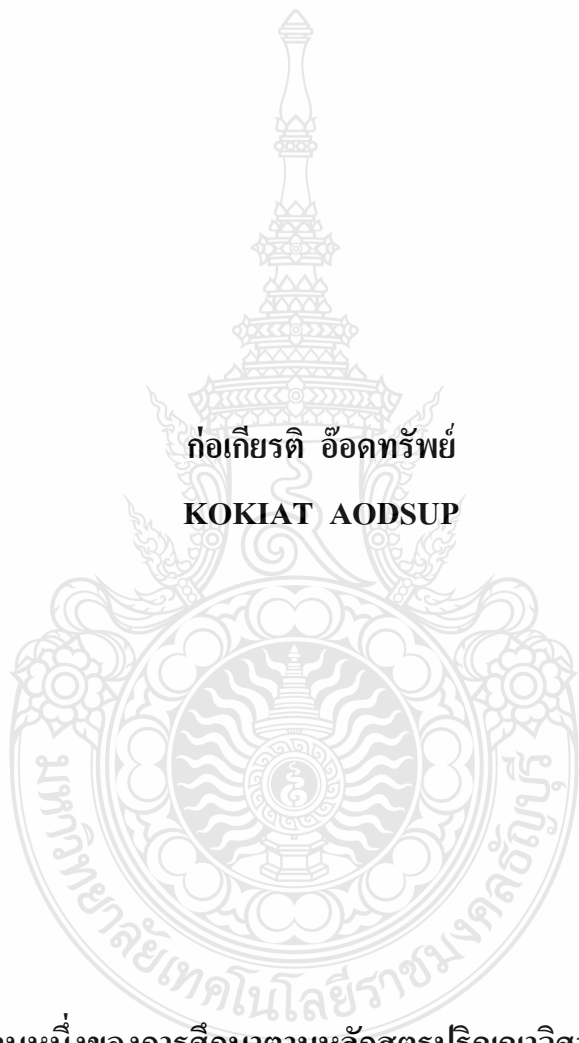


การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าเมื่อเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

**STUDY OF VOLTAGE STABILITY IN POWER SYSTEM WHEN CONNECTED
WIND TURBINE GENERATORS**

ก่อเกียรติ ออดทรัพย์

KOKIAT AODSUP



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ.2552

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสของ IEEE 14 Bus	63
ก.2 ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ IEEE 14 Bus	64
ก.3 ข้อมูลของสายส่งในระบบ IEEE 14 Bus	64



การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าเมื่อเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ก่อเกียรติ อุดทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

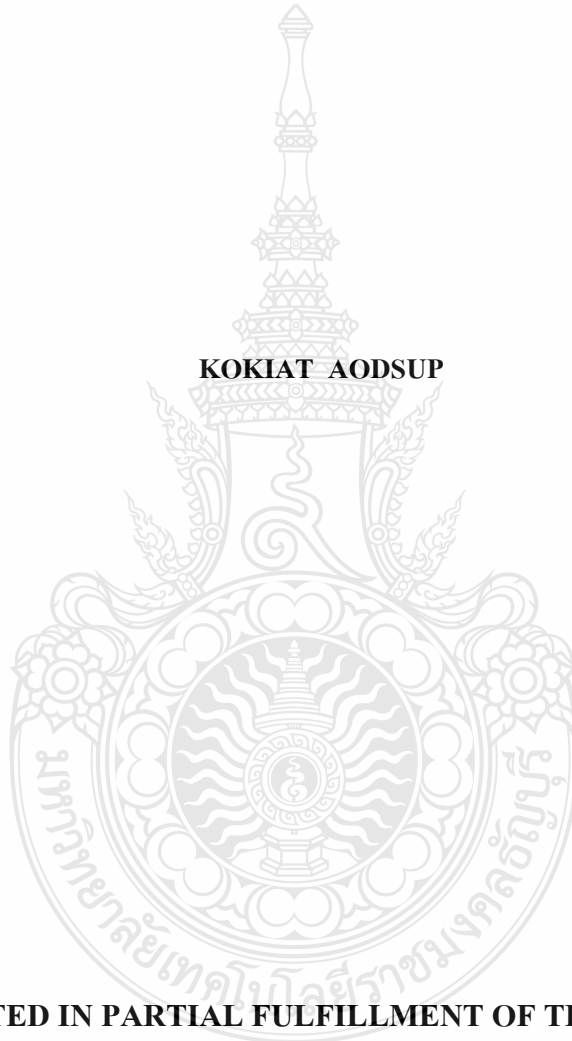
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ.2552

**STUDY OF VOLTAGE STABILITY IN POWER SYSTEM WHEN CONNECTED
WIND TURBINE GENERATORS**

KOKIAT AODSUP



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

2009

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

ก่อเกียรติ อ้อดทรัพย์





ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อ โยงกับกังหันลม
ผลิตไฟฟ้า

STUDY OF VOLTAGE STABILITY IN POWER SYSTEM
WHEN CONNECTED WIND TURBINE GENERATORS

ชื่อนักศึกษา

นายก่อเกียรติ อี๊ดทรัพย์

รหัสประจำตัว

114960402008-5

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ โสตรโยม

วัน เดือน ปี ที่สอบ

13 พฤษภาคม 2552

สถานที่สอบ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญนุกุล)

..... กรรมการ
(ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์)

..... กรรมการ
(ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล)

..... กรรมการ
(ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ โสตรโยม)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่

เดือน

พ.ศ.

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า
นักศึกษา	นายก่อเกียรติ อ็อคทรัพย์
รหัสประจำตัว	114960402008-5
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปี พ.ศ.	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ โสทรโยม

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม UWPFLOW เป็นเครื่องมือหาค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบก่อนถึงสถานะแรงดันพังทลาย วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบ IEEE 14 Bus เพื่อวิเคราะห์หาค่าแห่งการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ผลของความเร็วมต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบ และการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิด SVC และ STATCOM

ผลการศึกษาของวิทยานิพนธ์พบว่าค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบ IEEE 14 Bus ก่อนติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.70398 p.u. ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูงที่สุดคือ บัสที่ 14 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง มีค่าเพิ่มขึ้น 4.24% และ 11.24% ตามลำดับ และการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิด STATCOM สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันได้สูงกว่า SVC คือ มีค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเพิ่มขึ้น 56.33% และ 53.28% เมื่อติดตั้งในระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางตามลำดับ วิทยานิพนธ์นี้จึงมีประโยชน์โดยตรงต่อหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ : เสถียรภาพแรงดัน ไฟฟ้า, กังหันลมผลิตไฟฟ้า, อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิด STATCOM

Thesis Title : STUDY OF VOLTAGE STABILITY IN POWER SYSTEM
WHEN CONNECTED WIND TURBINE GENERATORS

Student Name : Mr.Kokiat Aodsup

Student ID : 114960402008-5

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Electrical Engineering

Year of Achievement : 2009

Thesis Advisor/s : Dr. Boonyang Plangklang
Dr.Arthit Sode-Yome

ABSTRACT

This thesis presents a study of voltage stability in power systems when connected wind turbine generators. The maximum loading factor of system model is carried out by using UWPFLOW program. The location and sizing of wind turbine generator is modeled in IEEE 14 bus system. Two types of wind turbine generator are selecting namely squirrel cage and doubly fed induction generators. To improve the voltage stability in IEEE 14 bus after installed the wind turbine generator, FACTS devices are proposed.

The result of this thesis can be shown that the maximum loading factor of IEEE 14 bus before install the wind turbine generator is 0.70398 p.u. The weakest bus is No.14. There for, loading factor of system that connects squirrel cage induction generator wind turbine and doubly fed induction generator wind turbine are increased to 4.24% and 11.24% respectively. By systems that connected with wind turbine generator and flexible ac transmission line systems show that STATCOM can increase Maximum loading factor higher than SVC. Maximum loading factor when setting STATCOM up to 56.33% and 53.28% in systems that connected squirrel cage induction generator wind turbine and doubly fed induction generator wind turbine respectively. This thesis gives direct advantage for organizations who responsible to built convincing of power system in study the respond of setting wind turbine generator on voltage stability.

Key word: Voltage Stability, Wind Turbine Generator, Flexible AC Transmission Line System

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเป็นอย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง และอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ โสตรโยม และอาจารย์ไพศาล บุญเจียม ได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำอันมีค่ายิ่ง ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญนุกูล , ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ และ ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำอันมีค่ายิ่ง ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และขอกราบขอบพระคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน(สนพ.) กระทรวงพลังงาน ที่ให้ทุนในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความเข้าใจดีสำหรับเวลาที่ข้าพเจ้าต้องใช้สำหรับการศึกษาเพื่ออนาคตในครั้งนี้ รวมทั้งพี่ๆและทีมงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการระบบกำลังไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ร่วมแรง ร่วมใจ อยู่ด้วยกันปฏิบัติงานตลอดมา

ก่อเกียรติ อ้อคทรัพย์

13 พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า	6
2.3 กังหันลมผลิตไฟฟ้า	13
2.4 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่น	22
2.5 สรุป	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 การดำเนินงานวิจัยโดยใช้โปรแกรม UWPFLOW	30
3.2 ศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 14 Bus	31
3.3 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า	32
3.4 สรุป	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
4.1 เสถียรภาพแรงดันเมื่อเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมชนิดเหนี่ยวนำ แบบกรงกระรอก	41
4.2 เสถียรภาพแรงดันเมื่อเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมชนิดเหนี่ยวนำ แบบป้อนสองทาง	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้า	53
4.4 สรุป	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	56
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก ก	62
ก.1 ข้อมูลของระบบ IEEE 14 Bus ที่ใช้วิเคราะห์	63
ก.2 ข้อมูลค่าความจุของ SVC และ STATCOM ในระบบ IEEE 14 บัส	65
ภาคผนวก ข	66
ข.1 รายละเอียดข้อมูลของระบบในโปรแกรม UWPFLOW	67
ข.2 ขั้นตอนการรันโปรแกรม UWPFLOW ในงานวิจัย	78
ภาคผนวก ค	79
ค.1 บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติ	80
ค.2 บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ระดับชาติ	91
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	34
3.2 ข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง	35
3.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	36
3.4 ข้อมูลของ SVC ขนาด 150 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 10	37
3.5 ข้อมูลของ STATCOM ขนาด 150 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 9	38
4.1 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	42
4.2 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ และผลของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง	43
4.3 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 14 และติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งต่างๆ	44
4.4 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 14 และติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA ที่โหลดบัส	45
4.5 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า, เมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า และการติดตั้งอุปกรณ์ ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น	46
4.6 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง	48
4.7 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆและผลของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง	49
4.8 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 14 และติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งต่างๆ	50
4.9 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมDFIGที่บัสที่ 14 และติดตั้ง STATCOMขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งต่างๆ	51
4.10 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า, เมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า และการติดตั้งอุปกรณ์ ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น	52
4.11 ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งและค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ IEEE 14 Bus เมื่อเชื่อมโยงกับ กังหันลมผลิตไฟฟ้า, SVC และ STATCOM	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังแสดงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง	6
2.2 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส	8
2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่ค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนแปลง	9
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง	10
2.5 ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธี CPF	10
2.6 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้า	13
2.7 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบ Stall limit	14
2.8 ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	15
2.9 ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง	15
2.10 ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	16
2.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอก	17
2.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง	18
2.13 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางในสถานะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส	19
2.14 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบเชื่อมต่อโดยตรง	21
2.15 ลักษณะของการติดตั้ง SVC	22
2.16 วงจรสมมูลของ SVC	23
2.17 แบบจำลองของ SVC	23
2.18 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ SVC	24
2.19 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสถานะคงตัว	25
2.20 ลักษณะของการติดตั้ง STATCOM	26
2.21 วงจรสมมูลของ STATCOM	26
2.22 กราฟคุณลักษณะแรงดันและกระแสของ STATCOM	27
2.23 แบบจำลองของ STATCOM	27
2.24 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ STATCOM ในสถานะคงตัว	29
3.1 ขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรม UWPFLOW	30
3.2 ระบบของ IEEE 14 Bus ที่นำมาใช้ในงานวิจัย	31
3.3 ตัวอย่างของระบบ IEEE 14 Bus เมื่อเชื่อมโยงกับกักเก็บผลิตไฟฟ้า บัสที่ 14	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า	37
3.5 การติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า	38
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบ IEEE 14 Bus	40
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่โหลดบัส	41
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง แสดงผลของความเร็วลม	42
4.4 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัส และอัตราเร็วลมตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s	43
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ตำแหน่งของการติดตั้ง SVC โหลดบัส	44
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ตำแหน่งของการติดตั้ง STATCOM	45
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ระบบ IEEE 14 Bus ก่อน และ หลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ อุปกรณ์ FACTS	46
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางที่โหลดบัส	47
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง แสดงผลของความเร็วลม	48
4.10 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบหลังการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัสและ ความเร็วลมตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s	49
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ตำแหน่งของการติดตั้ง SVC โหลดบัส	50
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิต และ ตำแหน่งของการติดตั้ง STATCOM	51
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ระบบ IEEE 14 Bus ก่อน และ หลังติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ อุปกรณ์ FACTS	52
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อน และหลังติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อน และหลังติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ติดตั้ง SVC	53
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อน และหลังติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ติดตั้ง STATCOM	54
ก.1 ผลการจำลองการทำงานการเพิ่มค่าความจุของ SVC และ STATCOM	65



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

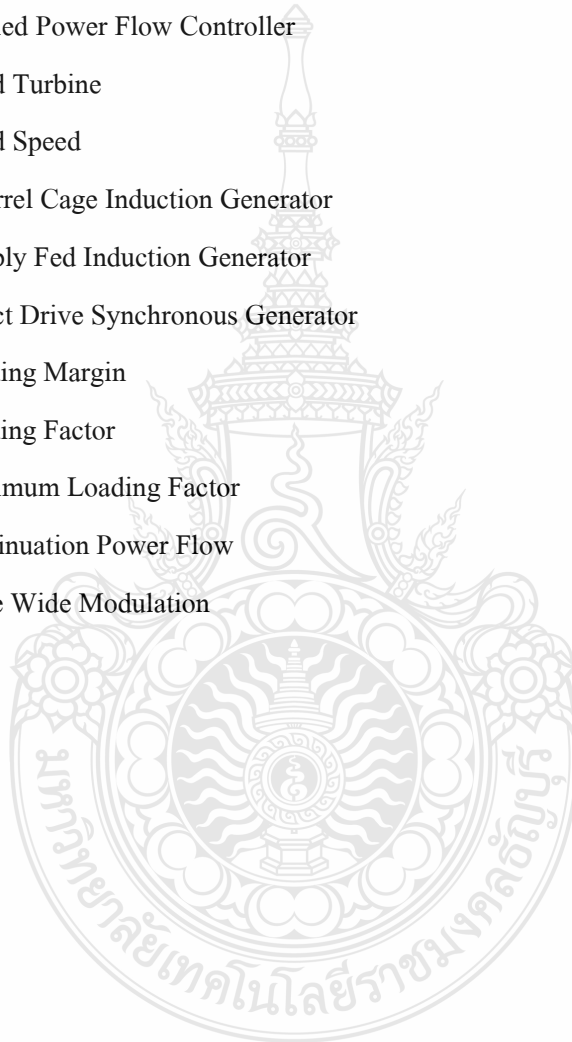
สัญลักษณ์	ความหมาย
E	แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิด
E_A	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเครื่องกำเนิด
V	แรงดันที่บัส
V_i	แรงดันของอุปกรณ์ FACTS
V_S	แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์
V_r	แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดโรเตอร์
V_a	แรงดันที่ตกคร่อมคาร์ีแอกแตนซ์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก
V_ϕ	แรงดันต่อเฟสที่บัส
V_{ref}	แรงดันอ้างอิง
V_{ac}	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
V_{dc}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
V_{min}	แรงดันต่ำสุด
V_{max}	แรงดันสูงสุด
I	กระแสที่ไหลระหว่างระบบไฟฟ้ากับอุปกรณ์ FACTS
I_S	กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์
I_r	กระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์
I_{min}	กระแสต่ำสุด
I_{max}	กระแสสูงสุด
X	รีแอกแตนซ์ของสายส่ง
X_1	รีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์
X_2	รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์
X_m	รีแอกแตนซ์ที่ทำให้เกิดฟลักซ์
X_S	ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์
X_L	รีแอกแตนซ์ของ SVC
X_c	คาปาซิแตนซ์ของ SVC
X_{SL}	รีแอกแตนซ์ของ SVC ในสถานะสมดุล
C	คาปาซิเตอร์
R_S	ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
R_r	ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
R_A	ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
Z_{in}	อิมพีแดนซ์อินพุต
B_e	ชัตเซียบแต่นซ์ของอุปกรณ์ FACTS
B_{min}	ชัตเซียบแต่นซ์ต่ำสุด
B_{max}	ชัตเซียบแต่นซ์สูงสุด
G_C	คอนดักแต่นซ์ของอุปกรณ์ FACTS
s	สลีป
P	กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
P_i	กำลังไฟฟ้าจริงของอุปกรณ์ FACTS
P_S	กำลังไฟฟ้าจริงที่ขดลวดสเตเตอร์
P_r	กำลังไฟฟ้าจริงที่ขดลวดโรเตอร์
P_W	กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้า
P_m	กำลังทางกล
T_e	แรงบิดของสนามแม่เหล็กหมุน
Q	กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
Q_i	กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของอุปกรณ์ FACTS
α	มุมจุดชนวนสวิตช์
α_m, α_{min}	มุมจุดชนวนต่ำสุด
α_M, α_{max}	มุมจุดชนวนสูงสุด
δ	มุมของแรงดันที่บัส
β	มุมเฟส
k	อัตราส่วนของการมอดูเลชั่น
D	อัตราขยายของอุปกรณ์แปลงผัน
m	ค่ามอดูเลชั่น
ρ_{air}	ค่าความหนาแน่นของอากาศหรือลม
A	พื้นที่ใบพัดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
V_w	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกังหันลม
C_p	สัมประสิทธิ์ของลม
a	อัตราส่วนของหม้อแปลง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
FACTS	Flexible AC Transmission line System
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
TCSC	Thyristor Control Series Capacitor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller
WT	Wind Turbine
WS	Wind Speed
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
DDSG	Direct Drive Synchronous Generator
LM	Loading Margin
LF	Loading Factor
Max. LF	Maximum Loading Factor
CPF	Continuation Power Flow
PWM	Pulse Wide Modulation



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลจากจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าเพื่อรองรับกับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น การพิจารณาจัดสรรพลังงานไฟฟ้าให้ได้ตามความต้องการต้องพิจารณาทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์ และความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ทางด้านเศรษฐศาสตร์นั้นจะต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตกับการจำหน่ายไฟฟ้าในราคาที่เหมาะสม ส่วนทางด้านความน่าเชื่อถือของระบบนั้นอยู่ที่การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้มีคุณภาพ และเพียงพอกับความต้องการ ตัวอย่างในด้านคุณภาพ คือ ระดับของแรงดันไฟฟ้าในระบบมีค่าคงที่ และ สม่่าเสมอ ส่วนความเพียงพอกับความต้องการ คือ ระบบจะต้องสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามความต้องการ โดยไม่ก่อให้เกิดเหตุการณ์ไฟดับขึ้นในระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัตถุประสงค์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ กับ ทางด้านความน่าเชื่อถือนั้นจะสวนทางกัน กล่าวคือ ระบบที่มีความน่าเชื่อถือสูงจะมีการลงทุนค่อนข้างสูง ส่วนระบบที่มีการลงทุนต่ำก็จะมี ความน่าเชื่อถือต่ำ

การปฏิบัติงานจริงในระบบส่งจ่ายนั้น ต้องรองรับภาระโหลดมากขึ้นตามความต้องการพลังงานไฟฟ้า ทำให้ส่งผลต่อการทำงานของระบบหลายประการ ปัญหาหนึ่งในนั้น คือ สภาวะแรงดันพังทลาย (Voltage Collapse) ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า โดยที่สภาวะแรงดันพังทลายนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ไฟดับทั้งระบบหรือบางส่วน

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย สำหรับคุณภาพของระบบไฟฟ้าที่ดีนั้นต้องมีระดับของแรงดันไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ และไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้านั้นจะประกอบด้วย ระบบการผลิตไฟฟ้า ระบบส่งจ่าย สถานีไฟฟ้า และ ระบบจำหน่าย ในส่วนของโหลดทางไฟฟ้านั้น เราสามารถดูได้จากสถานีไฟฟ้าว่ามีโหลดเพิ่มมากขึ้นเท่าไร โดยที่สถานีไหนมีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย น้อยสถานีนั้นมีความเสี่ยงสูงที่จะทำให้ระบบเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย หากต้องการเพิ่มเสถียรภาพหรือค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลายนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มสถานีผลิตไฟฟ้า หรือ ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นให้กับระบบ

ปัจจุบันได้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้ากันอย่างกว้างขวาง อันเนื่องมาจากการลดลงอย่างมากของพลังงานจากซากพืชซากสัตว์ และ ราคาของพลังงานจากซากพืช

ซากสัตว์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในพลังงานที่นำมาใช้ก็คือ พลังงานลม เนื่องจากพลังงานลมเป็นพลังงานที่สะอาด และ มีอยู่ทั่วไป ในปัจจุบันกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้มีการวิจัย และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้มีการนำกังหันลมผลิตไฟฟ้ามาใช้งานกันเพิ่มมากขึ้น กังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Wind Turbine), กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed Wind Turbine) และ กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (Variable Speed with Direct Drive)

โดยทั่วไปกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Generator) ส่วนในแบบความเร็วไม่คงที่ จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator) และ กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีการดูดกลืนค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบที่เชื่อมต่อเพื่อมาใช้ในการสร้างฟลักซ์สนามแม่เหล็กดังนั้นจึงจำเป็นที่เราจะต้องหาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากภายนอกเพื่อมาชดเชยค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบได้แก่ ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) และ อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS) เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้เห็นความสำคัญของปัญหาการเกิดสถานะแรงดันพังทลายในระบบไฟฟ้าเมื่อนำกังหันลมผลิตไฟฟ้ามาเชื่อมต่อกับระบบ และการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น โดยการนำเสนอการวิเคราะห์ระบบมาตรฐาน IEEE 14 Bus ที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ กังหันลมแบบความเร็วคงที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก กับกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นแบบขนาน 2 ชนิดคือ Static Var Compensator (SVC) และ Static Synchronous Compensator (STATCOM) ในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลม จากค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบก่อนถึงสถานะแรงดันพังทลาย ซึ่งผลของวิทยานิพนธ์นี้อาจเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ทำการวางแผนและออกแบบระบบไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลง

1.2.3 เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น 2 ชนิด คือ SVC และ STATCOM ที่เหมาะสมกับระบบที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาผลทางด้านเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม 2 ชนิด คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และ เปรียบเทียบความเหมาะสมของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น 2 ชนิด คือ SVC และ STATCOM โดยจะจำลองการทำงานกับระบบมาตรฐาน IEEE 14 Bus

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม 2 ชนิด คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

1.4.2 วิเคราะห์ผลของความเร็วต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง และ ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลม จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

1.4.3 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น 2 ชนิด คือ SVC และ STATCOM จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษารายละเอียดของวิทยานิพนธ์จากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.5.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม UWPFLOW เพื่อนำมาเขียนเส้นโค้ง P – V กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 บัส ทั้งก่อน และ หลังการติดตั้งกังหันลม และ เมื่อมีการติดตั้ง SVC และ STATCOM โดยใช้โปรแกรม UWPFLOW

1.5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.4 สรุป และ อภิปรายผล

1.5.5 เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ผู้วิจัยขอเสนอรายละเอียดต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อ ได้ดังนี้

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เสถียรภาพแรงดัน
3. เทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้า
4. อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prabha Kundur [1] ได้สรุปนิยาม และ ประเภทของเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งนิยามของเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง คือความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่ยังสามารถจ่ายโหลดได้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นในระบบ โดยระบบที่มีเสถียรภาพย่อมสามารถทนทานต่อผลกระทบต่างๆ ได้ เสถียรภาพในระบบนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ เสถียรภาพการเคลื่อนที่เชิงมุม (Rotor Angle Stability), เสถียรภาพของความถี่ (Frequency Stability) และ เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability)

นิพนธ์ เกตุจ้อย [2] ได้นำเสนอเทคโนโลยีพลังงานลม ว่ามีประวัติความเป็นมาอย่างไร เทคโนโลยีในปัจจุบัน ศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทย ทฤษฎีพลังงานลม เทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบต่างๆ ส่วนประกอบหลัก จุดเด่น และ จุดด้อยของเทคโนโลยีแบบต่างๆ และผลกระทบของการใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นการกล่าวถึงภาพรวมและความสำคัญของกังหันลมแต่ไม่มีการวิเคราะห์เรื่องใดเรื่องหนึ่ง โดยเฉพาะสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเมื่อเชื่อมต่อกังหันลมผลิตไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

วิฒนะ สืบกนิร และ บัลลังก์ เนียมมณี [3] ได้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทาง ในสภาวะคงตัวขณะที่ทำงานในเงื่อนไขของการทำงานในสภาวะซิงโครนัส โดยโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทางต่ออุปกรณ์แปลงผันด้านเครื่องจักรกล และ อุปกรณ์แปลงผันด้านที่เชื่อมต่อกับระบบ ซึ่ง อุปกรณ์แปลงผันด้านเครื่องจักรกล สามารถปรับได้ทั้งขนาดแรงดัน และ ความถี่ อย่างอิสระ โดยที่ความถี่ที่ป้อนให้โรเตอร์เมื่อรวมกับความถี่ของโรเตอร์แล้ว ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ที่โรเตอร์ กับ สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ซึ่งจะทำได้สามารถรักษา

ความถี่ที่สเตเตอร์ให้คงที่ โดยที่ความเร็วของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่โรเตอร์และสเตเตอร์ ทำได้โดยการปรับขนาดของแรงดันที่โรเตอร์ และการควบคุมนี้สามารถควบคุมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ โดยพิจารณาที่ ค่าความสูญเสียต่ำที่สุด

G.Coath, M.AI-Dabbagh [4] ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยจำลองการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า บัสที่ 30 ในระบบมาตรฐาน IEEE 54 Bus ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบมากกว่าระบบที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองชนิด แต่ไม่มีการให้เหตุผลว่าทำไมถึงเลือกที่จะติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าตรงบัสที่ 30

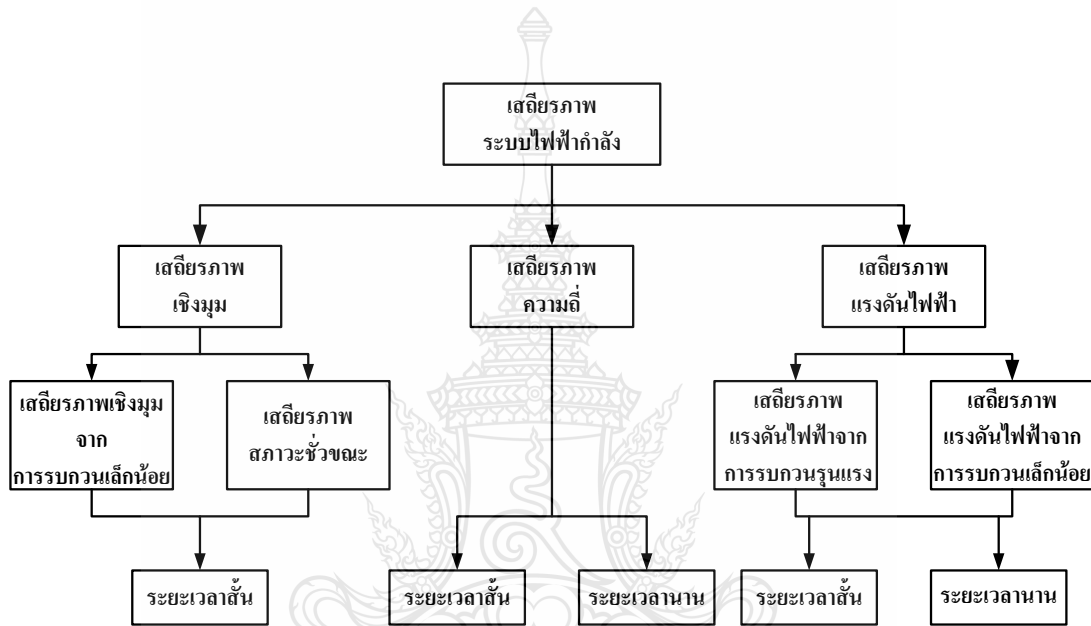
N. Mithulanathan, A.Sode-Yome, N.Acharya, S.Phichaisawat [5] ได้นำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย และการเพิ่มเสถียรภาพในระบบโดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้ง ชุดตัวเก็บประจุ และ อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหย่น โดยการวิเคราะห์จากค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดก่อนที่ระบบพังทลาย จากผลการวิจัยพบว่าสถานที่จังหวัดเชียงใหม่มีการเปลี่ยนของแรงดันมากที่สุดเมื่อมีการเพิ่ม โหลดอย่างต่อเนื่อง หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหย่นเข้าไปในระบบนี้สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ 20 – 30% โดยที่ STATCOM สามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าอุปกรณ์อื่นๆ แต่ยังไม่ได้อธิบายถึงระบบที่เชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

