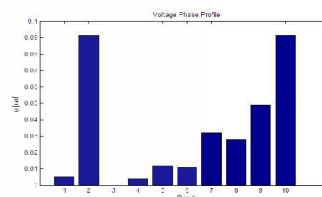


Figure 13 The phase of bus before install the Lumtakong wind turbines

The total of the real power is equal to 0.21428 pu. The reactive power is equal to 0.12058 pu. the total real power of the load is equal to 0.20873 pu, and the reactive power of the load is equal to 0.10383 pu. The total value of the real power loss is equal to 0.00555 pu, and the reactive power loss is equal to 0.01674 pu.

7. CONCLUSION

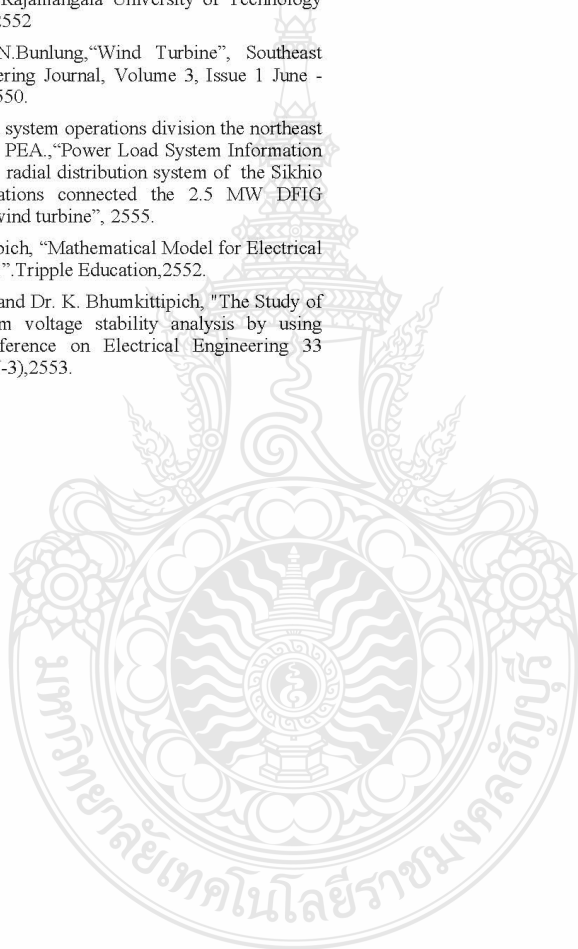
This paper studies the voltage stability of the 2.5 MW Lumtakong DFIG wind turbines is connected to the 22KV. radial distribution system of the Sikhio's power stations at Feeder NO.6 Under maximum load conditions for the power load flow analysis using Continuation Power Flow (CPF) PSAT in the disconnected wind turbine Lumtakong condition . The system voltage result is the voltage collapse .PSAT can know the Maximum Loading Parameter Max.LP) and power consumption of the load and generator. When the Lumtakong DFIG wind turbines connect to the 22KV. radial distribution system to load the system. PSAT simulate the power load flow analysis using Continuation Power Flow (CPF).The system voltage result of all buses find the proper voltage was have the 1.00 pu. voltage magnitude at Bus NO.1to 10. The Lumtakong DFIG wind turbines can supply the power load to stabilize the 22KV. Voltage. The system voltage will be stability.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology, and the Planning and system operations division the northeast region of the PEA.

REFERENCES

- [1] PR. Electricity Generating Authority, "Cabinet approval the wind turbines Energy investment projectsNO.2", EGAT 's News Week,15 January 2554.
- [2] F.Milano,"Power Analysis Toolbox". Documentation for PSAT version 2.0.0 7,2007.
- [3] A.Kokiati, P.Boonyoung,and S.Arthid, "Study of the voltage stability in power system when connected wind turbine generator",the degree of master of engineer's thesis. Electrical Engineering Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi,2552
- [4] S.Wattana, N.Bunlung,"Wind Turbine", Southeast Asia Engineering Journal, Volume 3, Issue 1 June - November 2550.
- [5] Planning and system operations division the northeast region of the PEA.,"Power Load System Information of the 22KV. radial distribution system of the Sikhio 's power stations connected the 2.5 MW DFIG Lumtakong wind turbine", 2555.
- [6] K.Bhumkittipich, "Mathematical Model for Electrical Power Sytem".Tripple Education,2552.
- [7] W.Jakkarin ,and Dr. K. Bhumkittipich, "The Study of power system voltage stability analysis by using PSAT" Conference on Electrical Engineering 33 (RMUTCON-3),2553.