A. Sode-Yome, N. Mithulanathan [6] ได้นำเสนอการเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบมาตรฐานของ IEEE 14 Bus โดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยัดหย่น 3 ชนิด คือ STATOM, TCSC และ SSSC โดยใช้วิธีการ Continuation Power Flow เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เพื่อหาค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบก่อนถึงสภาวะแรงดันพังทลาย ซึ่งจากการวิจัยพบว่าระบบที่เชื่อมต่อกับ STATCOM สามารถเพิ่มค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดได้มากกว่าระบบที่เชื่อมต่อกับ TCSC และ SSSC แต่ยังไม่ได้อธิบายถึงระบบที่เชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

จากการวิจัยที่ได้ศึกษาจะเห็นได้ว่าเสถียรภาพแรงดันในระบบมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อความน่าเชื่อถือของระบบ และมีการนำพลังงานลมมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า จึงมีความสนใจศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในระบบ โดยเฉพาะตำแหน่งของการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้ากังหันลมได้สูงที่สุด และการเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลม โดยใช้อุปกรณ์ FACTS

2.2 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่ยังสามารถจ่ายโหลดได้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นในระบบ โดยระบบที่มีเสถียรภาพย่อมสามารถทนทานต่อผลกระทบต่างๆ ได้ เสถียรภาพในระบบนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ เสถียรภาพการเคลื่อนที่เชิงมุม, เสถียรภาพของความถี่ และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลของปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นนี้จะเกิดปัญหาต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ [7]



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 2.1 แสดงปัญหาของเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมดซึ่งจะจำแนกเป็นประเภทและหัวข้อย่อยตามลักษณะของการเกิดผลทางด้านเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

เสถียรภาพเชิงมุมในส่วนเคลื่อนที่ คือ ความสามารถของเครื่องกลเชิงโรตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบ และยังคงอยู่ได้ในสภาวะซิงโครไนซ์หลังจากเกิดการรบกวนในระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการรักษาและฟื้นฟูให้เกิดความสมดุลระหว่างแรงบิดของสนามแม่เหล็กและแรงบิดทางกลของเครื่องกลเชิงโรตอร์ในระบบ สำหรับความไม่มีเสถียรภาพในระบบนี้อาจจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของมุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดตัวใดตัวหนึ่งในระบบ ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียสภาวะซิงโครไนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นในระบบ

เสถียรภาพของความถี่ คือ ความสามารถของระบบในการรักษาความถี่ให้คงที่ หลังจากเกิดการขาดความสมดุลของแหล่งจ่ายกับโหลดและจะส่งผลกระทบต่อระบบอย่างมาก ซึ่งความสามารถของ

ระบบนี้ขึ้นอยู่กับ การรักษาและฟื้นฟูความสมดุลระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด สำหรับความไม่มีเสถียรภาพนี้อาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำให้แหล่งจ่ายหรือโหลดถูกตัดออกจากการทำงาน

เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบในการรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ทุกบัสในระบบหลังจาก เกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บรักษาความสมดุลระหว่าง โหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ ความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่บัสลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจาก การสูญเสียที่โหลดหรือการสูญเสียในสายส่ง

สภาวะแรงดันพังทลายคือสภาวะที่แรงดันของระบบเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของโหลด เมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้นแรงดันของระบบจะค่อยๆลดลงจนถึงจุดวิกฤต (Critical Point) ในขณะนี้ ถ้าเพิ่มโหลดเพียงเล็กน้อยจะทำให้แรงดันของระบบตกลงอย่างมากเป็นเหตุให้ระบบไม่สามารถจ่ายโหลดได้อีก ซึ่งมีสาเหตุมาจากความสามารถของระบบในการจ่ายพลังงานให้กับโหลดไม่เพียงพอ สาเหตุของการเกิดพ้อจะสรุปได้เป็น 2 กรณี คือ การเพิ่มขึ้นของโหลด และ ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาระดับของแรงดันได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่วนมากสูญเสียไปกับสายส่งระหว่างตำแหน่งของแหล่งจ่ายพลังงานกับตำแหน่งของโหลด ซึ่งในทางปฏิบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบใช้อุปกรณ์ชดเชยต่างๆ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ และ อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น กับการที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหรือสายส่งชุดใดชุดหนึ่งถูกตัดออกจากระบบทันทีทันใดทำให้สายส่งหรือแหล่งจ่ายพลังงานอีกชุดหนึ่งต้องจ่ายโหลดเกินพิกัด

สำหรับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งหัวข้อย่อยได้ดังนี้

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

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

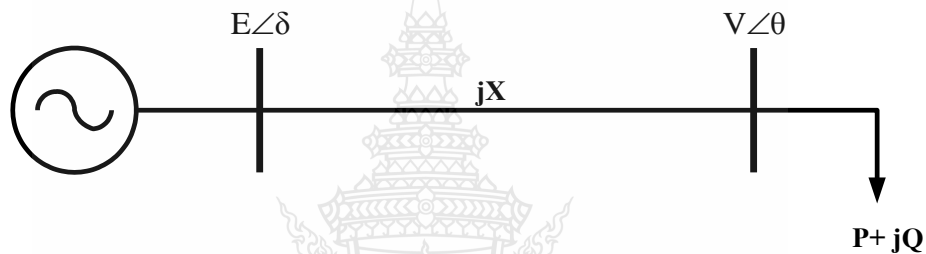
กรอบเวลาสำหรับปัญหาด้านเสถียรภาพแรงดันของระบบส่วนมากจะเริ่มจากวินาทีไปจนถึง 10 นาที เพราะฉะนั้นเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ระยะเวลาสั้นๆ (Short-Term) และ ระยะเวลาสั้น (Long-Term)

- เสถียรภาพแรงดันในระยะเวลาสั้นๆคือ ส่วนประกอบของโหลดที่มีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วดังเช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมโหลด และ อุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง คาบเวลาการศึกษาจะมีหน่วยเป็นวินาที

- เสถียรภาพแรงดันในระยะเวลานาน คืออุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เช่น การควบคุมอุณหภูมิของโหลด และการจำกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คาบเวลาของการศึกษาจะมีหน่วยเป็นนาที

2.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 2.2 แสดงไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส ใช้ศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจคุณลักษณะของเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า โดยที่ $E\angle\delta$ คือ แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sending End Bus), $V\angle\theta$ คือแรงดันที่จุดต่อของโหลด (Receiving End Bus), jX คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสาย และ $P+jQ$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดคงที่เขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบ 2 บัส

จากรูปที่ 2.2 เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \delta \quad (2.2)$$

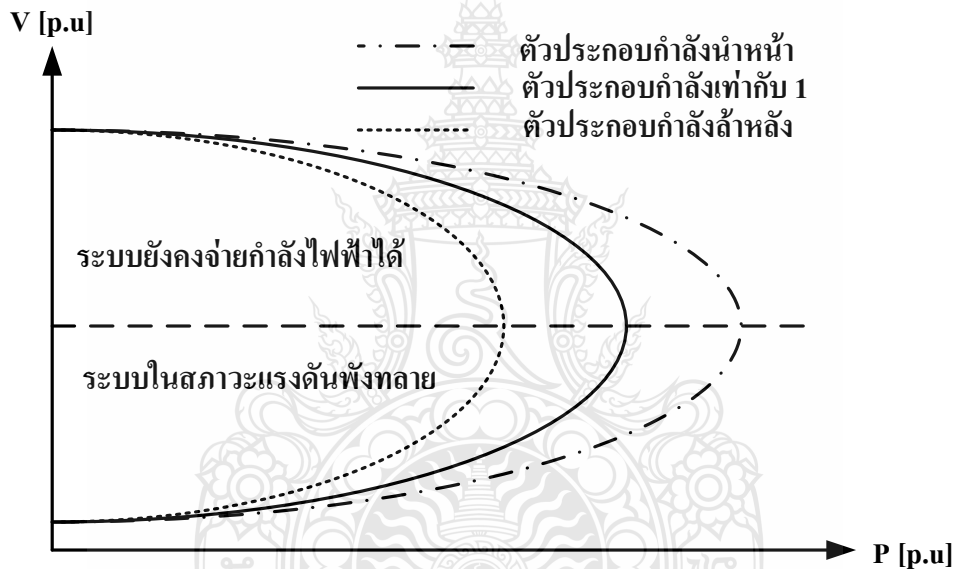
จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 จะได้สมการกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส คือ

$$V^2 = \frac{PX}{E} + \left[\frac{QX + V^2}{E} \right] \quad (2.3)$$

แรงดันที่โหลดจะมีค่าดังสมการ

$$V = \sqrt{\frac{E^2 - 2QX \pm \sqrt{(E^2 - 2QX)^2 - 4(P^2 + Q^2)X^2}}{2}} \quad (2.4)$$

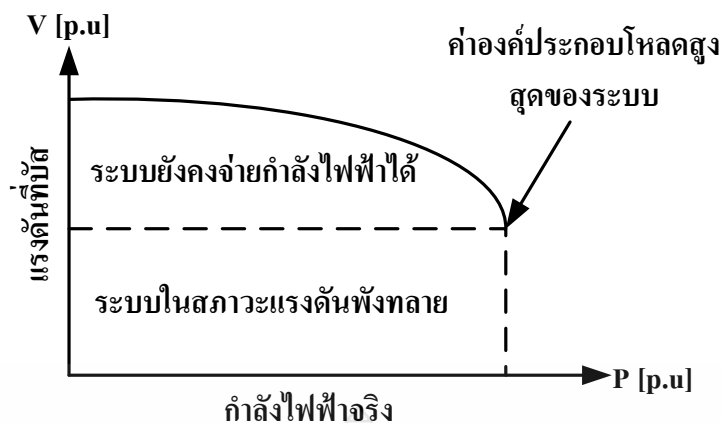
จากสมการที่ 2.3 ถ้ากำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังของ โหลดคงที่ และ ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเปลี่ยนแปลงไป (P) เราจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริงที่แสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังล้าหลังค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบจะลดลง เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้าค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่ค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนแปลง

2.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

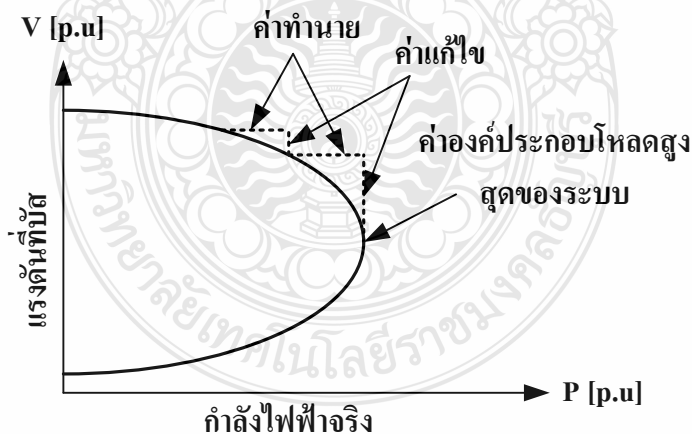
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดความสามารถของระบบในการจ่ายโหลด ที่ทำให้ระบบยังมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าอยู่ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P) และแรงดันที่บัส (V) ที่สนใจศึกษา



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง

จากรูปที่ 2.4 เป็นลักษณะของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า เพื่อหาขีดจำกัดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถจ่ายได้ก่อนถึงสถานะแรงดันพังทลาย แรงดันที่บัสจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความต้องการ โหลดเพิ่มมากขึ้น

วิธี Continuation Power Flow (CPF) คือ วิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ทั้งบนและล่างเพื่อหาค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุด วิธีการของ CPF จะทำงานเข้าไปเป็นขั้นๆ คือการทำนายค่าและการหาค่าแก้ไข ดังรูปที่ 2.5 [8]



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธี CPF

พื้นฐานบนสมการของ CPF มีลักษณะคล้ายกับการวิเคราะห์โหนดโพล์แต่จะมีการเพิ่มโหนดคือเพิ่มค่าพารามิเตอร์ (λ) ต่อท้ายสมการโหนดโพล์ สำหรับการเริ่มต้นของการเพิ่มโหนดสามารถเขียนสมการได้

$$\lambda K - f(\delta(V)) = 0 \quad (2.5)$$

หรือ

$$f(\delta(V, \lambda)) = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อ K คือ ลักษณะของโหลด และ λ คือ ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไป จากเดิมจนถึงค่าโหลดสูงสุด จากสมการที่ 2.6 เขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\frac{\partial f}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial f}{\partial V} dV + \frac{\partial f}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 มีตัวแปรอีกหนึ่งตัวตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ λ ซึ่งจะทำให้มีตัวแปรมากกว่า สมการ ดังนั้นเราต้องเพิ่มสมการอีกหนึ่งสมการคือ

$$e_k \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \pm 1 \quad (2.8)$$

เมื่อ e_k คือ แถวของเวกเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าจะมีค่าเป็น 1 ค่าพารามิเตอร์ของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า (λ) จะมีค่าเป็นบวกเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นและค่าแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในสภาวะตามการเพิ่มขึ้นของโหลด แต่จะมีค่าเป็นลบเมื่อค่าของแรงดันไฟฟ้ามีค่า ลดลงจากจุดที่ระบบสามารถรับโหลดได้สูงสุด

ค่าทำนาย หาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{\text{predicted}} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ \dots \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & & & \\ & J_{LF} & & \\ & & \vdots & K \\ & & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & [e_k] & \dots \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

และ σ คือ ขนาดของขั้นการเปลี่ยนแปลงในการทำนายครั้งต่อไป ที่ค่าการเพิ่มขึ้นของโหลด $dx_k = 1$ จะได้

$$x_k^{\text{predicted}} = x_{k0} + \sigma \quad (2.11)$$

วิธีการคำนวณหาค่าแก้ไข หาได้จากสมการ

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2.12)$$

$$x_k - x_k^{\text{predicted}} = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อ x_k คือ ค่าพารามิเตอร์ของความต่อเนื่องที่เลือกใช้

2.2.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

ก. การทำงานของอุปกรณ์ในระบบ การเกิดแรงดันพังทลายมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ป้องกันด้วย ซึ่งการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันควรพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว ความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และมีการตัดตอนส่วนที่มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุดออกไป

ข. กรณีการเกิดข้อผิดพลาดในระบบ ถ้าใช้เวลาในการตัดข้อผิดพลาดมากเกินไป จะทำให้แรงดันของระบบลดลง จนอาจทำให้เกิดสภาวะการพังทลายได้ ดังนั้นการออกแบบระบบ และการตั้งเวลาวิกฤติของระบบ จะต้องคำนึงถึงการเกิดสภาวะแรงดันพังทลายเอาไว้ด้วย

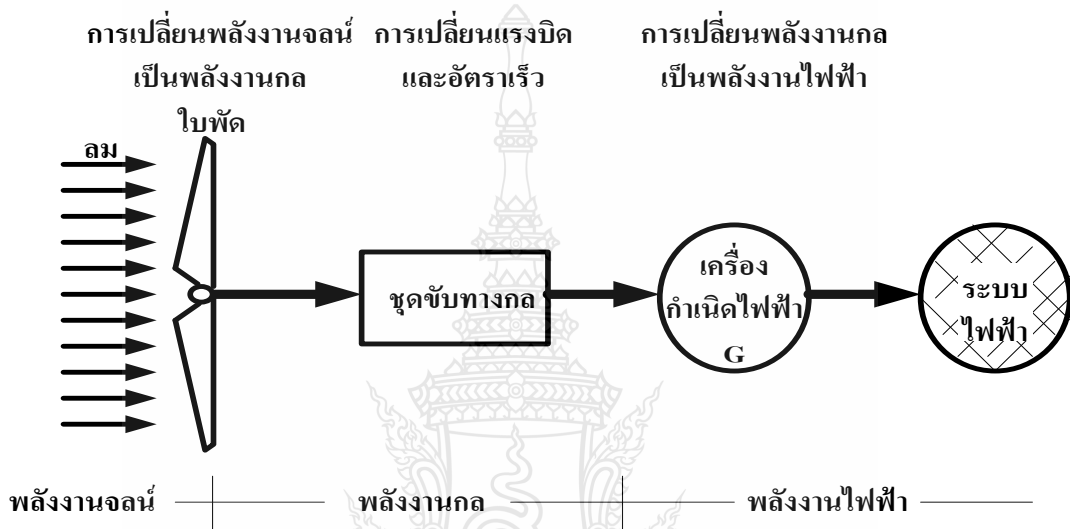
ค. ปริมาณและตำแหน่งของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ จากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านมาสู่โหลดเนื่องจากความสูญเสียในสายส่งระหว่างการจ่ายกำลังไฟฟ้า การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งต้องมีปริมาณที่พอเพียง และอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแรงดันพังทลาย

ง. ปัจจัยอันเนื่องมาจากปัญหาเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง เพราะปกติการเกิดสภาวะแรงดันพังทลายมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่อยู่ในสภาวะเครียดนั้นคือ ระบบมีความยืดหยุ่นต่ำอันเนื่องมาจากรายจ่ายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรายได้ จากสภาวะทางสังคมและเหตุผลทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้บรรดาผู้ผลิตไฟฟ้าต่างๆ ต้องปิดโรงไฟฟ้าลง อันเนื่องมาจากความไม่คุ้มทุนและปัญหาทางสังคม ส่งผลให้แหล่งจ่ายพลังงานลดลงแต่โหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

2.3 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

2.3.1 การเปลี่ยนกำลังลมเป็นกำลังไฟฟ้า

เมื่อมีลมมากระทบกับใบพัดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าทำให้เกิดการหมุนแกนหมุนของกังหันลมจะเชื่อมต่อกับชุดเกียร์เพื่อเพิ่มความเร็วในการหมุน ชุดเกียร์จะเชื่อมต่อกับส่วนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังทางกลให้เป็นกำลังไฟฟ้าและจ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า



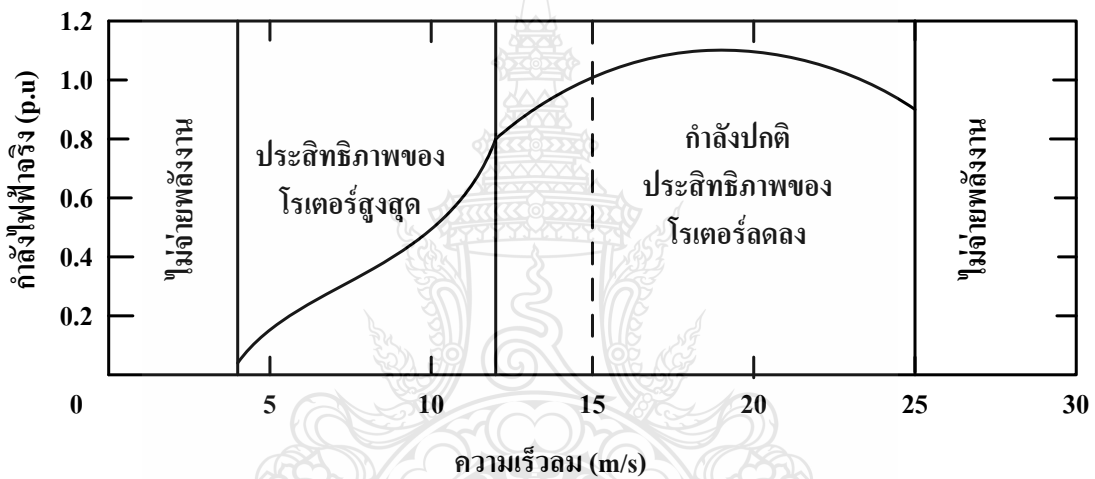
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (P_w) ที่นำมาใช้งานขึ้นอยู่กับลมที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ใบพัดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (A) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \cdot A \cdot V_w^3 C_p \quad (2.14)$$

- เมื่อ
- P_w คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้า
 - ρ_{air} คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศหรือลม
 - A คือ พื้นที่ใบพัดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
 - V_w คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกังหันลม
 - C_p คือ สัมประสิทธิ์ของลม

จากสมการที่ 2.14 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากกำลังลมจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง ที่ความเร็วลมต่ำ 1-2.5 เมตร/วินาที กังหันลมจะยังไม่ทำงาน ในช่วงนี้กังหันลมจะยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ที่ความเร็วลมระหว่าง 2.5-5 เมตร/วินาที กังหันลมเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่า “Cut in wind speed” ที่ความเร็วลมช่วงประมาณ 12-15 เมตร/วินาที เป็นช่วงที่เรียกว่า “Nominal หรือ Rate wind speed” ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตนเอง ค่าความเร็วที่แน่นอนขึ้นอยู่กับความส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดของใบพัดและการออกแบบที่จุดต่ำกว่า Nominal คือ “Maximum rotor efficient” ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับ “Tip speed ratio” ในช่วงความเร็วลมที่สูงกว่า 25 เมตร/วินาที กังหันลมจะหยุดทำงาน เนื่องจากความเร็วลมที่สูงเกินไปจนอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลม



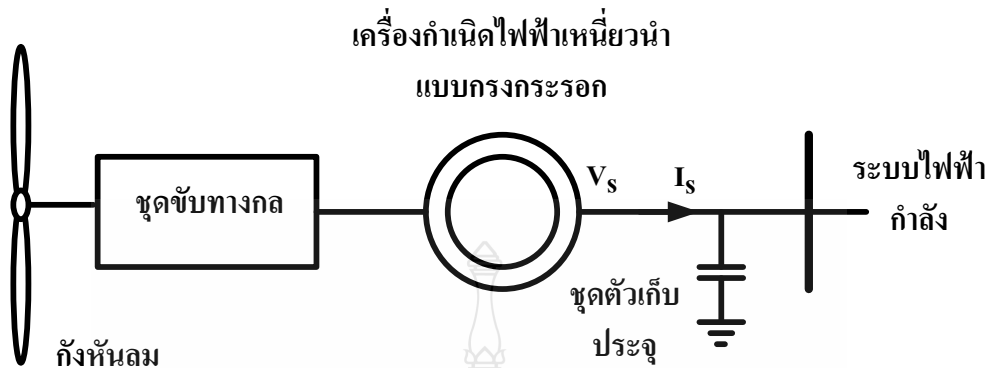
รูปที่ 2.7 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบ Stall limit

2.3.2 เทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดของเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน เนื่องจากเป็นที่นิยมนำมาใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

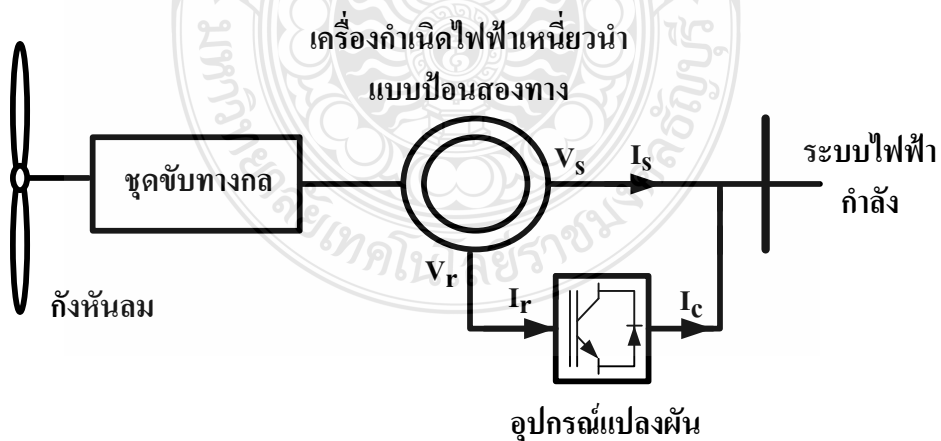
ก. กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก กังหันลมชนิดนี้จะประกอบด้วย ใบพัด กล้องเกียร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ชุดสเตรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.8 ค่าสลลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วลมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมากประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำมักจะดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากสายส่งมาใช้ โดยเฉพาะในระบบสายส่งที่ไม่เสถียรภาพ ซึ่ง

เหตุการณ์นี้สามารถลดการดึงค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เช่น ตัวเก็บประจุ หรือ ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น



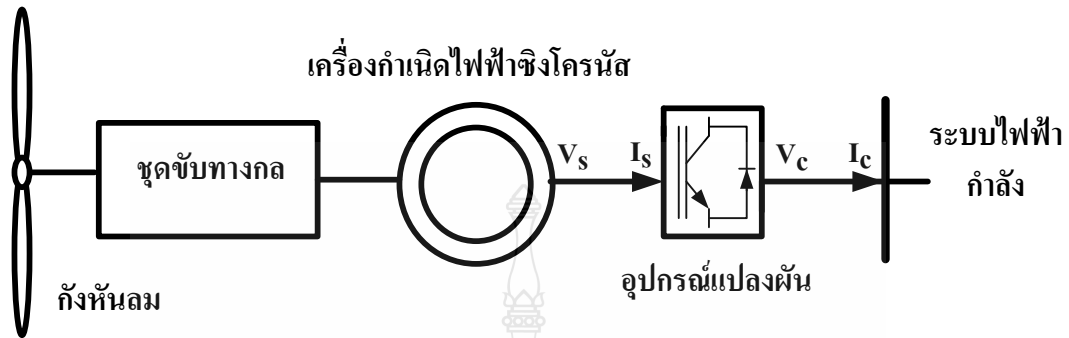
รูปที่ 2.8 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

ข. กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด ก่อ่งเกียร์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง อุปกรณ์แปลงผัน (Converter) ชุดสแตเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.9 กังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมกระแสฟลักซ์ของเครื่องกำเนิด ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้



รูปที่ 2.9 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

ก. กังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรงและมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าปรับปรุงความเร็วรอบและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.10



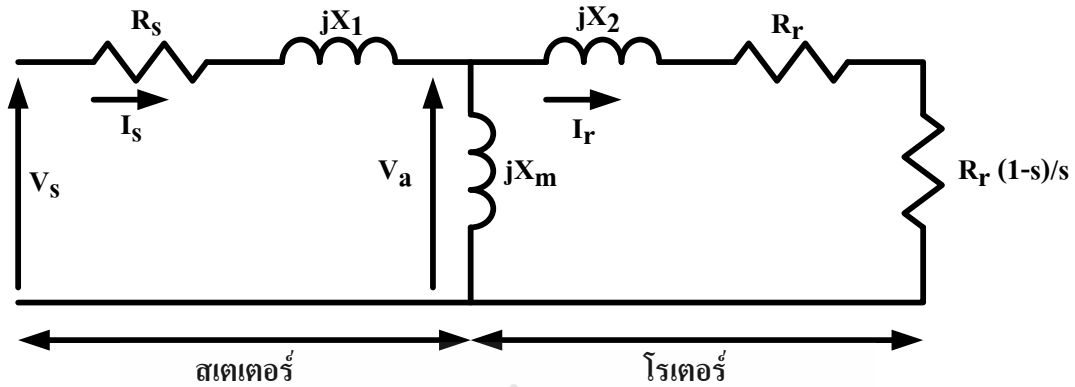
รูปที่ 2.10 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.3.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมผลิตไฟฟ้า

ก. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกสำหรับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกในการศึกษาเสถียรภาพและการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) นิยมให้บัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดชนิดนี้เป็นโหนดบัส เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและมีความต้องการค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ผลของความต้องการค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ ดังสมการที่ 2.15

$$Q \approx V^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + \frac{X}{V^2} P^2 \quad (2.15)$$

เมื่อ Q คือ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้, X_c คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่จ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิด, X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก, X คือผลรวมของค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์, V คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส และ P คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอก

จากรูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอก เมื่อ R_s คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์, R_r คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์, X_1 คือค่ารีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์, X_2 คือค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์, s คือ ค่าสลิป, I_s คือ ค่ากระแสในสเตเตอร์, I_r คือ ค่ากระแสในขดลวดโรเตอร์, V_a คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมค่ารีแอกแตนซ์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก จากวงจรสมมูลทำให้ได้สมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอกดังนี้

$$Z_{in} = R_s + jX_1 + (jX_m // ((\frac{R_r}{s}) + jX_2)) \quad (2.16)$$

$$I_s = \frac{V_s}{Z_{in}} \quad (2.17)$$

$$I_r = \frac{V_a}{Z_2} \quad (2.18)$$

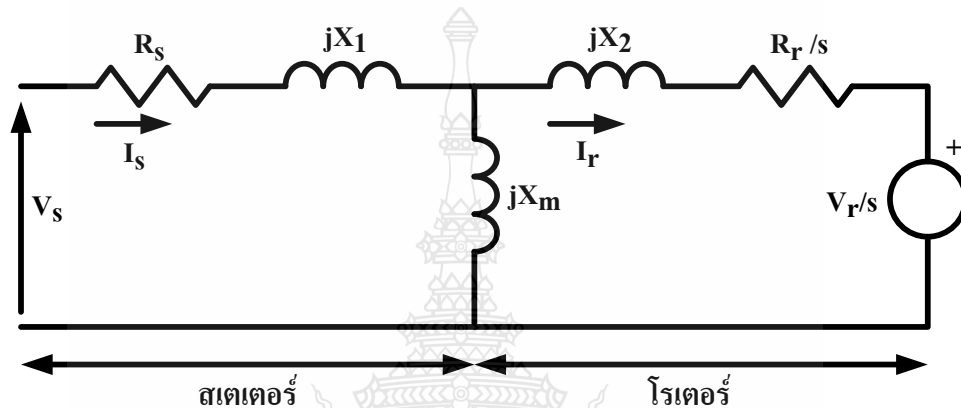
$$V_a = V_s + I_s(R_s + jX_1) \quad (2.19)$$

$$P = 3|V_s||I_s| \cos \theta \quad (2.20)$$

$$Q = 3|V_s||I_s| \sin \theta \quad (2.21)$$

เมื่อ Z_{in} คือ ค่าอิมพีแดนซ์อินพุต และ Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ เราสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ได้ ดังสมการที่ 2.17 และ 2.18 ค่าของแรงดันที่ตกคร่อมค่ารีแอกแตนซ์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหาได้จากสมการที่ 2.19 ส่วนของสมการที่ 2.20 และ 2.21 คือ สมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดจะขึ้นอยู่กับผลของความแตกต่างระหว่างความเร็วโรเตอร์กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน (s)

ข. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า บัซของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางจะมีลักษณะเป็นโหลดบัซ หรือบัซของ แหล่งจ่ายขึ้นอยู่กับ การควบคุม ซึ่งมีการควบคุมอยู่ 2 ลักษณะ คือการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง และการควบคุมแรงดันที่บัซ เมื่อใช้การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังบัซของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีลักษณะ เป็นโหลดบัซแต่ถ้าใช้การควบคุมแรงดันที่บัซ บัซของเครื่องกำเนิดจะมีลักษณะเป็นบัซของแหล่งจ่าย และมีการจำกัดขอบเขตของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

จากรูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางเมื่อ R_s คือค่า ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์, R_r คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์, X_1 คือค่ารีแอกแตนซ์ ของสเตเตอร์, X_2 คือค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์, s คือ ค่าสลลิป, I_s คือ ค่ากระแสในสเตเตอร์, I_r คือ ค่ากระแสในขดลวดโรเตอร์ และ V_r คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกจากโรเตอร์ เพื่อใช้ในการ ควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดที่จะจ่ายออกไปยังระบบไฟฟ้า จากวงจรสมมูลสามารถเขียนสมการ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ได้ ดังนี้

$$V_s = R_s I_s + jX_1 I_s + jX_m (I_s + I_r) \quad (2.22)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + jX_2 I_r + jX_m (I_s + I_r) \quad (2.23)$$

สมการที่ 2.22 และ 2.23 คือสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่ขดลวดสเตเตอร์ และขดลวดโรเตอร์ ตามลำดับ โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จะมีค่าของ สลลิป (s) เข้ามา เกี่ยวข้อง

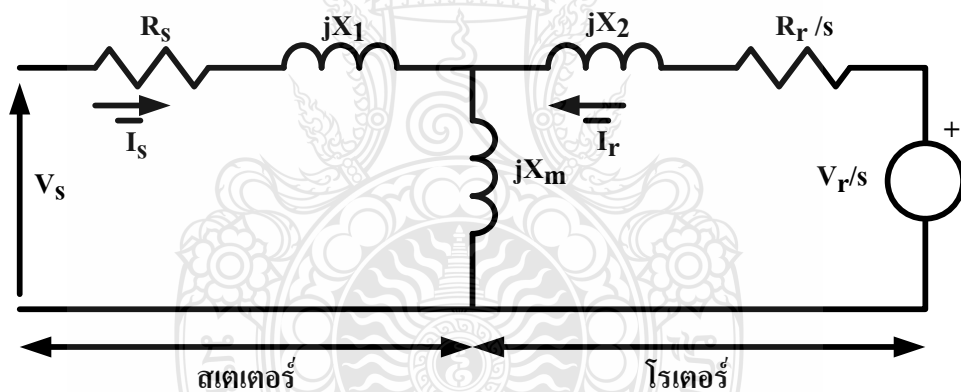
ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดคือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจากสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามสมการที่ 2.24, 2.25 และ 2.26 เมื่อ P_s คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของขดลวดสเตเตอร์, Q_s คือค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของขดลวดสเตเตอร์, P_r คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของขดลวดสเตเตอร์, Q_r คือค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของขดลวดสเตเตอร์ และ P คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ

$$P_s + jQ_s = 3V_s I_s \quad (2.24)$$

$$P_r + jQ_r = 3V_r I_r \quad (2.25)$$

$$P = P_s + P_r \quad (2.26)$$

ในสถานะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะส่งผลต่อตัวแปร 3 ส่วนคือ สลิป (s) ขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์, แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ V_r และมุมระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (α) วงจรสมมูลในสถานะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางในสถานะที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

ค่ากระแสที่สเตเตอร์และโรเตอร์แสดงดังสมการที่ 2.27 และ 2.28

$$\bar{I}_s = I_s (\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1) \quad (2.27)$$

$$\bar{I}_r = I_r (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) \quad (2.28)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สเตเตอร์

$$P_s = \text{Re}[\overline{V_s I_s}^*] \quad (2.29)$$

$$Q_s = \text{Im}[\overline{V_s I_s}^*] \quad (2.30)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โรเตอร์

$$P_r = \text{Re}\left[\frac{V_r}{s}(\cos \alpha + j \sin \alpha)\bar{I}_r^*\right] \quad (2.31)$$

$$Q_r = \text{Im}\left[\frac{V_r}{s}(\cos \alpha + j \sin \alpha)\bar{I}_r^*\right] \quad (2.32)$$

ค่ากำลังทางกลที่เข้าโรเตอร์ P_m

$$P_m = -3\left[(P_s - I_s^2 R_s) + (sP_r - I_r^2 R_r)\right] \quad (2.33)$$

หรือ

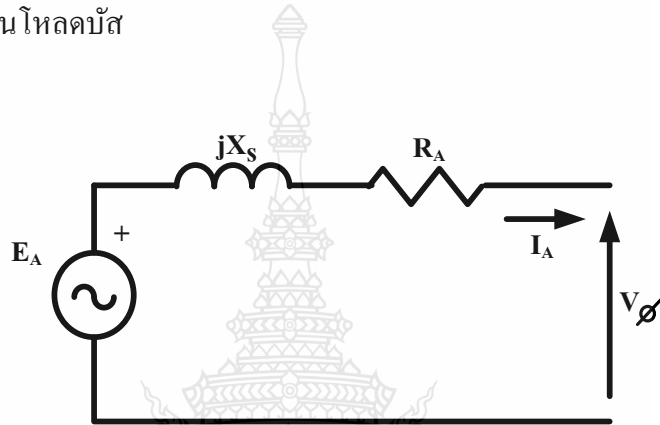
$$\begin{aligned} P_m = & 3 \frac{(1-s)X_m^2}{D} \left[\frac{V_r^2}{s^2} R_s - V_s^2 \frac{R_r}{s} \right] \\ & + 3(1-s)X_m \frac{V_s V_r}{sD} \left[\cos \alpha \left(\frac{R_r}{s} (X_1 + X_m) - R_s (X_2 + X_m) \right) \right. \\ & \left. + \sin \alpha \left(\frac{R_s R_r}{s} + X_1 X_2 + X_m (X_1 + X_2) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.34)$$

แรงบิดของสนามแม่เหล็กหมุน T_e

$$\begin{aligned} T_e = & -\frac{3}{\omega} \left[\frac{X_m^2 V_s^2}{Ds^2} R_s - \frac{X_m^2}{D} V_s^2 \frac{R_r}{s} \right] \\ & - \frac{3}{\omega} \frac{V_s V_r}{sD} X_m \left[\cos \alpha \left(\frac{R_r}{s} (X_1 + X_m) - R_s (X_2 + X_m) \right) \right. \\ & \left. + \sin \alpha \left(\frac{R_s R_r}{s} + X_1 X_2 + X_m (X_1 + X_2) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ 2.34 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ และค่าตัวประกอบกำลังสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ โดยใช้อุปกรณ์แปลงผันเป็นอุปกรณ์ควบคุม

ค. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบเชื่อมต่อโดยตรง การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบเชื่อมต่อโดยตรงมีลักษณะเป็น บัสของแหล่งจ่าย ซึ่งจะมีการกำหนดจำกัดขอบเขตค่าของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟหรือไม่มีก็ได้ ถ้ามีการกำหนดขอบเขตเมื่อค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเท่ากับค่าของขอบเขตที่กำหนดไว้บัสของเครื่องกำเนิดจะเปลี่ยนจากบัสของแหล่งจ่ายไปเป็นโหนดบัส



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบเชื่อมต่อโดยตรง

จากรูปที่ 2.14 เมื่อ V_ϕ คือ แรงดันต่อเฟสที่จุดต่อ, E_A คือค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเครื่องกำเนิด, X_s คือ ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์, I_A คือกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ และ R_A คือค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ เราสามารถหาค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.36, 2.37 และ 2.38

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (2.36)$$

$$P = 3V_\phi I_A \cos \phi \quad (2.37)$$

$$Q = 3V_\phi I_A \sin \phi \quad (2.38)$$

สมการที่ 2.36 คือสมการแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายให้กับระบบ สมการที่ 2.37 และ 2.38 คือค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายให้กับระบบ

2.4 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นตามคำจำกัดความของมาตรฐาน IEEE คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และอุปกรณ์ควบคุมอยู่กับที่ เชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเพิ่มความสามารถและสมรรถนะในการจ่ายกำลังไฟฟ้า

จากนิยามเราสามารถกำหนดวัตถุประสงค์ในการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ได้ 2 กรณี คือ

1. เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ
2. เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

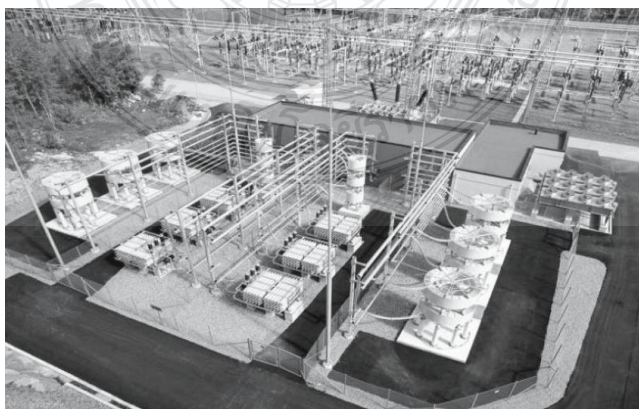
ในปัจจุบันอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นแบ่งออกตามลักษณะของการเชื่อมต่อกับระบบและการควบคุมนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน [29]

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานกับระบบ ได้แก่ Static Var Compensator และ Static Synchronous Compensator

2.4.1 Static Var Compensator (SVC)

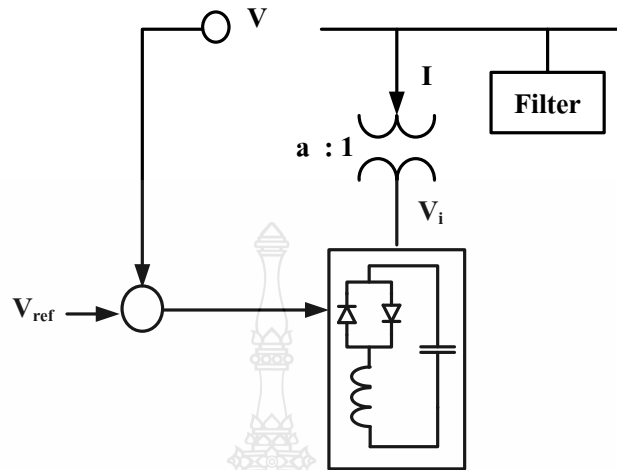
SVC ถูกใช้งานเป็นครั้งแรกในเตาหลอมไฟฟ้าเมื่อปี 1979 และถูกนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ในปี 1979 ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา SVC ได้ถูกนำมาใช้งานกันเพิ่มมากขึ้นและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน

SVC จะมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายและโหลดทางไฟฟ้าเพราะสามารถจ่ายและรับค่ากำลังไฟฟัรีแอกทีฟจากระบบได้ และจะช่วยในการรักษาระดับของแรงดันในระบบเมื่อแรงดันที่บัลลดลงหรือเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบส่งจ่าย SVC จะประกอบไปด้วย สวิตช์ตัดต่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงานและ สวิตช์ตัดต่อตัวเหนี่ยวนำ ต่อขนานเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการควบคุมค่ากำลังไฟฟัรีแอกทีฟ

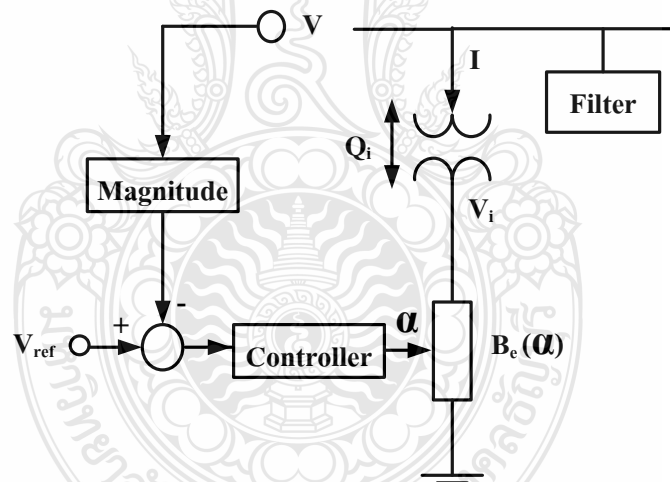


รูปที่ 2.15 ลักษณะของการติดตั้ง SVC

วงจรสมมูลและแบบจำลองการควบคุมเสถียรภาพของ SVC แสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

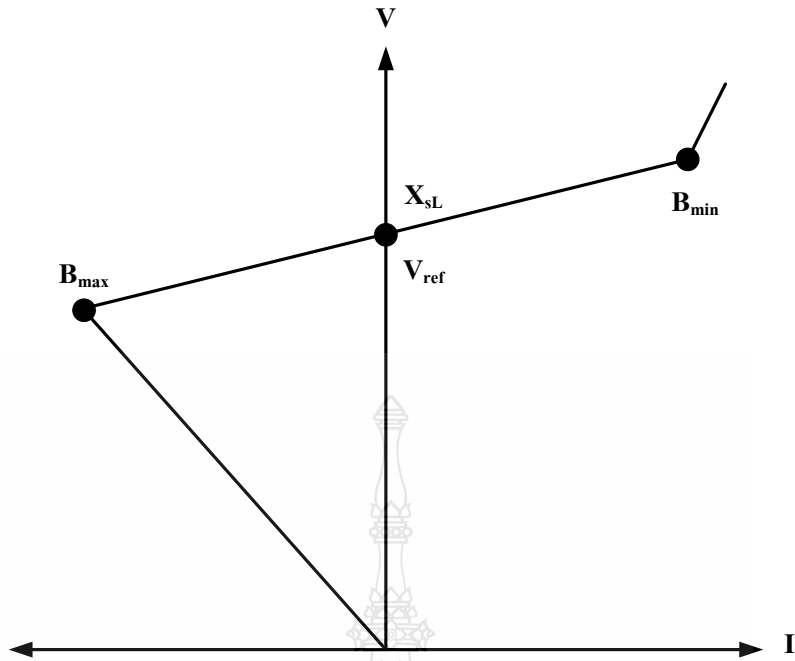


รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของ SVC



รูปที่ 2.17 แบบจำลองของ SVC

SVC สามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานได้ดังรูปที่ 2.16 โดย SVC จะสามารถควบคุมแรงดันที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลังได้ จากรูปที่ 2.17 SVC จะใช้การควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์การรับหรือจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ มุมการจุดชนวนนี้จะอยู่ในช่วง $90^\circ \sim 180^\circ$ คุณลักษณะเฉพาะของ SVC แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ SVC

รูปที่ 2.18 การทำงานของ SVC ขึ้นอยู่กับแรงดันที่บัส ขอบเขตของค่าสูงสุดและต่ำสุดของ SVC ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ที่จุด B_{max} คือตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเก็บประจุทำงานจ่ายค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟตามขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ และที่จุด B_{min} คือตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเหนี่ยวนำทำงานรับค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบตามพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ

ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังส่วนประกอบในการควบคุมของ SVC มีความสำคัญมากในแบบจำลองของ SVC ซึ่งเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนั้นสมการ 2.39 และ 2.40

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, V, V_{ref}) \quad (2.39)$$

$$0 = \underbrace{\begin{bmatrix} B_e - \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L/X_C)}{\pi X_L} \\ I - V_i B_e \\ Q_i - V_i^2 B_e \end{bmatrix}}_{g(\alpha(V, V_i, I, Q, B_e))} \quad (2.40)$$

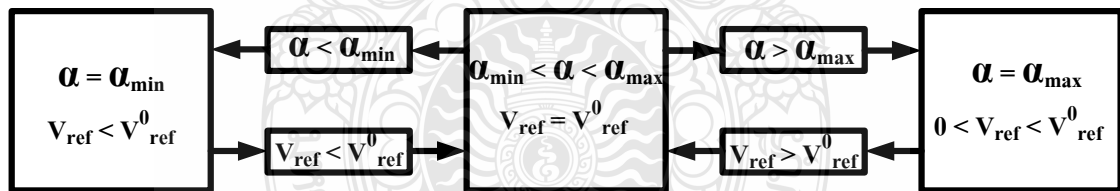
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าจะต้องกำหนดค่าให้ชัดเจนในรูปที่ 2.17 โดยที่ X_c และ $f(\cdot)$ ยังคงอยู่ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ ซึ่งจะไม่มีการกำหนดขอบเขตของสมการยกเว้นมุมการจูดชนวน (α), โดยเฉพาะกระแส (I), การควบคุมแรงดัน (V) และ แรงดัน SVC (V_r) เช่นเดียวกันกับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

จากสมการที่ 2.39 และ 2.40 แบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัวสามารถเขียนแทนได้ดังสมการที่ 2.41

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL}I \\ g(\alpha(V, V_i, I, Q_i, B_c)) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

เราสามารถใช้อุปกรณ์การไหลของกำลังไฟฟ้าในการหาขอบเขตที่เหมาะสมของมุมจูดชนวนจากสมการที่ 2.40 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั้สเซียบแดนซ์ (B_c) และมุมจูดชนวนไทรสเตอร์ (α), กระแส (I) และ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_i)

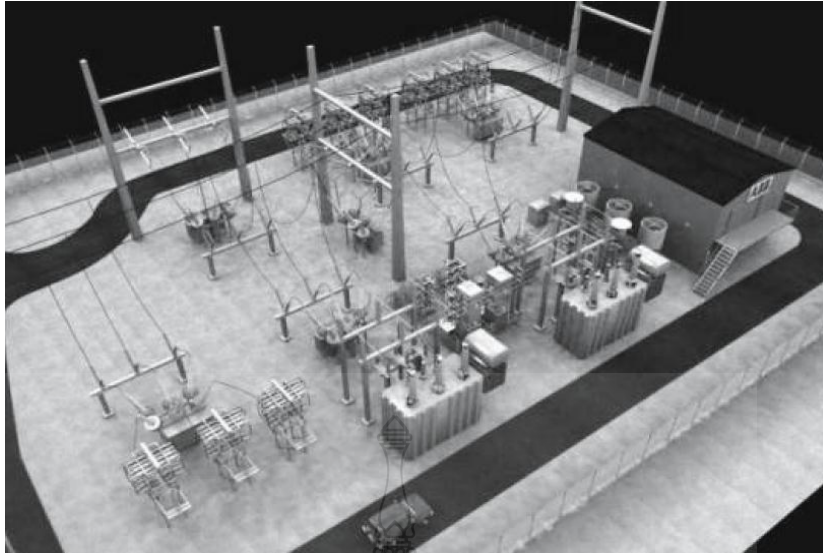
ขอบเขตของการควบคุม SVC คือ การควบคุมค่าของมุมจูดชนวนไทรสเตอร์ซึ่งอยู่ในช่วง $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$ เมื่อ α_m และ α_M คือ มุมจูดชนวนน้อยที่สุดและมุมจูดชนวนมากที่สุดตามลำดับ ถ้าเราไม่รู้วิธีหาขอบเขตมุมจูดชนวน ให้กำหนดมุมจูดชนวนให้คงที่และเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} วิธีการของการจัดการควบคุมขอบเขตแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ SVC ในสภาวะคงตัว

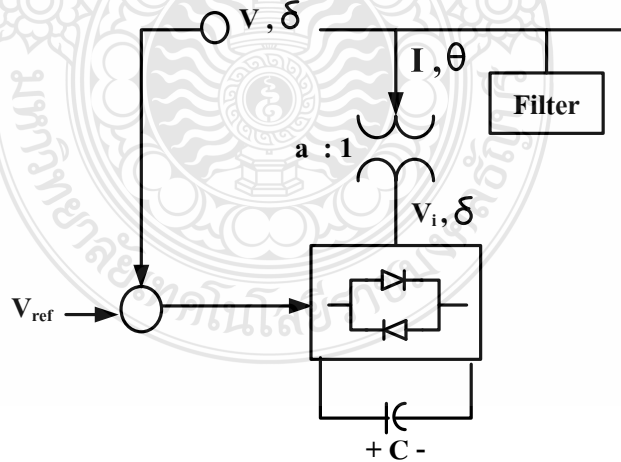
2.4.2 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

ในปี 1999 SVC ถูกนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า แล้วเรียกกันว่า“STATCOM” มีลักษณะคล้ายกันกับ ซิงโครไนส์คอนเดนเซอร์แต่เป็นการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และมีหม้อแปลงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กับ บัส STATCOM สามารถควบคุมแรงดันที่บัสโดยการควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบกำลังไฟฟ้า

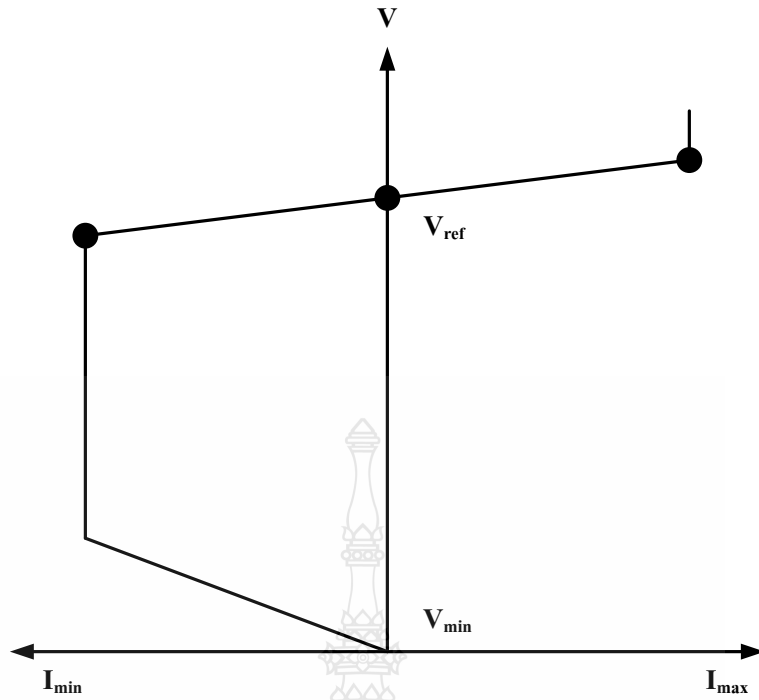


รูปที่ 2.20 ลักษณะของการติดตั้ง STATCOM

วงจรสมมูลของ STATCOM แสดงในรูปที่ 2.21 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันจากวงจรแปลงผัน ซึ่งวงจรแปลงผันจะทำหน้าที่ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีการควบคุมระดับความถี่เท่ากับระบบที่เชื่อมต่อ และชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามความต้องการของระบบ จากรูปจะตัดการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออกจากแผนผังของการควบคุมจะใช้การควบคุมมอดูเลต

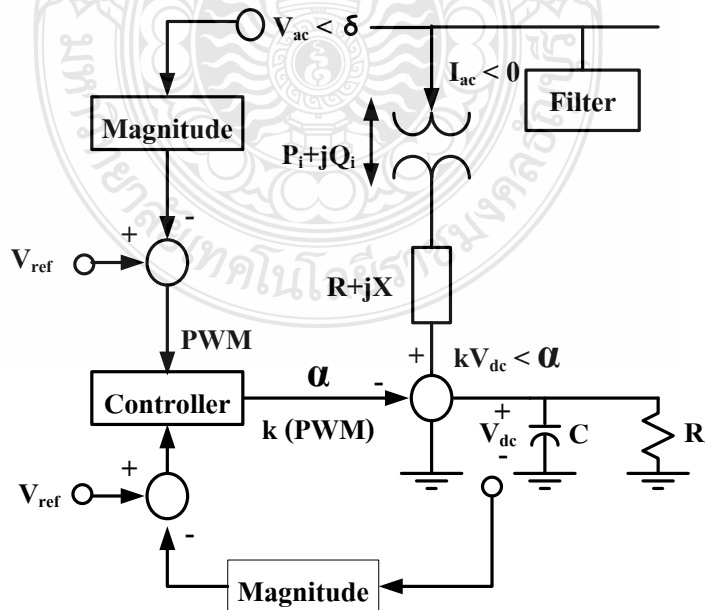


รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลของ STATCOM



รูปที่ 2.22 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ STATCOM

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



รูปที่ 2.23 แบบจำลองของ STATCOM

แบบจำลองของ STATCOM มีข้อจำกัดระหว่างการควบคุมและการทำงาน ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมให้แบบจำลองของ STATCOM มีลักษณะเดียวกับเครื่องจักรกลเชิงโรคนัส สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลอง STATCOM ในรูปเปอร์ยูนิต คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dc,ref}) \quad (2.42)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{R_c C} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (2.43)$$

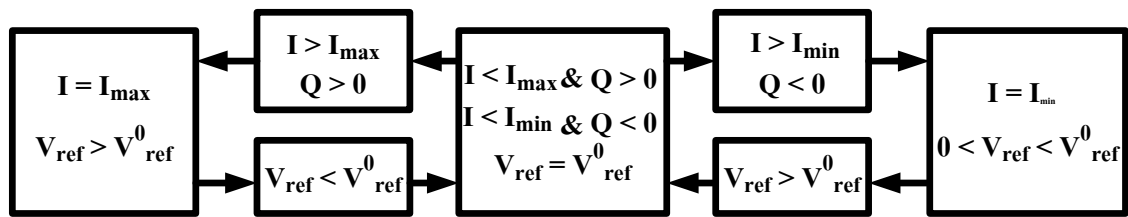
$$0 = \begin{bmatrix} P_i - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q_i - VI \sin(\delta - \theta) \\ P_i - V^2 G_c + kV_{dc} V G_c \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} V B_e \sin(\delta - \theta) \\ Q_i + V^2 B_e + kV_{dc} V B_e \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} V G_c \sin(\delta - \theta) \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$g(\alpha(k, V, V_{dc}, \delta, \theta, P_i, Q_i))$

เมื่อ m คือค่ามอดูเลชันของอุปกรณ์แปลงผัน และ X_c และ $f(\cdot)$ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ แบบจำลองของ STATCOM จากสมการที่ 2.42 – 2.44 จะได้สามารถเขียนแทนได้

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} \pm X_{SL} I \\ V_{dc} - V_{dc,ref} \\ P_i - V_{dc}^2 / R_c - RI^2 \\ g(\alpha(k, V, V_{dc}, \delta, \theta, P_i, Q_i)) \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

เราสามารถใช้อุปกรณ์การไหลของกำลังไฟฟ้าในการหาการจำกัดขอบเขตที่เหมาะสม, การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบที่มี STATCOM ในสภาวะคงตัว การจำกัดขอบเขตกระแสของแบบจำลองในสภาวะคงตัวที่ได้นั้น อัตราส่วนของการมอดูเลชัน k หรือ มุมเฟสของแรงดันสามารถทำงานรวมกันได้ ในแบบจำลองที่นำเสนอในรูปแบบที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองของ STATCOM ในสภาวะคงตัว

2.5 สรุป

ในการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องศึกษารายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับ การเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งจะศึกษาในส่วนของนิยามและความสำคัญของเสถียรภาพแรงดัน, การวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง และการเกิดสภาวะแรงดันพังทลาย การศึกษาเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะศึกษาในส่วนของวงจรสมมูล และการเกิดพลังงานไฟฟ้าในสภาวะคงตัว ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมแต่ละชนิด และการศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นทั้ง 2 ชนิดคือ SVC และ STATCOM ในส่วนของโครงสร้างและการทำงานในสภาวะคงตัว