ข.3 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ PEA 22KV เชื่อมกับกั้นหม้อลมน้ำตะกอน



Department of Alternative Energy Development and Efficiency
MINISTRY OF ENERGY

กำหนดการและบทความ

สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

การประชุมสัมมนาวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
The 5th Thailand Renewable Energy For Community Conference
TREC-5
18 - 20 ธันวาคม 2555

จัดโดย สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน(แห่งประเทศไทย)
ณ สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

adiCET

WELCOME TO TREC-5 adiCET | CMRU




การประชุมสัมมนาวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
 The 5th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)
 18-20 December 2555

ครั้งที่ 5



หน้าแรก	การส่งบทความ	กำหนดการสำคัญ	สถานที่จัดงาน	ติดต่อเรา
---------	--------------	---------------	---------------	-----------

เมนู
Call For Papers
ความเป็นมา
สารจากประธาน
คณะกรรมการ
กำหนดการสำคัญ
โปรแกรมการประชุม
การส่งบทความ
การลงทะเบียน
Social Program
สถานที่จัดงาน
สถานที่พักและการเดินทาง
ผู้สนับสนุน
ติดต่อเรา

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ	
1. รศ.ดร.วิदनพงษ์ รัชชวีเชียร	
2. ศ.ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	
3. ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	
4. ศ.ดร.จงจิตร หิรัญลาภ	
5. Prof. Dr. Joseph KHEDARI	
6. รศ.ดร.นายทศ สงค์ธนาพิทักษ์	
7. ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	
8. ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด	
9. คุณอำนาจ ทอสลิต	
10. ผศ.ดร.เรืองเดช วงศ์หล้า	

คณะกรรมการดำเนินงาน	
ดร. วีรชัย ไรยรินทร์	ประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	รองประธาน
ดร. กฤษณวัฒน์ ภูมิศักดิ์พิบูลย์	กรรมการ
ผศ.ดร. ต๋อพงษ์ ศรีธาดา	กรรมการ
ดร. สุมนมาลย์ เนียมกลาง	กรรมการ
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรค์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายบทความ	
ดร. ณัฐยา ตันตรานนท์	ประธาน
ดร. กฤษณวัฒน์ ภูมิศักดิ์พิบูลย์	รองประธาน
ดร. วีระ วงศ์ปิโย	กรรมการ
ดร. อนสรณ์ ชนารักษ์	กรรมการ
ดร. ประพิชารุ ชนารักษ์	กรรมการ
ดร. รวิภา ยงประยูร	กรรมการ
นางสาวสิริสรณ์ สิทธิรินทร์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายจัดหารายได้และการลงทะเบียน	
รศ.ดร. วิदनพงษ์ รัชชวีเชียร	ประธาน
ดร. วีรชัย ไรยรินทร์	รองประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	กรรมการ
ดร. สุมนมาลย์ เนียมกลาง	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ	
ดร. วีชี หาญเมืองใจ	ประธาน
นายสุวัจน์ ศรีแก้ว	รองประธาน
นายภุชภณะ ศิริบุค	กรรมการ
นางปณิตดา สัมสกุล	กรรมการ
นายอานนท์ ผัดแปง	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์	
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรค์	ประธาน
ดร. บุญยง ปลั่งกลาง	รองประธาน
ดร. สุมนมาลย์ เนียมกลาง	กรรมการ
อ. เจนจิรา เปี่ยมดี	กรรมการ
นายภุชภณะ อินดิษฐ์วงศ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายที่ถือการและการต้อนรับ	
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรค์	ประธาน
อ. เจนจิรา เปี่ยมดี	รองประธาน
ดร. บุญยง ปลั่งกลาง	กรรมการ
ดร. ณัฐยา ตันตรานนท์	กรรมการ
ดร. วีชี หาญเมืองใจ	กรรมการ
นางปณิตดา สัมสกุล	กรรมการและเลขานุการ