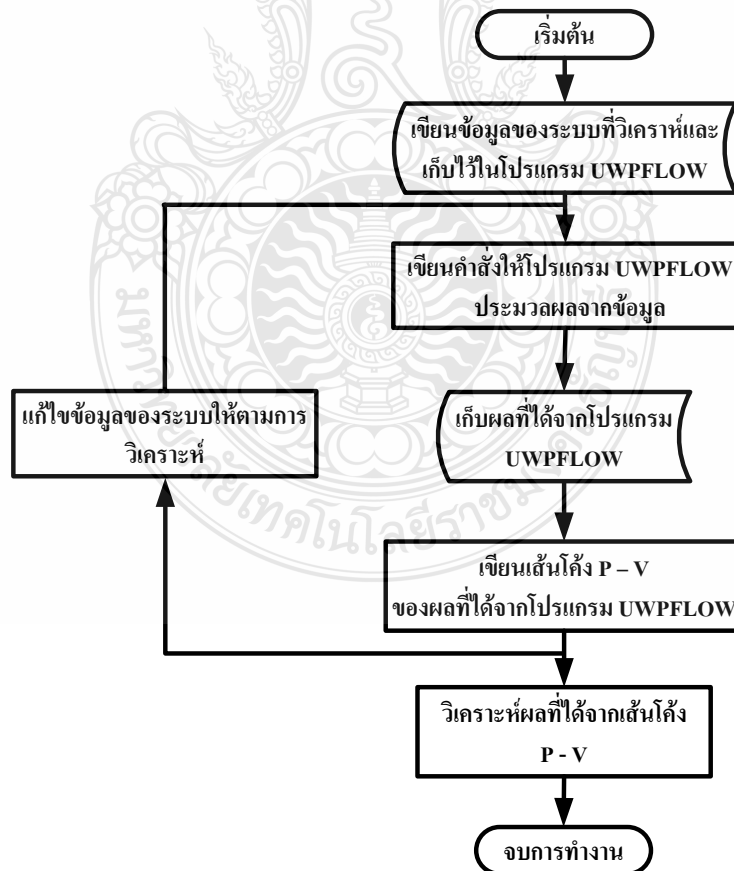
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม UWPFLOW เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ เพื่อหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า และการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น คือ SVC และ STATCOM ซึ่งได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม UWPFLOW เป็นเครื่องมือในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เพื่อวิเคราะห์ด้านเสถียรภาพแรงดันในระบบ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้



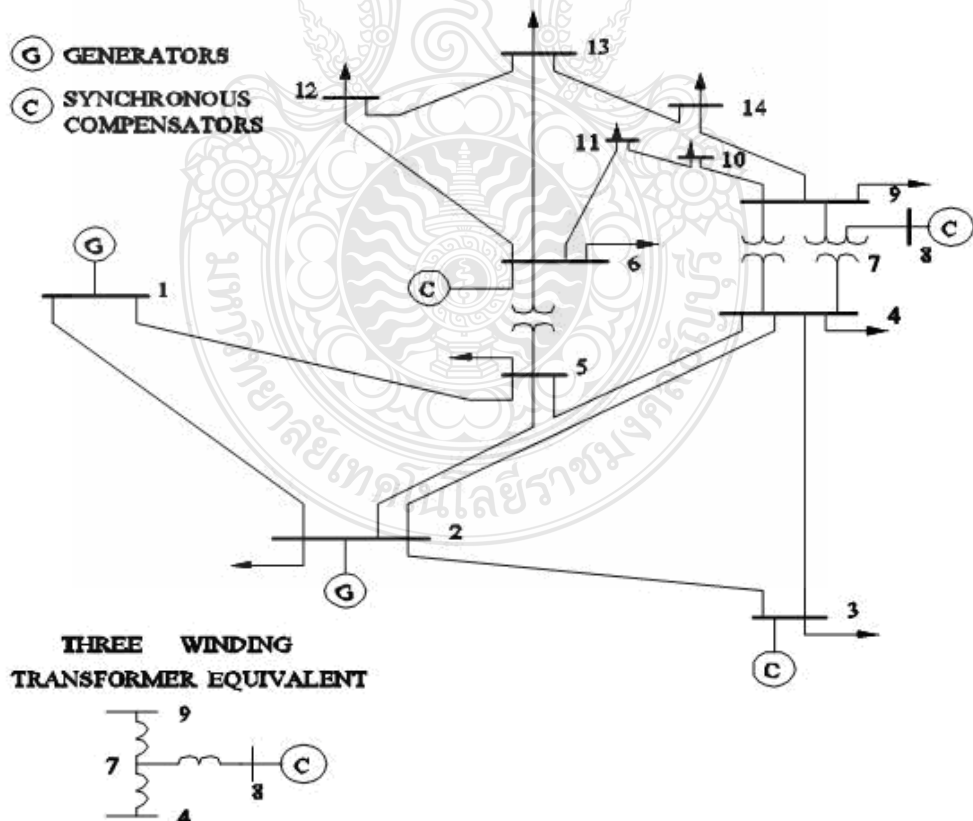
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม UWPFLOW

รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม UWPFLOW เพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันในระบบ โดยการหาค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบในกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

1. การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่นำมาใช้ในงานวิจัย
2. การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ และการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น
3. การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วไม่คงที่ และการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

3.2 ระบบ IEEE 14 Bus

ระบบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือระบบของ IEEE 14 Bus โดยการนำข้อมูลต่างๆของระบบมาใช้ในโปรแกรม UWPFLOW เพื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง หาค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะการพังทลาย และหาบัสที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุด



รูปที่ 3.2 ระบบของ IEEE 14 Bus ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 3.2 แสดงระบบของ IEEE 14 Bus ที่นำมาใช้ในงานวิจัยโดยระบบของ IEEE 14 Bus จะประกอบด้วย เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรตัส 5 เครื่อง ได้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส 2 เครื่องและอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าเชิงโรตัส 3 เครื่อง มีสายส่ง 20 สาย และมีบัส 14 บัส มีโหลดทั้งหมด 259 MW และ 81.4 MVAR

3.3 ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกักเก็บผลผลิตไฟฟ้า

หัวข้อนี้จะการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ IEEE 14 Bus เมื่อมีการเชื่อมโยงกับกักเก็บผลผลิตไฟฟ้า 2 ชนิดคือ กักเก็บผลผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และกักเก็บผลผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วไม่คงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง โรงไฟฟ้ากักเก็บลมที่ใช้ในกรณีศึกษามีขนาด 10 MW

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกของกักเก็บผลผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.16 – 2.21 ซึ่งค่าตัวแปร ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้

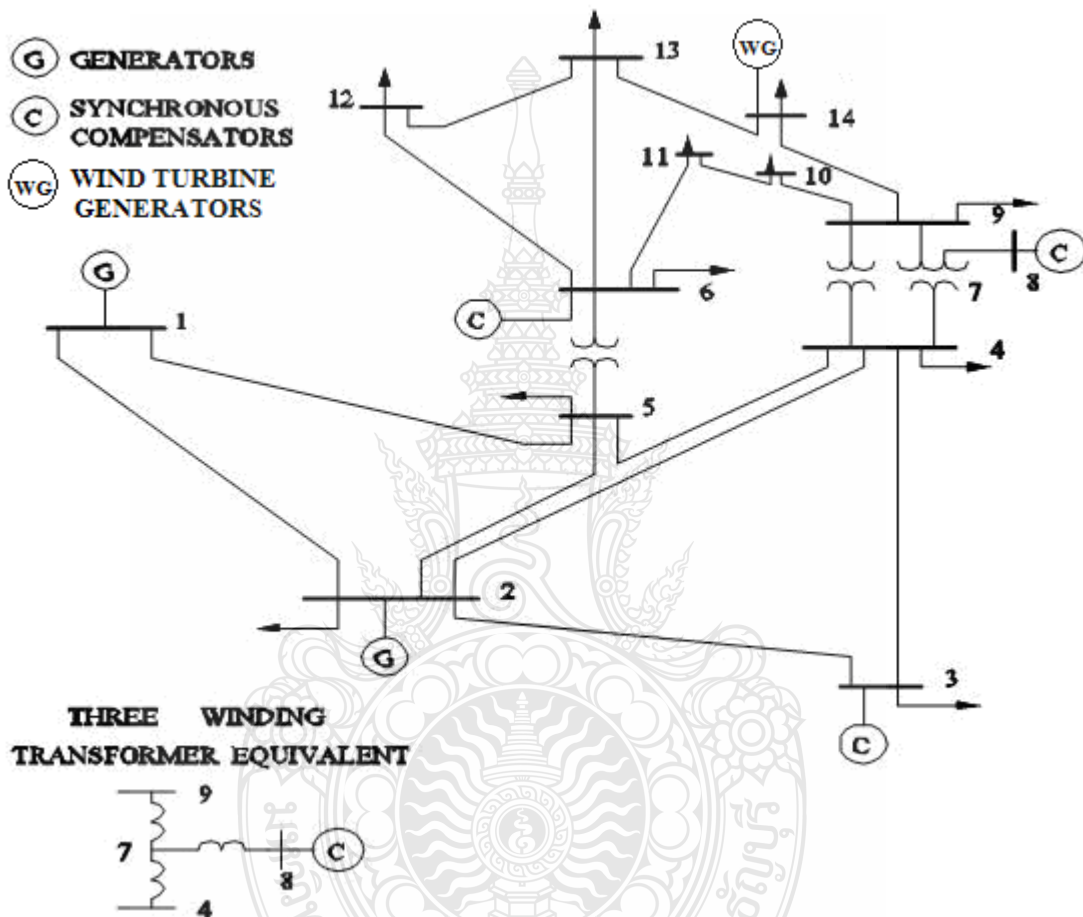
- ค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ ($R_s = 0.0048$ p.u)
- ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ($R_r = 0.00549$ p.u)
- ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ ($X_1 = 0.09241$ p.u)
- ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ ($X_2 = 0.09955$ p.u)
- ค่าความเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดฟลัก ($X_m = 3.95327$ p.u)

ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกแต่ละเครื่องจากการคำนวณ คือ 1.0050 p.u มีค่าตัวประกอบกำลัง เท่ากับ 0.8935 ดังนั้น โรงไฟฟ้ากักเก็บผลผลิตไฟฟ้าขนาด 10 MW มีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 5.025 p.u

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้มีขนาดเท่ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเพื่อไม่ให้เกิดความแตกต่างระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองชนิด

3.3.1 การตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในระบบ

ในหัวข้อนี้จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมที่ผลิตได้มีค่าตามพิกัด 10 MW และทดสอบโดยติดตั้งการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัส (บัสที่ 4, บัสที่ 5, บัสที่ 7, บัสที่ 9 บัสที่ 10, บัสที่ 11, บัสที่ 12, 13 และ บัสที่ 14) ทีละบัส เพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด



รูปที่ 3.3 ระบบ IEEE 14 Bus เมื่อเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 14

วิธีการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัสโดยการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจริงขนาด 10 MW ในส่วนของ P_G และเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ Q_L ค่ากำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟจะมีค่าเท่ากับ 5.025 MVAR แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

IEEE 14 BUS SYSTEM DATA								
Bus No	Bus Code	Voltage kV	Load		Generator			Voltage p.u
			MW	MVAR	MW	Q_{max}	Q_{min}	
1	1	69	0	0	232.6	990	-989	1.06
2	2	69	21.7	12.7	40	50	-40	1.045
3	2	69	94.2	19	0	40	0	1.01
4	0	69	47.8	4	0	0	0	0
5	0	69	7.6	1.6	0	0	0	0
6	2	13.8	11.2	7.5	0	24	-6	1.07
7	0	13.8	0	0	0	0	0	0
8	2	18	0	0	0	24	-6	1.09
9	0	13.8	29.5	16.6	0	0	0	0
10	0	13.8	9	5.8	0	0	0	0
11	0	13.8	3.5	1.8	0	0	0	0
12	0	13.8	6.1	1.6	0	0	0	0
13	0	13.8	13.5	5.8	0	0	0	0
14	0	13.8	14.9	10.025	10	0	0	0

* Bus code 1 = Slack bus , Bus code 2 = PV Bus , Bus code 0 = PQ Bus

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของระบบที่เชื่อมต่อกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าคือ บัสที่ 14 ซึ่งมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 10 MW จากคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดชนิดนี้จะมีการดูดกลืนค่ากำลังไฟรีแอกทีฟจากระบบ ชนิดของบัสจึงมีลักษณะเป็นโหลดบัส และโหลดของกำลังไฟรีแอกทีฟเพิ่มขึ้นอีก 5.025 MVAR

สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วไม่คงที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 MW ($P_G=10$ MW) และมีขอบเขตของค่ากำลังไฟรีแอกทีฟ มีค่าเท่ากับ ± 5.025 MVAR ($Q_{MIN}=-5.025$ MVAR, $Q_{MAX}=5.025$ MVAR) ข้อมูลแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดหนึ่งยวนาแบบป้อนสองทาง

IEEE 14 BUS SYSTEM DATA								
Bus No	Bus Code	Voltage kV	Load		Generator			Voltage p.u
			MW	MVAR	MW	Q _{max}	Q _{min}	
1	1	69	0	0	232.6	990	-989	1.06
2	2	69	21.7	12.7	40	50	-40	1.045
3	2	69	94.2	19	0	40	0	1.01
4	0	69	47.8	4	0	0	0	0
5	0	69	7.6	1.6	0	0	0	0
6	2	13.8	11.2	7.5	0	24	-6	1.07
7	0	13.8	0	0	0	0	0	0
8	2	18	0	0	0	24	-6	1.09
9	0	13.8	29.5	16.6	0	0	0	0
10	0	13.8	9	5.8	0	0	0	0
11	0	13.8	3.5	1.8	0	0	0	0
12	0	13.8	6.1	1.6	0	0	0	0
13	0	13.8	13.5	5.8	0	0	0	0
14	2	13.8	14.9	5	10	5.025	-5.025	0

* Bus code 1 = Slack bus , Bus code 2 = PV Bus , Bus code 0 = PQ Bus

จากตารางที่ 3.2 ข้อมูลของระบบที่เชื่อมต่อกับข้อมูลของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดหนึ่งยวนาแบบป้อนสองทาง ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าคือ บัสที่ 14 ซึ่งมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 10 MW จากคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดชนิดนี้เมื่อมีการควบคุมระดับของแรงดันชนิดของบัสจะมีลักษณะเป็นบัสของแหล่งจ่าย และมีขอบเขตของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ± 5.025 MVAR

3.3.2 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ความเร็วลมระดับต่างๆ

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันเปลี่ยนตามความเร็วลม ดังรูปที่ 3.6 ในการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบที่ความเร็วลม ตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าในรูปที่ 3.4 ให้ค่ากำลังไฟฟ้า เท่ากับ 10 MW

จากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่างสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั้งสองชนิดได้ดังตารางที่ 3.3

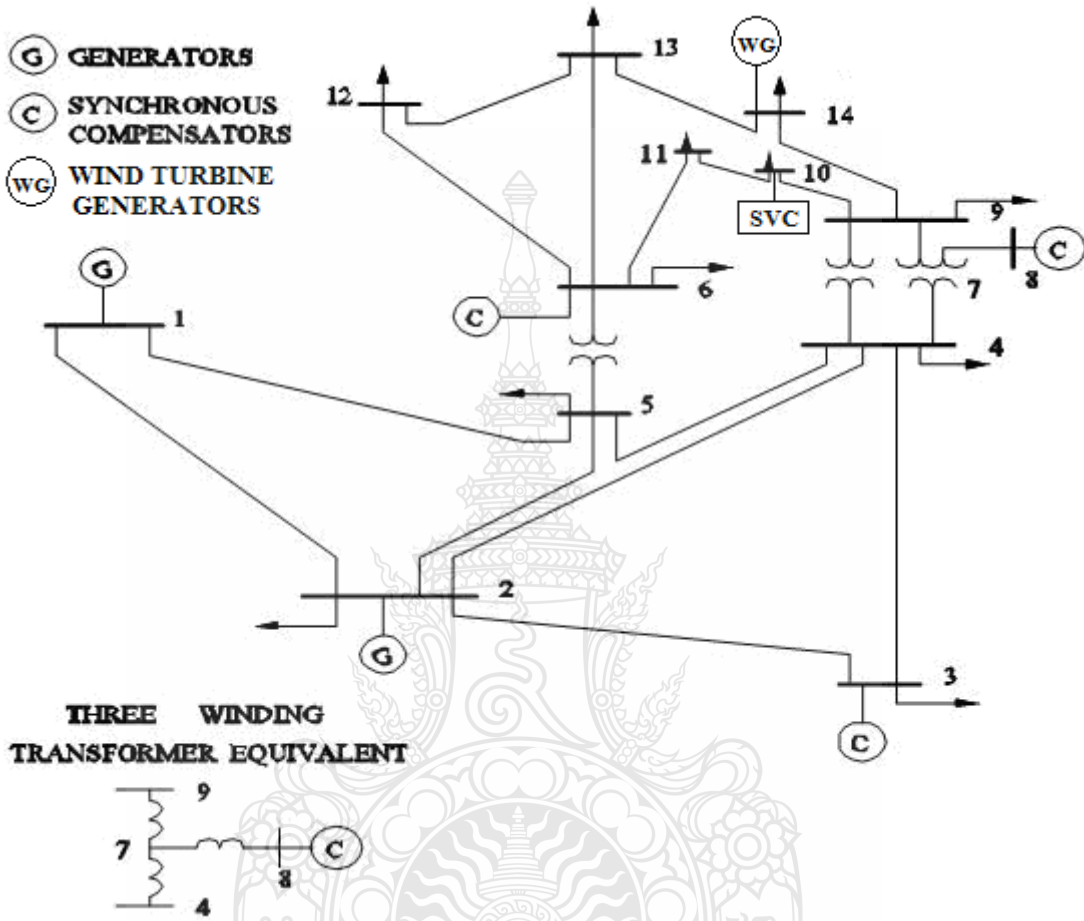
ตารางที่ 3.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVAR)
4	0.4	0.201
5	0.8	0.402
6	1.4	0.703
7	2.2	1.106
8	3.3	1.658
9	4.8	2.412
10	6.7	3.384
11	8.1	4.070
12	8.8	4.420
13	9.3	4.670
14	9.7	4.880
15	10	5.025

3.3.3 การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น เป็นอุปกรณ์ปรับปรุงเสถียรภาพในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบ งานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั้งสองชนิด โดยการหาตำแหน่งในการติดตั้งและเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น 2 ชนิด คือ SVC และ STATCOM ขนาดพิกัด 150 MVA

ก. SVC ในหัวข้อนี้จะใช้ SVC ขนาด 150 MVA ทดสอบโดยติดตั้งการติดตั้งกักหนั
 ลมผลิตไฟฟ้าที่โหนดบัส (บัสที่ 4, บัสที่ 5, บัสที่ 7, บัสที่ 9 บัสที่ 10, บัสที่ 11, บัสที่ 12, 13 และ บัสที่
 14) ที่ละบัส เพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้ง SVC ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด



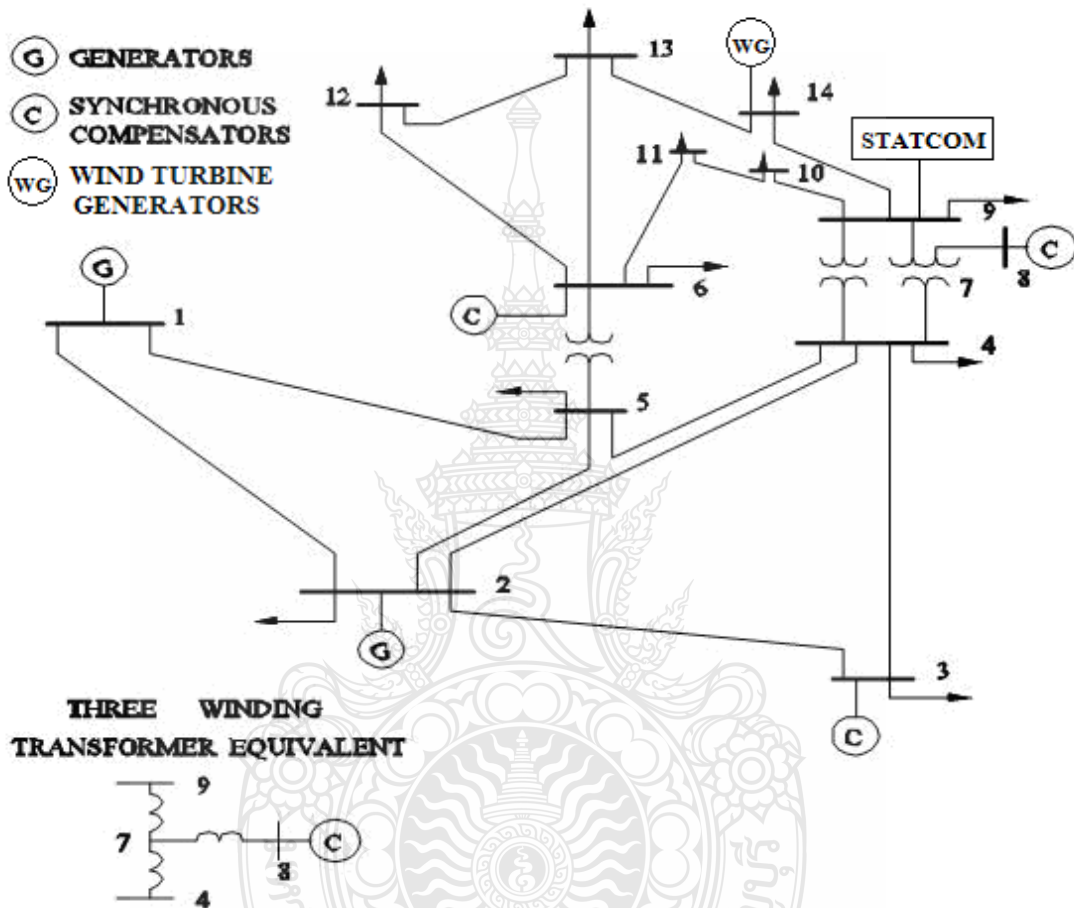
รูปที่ 3.4 การติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.4 แสดงการติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่บัสที่ 10 ในระบบที่เชื่อมโยง
 กับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 10 MW ข้อมูลของ SVC แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลของ SVC ขนาด 150 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 10

SVC DATA						
Bus No	kV	X_c	X_L	α_{min}	α_{max}	MVA
10	13.8	1.1708	0.4925	90	175	150

ข. STATCOM ในหัวข้อนี้จะใช้ STATCOM ขนาด 150 MVA ทดสอบโดยติดตั้ง การติดตั้งกักหน้ลผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัส (บัสที่ 4, บัสที่ 5, บัสที่ 7, บัสที่ 9 บัสที่ 10, บัสที่ 11, บัสที่ 12, 13 และ บัสที่ 14) ทีละบัส เพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้ง STATCOM ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แรงดันไฟฟ้ามากที่สุด



รูปที่ 3.5 แสดงการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบที่เชื่อมโยงกับกักหน้ลผลิตไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.5 แสดงการติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA ทีบัสที่ 9 ในระบบที่ ติดตั้งกักหน้ลผลิตไฟฟ้าขนาด 10 MW ข้อมูลของ STATCOM แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลของ STATCOM ขนาด 150 MVA ที่ติดตั้งในตำแหน่งของบัสที่ 9

STATCOM DATA							
Bus No	kV	R	X	G_c	I_c	I_L	MVA
9	13.8	0	0.145	0.0017	1	1	150

3.4 สรุป

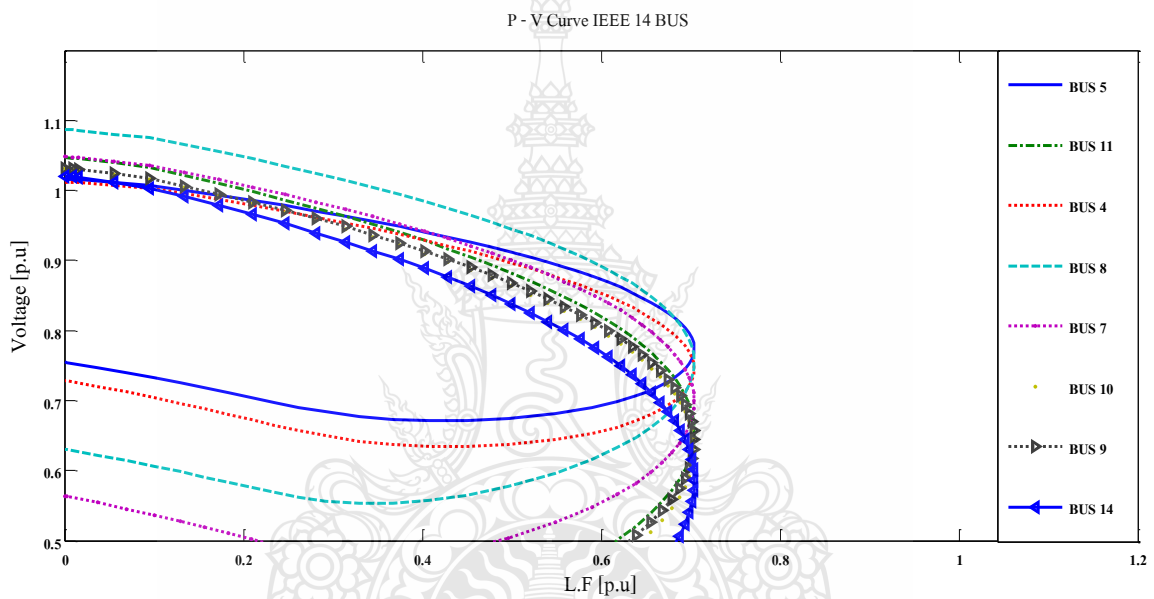
งานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม UWPFLOW เป็นเครื่องมือในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เพื่อศึกษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้ระบบของ IEEE 14 บัสเป็นระบบอ้างอิงที่นำมาใช้ในงานวิจัย ในการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบก่อนติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า, การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่มีการเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น และ การศึกษาเสถียรภาพของระบบที่มีการเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น โดยกำหนดให้ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย มีขนาดเท่ากับ 10 MW และขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (SVC และ STATCOM) มีขนาดเท่ากับ 150 MVA



บทที่ 4

ผลการทดลอง

ระบบที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระบบของ IEEE 14 Bus โดยการนำข้อมูลต่างๆของระบบมาใช้ในโปรแกรม UWPFLOW มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เพื่อค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะการพังทลายและหาบัสที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุด



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบ IEEE 14 Bus

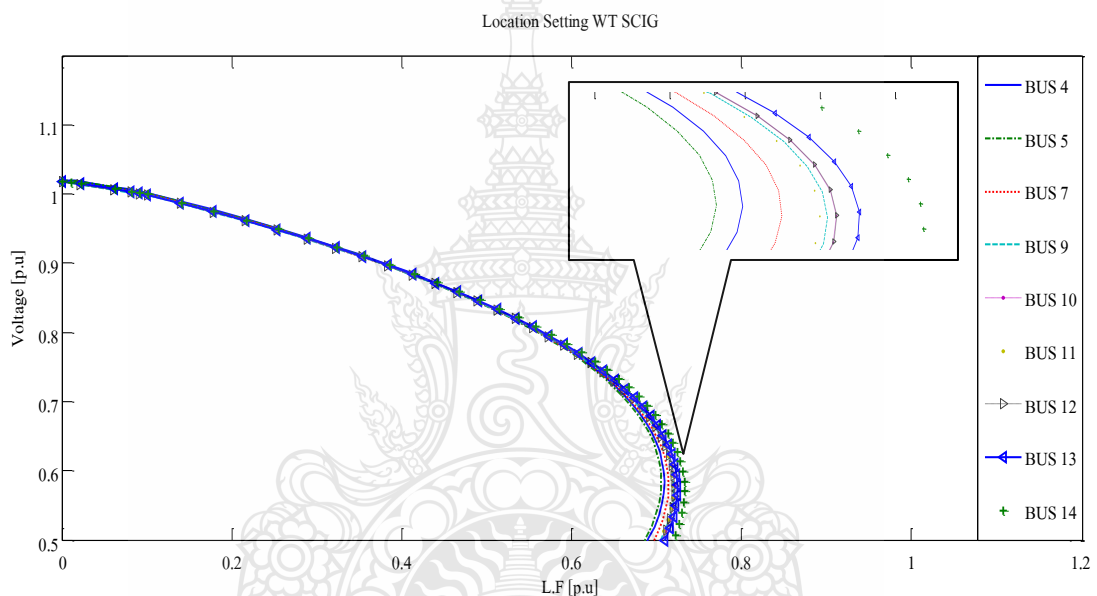
ระบบของ IEEE 14 Bus เป็นระบบอ้างอิงที่นำมาใช้สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งผลที่ได้จากระบบอ้างอิง IEEE 14 Bus แสดงในรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง พบว่าค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ มีค่าเท่ากับ 0.70398 p.u บัสที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุด คือบัสที่ 14

4.1 เสถียรภาพแรงดันเมื่อเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกสำหรับวิทยานิพนธ์นี้มีขนาด 10 MW ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 5.025 MVAR ผลของวิทยานิพนธ์มีดังนี้

4.1.1 ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะทดลองติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัส ได้แก่ บัสที่ 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 และ 14 แล้วพิจารณาว่าตำแหน่งใดมีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบในแต่ละบัสสูงที่สุด