สารบัญ

บทความ	หน้า
Oral Presentation Session	
กลุ่มที่ 1 ไฟฟ้าชุมชน (CP)	
CP001 การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์และรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นสำหรับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวล กรณีศึกษาจังหวัดสุพรรณบุรี <i>กฤษณนธ์ สนธิ สุรินทร์ แหวมงาม</i>	1
CP002 กังหันน้ำเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ <i>วรรณกร พรหมอารีย์</i>	9
CP003 การศึกษาการกลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อการประยุกต์ใช้ผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟ <i>สิทธิชัย กันทะวงศ์ เอกรัตน์ นภกานต์ และบุญยั้ง ปลั่งกลาง</i>	16
CP004 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นชนิดสเตเตอร์คู่ โดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิธมอดูเลชั่น <i>อรรรนท บัวศรี วันชัย ทรัพย์สิงห์</i>	22
CP005 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อช่วยคำนวณรายการอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายสายส่งชิงอากาศ 22 kV <i>กุลเดชา อนุกุลภิรมย์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	28
CP006 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ PEA 22KV เชื่อมกับกังหันลมลำตะคอง <i>ชนสิษฎ์ จันเงิน กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	34
CP007 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 5 kW <i>ชาคริต จินลอย วิรัชย์ โรยณรินทร์ เดชา อินทร์โทโส</i>	42
CP008 การประเมินด้านเทคนิคการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบเตือนภัยน้ำท่วมพื้นที่ต้นน้ำน่าน <i>ไทรรัตน์ ปะที กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	49

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
18 - 20 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ PEA 22KV เชื่อมกับกังหันลมลำตะคอง Study to the Voltage Stability of 22KV PEA BUS connected by Lamtakong Wind Turbine

CP006

ชนสิทธิ์ จันเงิน และ กฤษณวิชญ์ ภูมิภักดีพิชญ์
ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทร 0-2549-3571 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: chanasith@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลเกิดการขาดแคลนส่งผลต่อโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้เกิดความไม่มั่นคงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าอาจลดลงจนเกิดแรงดันฟลลทลายขึ้นได้ บทความนี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของ กังหันลมลำตะคอง ประเภท DFIG มีขนาดรวม 2.5 MW เชื่อมกับระบบจำหน่ายแบบแรงดันขนาด 22KV ของสถานีไฟฟ้าสีคิ้ว นครราชสีมา โดยใช้วิธีวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง (CPF) ด้วยโปรแกรม PSAT ในสภาวะก่อนและหลังของการเชื่อมกังหันลมลำตะคองโดยใช้ค่าโหลดที่จ่ายสูงสุดที่มีกังหันลมลำตะคองเชื่อมอยู่ ผลลัพธ์ที่ได้คือ กังหันลมลำตะคอง สามารถจ่ายโหลดให้ระบบแรงดันไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: กังหันลม, เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า, วิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง, กล้องเครื่องมือวิเคราะห์ระบบกำลังไฟฟ้า

1. บทนำ

เชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลเกิดการขาดแคลนส่งผลให้ต้นทุนของการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้พลังงานประเภทนี้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ติดตั้งกังหันลมไฟฟ้า ที่เขายายเที่ยง ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา เชื่อมกับระบบ แรงดันไฟฟ้า ขนาด 22KV ของสถานีไฟฟ้าสีคิ้ว การไฟฟ้าภูมิภาค ที่ FEEDER NO.6 เพื่อศึกษาวิจัยเป็นโครงการนำร่องของการใช้พลังงานทดแทน [1] บทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบ PEA 22KV. เชื่อมกับกังหันลมลำตะคองเป็นกังหันลมไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator DFIG) และศึกษาการแก้สมการ การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีนิวตันราฟสันโดยใช้โปรแกรม (Power System Analysis Toolbox, PSAT) พัฒนาโดย Prof. Dr. Federico Milano [2]