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่โหลดบัส

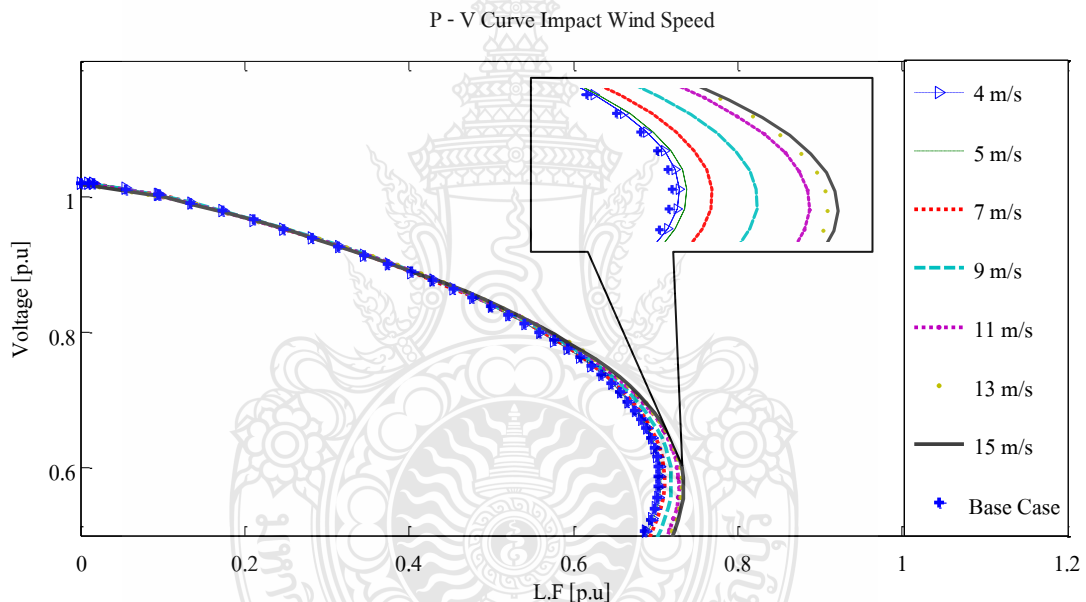
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่โหลดบัส ขนาด 10 MW ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่ากับ 5.025 MVAR ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบในตำแหน่งต่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า คือ บัสที่ 14 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ 0.73381 p.u

ตารางที่ 4.1 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

Location	บัสที่ 4	บัสที่ 5	บัสที่ 7	บัสที่ 9	บัสที่ 10	บัสที่ 11	บัสที่ 12	บัสที่ 13	บัสที่ 14
Max LF [p.u]	0.70971	0.7062	0.71492	0.72101	0.7222	0.71997	0.72222	0.72522	0.73381

4.1.2 ผลของความเร็วมต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

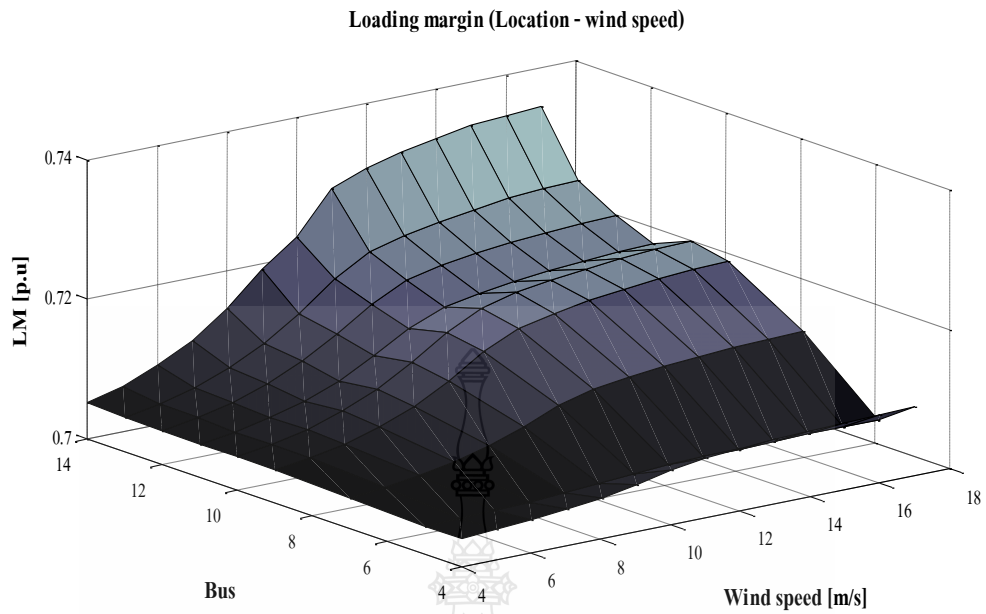
วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาความเร็วมตั้งแต่กังหันลมผลิตไฟฟ้าเริ่มจ่ายพลังงาน ตั้งแต่ 4 m/s จนถึง 15 m/s คือ ค่าที่จ่ายกำลังสูงสุด ตำแหน่งที่ติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า บัสที่ 14



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง แสดงผลของความเร็วม

รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบเมื่อเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ติดตั้งที่บัสที่ 14 ความเร็วมตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s ซึ่งค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.70535 p.u ถึง 0.73381 p.u

ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบที่ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัสคือ บัสที่ 4 บัสที่ 5, บัสที่ 7, บัสที่ 9, บัสที่ 10, บัสที่ 11, บัสที่ 12, บัสที่ 13 และ บัสที่ 14 ที่ความเร็วมตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s แสดงดังรูปที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.2



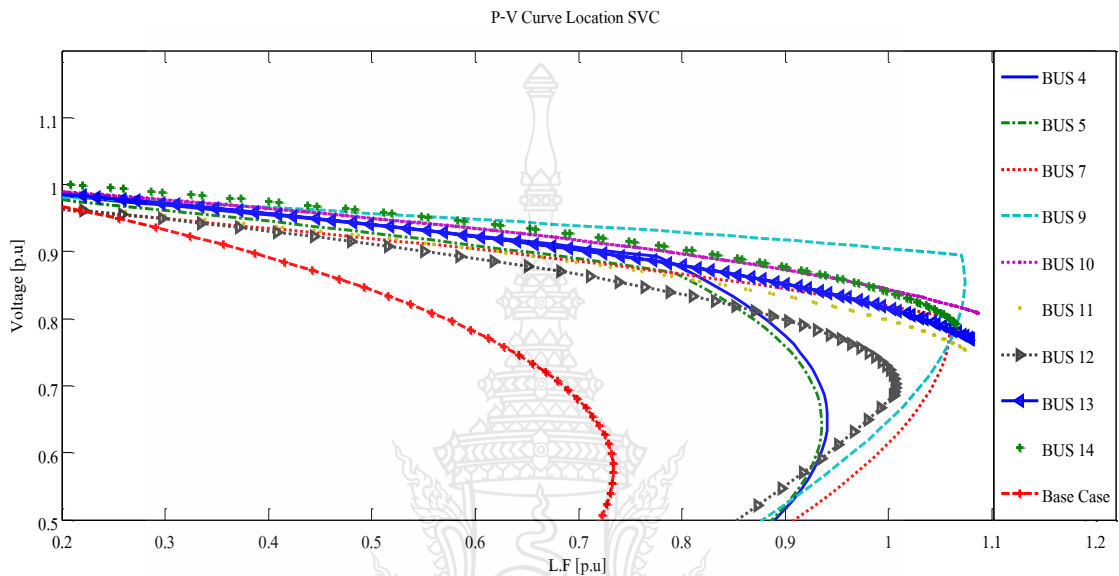
รูปที่ 4.4 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบหลังการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัสและความเร็วลมตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s

ตารางที่ 4.2 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ และผลของความเร็วมที่เปลี่ยนแปลง

Location	Wind speed (m/s)						
	4	5	7	9	11	13	15
	Maximum Loading Factor (p.u)						
Bus 4	0.70423	0.70446	0.70528	0.70681	0.70867	0.70933	0.70971
Bus 5	0.70409	0.70417	0.7045	0.70511	0.70581	0.70606	0.7062
Bus 7	0.70449	0.70495	0.70661	0.70959	0.71306	0.71425	0.71492
Bus 9	0.70473	0.70544	0.70795	0.71254	0.71803	0.71996	0.72101
Bus 10	0.70481	0.70559	0.70835	0.71331	0.71909	0.72108	0.7222
Bus 11	0.70475	0.70546	0.70796	0.71238	0.71738	0.71904	0.71997
Bus 12	0.70488	0.70572	0.70865	0.71374	0.71937	0.72121	0.72222
Bus 13	0.70495	0.70586	0.70908	0.71485	0.7216	0.72391	0.72522
Bus 14	0.70535	0.70664	0.71117	0.71923	0.72877	0.732	0.73381

4.1.3 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้ SVC

หัวข้อวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่เชื่อมโยงกับกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ขนาด 10 MW โดยการติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งของโหนดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ตำแหน่งของการติดตั้ง SVC โหนดบัส

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ขนาด 10 MW ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าบัสที่ 14 ที่ความเร็วลม 15 m/s และติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งของโหนดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้ง SVC พบว่าตำแหน่งที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด คือ บัสที่ 10 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 1.0864 p.u และ ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้ง SVC แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

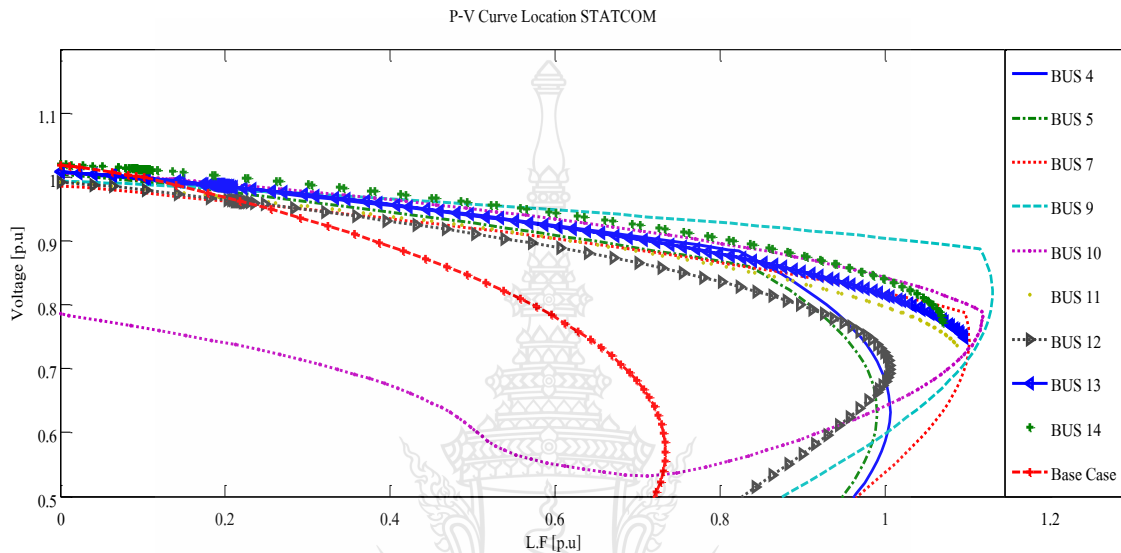
ตารางที่ 4. 3 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 14 และติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งต่างๆ

Location	บัสที่ 4	บัสที่ 5	บัสที่ 7	บัสที่ 9	บัสที่ 10	บัสที่ 11	บัสที่ 12	บัสที่ 13	บัสที่ 14
Max. LF [p.u]	0.94089	0.93541	1.0595	1.0737	1.0864	1.0744	1.0072	1.0798	1.0654

4.1.4 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

โดยใช้ STATCOM

หัวข้อวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ขนาด 10 MW โดยการติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งของโหนดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง



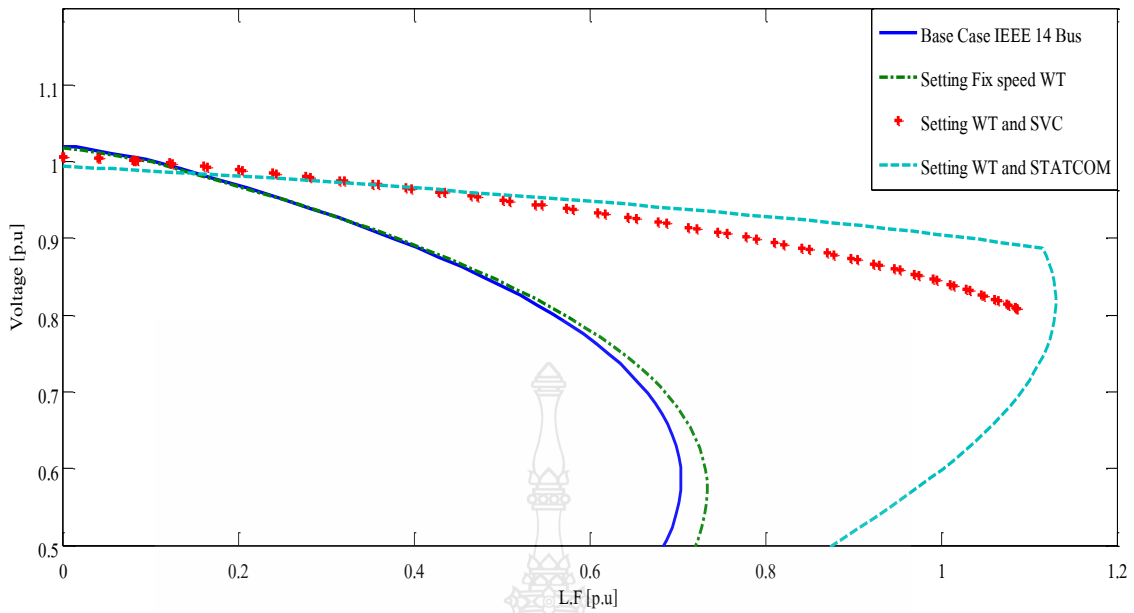
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิต และ ตำแหน่งของการติดตั้ง STATCOM

รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ขนาด 10 MW ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าบัสที่ 14 ที่ความเร็วลม 15 m/s และติดตั้ง STATCOM ขนาด 150MVA ที่ตำแหน่งของโหนดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้ง STATCOM พบว่าตำแหน่งที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด คือ บัสที่ 9 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 1.1304 p.u และค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้ง STATCOM ที่โหนดบัสแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 14 และติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA ที่โหนดบัส

Location	บัสที่ 4	บัสที่ 5	บัสที่ 7	บัสที่ 9	บัสที่ 10	บัสที่ 11	บัสที่ 12	บัสที่ 13	บัสที่ 14
Max. LF [p.u]	1.0063	0.9905	1.1021	1.1304	1.1184	1.0876	1.006	1.096	1.0703

P-V Curve Fix Speed Wind Turbine and FACTS



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ระบบ IEEE 14 Bus ก่อน และ หลัง ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ อุปกรณ์ FACTS

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อนการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า หลังจากติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ขนาด 10 MW หลังจากติดตั้ง SVC และ หลังจากติดตั้ง STATCOM ซึ่งค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบที่ดีที่สุดคือ ระบบที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ มีการปรับปรุงเสถียรภาพโดยใช้ STATCOM ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 1.1304 p.u และค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบของระบบต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบก่อนติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า, เมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ การติดตั้งอุปกรณ์ ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

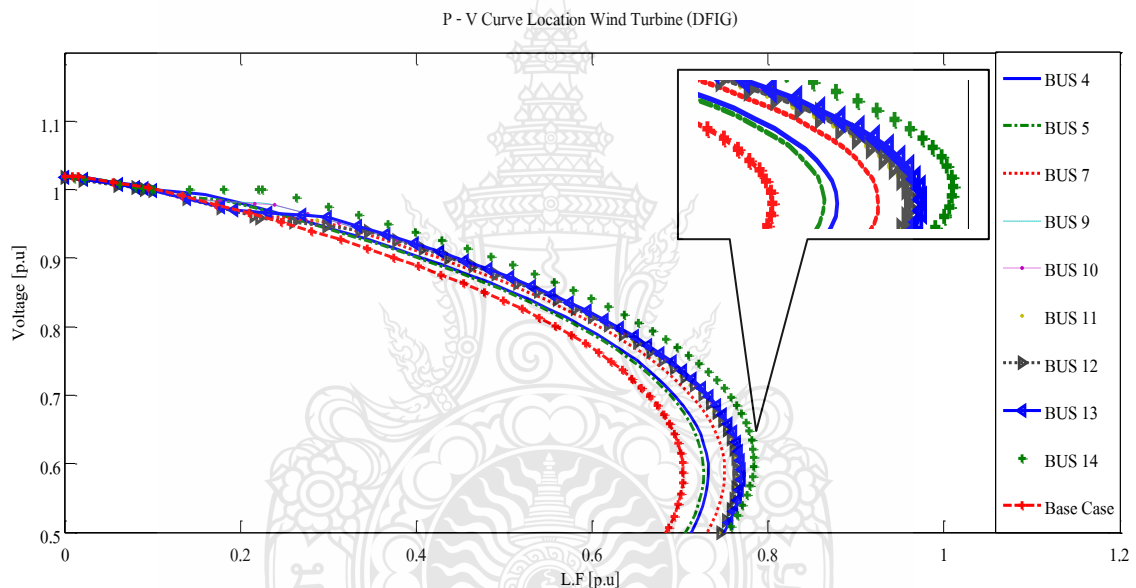
Setting	Base Case	WT(SCIG)	WT and SVC	WT and STATCOM
Max. LF [p.u]	0.70398	0.73381	1.0864	1.1304

4.2 เสถียรภาพแรงดันเมื่อเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางสำหรับวิทยานิพนธ์นี้มีขนาด 10 MW ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ ± 5.025 MVAR ผลของวิทยานิพนธ์มีดังนี้

4.2.1 ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะทดลองติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหนดบัสได้แก่ บัสที่ 4 , 5 , 7 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 และ 14 แล้วพิจารณาว่าตำแหน่งใดค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบในแต่ละบัสสูงที่สุด



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางที่โหนดบัส

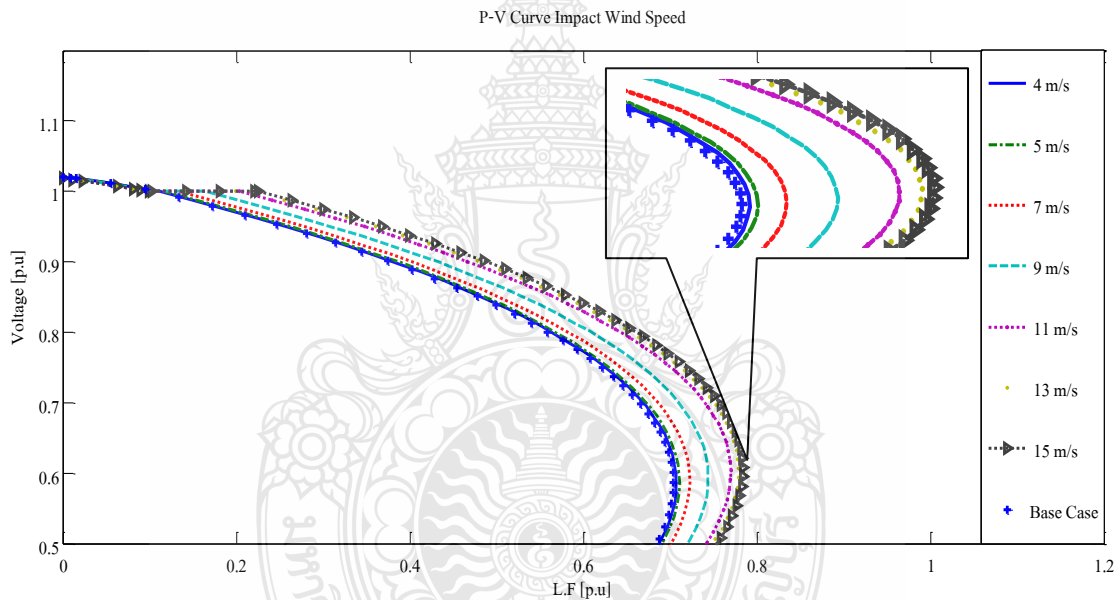
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง เมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางขนาด 10 MW ทดลองติดตั้งในตำแหน่งที่เป็นโหนดบัส ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบในตำแหน่งต่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 จากผลการวิจัยพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าคือ บัสที่ 14 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบ 0.78449 p.u

ตารางที่ 4.6 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนียวนำแบบป้อนสองทาง

Location	บัสที่ 4	บัสที่ 5	บัสที่ 7	บัสที่ 9	บัสที่ 10	บัสที่ 11	บัสที่ 12	บัสที่ 13	บัสที่ 14
Max. LF [p.u]	0.73305	0.72731	0.75135	0.76601	0.76869	0.76412	0.76546	0.77043	0.78449

4.2.2 ผลของความเร็วลมต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวนำแบบป้อนสองทาง

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาความเร็วลมตั้งแต่กังหันลมผลิตไฟฟ้าเริ่มจ่ายพลังงาน ตั้งแต่ 4 m/s จนถึง 15 m/s ตำแหน่งที่ติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า บัสที่ 14

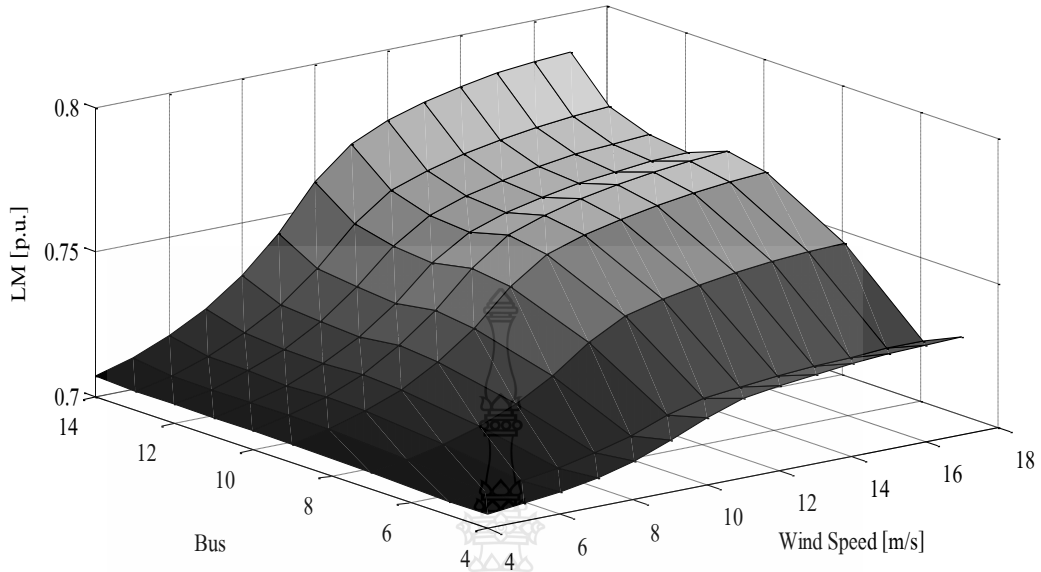


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง แสดงผลของความเร็วลม

รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบเมื่อเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนียวนำแบบป้อนสองทางติดตั้งที่บัสที่ 14 ความเร็วลมตั้ง 4 m/s ถึง 15 m/s ซึ่งค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.70741 p.u ถึง 0.78449 p.u

ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบที่ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหลดบัสคือ บัสที่ 4 บัสที่ 5, บัสที่ 7, บัสที่ 9, บัสที่ 10, บัสที่ 11, บัสที่ 12, บัสที่ 13 และบัสที่ 14 ที่ความเร็วลมตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s แสดงดังรูปที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.7

P - V Curve Setting WT (Location and Wind speed)



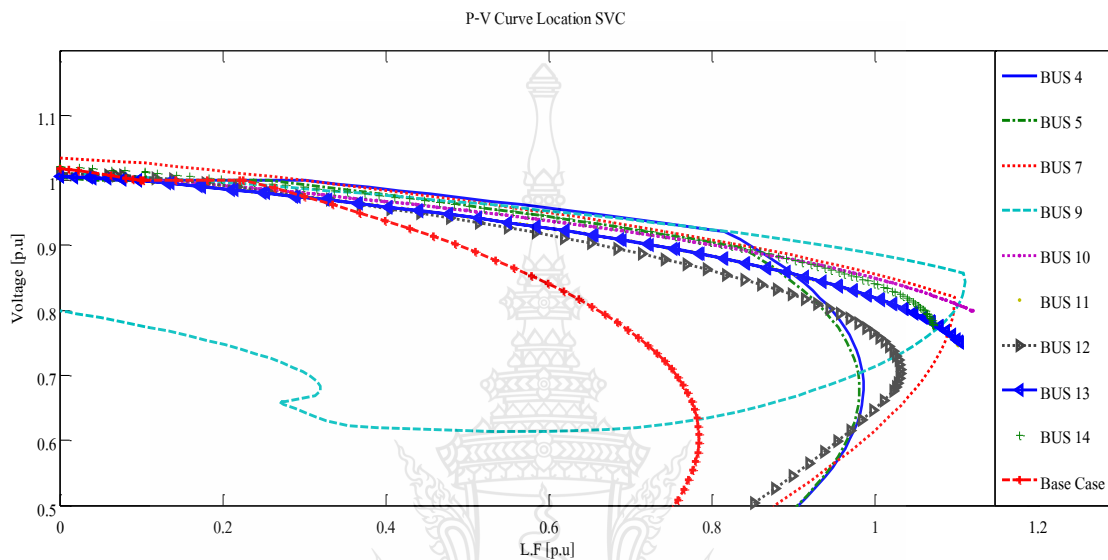
รูปที่ 4.10 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบหลังการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่โหนดบัสและความเร็วลมตั้งแต่ 4 m/s ถึง 15 m/s

ตารางที่ 4. 7 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆและผลของความเร็วมที่เปลี่ยนแปลง

Location	Wind speed (m/s)						
	4	5	7	9	11	13	15
Maximum Loading Factor (p.u)							
Bus 4	0.70507	0.70624	0.71029	0.71794	0.72757	0.73103	0.73305
Bus 5	0.70492	0.70587	0.70915	0.71514	0.72285	0.72567	0.72731
Bus 7	0.70584	0.70779	0.71451	0.72689	0.7425	0.74809	0.75135
Bus 9	0.70639	0.70897	0.71784	0.73408	0.75445	0.76176	0.76601
Bus 10	0.7066	0.70932	0.71864	0.73563	0.75677	0.76431	0.76869
Bus 11	0.70645	0.709	0.71772	0.73356	0.75314	0.76009	0.76412
Bus 12	0.70657	0.70921	0.71822	0.73462	0.75452	0.76147	0.76546
Bus 13	0.70667	0.70948	0.71914	0.73666	0.7583	0.76599	0.77043
Bus 14	0.70741	0.71088	0.72275	0.74408	0.77007	0.77922	0.78449

4.2.3 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้ SVC

ในหัวข้องานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 10 MW โดยการติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งของโหลดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ตำแหน่งของการติดตั้ง SVC โหลดบัส

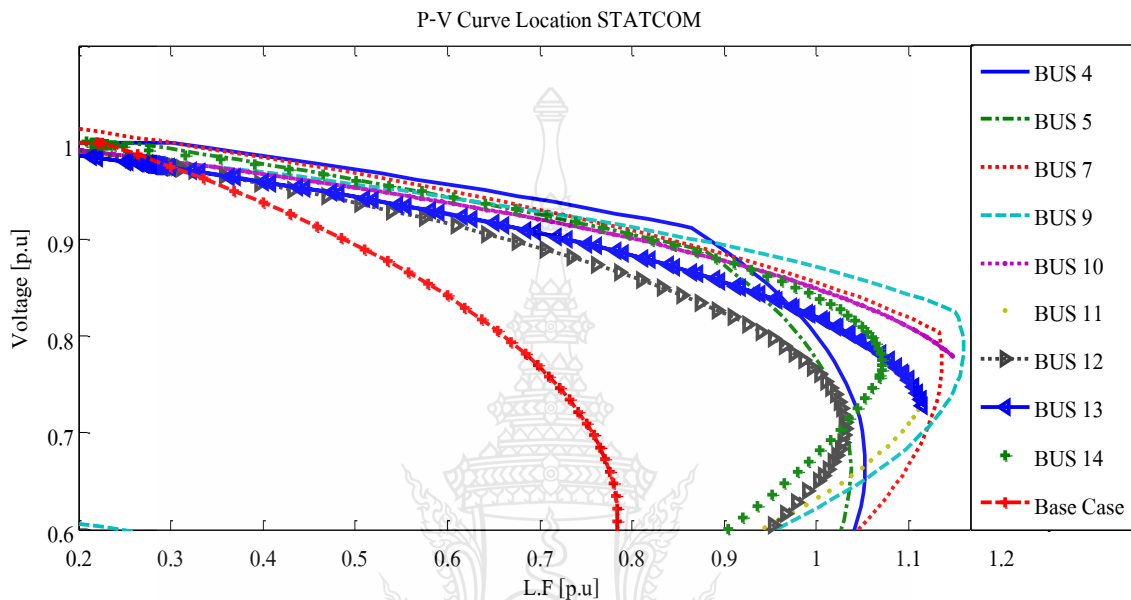
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 10 MW ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าบัสที่ 14 ที่ความเร็วลม 15 m/s และติดตั้งอุปกรณ์ ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น ชนิด SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งของโหลดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้ง SVC ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า ตำแหน่งที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด คือ บัสที่ 10 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 1.1206 p.u และค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้ง SVC ที่โหลดบัสแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4. 8 ค่าองค์ประกอบ โหลดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 14 และติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งต่างๆ

Location	บัสที่ 4	บัสที่ 5	บัสที่ 7	บัสที่ 9	บัสที่ 10	บัสที่ 11	บัสที่ 12	บัสที่ 13	บัสที่ 14
Max. LF [p.u]	0.98661	0.98165	1.0981	1.1109	1.1206	1.1031	1.0318	1.1049	1.072

4.2.4 การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้ STATCOM

หัวข้อวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 10 MW โดยการติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งของโหนดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง



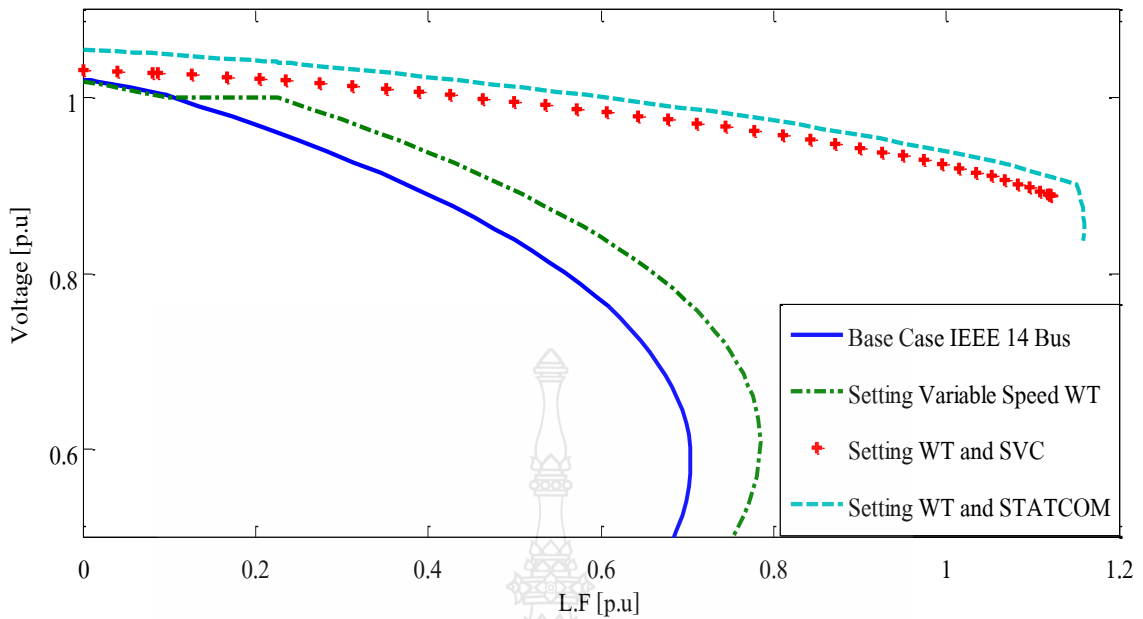
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิต และ ตำแหน่งของการติดตั้ง STATCOM

จากรูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 10 MW ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าบัสที่ 14 ที่ความเร็วลม 15 m/s และ ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ชนิด STATCOM ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งของโหนดบัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้ง STATCOM ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า ตำแหน่งที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแรงดันมากที่สุด คือ บัสที่ 9 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเท่ากับ 1.1596 p.u และ ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้ง STATCOM ที่โหนดบัสแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4. 9 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าบัสที่ 14 และ ติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA ที่ตำแหน่งต่างๆ

Location	บัสที่ 4	บัสที่ 5	บัสที่ 7	บัสที่ 9	บัสที่ 10	บัสที่ 11	บัสที่ 12	บัสที่ 13	บัสที่ 14
Max. LF [p.u]	1.0527	1.0372	1.1359	1.1596	1.1478	1.1109	1.0306	1.1148	1.0709

P-V Curve Variable Speed Wind Turbine and FACTS



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ระบบ IEEE 14 Bus ก่อน และ หลัง ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ อุปกรณ์ FACTS

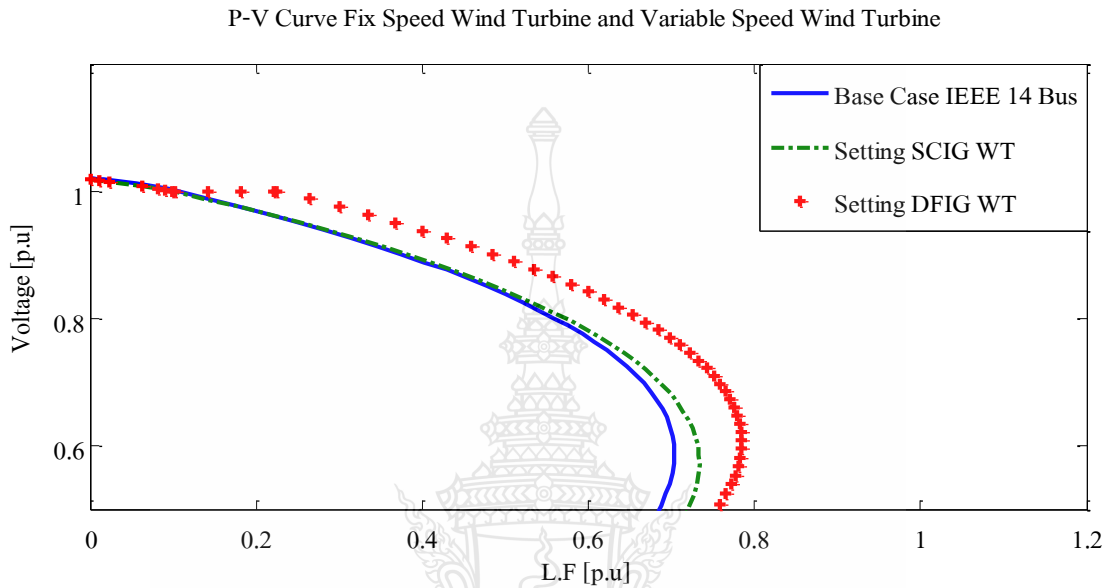
จากรูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อนการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า หลังจากติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ขนาด 10 MW หลังจากติดตั้ง SVC และ หลังจากติดตั้ง STATCOM ซึ่งค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบที่มีดีที่สุดคือ ระบบที่ติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และ มีการปรับปรุงเสถียรภาพโดยใช้ STATCOM มีค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบเท่ากับ 1.1596 p.u และ ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4. 10 ค่าองค์ประกอบโหนดสูงสุดของระบบก่อนติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า, เมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ การติดตั้งอุปกรณ์ ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

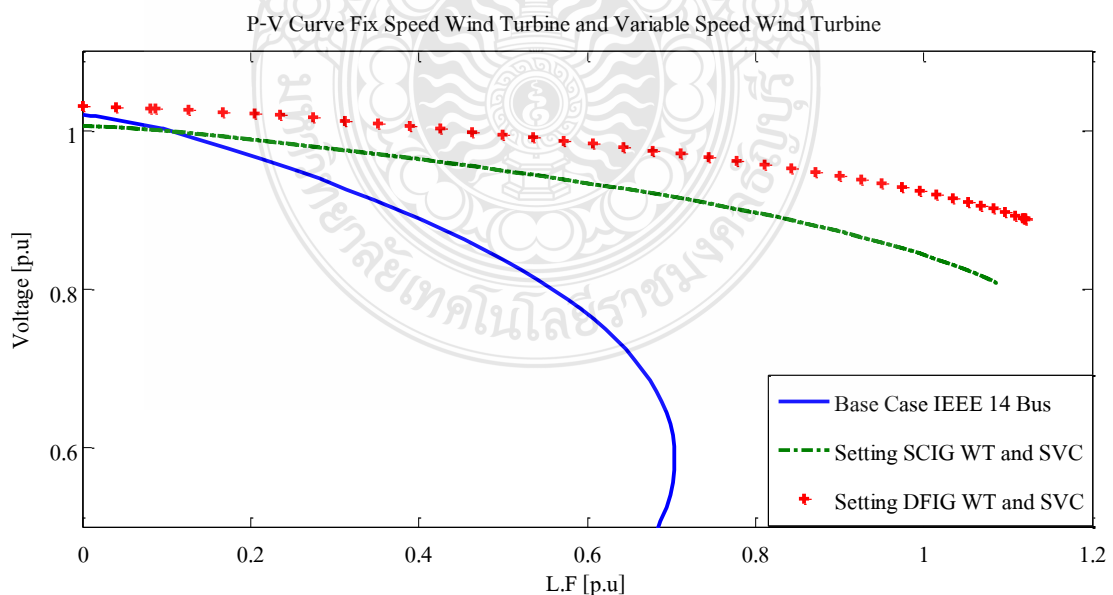
Setting	Base Case	WT(DFIG)	WT and SVC	WT and STATCOM
Max. LF [p.u]	0.70398	0.78449	1.1206	1.1596

4.3 ผลของเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

หัวข้อวิทยานิพนธ์นี้แสดงผลของเสถียรภาพแรงดันเมื่อเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนียวน่าแบบกรงกระรอก กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนียวน่าแบบป้อนสองทาง และการปรับปรุงเสถียรภาพโดยใช้อุปกรณ์ FACTS

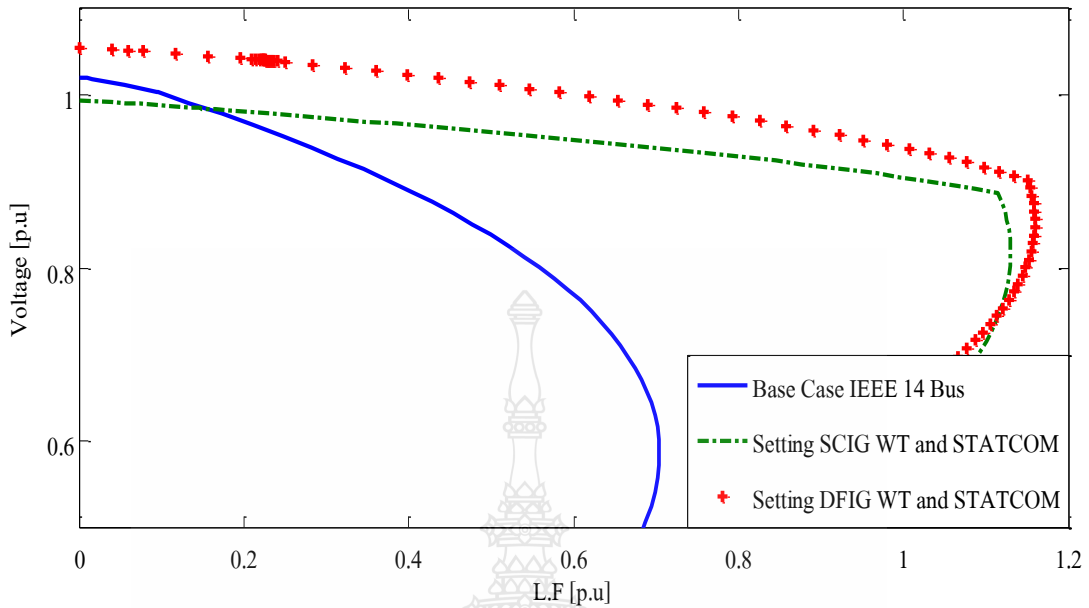


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อนและหลังติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อนและหลังติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ ติดตั้ง SVC

P-V Curve Fix Speed Wind Turbine and Variable Speed Wind Turbine



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ก่อนและหลังติดตั้งกักหนผลผลิตไฟฟ้า และ ติดตั้ง STATCOM

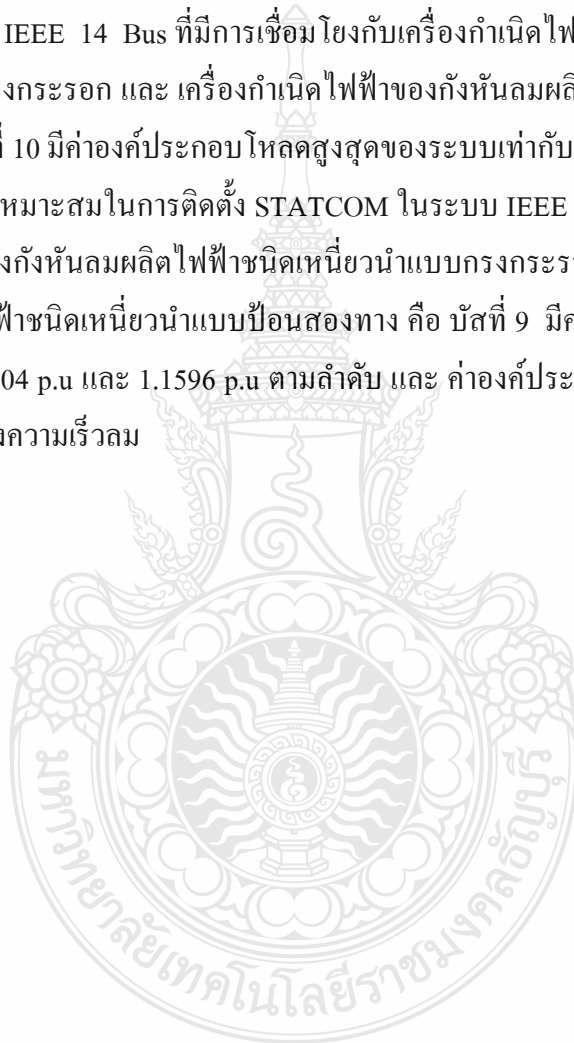
จากรูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงการเปรียบเทียบเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกักหนผลผลิตไฟฟ้า 2 ชนิด คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกักหนผลผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกักหนผลผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และ การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของกักหนผลผลิตไฟฟ้าทั้งสองชนิดโดยการติดตั้ง SVC และ STATCOM ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งและค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ IEEE 14 Bus เมื่อเชื่อมโยงกับ กักหนผลผลิตไฟฟ้า, SVC และ STATCOM

ชนิดของเครื่องกำเนิด	กักหนผลผลิตไฟฟ้า		SVC		STATCOM	
	ตำแหน่ง	Max. LF [p.u]	ตำแหน่ง	Max. LF [p.u]	ตำแหน่ง	Max. LF [p.u]
SCIG	14	0.73381	10	1.0864	9	1.1304
DFIG	14	0.78449	10	1.1206	9	1.1596

4.5 สรุป

ผลการทดลองการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบ IEEE 14 Bus ที่ใช้เป็นระบบอ้างอิงก่อนการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.70398 p.u. หลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าคือบัสที่ 14 ค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.73381 p.u. และ 0.78449 p.u. ตามลำดับ ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง SVC ในระบบ IEEE 14 Bus ที่มีการเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง คือ บัสที่ 10 มีค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบเท่ากับ 1.0864 p.u. และ 1.1478 p.u. ตามลำดับ ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง STATCOM ในระบบ IEEE 14 Bus ที่มีการเชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง คือ บัสที่ 9 มีค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบเท่ากับ 1.1304 p.u. และ 1.1596 p.u. ตามลำดับ และ ค่าองค์ประกอบโพลสูงสุดของระบบจะแปรผันตามเส้นโค้งความเร็วลม



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า สามารถสรุปผลการทดลองดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับ กำลังไฟฟ้าจริง ของระบบ IEEE 14 Bus ที่โหลดบัส คือบัสที่ 4, บัสที่ 5, บัสที่ 7, บัสที่ 9, บัสที่ 10, บัสที่ 11, บัสที่ 12, บัสที่ 13 และ บัสที่ 14 ได้แสดงให้เห็นว่าบัสที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากที่สุดหรือเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากบัสที่ 14 มีค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งที่เชื่อมต่อกับบัสที่ 14 มีค่าสูงที่สุดในระบบ ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเท่ากับ 0.70398 p.u

เมื่อทดลองติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 10 MW ที่โหลดบัส พบว่าเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในตำแหน่งของบัสที่ 14 ระบบจะมีเสถียรภาพแรงดันสูงที่สุด โดยมีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเท่ากับ 0.73381 p.u ซึ่งมีค่าสูงกว่าก่อนที่จะติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ประมาณ 4.24 % และ ตำแหน่งการทดลองติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยที่สุดคือบัสที่ 5 มีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ 0.7062 p.u ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 0.31 % สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 10 MW พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า คือ บัสที่ 14 และมีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเท่ากับ 0.78449 p.u ซึ่งมีค่าสูงกว่าก่อนการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า ประมาณ 11.44 % และตำแหน่งการทดลองติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยที่สุดคือบัสที่ 5 มีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ 0.72731 p.u ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 3.31 % จากผลการทดลองที่กล่าวมาพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางของกังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถเพิ่มเสถียรภาพแรงดันของระบบได้สูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และตำแหน่งของบัสติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าก็มีส่วนสำคัญในการเพิ่มเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบ จะสังเกตได้จากการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในตำแหน่งของบัสที่ 5 จะเพิ่มเสถียรภาพแรงดันเพียงเล็กน้อยเนื่องจากบัสที่ 5 เชื่อมโยงกับบัสของแหล่งจ่าย ถึง 2 บัส ดังนั้นเมื่อติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสที่ 5 จึงไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากนัก

จากการทดลองผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเร็วลมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางพบว่าค่าองค์ประกอบ โหลดสูงสุดของระบบมีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าความเร็วลมตามเส้นโค้งกำลังไฟฟ้ากับความเร็วลม โดยจะพิจารณาในสภาวะที่กักเก็บลมผลิตไฟฟ้าเริ่มจ่ายพลังงานคือตั้งแต่ที่ความเร็วลม 4 m/s ถึง 15 m/s สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ความเร็วลม 4 m/s ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.70535 p.u. และที่ความเร็วลมเท่ากับ 15 m/s ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.73381 p.u. สำหรับกักเก็บลมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ความเร็วลม 4 m/s ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.70741 p.u. และที่ความเร็วลม 15 m/s ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบเท่ากับ 0.78449 p.u. จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ความเร็วลมก็สำคัญต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ

จากการผลทดลองทั้งสองหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่มีต่อเสถียรภาพแรงดันในระบบที่ เชื่อมโยงกับกักเก็บลมผลิตไฟฟ้าก็คือ ตำแหน่งของบัสที่ติดตั้งกักเก็บลมผลิตไฟฟ้า และความเร็วลม

การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่เชื่อมโยงกับกักเก็บลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่และ แบบความเร็วไม่คงที่โดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น ได้แก่ SVC และ STATCOM จาก ผลการทดลองในบทที่ 4 พบว่าระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกักเก็บลมผลิตไฟฟ้าชนิด เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกติดตั้งที่บัสที่ 14 ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA คือบัสที่ 10 มีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ 1.0737 p.u. เพิ่มขึ้นจากระบบที่มีติดตั้งกักเก็บลม ผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 48.28 % และตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA คือบัสที่ 9 มีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ 1.1304 p.u. ซึ่งมีเพิ่มขึ้นจากระบบที่มีติดตั้ง กักเก็บลมผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 56.33 % สำหรับระบบที่เชื่อมโยงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกักเก็บ ลมผลิตไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง ติดตั้งที่บัสที่ 14 ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง SVC ขนาด 150 MVA คือบัสที่ 10 มีค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ 1.1206 p.u. ซึ่งมีเพิ่มขึ้น จากระบบที่มีติดตั้งกักเก็บลมผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 47.74 % และตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง STATCOM ขนาด 150 MVA คือบัสที่ 9 ค่าองค์ประกอบโหลดสูงสุดของระบบ 1.1596 p.u. เพิ่มขึ้น จากระบบที่มีติดตั้งกักเก็บลมผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 53.28 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพื่อหาทางป้องกันไม่ให้เกิดสถานะแรงดันพังทลาย และการหาตำแหน่งในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งในความเป็นจริงแล้วสิ่งแรกที่เราคำนึงถึงกันในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าก็คือความเร็วลมในพื้นที่นั้นๆ เมื่อพิจารณาแล้วเห็นว่าความเร็วลมเพียงพอในการผลิตกระแสไฟฟ้าก็ทำการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าแล้วจ่ายเข้าสู่ระบบ โดยที่ยังไม่คำนึงถึงเสถียรภาพของแรงดันในระบบหลังจากติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าว่าเพิ่มขึ้นมากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงน่าที่จะศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบก่อนว่าตำแหน่งที่เราต้องการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้นสามารถจ่ายโหลดเพิ่มได้อีกเท่าไร และคำนวณหาจุดคุ้มทุนก่อนที่จะติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การเชื่อมต่อกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่บัสในงานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมต่อโดยตรงสู่บัสโดยไม่คิดการสูญเสียในสายส่ง ซึ่งทางปฏิบัติอาจจะทำไม่ได้เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ไกลจากสถานีจึงจำเป็นต้องมีการนำมาคิดหาค่าการสูญเสียในสายส่งด้วย ซึ่งทำให้ค่าโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้เปลี่ยนแปลงไป

ในการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานเข้าในระบบเราต้องคำนึงถึงคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าไปในระบบและผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบก่อนเพื่อไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับระบบและผู้ใช้ไฟฟ้า

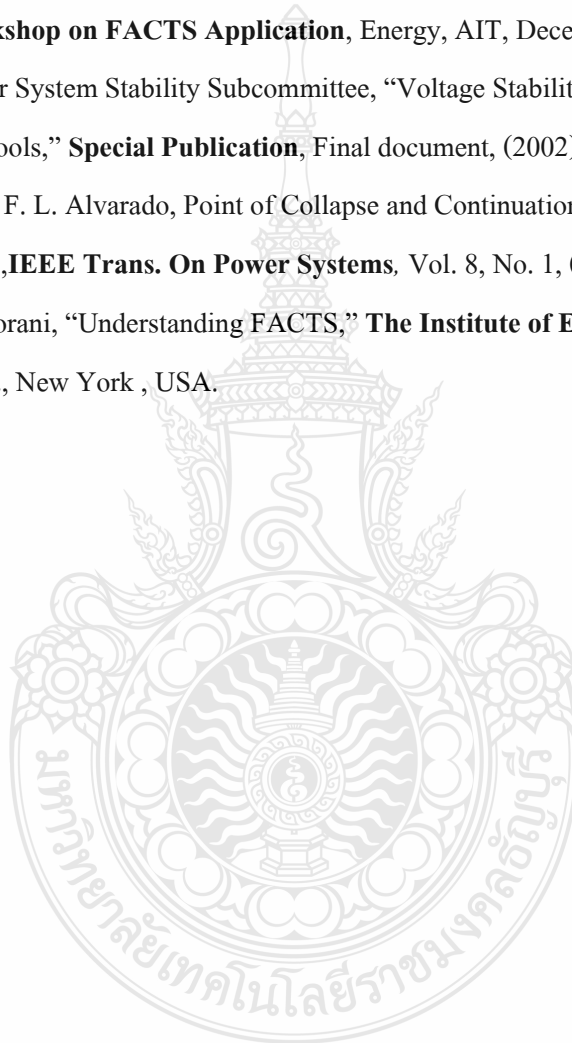
งานวิจัยนี้มีการศึกษาอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิด 2 ชนิดคือ SVC และ STATCOM ที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานกับระบบ ซึ่งยังมีอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิดอื่นๆอีก 3 ชนิด คือ TCSC, SSSC และ UPFC น่าสนใจนำมาศึกษาในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability and Definition, "Definition and Classification of Power System Stability," **IEEE Transactions on power system**, Vol.19, No.2, May 2004 , pp.1387-1401.
- [2] นิพนธ์ เกตุจ้อย, อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์, "เทคโนโลยีพลังงานลม," **Naresuan University Journal**, 2004, 12(2):57-73
- [3] วัฒนะ สืบกนิร, บัลดังก์ เนียมมณี, "กั๊งหันลม," **วิศวกรรมสารเอเชียอาคเนย์**, 2550
- [4] G.Coath, M.Al-Dabbagh, "Effect of steady-state wind turbine generator model on power flow convergence and voltage stability limit," **Australasian universitie power engineering conference (AUPEC 2005)**, Australia , 2005.
- [5] N. Mithulananthan, 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
- [6] A.Sode-Yome, N. Mithulananthan, K.Y.Lee, "Static voltage stability margin enhancement using STATCOM,TCSC and SSSC," **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition** , Dalian, China, 2005
- [7] P.Kundur, "Power system stability and control," **McGraw-Hill Inc.**, New York , USA, 1994.
- [8] Mariesa Crow, "Computational methods for electric power systems ," **University of Missouri Rolla** ,Missouri.
- [9] R.K.Jaganathan, T.K.Saha, "Voltage stability analysis of grid connected embedded Generator," **Australasian universitie power engineering conference (AUPEC 2004)**, Australia , 2004.
- [10] M.Begovic, J.Bright, T.Domin, S.Easterday-Mcpadden, A.Girgis, W.Hartmann, C.Hanville, M.Ibrahim, K.Kozminski, R.Marttila, G.Michel, K.Mustaphi, D.Novosel, B.Pettigrew, M.Sachdev, H.Shuh, P.Solanics, J.Williams, "Voltage Collapse Report to IEEE Power System Relaying Committee," **Final version**, December, 1996.
- [11] Marcia Martin, "Voltage Stability Issues Related to Implementation of Large Wind Farm," **Thesis for the degree of licentiate of engineering**, Chalmers university, Sweden, 2006.
- [12] M.S.Vicatos, J.A.Tegopoulos, "Steady State Analysis of Doubly-Fed Induction Generator Under Synchronous Operation," **IEEE Power Engineering Review**, September, 1989

- [13] J.Slootweg, W.Kling, "Is the answer blowing in the wind?," **IEEE Power Energy Magazine**, Vol.1, pp.26-33, November-December, 2003
- [14] R.Koessler, S.Pillutla, L.Trinh, D.Dickmader, "Integration of large wind farms into utility Grids (part 1 Modeling of dfig)," **Proceeding of the IEEE power engineering society general Meeting**, vol.3, 2003
- [15] A.Feijoo, J.Cidras, "Modeling of wind farm in the load flow analysis," **IEEE Transactions on Power system**, vol.15, no.1, pp.110-115, 2000
- [16] G.Coath, M.Al-Dabbagh, S.Halgamuge, "Particle swarm optimization for reactive power And voltage control with grid integrated wind farm.," **Proceeding of the IEEE Power Engineering Society General Meeting** , vol.18, no.3, pp.1078-1085, 2003.
- [17] J.Kaewmanee, "AC-DC Power flow analysis with FACT devices by unified Newton – Raphson method," **Thesis submitted in partial fulfillment of the requirments for degree of Master of Electrical Engineer**,KMUTNB,2007
- [18] C.A. Canizares, "Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies," **IEEE/PES WM on Modeling, Simulation and Applications of FACTS Controllers in Angle and Voltage Stability Studies**, Singapore, January 2000.
- [19] A.Sode-Yome, N. Mithulananthan, K.Y.Lee, "A Maximum Loading Margin Method for Static Voltage Stability in Power System," **IEEE Transaction on Power Systems**, Vol.21 No.2, May 2006
- [20] K. Aodsup, P. Boonchiam, A. Sode-Yome, P. Kongsuk, N. Mithulananthan, "Response of DSTATCOM under Voltage Flicker In Farm Wind," **Power Electronic and Drives**, Thailand , 2007
- [21] K. Aodsup, P. Boonchiam, A. Sode-Yome, P. Kongsuk, B.Planklang, "Voltage Flicker Mitigation in Wind Farm by Using DSTATCOM," **5th EMSES**, Pattaya, November 2007
- [22] ก่อเกียรติ อ้อดทรัพย์,ไพศาล บุญเจียม, บุญยัง ปลั่งกลาง, อาทิตย์ โสโตโยม, "การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับกังหันลม," **การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย TREC 1st**, วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก, 15-16 ธันวาคม 2551

- [23] Edvina Uzunovic, "EMTP, Transient stability and Power flow model and Control of VSC Based FACTS controllers," **Waterloo**, Ontario , Canada , 2001.
- [24] American wind energy association, "AWEA Electrical Guide to Utility Scale Wind Turbines," **Policy Department 1101 14th Street NW**, Washington DC, 2005
- [25] Dromey, "Asynchronous Generation in distribution Systems ," **Dromey Design Inc** ,2007.
Available: [http:// www.dromeydesign.com](http://www.dromeydesign.com)
- [26] A.Sode-Yome, "Applications of FACTS Controllers for Voltage Stability Enhancement," **Training Workshop on FACTS Application**, Energy, AIT, December 2004
- [27] IEEE/PES Power System Stability Subcommittee, "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools," **Special Publication**, Final document, (2002).
- [28] C. A. Cañizares, F. L. Alvarado, Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems, **IEEE Trans. On Power Systems**, Vol. 8, No. 1, (1993).
- [29] Narain G. Hingorani, "Understanding FACTS," **The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc.**, New York , USA.