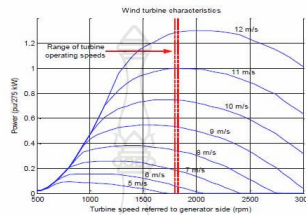
องค์ประกอบของการนำเสนอความนี้ประกอบด้วยลำดับแรกจะกล่าวถึงคำจำกัดความของกังหันลมไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ระบบจำหน่ายแบบแรงดัน การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า การแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า และการนำโปรแกรม PSAT ไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ PEA 22KV สุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยลำดับต่อไป

2. กังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล คำกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะแปรผันตามความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถเขียนเป็นสมการ

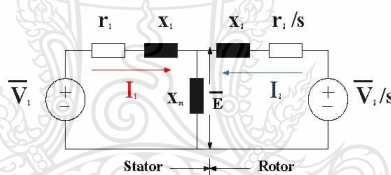
$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \tag{1}$$

เมื่อกระแสลมมีความหนาแน่น (ρ) ความเร็วลม (V) พัดผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) มีสัมประสิทธิ์กำลังงาน C_p (Power Coefficient) จะเห็นได้ว่าความเร็วลมจะมีผลต่อกำลังไฟฟ้าของกังหันลมไฟฟ้าดังรูปที่ 1 [3]



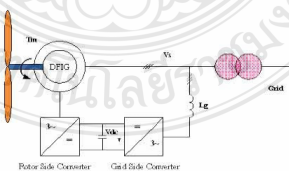
รูปที่ 1 คุณสมบัติความเร็วรอบของชุดกังหันเทียบกับกำลังงานไฟฟ้า

กังหันลมไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator DFIG) มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด (Wound Rotor Induction Generator WRIGs) ที่ใส่สเตเตอร์และโรเตอร์ประกอบด้วยขดลวดตัวนำสามเฟส วงจรสมมูลของ DFIG ที่ปรับปรุงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ ได้ดังรูปที่ 2 [4]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของ DFIG

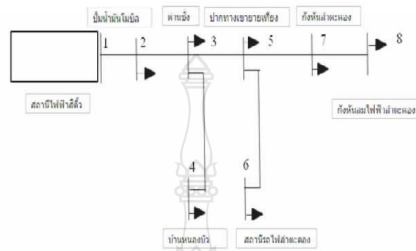
ขณะที่ทำงานในสภาวะคงตัวในเงื่อนไขของ Synchronous operation โดยโรเตอร์ต่อกับ machine side converter และ line side converter ซึ่ง machine side converter สามารถปรับได้ทั้งขนาดแรงดันและ ความถี่ อย่างอิสระโดยความถี่ที่ป้อนให้โรเตอร์เมื่อรวมกับความเร็วของโรเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ Synchronize กับสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำให้สามารถรักษาความถี่ที่สเตเตอร์ได้คงที่โดยความเร็วของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง การควบคุมเพาเวอร์แฟกเตอร์จะควบคุมที่การปรับขนาดของแรงดันทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ดังรูปที่ 3 [4]



รูปที่ 3 การขับเคลื่อนกังหันลม DFIG

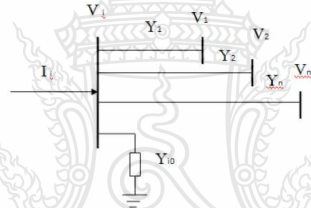
3. ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลเป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด การจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียวพลังงานไฟฟ้าจะไหลไปทางเดียวกัน ระบบนี้สามารถปรับให้เป็นระบบแบบจำหน่ายแบบลูบได้ ระบบแรงดันไฟฟ้าขนาด 22KV ของสถานีไฟฟ้าสีคิ้ว ที่ FEEDER NO.6 เชื่อมกับกึ่งหม้อลมน้ำตะกอนเป็นระบบจำหน่ายแบบเรเดียลแบบ 8 บัส ดังรูปที่ 4 [5]