ภาคผนวก ก

ก.1 ข้อมูลของระบบ IEEE 14 บัส ที่ใช้วิเคราะห์

ก.2 ข้อมูลค่าความจุของ SVC และ STATCOM ในระบบ IEEE 14 บัส

ภาคผนวก ก.1

ข้อมูลของระบบ IEEE 14 บัส ที่ใช้วิเคราะห์

ข้อมูลของระบบ IEEE 14 บัส สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ ข้อมูลบัส, ข้อมูลสายส่ง และข้อมูลหม้อแปลง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสของ IEEE 14 บัส

IEEE 14 BUS SYSTEM DATA								
Bus No	Bus Code	Voltage KV	Load		Generator			Voltage p.u
			MW	MVAR	MW	Qmax	Qmin	
1	1	69	0	0	232.6	990	-989	1.06
2	2	69	21.7	12.7	40	50	-40	1.045
3	2	69	94.2	19	0	40	0	1.01
4	0	69	47.8	4	0	0	0	0
5	0	69	7.6	1.6	0	0	0	0
6	2	13.8	11.2	7.5	0	24	-6	1.07
7	0	13.8	0	0	0	0	0	0
8	2	18	0	0	0	24	-6	1.09
9	0	13.8	29.5	16.6	0	0	0	0
10	0	13.8	9	5.8	0	0	0	0
11	0	13.8	3.5	1.8	0	0	0	0
12	0	13.8	6.1	1.6	0	0	0	0
13	0	13.8	13.5	5.8	0	0	0	0
14	0	13.8	14.9	5	0	0	0	0

* Bus code 1 = Slack bus , Bus code 2 = PV Bus , Bus code 0 = PQ Bus

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ IEEE 14 บัส

Transformer IEEE 14 Bus DATA									
Bus No 1	KV	Bus No 2	KV	R	X	G	B	Tap 1	Tap 2
4	69	7	13.8	0	0.20912	0	0	67.48	13.8
4	69	9	13.8	0	0.55618	0	0	66.86	13.8
5	69	6	13.8	0	0.25202	0	0	64.31	13.8

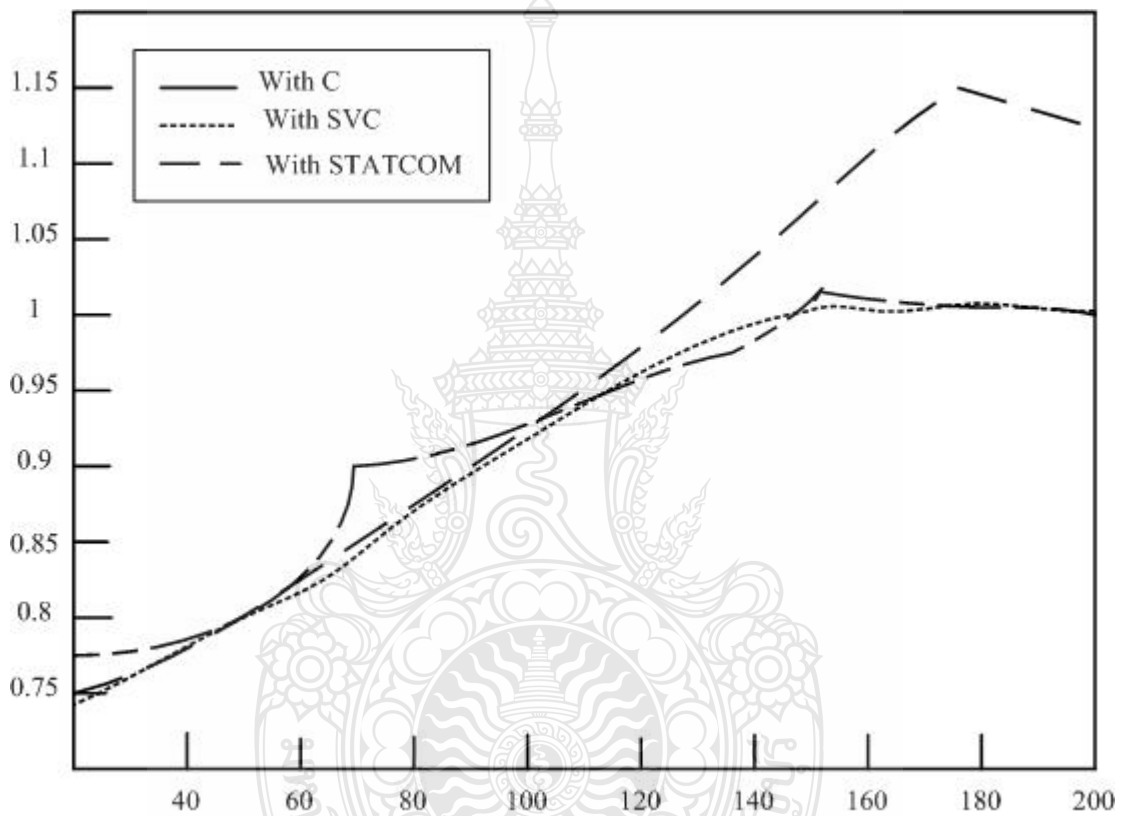
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของสายส่งในระบบ IEEE 14 บัส

Transmission Line IEEE 14 Bus Data						
Bus No 1	KV	Bus No 2	KV	R	X	B/2
1	69	2	69	0.01938	0.05917	0.0264
1	69	5	69	0.05403	0.22304	0.0246
2	69	3	69	0.04699	0.19797	0.0219
2	69	4	69	0.05811	0.17632	0.0187
2	69	5	69	0.05695	0.17388	0.017
3	69	4	69	0.06701	0.17103	0.0173
4	69	5	69	0.01335	0.04211	0.0064
6	13.8	11	13.8	0.09498	0.1989	0
6	13.8	12	13.8	0.12291	0.25581	0
6	13.8	13	13.8	0.06615	0.13027	0
7	13.8	8	18	0	0.17615	0
7	13.8	9	13.8	0	0.11001	0
9	13.8	10	13.8	0.03181	0.0845	0
9	13.8	14	13.8	0.12711	0.27038	0
10	13.8	11	13.8	0.08205	0.19207	0
12	13.8	13	13.8	0.22092	0.19998	0
13	13.8	14	13.8	0.17093	0.34802	0

ภาคผนวก ก.2

ข้อมูลค่าความจุของ SVC และ STATCOM ในระบบ IEEE 14 บัส

จากผลการจำลองการทำงานการเพิ่มค่าความจุของ SVC และ STATCOM ในระบบ IEEE 14 บัส ค่าความจุสูงสุดของ SVC และ STATCOM มีค่าประมาณ 150 MVA ก่อนที่จะอิ่มตัว ซึ่งแสดงในรูปที่ ก.1 [25]



รูปที่ ก.1 ผลการจำลองการทำงานการเพิ่มค่าความจุของ SVC และ STATCOM



ภาคผนวก ข

ข.1 รายละเอียดข้อมูลของระบบในโปรแกรม UWPFLOW

ข.2 ขั้นตอนการรันโปรแกรม UWPFLOW ในงานวิจัย

ภาคผนวก ข.1

รายละเอียดข้อมูลของระบบในโปรแกรม UWPFLOW

ภาคผนวกนี้จะแสดงรายละเอียดของข้อมูลป้อนเข้าของระบบที่นำมาทดสอบในบทที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลบัส, ข้อมูลสายส่ง, ข้อมูลหม้อแปลง, ข้อมูลการควบคุมโปรแกรม และข้อมูลของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิด SVC และ STATCOM

ข้อมูลบัส ประกอบด้วย

1. Type (A2) คือ ชนิดของบัส
 - "B " คือ โหลดบัส PQ
 - "BQ" คือ บัสของแหล่งจ่าย PV กำหนดขอบเขตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
 - "BE" คือ บัสของแหล่งจ่าย PV ไม่กำหนดขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
 - "BV" คือ บัสของแหล่งจ่าย PV กำหนดขอบเขตแรงดัน
 - "BG" คือ บัสของแหล่งจ่าย PV กำหนดขอบเขตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ควบคุมแรงดันที่โหลดบัส PV ด้วยรีโมท
 - "BC" คือ โหลดบัส PV ควบคุมแรงดันด้วยรีโมท
 - "BT" คือ โหลดบัส PQ ควบคุมแรงดันโดยหม้อแปลง LTC
 - "BS" คือ บัสที่เปลี่ยนแปลง
2. Ow (A3) คือ ผู้ถือกรรมสิทธิ์
3. Name (A8) คือ ชื่อบัส
4. kV (F4.0) คือ แรงดันบัส มีหน่วยเป็น kV
5. Z (2A) คือ พื้นที่
6. PL (F5.0) คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด มีหน่วยเป็น MW
7. QL (F5.0) คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลด มีหน่วยเป็น MVAR
8. SHUNT (2F4.0) คือ ขนาดอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น MW และ MVAR
9. PM (F4.0) คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่จ่ายให้ระบบ มีหน่วยเป็น MW
10. P (F5.0) คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายให้ระบบ มีหน่วยเป็น MW
11. QM (F5.0) คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดที่จ่ายให้ระบบ มีหน่วยเป็น MVAR
12. Qm (F5.0) คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่ำสุดที่จ่ายให้ระบบ มีหน่วยเป็น MVAR
13. Vpu (F4.3) คือ ขนาดของแรงดันที่ต้องการ มีหน่วยเป็น p.u
14. Vm (F4.3) คือ แรงดันต่ำสุด สำหรับบัสชนิด BV และ PV.
15. Remote Name (A8) คือ ชื่อของบัสที่ควบคุมด้วยรีโมท สำหรับบัสชนิด "BG"

16. Remote kV (F4.0) คือ แรงดันบัสที่ควบคุมด้วยรีโมท สำหรับบัสชนิด "BG"
17. Remote %Q (I3) คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสที่ควบคุมด้วยรีโมทสำหรับบัสชนิด "BG"

ข้อมูลสายส่ง ประกอบด้วย

1. Type (A2) คือ ชนิดสายส่ง "L "
2. Ow (A3) คือ ผู้ถือกรรมสิทธิ์
3. Name_1 (A8) คือ ชื่อของบัสที่ส่ง
4. kV1 (F4.0) คือ แรงดันของบัสที่ส่ง มีหน่วยเป็น kV
5. M (I1) คือ เครื่องวัดบัสที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหล
6. Name_2 (A8) คือ ชื่อของบัสที่รับ
7. kV2 (F4.0) คือ แรงดันของบัสที่รับ มีหน่วยเป็น kV
8. C (I1) คือ ข้อมูลวงจร
9. S (I1) คือ จำนวนวงจรปิด
10. In (F4.0) คือ พิกัดกระแส
11. N (I1) คือ จำนวนวงจร
12. R (F6.5) คือ ขนาดของ R ต่ออนุกรมในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u
13. X (F6.5) คือ ขนาดของ X ต่ออนุกรมในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u
14. G/2 (F6.5) คือ ขนาดของ G/2ต่อขนานในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u
15. B/2 (F6.5) คือ ขนาดของ B/2ต่อขนานในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u
16. Mil (F4.1) คือ ระยะของสายส่ง มีหน่วยเป็น miles

ข้อมูลหม้อแปลง ประกอบด้วย

1. Type (A2) คือ ชนิดหม้อแปลง "T "
2. Ow (A3) คือ ผู้ถือกรรมสิทธิ์
3. Name_1 (A8) คือ ชื่อของบัสที่ส่ง
4. kV1 (F4.0) คือ แรงดันของบัสที่ส่ง มีหน่วยเป็น kV
5. M (I1) คือ เครื่องวัดบัสที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหล
6. Name_2 (A8) คือ ชื่อของบัสที่รับ
7. kV2 (F4.0) คือ แรงดันของบัสที่รับ มีหน่วยเป็น kV
8. C (I1) คือ ข้อมูลวงจร
9. S (I1) คือ จำนวนวงจรปิด
10. Sn (F4.0) คือ พิกัดหม้อแปลง มีหน่วยเป็น MVA

- | | |
|-----------------|--|
| 11. N (I1) | คือ จำนวนวงจร |
| 12. R (F6.5) | คือ ขนาดของ R ต่ออนุกรมในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u |
| 13. X (F6.5) | คือ ขนาดของ X ต่ออนุกรมในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u |
| 14. G/2 (F6.5) | คือ ขนาดของ G ต่อขนานในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u |
| 15. B/2 (F6.5) | คือ ขนาดของ B ต่อขนานในวงจร PI มีหน่วยเป็น p.u |
| 16. Tap1 (F5.2) | คือ แรงดันส่วนแบ่งของบัสที่ส่ง มีหน่วยเป็น kV |
| 17. Tap2 (F5.2) | คือ แรงดันส่วนแบ่งของบัสที่รับ มีหน่วยเป็น kV |

ข้อมูลการควบคุมโปรแกรม ประกอบด้วย

- | | |
|------------------|--|
| 1. Max Iter (I5) | คือ จำนวนรอบสูงสุดของการคำนวณ Newton-Raphson |
| 2. Name (A8) | คือ ชื่อของ slack bus |
| 3. kV (F4.0) | คือ แรงดันของ slack bus มีหน่วยเป็น kV |
| 4. Angle (F10.4) | คือ มุมของ slack bus มีหน่วยเป็น องศา |

ข้อมูลของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิด SVC ประกอบด้วย

- | | |
|----------------|---|
| 1. Type (A2) | คือ ชนิดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าชนิด SVC "FS" |
| 2. Ow (A3) | คือ ผู้ถือกรรมสิทธิ์ |
| 3. Bus1 (A8) | คือ บัสของระบบที่เชื่อมต่อกับ SVC |
| 4. kV1 (F4.0) | คือ แรงดันบัสของระบบที่เชื่อมต่อกับ SVC มีหน่วยเป็น kV |
| 5. Bus2 (A8) | คือ บัสของระบบที่ SVC ควบคุม. |
| 6. kV2 (F4.0) | คือ แรงดันบัสของระบบที่ SVC ควบคุม มีหน่วยเป็น kV |
| 7. Xc (F8.7) | คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของ SVC มีหน่วยเป็น p.u |
| 8. Xl (F8.7) | คือ ค่าอินดักแตนซ์ของ SVC มีหน่วยเป็น p.u |
| 9. am (F3.0) | คือ มุมจุดชนวนต่ำสุด มีหน่วยเป็น องศา |
| 10. aM (F3.0) | คือ มุมจุดชนวนสูงสุด มีหน่วยเป็น องศา |
| 11. s (F2.0) | คือ ค่าความชันในการควบคุม SVC มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ |
| 12. MVA (F4.0) | คือ พิกัดสูงสุดของ SVC มีหน่วยเป็น MVAR (ตัวเก็บประจุ). |
| 13. Vrf (F4.3) | คือ แรงดันควบคุมอ้างอิง มีหน่วยเป็น p.u |
| 14. kV (F4.0) | คือ แรงดันด้านแรงต่ำของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น kV. |
| 15. Xth (F8.7) | คือ ค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงลดแรงดัน มีหน่วยเป็น p.u |

ข้อมูลของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ายัดหยุ่นชนิด STATCOM ประกอบด้วย

1. - Type (A2) คือ ชนิดอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ายัดหยุ่นชนิด STATCOM "FT"
2. Ow (A3) คือ ผู้ถือกรรมสิทธิ์
3. Bus1 (A8) คือ บัสของระบบที่เชื่อมต่อกับ SVC
4. kV1 (F4.0) คือ แรงดันบัสของระบบที่เชื่อมต่อกับ SVC มีหน่วยเป็น kV
5. Bus2 (A8) คือ บัสของระบบที่ SVC ควบคุม.
6. kV2 (F4.0) คือ แรงดันบัสของระบบที่ SVC ควบคุม มีหน่วยเป็น kV
7. R (F6.0) คือ ค่า R ในวงจรไฟฟ้า AC ของ STATCOM มีหน่วยเป็น p.u
8. X (F6.5) คือ ค่า X ในวงจรไฟฟ้า AC ของ STATCOM มีหน่วยเป็น p.u
9. Gc (F6.5) คือ ค่า G ในวงจรไฟฟ้า DC ของ STATCOM มีหน่วยเป็น p.u
10. Im (F6.4) คือ ค่ากระแสสูงสุดของคาปาซิเตอร์ ($I_{min} > 0$) มีหน่วยเป็น p.u
11. IM (F6.4) คือ ค่ากระแสสูงสุดของอินดักเตอร์ ($I_{min} > 0$) มีหน่วยเป็น p.u
12. s (F3.0) คือ ค่าความชันของการควบคุมในวงจรไฟฟ้า AC ของ STATCOM SVC มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
13. MVA (F5.0) คือ พิกัดของ STATCOM มีหน่วยเป็น MVA
14. Vrf (F4.3) คือ แรงดันไฟฟ้า AC ควบคุมอ้างอิง มีหน่วยเป็น p.u
15. M (A1) คือ โหมดการควบคุม :
“W” สำหรับ การควบคุมแบบ PWM
“P” สำหรับ การควบคุมเฟส
16. Con (F6.5) คือ การปรับค่าการควบคุม:
k เป็นค่าคงที่ใช้สำหรับการควบคุมเฟส (มีค่าเป็น 0.9 สำหรับ 12 พัลส์)
แรงดันไฟฟ้า DC ควบคุมอ้างอิง สำหรับการควบคุมแบบ PWM (มีค่าเท่ากับ 1 p.u).

ตัวอย่างข้อมูลของระบบ IEEE 14 บัส ในโปรแกรม UWPFLOW

ข้อมูลนี้เป็นตัวอย่างของระบบ IEEE 14 Bus ที่นำมาใช้เป็นระบบอ้างอิงเพื่อนำมาเขียนเส้น
โค้ง P-V

C*****

C 14 BUS TEST SYSTEM:

C WSCC data file

C Case Title (3 A8 lines)

HDG

14 BUS AC TEST SYSTEM

WSCC/ETMSP DATA FORMAT

NOVEMBER 2002

BAS

C System Data

C AC BUSES

C Bus Input Data:

C - Type (A2) -> "B " -> PQ load bus

C "BQ" -> PV generator bus with Q limits

C "BE" -> PV generator bus with no Q limits

C "BV" -> PQ generator bus with V limits

C "BG" -> PQ generator bus with Q limits controlling voltage on

C a remote PV load bus

C "BC" -> PV load bus with remote voltage control

C "BT" -> PQ load bus with voltage controlled by LTC transformer

C "BS" -> Swing bus

C - Ow (A3) -> Owner

C - Name (A8) -> Bus Name

C - kV (F4.0) -> Bus kV base

C - Z (2A) -> Zone

C - PL (F5.0) -> P load in MW

C - QL (F5.0) -> Q load in MVAR

C - SHUNT (2F4.0) -> MW and MVAR shunts (+ for Capacitors)

C - PM (F4.0) -> Max. generator P power in MW

C - P (F5.0) -> generator P power in MW
 C - QM (F5.0) -> Max. generator Q power in MVAR (not needed for "BE" PV bus types)
 C - Qm (F5.0) -> Min. generator Q power in MVAR (not needed for "BE" PV bus types)
 C - Vpu (F4.3)-> PV desired voltage magnitude in p.u. (max. voltage for "BV" PV bus type)
 C - Vm (F4.3) -> Min. voltage for "BV" PV bus type.
 C - Remote Name (A8) -> Remote controlled bus name for "BG" type bus.
 C - Remote kV (F4.0) -> Remote controlled bus kV for "BG" type bus.
 C - Remote %Q (I3) -> Percentage of Q of remote bus control for "BG" type bus.

C 1 2 3 4 5 6 7 8
 C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C		SHUNT				REMOTE BUS									
C	Ow Name	kV	Z PL	QL	MW	Mva	PM	P	QM	Qm	Vpu	Vm	Name	kV	%Q
BQ	BUS_1	69.0IE	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	9999.232	6990.0	-9891060	0	0.0					
BQ	BUS_2	69.0IE	21.7012.70	0.0000.0000	0.0000.0000	9999.400	50.00-40.01	045	0	0.0					
BQ	BUS_3	69.0IE	94.2019.00	0.0000.0000	0.0000.0000	9999.000	040.00.0000	1010	0	0.0					
B	BUS_4	69.0IE	47.804.000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
B	BUS_5	69.0IE	7.6001.600	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
BQ	BUS_6	13.8IE	11.207.500	0.0000.0000	0.0000.0000	9999.000	024.00-6.00	1070	0	0.0					
B	BUS_7	13.8IE	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
BQ	BUS_8	18.0IE	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	9999.000	024.00-6.00	1090	0	0.0					
B	BUS_9	13.8IE	29.5016.60	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
B	BUS_10	13.8IE	9.0005.800	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
B	BUS_11	13.8IE	3.5001.800	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
B	BUS_12	13.8IE	6.1001.600	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
B	BUS_13	13.8IE	13.505.800	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					
B	BUS_14	13.8IE	14.905.000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0.0000.0000	0	0	0.0					

C*****

C AC LINES

C Line Input Data:

C - Type (A2) -> "L "

C - Ow (A3) -> Owner

C - Name_1 (A8) -> Name of sending bus

C - kV1 (F4.0) -> kV base for sending bus

C - M (I1) -> Metered bus for flow interchange

C - Name_2 (A8) -> Name of receiving bus

C - kV2 (F4.0) -> kV base for receiving bus

C - C (I1) -> Circuit ID

C - S (I1) -> Section number

C - In (F4.0) -> Rated Amps.

C - N (I1) -> Circuit number

C - R (F6.5) -> p.u. series R of PI equivalent

C - X (F6.5) -> p.u. series X of PI equivalent

C - G/2 (F6.5) -> p.u. shunt G/2 of PI equivalent

C - B/2 (F6.5) -> p.u. shunt B/2 of PI equivalent

C - Mil (F4.1) -> Length in miles

C

C 1 2 3 4 5 6 7 8

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C M CS N

C |Ow|Name_1 |kV1||Name_2 |kV2||In || R | X | G/2 | B/2 |Mil|

L BUS_1 69.01BUS_2 69.011.0001.01938.05917.00000.02640

L BUS_1 69.01BUS_5 69.011.0001.05403.22304.00000.02460

L BUS_2 69.01BUS_3 69.011.0001.04699.19797.00000.02190

L BUS_2 69.01BUS_4 69.011.0001.05811.17632.00000.01870

L BUS_2 69.01BUS_5 69.011.0001.05695.17388.00000.01700

L BUS_3 69.01BUS_4 69.011.0001.06701.17103.00000.01730

L BUS_4 69.01BUS_5 69.011.0001.01335.04211.00000.00640

L BUS_6 13.81BUS_11 13.811.0001.09498.19890.00000.00000

L BUS_6 13.81BUS_12 13.811.0001.12291.25581.00000.00000
 L BUS_6 13.81BUS_13 13.811.0001.06615.13027.00000.00000
 L BUS_7 13.81BUS_8 18.011.0001.00000.17615.00000.00000
 L BUS_7 13.81BUS_9 13.811.0001.00000.11001.00000.00000
 L BUS_9 13.81BUS_10 13.811.0001.03181.08450.00000.00000
 L BUS_9 13.81BUS_14 13.811.0001.12711.27038.00000.00000
 L BUS_10 13.81BUS_11 13.811.0001.08205.19207.00000.00000
 L BUS_12 13.81BUS_13 13.811.0001.22092.19988.00000.00000
 L BUS_13 13.81BUS_14 13.811.0001.17093.34802.00000.00000

C*****

C TRANSFORMERS

C Transformer Input Data:

C - Type (A2) -> "T "

C - Ow (A3) -> Owner

C - Name_1 (A8) -> Name of sending bus

C - kV1 (F4.0) -> kV base for sending bus

C - M (I1) -> Metered bus for flow interchange

C - Name_2 (A8) -> Name of receiving bus

C - kV2 (F4.0) -> kV base for receiving bus

C - C (I1) -> Circuit ID

C - S (I1) -> Section number

C - Sn (F4.0) -> Rated MVA

C - N (I1) -> Circuit number

C - R (F6.5) -> p.u. series R of equivalent circuit

C - X (F6.5) -> p.u. series X of equivalent circuit

C - G (F6.5) -> p.u. shunt G of equivalent circuit

C - B (F6.5) -> p.u. shunt B of equivalent circuit

C - Tap1 (F5.2) -> kV tap for sending bus

C - Tap2 (F5.2) -> kV tap for receiving bus

C

```

C   1   2   3   4   5   6   7   8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C           M           CS
C |Ow|Name_1 |kV1||Name_2 |kV2||Sn |R |X |G |B |Tap1|Tap2|
T  BUS_4 69.01BUS_7 13.811.0001.00000.20912.00000.0000067.4813.80
T  BUS_4 69.01BUS_9 13.811.0001.00000.55618.00000.0000066.8613.80
T  BUS_5 69.01BUS_6 13.811.0001.00000.25202.00000.0000064.3113.80
A IEEE14  BUS_2 69.0 0.00 IE
C*****
C           SOLUTION CONTROL CARD
C Solution control card:
C - Max Iter (I5) -> Maximum number of Newton-Raphson iteration
C - Name (A8) -> Name of the slack bus
C - kV (F4.0) -> kV base for slack bus
C - Angle (F10.4) -> Reference angle for slack bus in degrees
C
C   1   2   3   4   5   6   7   8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C           |Max| |SLACK BUS |
C           |Itr| |Name |kV| |Angle |
SOL1       20 BUS_1 69.0 0.0000 1.1000 1 1.00
IND
END

```

ตัวอย่างของข้อมูลของ SVC และ STATCOM

```
C*****
C
C          SVC DATA
C
C SVC Input Data:
C - Type (A2) -> "FS" (F for FACTS, S for SVC).
C - Ow (A3)  -> Owner
C - Bus1 (A8) -> System bus where SVC is connected.
C - kV1 (F4.0) -> Bus 1 kV base.
C - Bus2 (A8) -> System bus that SVC controls.
C - kV2 (F4.0) -> Bus 2 kV base.
C - Xc (F8.7) -> Per unit SVC capacitive X w.r.t. MVA and kV1 base.
C - Xl (F8.7) -> Per unit SVC inductive X w.r.t. MVA and kV1 base.
C - am (F3.0) -> Minimum firing angle alpha in degrees.
C - aM (F3.0) -> Maximum firing angle alpha in degrees.
C - s (F2.0)  -> SVC control slope in % w.r.t. to MVA and kV1 base.
C - MVA (F4.0) -> SVC maximum rating in MVAR (capacitive).
C - Vrf (F4.3) -> p.u. reference control voltage.
C - kV (F4.0) -> Low kV side of step-down transformer (optional).
C - Xth (F8.7) -> Step-down transformer reactance in p.u. w.r.t. to SVC MVA
C          rating and kV1 (optional).
C - al (F5.1) -> Initial value of firing angle in degrees (optional).
C
C   1   2   3   4   5   6   7   8
C234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
C |Ow|Bus1 |kV1 |Bus2 |kV2|Xc  |Xl  |am|aM|s|MVA|Vrf|kV |Xth  |al
FS  BUS_5 69.0 BUS_5 69.0 1.1708 0.4925 90175 2 150 1.26. 0.1
C
C*****
```


ภาคผนวก ข.1

ขั้นตอนการรันโปรแกรม UWPFLOW ในงานวิจัย

1. เมื่อกำหนดข้อมูล เสร็จแล้ว ให้บันทึกไฟล์เป็นชนิด Windows Script Component (.wsc)
2. เขียนคำสั่งรัน โปรแกรมของข้อมูลที่บันทึกไว้ มีรูปแบบดังนี้

uwflow [-options] input_file [[>]output_file]

บันทึกไฟล์เป็นชนิด MS-DOS Batch File

ตัวอย่างของคำสั่งรัน โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

“uwflow bc_14.wsc -Kieee14.k -cbc_14.m -m -O -s -k0.1”

โปรแกรม UWPFLOW รับข้อมูลจากไฟล์ **bc_14.wsc** และ อ่านข้อมูลของแหล่งจ่าย และ โหลดที่ไฟล์ **ieee14.k** บันทึกข้อมูลผลที่ได้จากโปรแกรมชื่อ **bc_14.m**

3. เขียนเส้น โคงง P-V จากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม UWPFLOW



ภาคผนวก ค

ค.1 บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

ค.2 บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติ

ภาคผนวก ค.1

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

















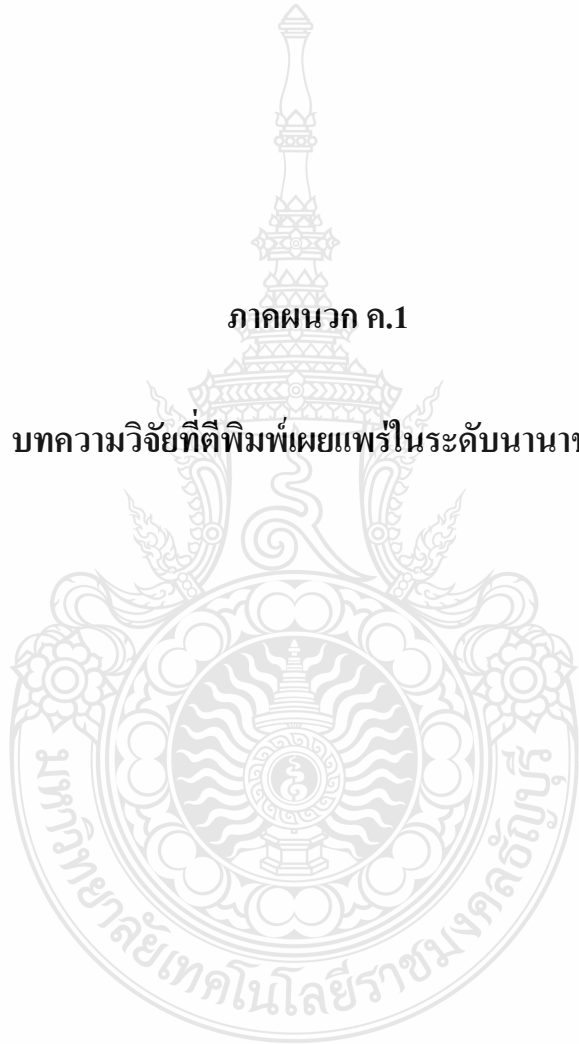






ภาคผนวก ค.1

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ























Response of DSTATCOM under Voltage Flicker In Farm Wind

K. Aodsup¹, P. N. Boonchiam¹, A. Sode-Yome², P. Kongsuk³ and N. Mithulananthan⁴

¹Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathunthani, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Siam University, Bangkok, Thailand

³Industrial Technology Field of Study, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Thailand

⁴Energy Field of Study, Asian Institute of Technology, Thailand

Abstract—This paper presents the response of distribution static synchronous compensator (DSTATCOM). The connection of wind turbines to distribution systems may affect the voltage quality offered to the consumers. One of the factors contributing to this effect is the rapid variations of the wind turbine output power, which cause respective fluctuations in the supply voltage referred to as flicker. This paper presents the design, control and analysis of a DSTATCOM enhanced with an energy storage device when combined with a wind farm comprising fixed speed induction generators. In this paper it is shown that the DSTATCOM, controlled via a decoupled vector control technique, is an effective way of reducing voltage flicker emissions at the point of common coupling, removing the wind speed fluctuations and improving the transient stability of wind farm. Energy storage rating requirements are discussed in relation to the level of power quality obtained.