รูปที่ 4 แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 8 บัส

พิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่เข้าบัส i ให้อยู่ในเทอมของเมทริกซ์ของบัส แอสสมิตแดนซ์ ดังรูปที่ 5 [6]



รูปที่ 5 ตัวอย่างบัสสำหรับหาค่าลึงไฟฟ้าที่บัส

เขียนสมการกระแสไฟฟ้าเข้าบัส i ในรูปเชิงขั้ว ได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \tag{2}$$

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจากเกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า เพื่อหาขีดจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย แรงดันที่บัสจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อความต้องการโหลดเพิ่มมากขึ้น การใส่กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้านอกคิฟเข้าไปแต่ละบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) (4)และ (5)

$$P_i - jQ_i = V_i \angle(-\delta) \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \tag{3}$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i \delta V_j \delta Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{4}$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i \delta V_j \delta Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{5}$$

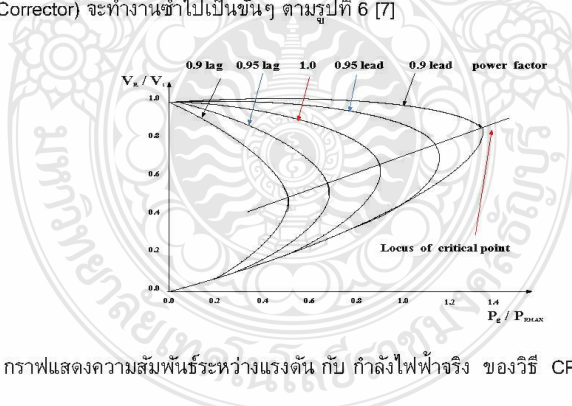
เมื่อ P_i และ Q_i เป็นกำลังไฟฟ้าที่ออกไปที่บัส i , $|Y_{ij}|$ และ θ_{ij} คือค่ายอดและมุมเฟสระหว่างบัส i และ j ที่เป็นองค์ประกอบเมตริกซ์ $|V_i|$ และ δ_i คือค่ายอดและมุมเฟสของแรงดันที่บัส เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า เมื่อมีการคำนวณสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้นในเทอมของตัวแปรไม่เกี่ยวข้องกันประกอบด้วยขนาดของแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าต่อหน่วยและเฟสของแรงดันไฟฟ้าเป็นเรเดียน[6]

5. การแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาวิเคราะห์ การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญของการวางแผนและการออกแบบสำหรับการขยายระบบกำลังไฟฟ้าในอนาคต ข้อมูลหลักที่ใช้ในการคำนวณคือขนาดและมุมเฟสของแรงดันแต่ละบัสและค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟที่ไหลในแต่ละสายส่ง มาแยกชนิดของบัส เรือนไขบึงคืบและการแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Method) ที่อาศัยให้ค่าความผิดพลาดของคั้ง $f(x)$ เข้าสู่ศูนย์โดยใช้การปรับค่าตัวแปร Δx จะใช้อนุกรมของเทเลอร์ (Taylor's Series) ในการคำนวณและปรับค่าคำตอบทุกๆบัสไปพร้อมๆกัน ทำให้จำนวนการวนรอบคำนวณไม่ขึ้นอยู่กัจำนวนบัสของระบบ [6]

นำแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงที่ค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนแปลงมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กันจะเป็นวิธีใช้ในการกำหนดความสามารถของระบบในการจ่ายโหลดที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นการหาค่าองค์ประกอบสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage Collapse)

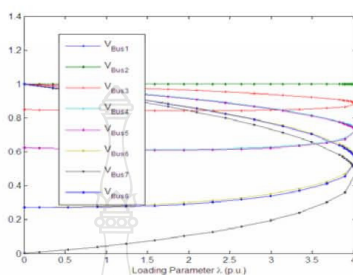
วิธี Continuation Power Flow (CPF) คือ วิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ทั้งบนและล่างเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุด วิธีการของ CPF จะทำงานเข้าไปเป็นขั้นๆ คือการทำนายค่า (Predictor) และการหาค่าแก้ไข (Corrector) จะทำงานเข้าไปเป็นขั้นๆ ตามรูปที่ 6 [7]



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของวิธี CPF

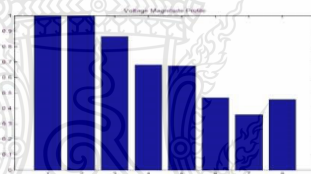
บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลัง CPF โดยใช้ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้า จากสถานีไฟฟ้าสี่คิ้ว นครราชสีมา ถึงกังหันลมไฟฟ้าลำตะคอง Feeder NO.6 ของกองแผนงานและระบบปฏิบัติการ การไฟฟ้าภูมิภาค เขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มาจำลอง ตามตารางที่ 1 [5]

ก่อนติดตั้งกังหันลมล่าตะคองด้วยวิธี CPF ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 4.0354 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันกำลังไฟฟ้าจริงกับองค์ประกอบโหลดของระบบไฟฟ้า PEA 22KV ดังรูปที่ 8

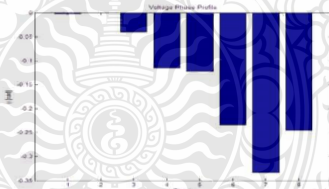


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันกำลังไฟฟ้าจริงกับองค์ประกอบโหลดของระบบไฟฟ้า PEA 22KV.

ผลการจำลองด้วยวิธี CPFพบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1,2 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.00 p.u. ดังรูปที่ 9 และเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. คือบัสที่ 2 ดังรูปที่ 10

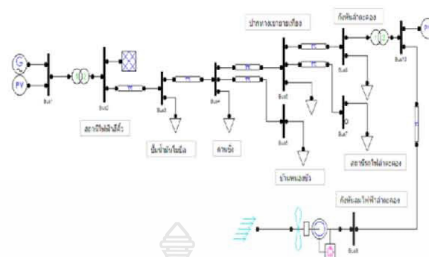


รูปที่ 9 ขนาดแรงดันที่บัส



รูปที่ 10 ขนาดเฟสที่บัส

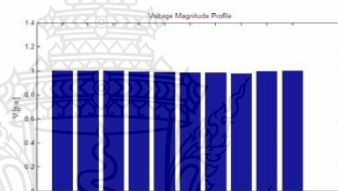
ได้ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 1.5217 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 1.3587 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 0.92156 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 0.45844 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 0.60019 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 0.90029 p.u. บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากที่สุดคือบัสที่ 7 ทำการเชื่อมโยงกังหันลมล่าตะคองชนิด DFIG ขนาด 2.5MVA 690V 50Hz เข้าบัสที่ 8 .ดังรูปที่ 11



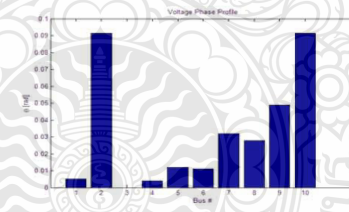
รูปที่ 11 ระบบไฟฟ้า PEA 22KV. หลังติดตั้งกั้นลล้าตะคอง

หลังจากการติดตั้งกั้นลล้าตะคอง ใช้วิธี CPF หา ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าสูงสุดของระบบ (Maximum Loading Parameter, Max.LP) มีค่าเท่ากับ 0.88369

ผลการจำลองด้วยวิธี CPF พบว่าแรงดันที่เหมาะสมอยู่ที่บัสที่ 1 ถึง 10 ได้ค่าแรงดันขนาด 1.00 p.u. ดังรูปที่ 12 และเฟสแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 rad. คือบัสที่ 3 ดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 ขนาดแรงดันที่บัส



รูปที่ 13 ขนาดเฟสที่บัส

ผลรวมของระบบค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.21428 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 0.12058 p.u. โดยแยกเป็นผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเท่ากับ 0.20873 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่ากับ 0.10383 p.u. ผลรวมค่ากำลังไฟฟ้าจริงของการสูญเสียเท่ากับ 0.00555 p.u. ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของการสูญเสียเท่ากับ 0.01674 p.u.

8. สรุป

บทความนี้เมื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความต่อเนื่องการไหลของกำลังไฟฟ้า (CPF) ด้วยโปรแกรม PSAT กับระบบจำหน่ายแบบแรงดันขนาด 22KV.ของสถานีไฟฟ้าสีคิ้วที่ FEEDER NO.6 ในสภาวะก่อนเชื่อมกังหันลมล่าตะคองกับระบบ 22 KV.ในสภาวะโหลดสูงสุด พบว่าระบบแรงดันไฟฟ้าจะเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage Collapse) ขึ้น และเมื่อมีการเชื่อมกังหันลมล่าตะคองกับระบบ 22 KV.ผลลัพธ์ที่ได้พบว่ากังหันลมล่าตะคองสามารถจ่ายโหลดให้ระบบแรงดันไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฝ่ายประชาสัมพันธ์, "คณะรัฐมนตรีอนุมัติ กฟผ.ลงทุนกังหันลมผลิตไฟฟ้าโครงการที่ 2" ข่าวสัปดาห์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 15มกราคม 2554
- [2] F.Milano,M. 2007, Power Analysis Toolbox. Documentation for PSAT version 2.0.0 7.
- [3] ก่อเกียรติ อัดน้อย, ไพศาล บุญเยี่ยม, บุญยัง ปลั่งกลาง และ อาทิตย์ โสตรโยม, "การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า" การประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1
- [4] วัฒนา สืบกินร, บัลลังก์ เนียมมณี, "กังหันลม Wind Turbine" วิศวกรรมเอเชียอาคเนย์ ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มิถุนายน – พฤศจิกายน 2550
- [5] การไฟฟ้าภูมิภาค เขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, "ข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้า จากสถานีไฟฟ้าสีคิ้ว นครราชสีมา ถึงกังหันลมไฟฟ้าล่าตะคอง Feeder NO.6 ของกองแผนงานและระบบปฏิบัติการ."
- [6] ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบกำลังไฟฟ้า กำลัง" บริษัททริเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่นจำกัด 2552
- [7] จักรินทร์ วิเศษยา, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, "การศึกษากาวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมPSAT" ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (RMUTCON-3)
- [8] ก่อเกียรติ อัดทรัพย์, บุญยัง ปลั่งกลาง , อาทิตย์ โสตรโยม, "การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า " วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชนสิทธิ์ จันเงิน
วัน เดือน ปีเกิด	23 มีนาคม 2505
ที่อยู่	50/824 หมู่ที่ 2 ต.บึงยี่โถ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2534
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2527 – พ.ศ. 2536	แผนกอุปกรณ์พิเศษ กองวิศวกรรมบำรุงรักษาไฟฟ้า ทดสอบและตรวจสอบ AVR, GOV & Auto Sync. ของโรงไฟฟ้า
พ.ศ. 2536 – พ.ศ. 2537	แผนกบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก กองบำรุงรักษาไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังน้ำทดสอบและตรวจสอบ UPS & Instrument ของโรงไฟฟ้า
พ.ศ. 2538 – พ.ศ. 2542	แผนกอุปกรณ์พิเศษ กองอุปกรณ์รักษาไฟฟ้า ทดสอบและตรวจสอบ Auxiliary Equipment ของโรงไฟฟ้า
พ.ศ. 2542 – พ.ศ. 2547	แผนกอุปกรณ์ตัดตอน กองอุปกรณ์รักษาไฟฟ้า
พ.ศ. 2547 – พ.ศ. 2553	แผนกวิศวกรรมบำรุงรักษาไฟฟ้า กองบำรุงรักษาพลังงานความร้อนพลังน้ำ
พ.ศ. 2553 – ปัจจุบัน	แผนกเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ควบคุมกล