Index terms- DSTATCOM, power quality, wind farm

I. INTRODUCTION

Wind turbines connected to electrical grids may affect the power quality of the supply, as a result of the fluctuating character of their output power. This contains both periodic component and random variations, resulting in corresponding fluctuations of the voltage magnitude along the feeder where the wind turbines are connected. Fluctuations in the frequency range between 0.5 and 35 Hz contribute to the light flickering effect, referred to as "flicker". Flicker is evaluated according to IEC 60860 standard [1][2]. A common measure of its severity is the short-term flicker index, P_{st} measured over 10 min periods, whereas in certain cases the long-term (120 min) index, P_{lt} is also applicable. The drawback characteristic of wind turbine are the higher mechanical stress, and the enhanced effect of power fluctuations caused by the blades passing the tower, power variations caused by variable with speeds. Real and reactive power injection is thus necessary to compensate for these effects.

Static compensators (STATCOMs) are promising technology that can control grid voltage more rapidly than synchronous generators and thyristor based static var compensators [3] and can improve power quality [4]. STATCOMs are used at a transmission level [5] and distribution level, where they are known as DSTATCOM [6]. Without energy storage, a DSTATCOM can control the voltage by exchanging reactive power with the grid, but their capacity to exchange active power is very limited due to the small energy that can be stored in a conventional DC-link

capacitor. DSTATCOM enhanced with energy storage can give additional benefits, such as increased capacity to damp electro-mechanical oscillation, increased power quality and reliability of system.

Wind farm combined with a DSTATCOM comprising an energy storage device placed onshore, could balance the reactive and real power needed to boost the voltage at the point of common coupling (PCC), mitigate flicker emissions and eliminate wind speed fluctuations. This paper describes analysis and control design of DSTATCOM to control the voltage at the PCC, keep the power constant at the load and mitigate flicker emissions from intermittent wind speeds. The MATLAB/simulink software package is used to simulate the proposed compensation strategies. A vector control technique based on the decoupling of real and reactive power.

II. THE GRID

The study case power system considered in this paper is shown in Fig. 1. The medium voltage distribution grid is represented by its Thevenin equivalent, consisting of a voltage source E_{th} and the series impedance Z_{th} . A concentrated local load is connected at the PCC, corresponding to the consumer loads in the nearby area. Although the local load could have been included in the Thevenin equivalent of the grid, it is modeled here independently in order to investigate its effect on the PCC.

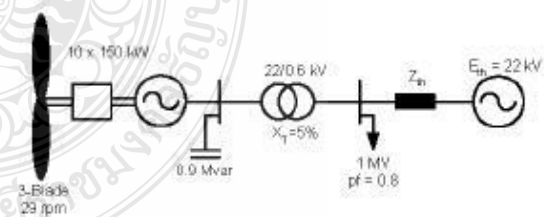


Fig. 1. Study case power system.

A 1.5 MW wind farm consisting of ten 150 kW wind turbines connected to a 22 kV distribution system exports power to a 230 kV grid through a 20 km, 22 kV feeder. A 0.9 Mvar ($Q=50$) filter are connected at the 575 V generation bus. The turbine parameters specifying ratings of power components of the wind turbine are saved in a Matlab programme. This file is automatically executed at simulation start so that parameters for the 10x150 kW turbines are loaded

in our Matlab workspace. The wind turbine is equipped with a 3-blade fixed-pitch rotor, rotating at 29 rpm. The rotor aerodynamic characteristics are simulated using its static aerodynamic power coefficient, $C_P(\lambda)$, curve, resulting in the power curve shown in Fig. 2.

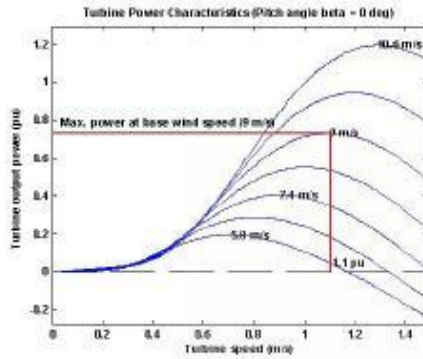


Fig. 2. Wind turbine power curve.

III. FLICKER CALCULATION

The assessment of the short-term flicker index, P_{st} , is performed as specified in IEC 60868 and briefly described in this section, for the sake of completeness. In Fig. 3, the UIE/IEC flickermeter block diagram is shown. Input is a 10-min time series of the voltage at the evaluation node, which may be expressed as

$$u(t) = [U_0 + \Delta U(t)] \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

where U_0 is the average node voltage magnitude, $\Delta U(t)$ the superimposed amplitude variations, $\omega = 2\pi f$ the system frequency and ψ the initial phase angle. Using equation (1), the output of the first block of the flickermeter can be expressed as:

$$\frac{u^2(t)}{U_0} = \frac{U_0 + \Delta U(t)}{2} - \left[\frac{U_0 + \Delta U(t)}{2} \right] \cos[2(\omega t + \psi)] \quad (2)$$

The constant $U_0/2$ in the above expression is eliminated by the high pass filter (1st order, 0.5 Hz cut-off frequency), whereas the double power frequency component is filtered out by the subsequent low-pass filter block (6th order Butterworth, 35 Hz cut-off frequency). Hence, output of the third block are the voltage magnitude variations, $\Delta U(t)$, in the frequency range 0.5 to 35 Hz.

The next block in diagram of Fig. 3 is a weighting function, simulating the perception ability of the human eye vs. the frequency of the disturbing signal. The peak of this curve is located at 8.8 Hz. Since the irritation caused is proportional to the square of the voltage magnitude fluctuations, the output of the weighting function block is squared and led to a 1st order lag, representing the memory tendency of the human brain. Its output is the time series of the instantaneous flicker sensation, $P_{st}(t)$.

The calculation of the short term flicker index, P_{st} , required then a simple statistical processing of the $P_{st}(t)$ time series. First the cumulative duration curve of the $P_{st}(t)$ values is found. The P_{st} index is then given by

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1s} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{5s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}} \quad (3)$$

where P_x is the x % percentile (i.e. the flicker level which is exceeded for x % of the time), calculated from the $P_{st}(t)$ duration curve. The subscript “ s ” denoted smoothed values, obtained by averaging neighboring values of the duration curve, as described in IEC 60868-0.



Fig. 3. UIE/IEC flickermeter functional diagram.

IV. MATHEMATICAL MODEL OF DSTATCOM

DSTATCOM shown in Fig.4 is modeled using the dg transformation as defined in [8]. The inverter block is treated as an ideal lossless voltage source converter. The inverter switching losses are represented by a resistance R_f in parallel with a DC-link energy store supercapacitor. The transformer leakage reactance and the inverter series resistance are represented by L_f and R_f , respectively

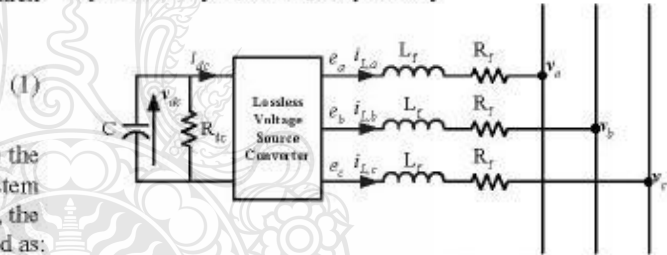


Fig. 4. Equivalent circuit of DSTATCOM.

The AC-side equations can be written in terms of the instantaneous variables shown in Fig. 1.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{R_f}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a - v_a \\ e_b - v_b \\ e_c - v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Equation 4 is converted into per-unit values and transform to rotating frame as shown in (5)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f \omega_s}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{R_f \omega_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{\omega_s}{L} \begin{bmatrix} e_d - v \\ e_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

where v is the *rms*-value of the grid voltage.

The instantaneous power at the DC and AC side of the DSTATCOM inverter must be equal and therefore the following power balance equation must be hold:

$$P_{dc} = P_{ac} \Rightarrow v_{dc} i_{dc} = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \quad (6)$$

From Fig. 2 and using p.u. values, the DC side circuit equation is derived as follows:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{v_{dc}}{R_f} - \frac{1}{C} i_{dc} \quad (7)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\omega_b C \left(i_{dc} + \frac{v_{dc}}{R_f} \right) \quad (8)$$

The state space equation for DSTATCOM is obtained:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} - \frac{\omega_b}{L} \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Linearising around an operation point and using the fact that no active power is exchanged at the equilibrium point it is possible to get a decoupled expression for i_d and i_q [2].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_f \omega}{L} & 0 \\ 0 & \frac{R_f \omega}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

It can be seen from equation (10) that no cross-coupling between i_d and i_q occurs. Also, if c_1 and c_2 are expressed as in equation (11), a real and reactive power decoupled vector control strategy can be achieved since i_d can be used to regulate the active power and i_q to control the reactive power flow.

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_d^* - i_d) \\ \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_q^* - i_q) \end{bmatrix} \quad (11)$$

The relation between the DC-side voltage and the line-to-neutral AC side voltage of the inverter terminal can be expressed as follows:

$$e_d = m v_{dc} \cos \alpha \quad (12)$$

$$e_q = m v_{dc} \sin \alpha \quad (13)$$

The modulation index m is the magnitude ratio of the DC and AC side voltage and α is the angle by which the inverter voltages lead or lag the bus voltages. A vector control scheme controls i_d and i_q by varying the modulation index and angle, as shown in Fig. 5. A phase-locked-Loop (PLL) is used to provide the reference voltage angle θ , thereby synchronizing the current vectors to the fundamental of the PCC voltages

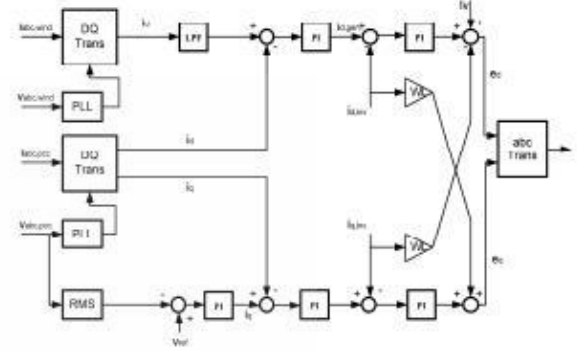


Fig. 5 DSTATCOM vector control scheme-LPF: Low Pass Filter, PI: Proportional Integral regulator.

The wind turbines current are subjected to a low pass filter, which has a selectable time constant to achieve different cut-off frequency. The filter i_{wv} signal provides the real power reference of the control scheme. The functionality of this LPF can be explained as follows. Selecting a 10-4 Hz cut-off makes the input current reference virtually constant representing effectively the mean of i_{wv} . In this case, the control system will try to perfectly smooth the power at the PCC by maximum variation of the real power component of the DSTATCOM current i_{dinv} to compensate for real power fluctuation in i_{wv} . On the other hand, a LPF with 1 Hz cut-off relaxes significantly the bandwidth of control, in other words allowing some fluctuation at PCC, resulting in less power compensation and requiring less energy storage.

V. ENERGY STORAGE SIZING

For a practical application it is important to minimize the energy storage rating to reduce the cost and size. The required energy storage can be derived from the modulation in energy exchange by the STATCOM which is necessary to reduce flicker to an acceptable level for a certain site. The DC-link energy is used in order to assess the energy requirement of constant and LPF references, over a specific period.

$$E_{dc} = \int P_{dc} dt = \int V_{dc} I_{dc} dt \quad (14)$$

A minimum value for DC voltage must be chosen to avoid an excessive current rating of the power electronic converter, and to be able to control P and Q independently. A minimum value of 90% of the nominal DC voltage has been chosen here. The

value of capacitance can then be calculated from the measured peak to peak DC energy as follows.

$$E_{dc} = \frac{1}{2} C (V_{dc}^2 - (0.9V_{dc}^2)) \quad (15)$$

VI. SIMULATION RESULT

Simulation used power distribution of Thailand sizing 22 kV 50 Hz .Connect to transformer 100 kVA . DSTATCOM can compensation voltage flicker more 10 sec with used capacitor sizing 40 mF and control dc voltage at dc link. Fig. 6 shows during voltage flicker at 40 ms . Fig. 7 show current inject to system when during voltage flicker at 40 ms and Fig. 8 shows voltage curve of phase A when DSTATCOM compensation . From simulation DSTATCOM can compensation voltage flicker.

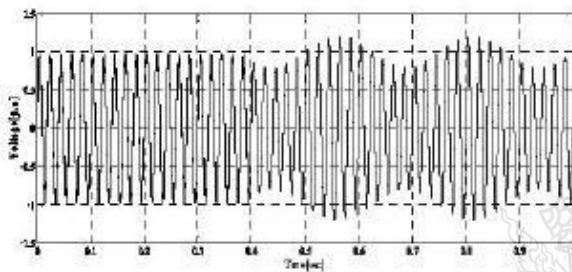


Fig. 6. Voltage Flicker at Phase A

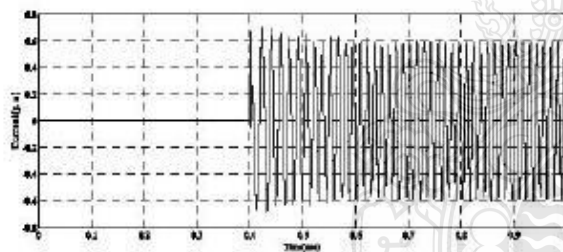


Fig. 7. Output current of the D-STATCOM

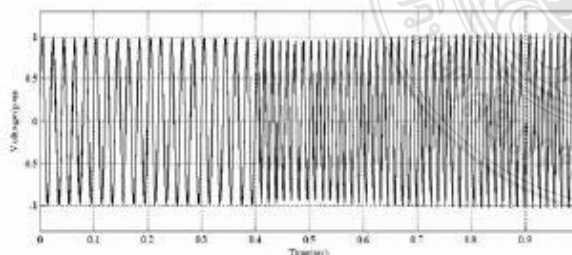


Fig. 8. Voltage waveform before and during the compensation

VII. CONCLUSIONS

The use of an energy storage device linked to a DSTATCOM to provide real power as well as reactive power flow was explored in this paper. The results have shown that the DSTATCOM device has the ability to significantly reduce the power fluctuation generated by wind farm comprising fixed speed induction generators, while also keeping the voltage at the PCC at 1 p.u. In addition, the wind farm's fault ride through capability can be greatly improved by the DSTATCOM. For commercial application a more detailed design and technical can economic analysis needs to be carried out. Taking into consideration maintenance and operation costs, this would allow a comparison between a wind farm using fixed speed induction generators combined with DSTATCOM onshore, and wind farms which inherently generate less flicker due to the smoothing effect of the rotor with variable speed.

REFERENCES

- [1] CIGRE Study Committee, "Development of Dispersed Generation and Consequence for Power System," Final Report of WG C6.01 (ex 37.33), July, 2003.
- [2] J.G. Slootweg, W.L. Kling, "Aggregated Modeling of Wind Parks in Power system Dynamic Simulations", Delft University of Technology, the Netherlands
- [3] Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus, "An Aggregated wind Park Model", Technical University of Lisbon, Portugal
- [4] C. Abbey, B. Rhodabakhchian, F. Zhou, "Transient modelling and comparison of wind generator topologies", International conference on power system transients (IPST'05), Canada
- [5] J.G. Slootweg, W.L. Kling, "Modelling of Large Wind Farms in Power System Simulation", Delft University of Technology, the Netherlands
- [6] N. Mithulananthan, Claudio A. Canizares: "Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillation", IEEE Trans. Power Systems, October 2002
- [7] P. Garcia-Gonzalez, A. Garcia C., "Control system for a PWM-based STATCOM", Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Spain.
- [8] P.S. Sensarma, K.R. Padiyar, "Analysis and performance Evaluation of a Distribution STATCOM for compensating Voltage Fluctuations", The Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Science, India

5th **EMSES 2007** November 21 -24,2007 at PATTAYA, THAILAND

Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

5th EMSES PROCEEDING



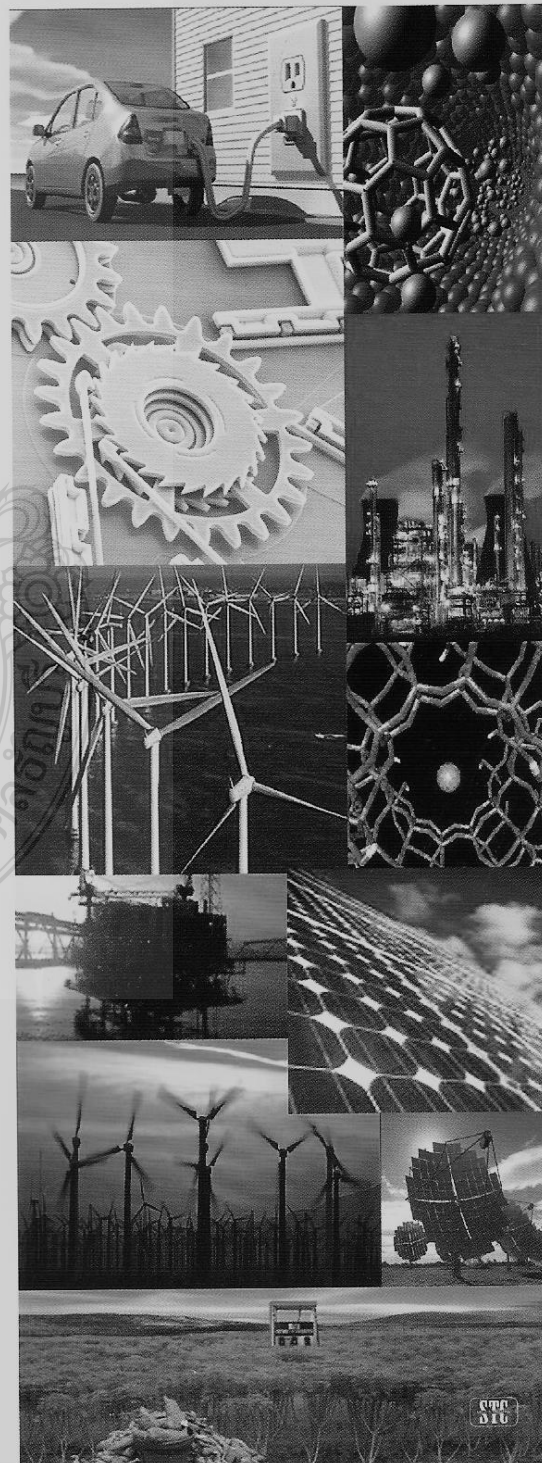
Eco-energy Materials Science Engineering Symposium

Session

- A : New Energy
- B : Eco-Materials
- C : Sustainable Environment
- D : Nanotechnology

November 21-24 , 2007

“ Asia Pattaya Hotel , Pattaya THAILAND ”



www.thaipolymersociety.org



Polymer Society (Thailand)
สมาคมพอลิเมอร์ (ประเทศไทย)



กรม
DIT

Voltage Flicker Mitigation In Wind Farm By Using DSTATCOM

K. Aodsup¹, P. N. Boonchiam¹, A. Sode-Yome², P. Kongsuk³ and B. Plangklang¹

¹Power System Research Center, Department of Electrical Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathunthani, Thailand

²Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Thailand

³Industrial Technology Field of Study, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Thailand

Abstract—This paper presents the response of distribution static synchronous compensator (DSTATCOM). The connection of wind turbines to distribution systems may affect the voltage quality offered to the consumers. One of the factors contributing to this effect is the rapid variations of the wind turbine output power, which cause respective fluctuations in the supply voltage referred to as flicker. This paper presents the design, control and analysis of a DSTATCOM enhanced with an energy storage device when combined with a wind farm comprising fixed speed induction generators. In this paper it is shown that the DSTATCOM, controlled via a decoupled vector control technique, is an effective way of reducing voltage flicker emissions at the point of common coupling, removing the wind speed fluctuations and improving the transient stability of wind farm. Energy storage rating requirements are discussed in relation to the level of power quality obtained.

Keywords: DSTATCOM, power quality, wind farm

1. INTRODUCTION

Wind turbines connected to electrical grids may affect the power quality of the supply, as a result of the fluctuating character of their output power. This contains both periodic component and random variations, resulting in corresponding fluctuations of the voltage magnitude along the feeder where the wind turbines are connected. Fluctuations in the frequency range between 0.5 and 35 Hz contribute to the light flickering effect, referred to as “flicker”. Flicker is evaluated according to IEC 60860 standard [1][2]. A common measure of its severity is the short-term flicker index, P_{st} measured over 10 min periods, whereas in certain cases the long-term (120 min) index, P_{lt} is also applicable. The drawback characteristic of wind turbine are the higher mechanical stress, and the enhanced effect of power fluctuations caused by the blades passing the tower, power variations caused by variable with speeds. Real and reactive power injection is thus necessary to compensate for these effects.

Static compensators (STATCOMs) are promising technology that can control grid voltage more rapidly than synchronous generators and thyristor based static var compensators [3] and can improve power quality [4]. STATCOMs are used at a transmission level [5] and distribution level, where they are known as DSTATCOM [6]. Without energy storage, a DSTATCOM can control the voltage by exchanging reactive power with the grid, but their capacity to exchange active power is very limited due to the small energy that can be stored in a conventional DC-link capacitor. DSTATCOM enhanced with energy storage can give additional benefits, such as increased capacity to damp electro-mechanical oscillation, increased power quality and reliability of system.

Wind farm combined with a DSTATCOM comprising an energy storage device placed onshore, could balance the reactive and real power needed to boost the voltage at the point of common coupling (PCC), mitigate flicker emissions and eliminate wind speed fluctuations. This paper describes analysis and control design of DSTATCOM to control the voltage at the PCC, keep the power constant at the load and mitigate flicker

emissions from intermittent wind speeds. The MATLAB/simulink software package is used to simulate the proposed compensation strategies. A vector control technique based on the decoupling of real and reactive power.

2. THE GRID

The study case power system considered in this paper is shown in Fig. 1. The medium voltage distribution grid is represented by its Thevenin equivalent, consisting of a voltage source E_{th} and the series impedance Z_{th} . A concentrated local load is connected at the PCC, corresponding to the consumer loads in the nearby area. Although the local load could have been included in the Thevenin equivalent of the grid, it is modeled here independently in order to investigate its effect on the PCC.

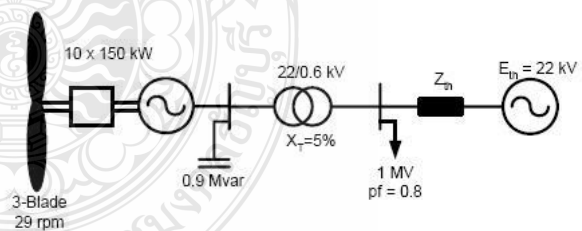


Fig. 1 Study case power system.

A 1.5 MW wind farm consisting of ten 150 kW wind turbines connected to a 22 kV distribution system exports power to a 230 kV grid through a 20 km, 22 kV feeder. A 0.9 Mvar ($Q=50$) filter are connected at the 575 V generation bus. The turbine parameters specifying ratings of power components of the wind turbine are saved in a Matlab programme. This file is automatically executed at simulation start so that parameters for the 10x150 kW turbines are loaded in our Matlab workspace. The wind turbine is equipped with a 3-blade fixed-pitch rotor, rotating at 29 rpm. The rotor aerodynamic characteristics are simulated using its static aerodynamic power coefficient, $C_p(\lambda)$, curve, resulting in the power curve shown in Fig. 2.

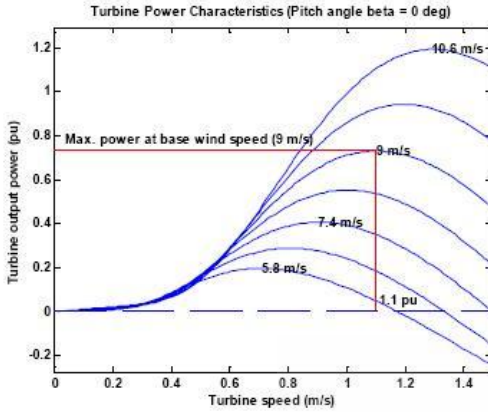


Fig. 2 Wind turbine power curve.

3. FLICKER CALCULATION

The assessment of the short-term flicker index, P_{st} , is performed as specified in IEC 60868 and briefly described in this section, for the sake of completeness. In Fig.3, the UIE/IEC flickermeter block diagram is shown. Input is a 10-min time series of the voltage at the evaluation node, which may be expressed as

$$u(t) = [U_0 + \Delta U(t)] \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

where U_0 is the average node voltage magnitude, $\Delta U(t)$ the superimposed amplitude variations, $\omega = 2\pi f$ the system frequency and ψ the initial phase angle. Using equation (1), the output of the first block of the flickermeter can be expressed as:

$$\frac{u^2(t)}{U_0} = \frac{U_0}{2} + \Delta U(t) - \left[\frac{U_0}{2} + \Delta U(t) \right] \cos[2(\omega t + \psi)] \quad (2)$$

The constant $U_0/2$ in the above expression is eliminated by the high pass filter (1st order, 0.5 Hz cut-off frequency), whereas the double power frequency component is filtered out by the subsequent low-pass filter block (6th order Butterworth, 35 Hz cut-off frequency). Hence, output of the third block are the voltage magnitude variations, $\Delta U(t)$, in the frequency range 0.5 to 35 Hz.

The next block in diagram of Fig. 3 is a weighting function, simulating the perception ability of the human eye vs. the frequency of the disturbing signal. The peak of this curve is located at 8.8 Hz. Since the irritation caused is proportional to the square of the voltage magnitude fluctuations, the output of the weighting function block is squared and led to a 1st order lag, representing the memory tendency of the human brain. Its output is the time series of the instantaneous flicker sensation, $P_{st}(t)$.

The calculation of the short term flicker index, P_{st} , required then a simple statistical processing of the $P_{st}(t)$ time series. First the cumulative duration curve of the $P_{st}(t)$ values is found. The P_{st} index is then given by

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1s} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{5s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}} \quad (3)$$

where P_x is the x % percentile (i.e. the flicker level which is exceeded for x % of the time), calculated from the $P_{st}(t)$ duration curve. The subscript "s" denoted smoothed values, obtained by averaging neighboring values of the duration curve, as described in IEC 60868-0.



Fig. 3 UIE/IEC flickermeter functional diagram.

4. MATHEMATICAL MODEL OF DSTATCOM

DSTATCOM shown in Fig.4 is modeled using the dq transformation as defined in [8]. The inverter block is treated as an ideal lossless voltage source converter. The inverter switching losses are represented by a resistance R_f in parallel with a DC-link energy store supercapacitor. The transformer leakage reactance and the inverter series resistance are represented by L_f and R_f , respectively

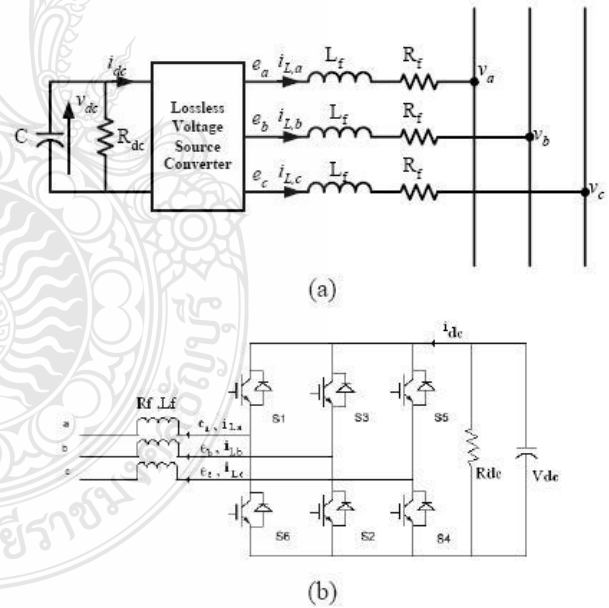


Fig. 4 (a) Equivalent circuit of DSTATCOM. (b) schematic representation of three-phase DSTATCOM

The AC-side equations can be written in terms of the instantaneous variables shown in Fig. 1.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{R_f}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a - v_a \\ e_b - v_b \\ e_c - v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Equation 4 is converted into per-unit values and transform to rotating frame as shown in (5)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f \omega_b}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{R_f \omega_b}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{L} \begin{bmatrix} e_d - v \\ e_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

where v is the *rms*-value of the grid voltage.

The instantaneous power at the DC and AC side of the DSTATCOM inverter must be equal and therefore the following power balance equation must be hold:

$$P_{dc} = P_{ac} \Rightarrow v_{dc} i_{dc} = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \quad (6)$$

From Fig. 2 and using p.u. values, the DC side circuit equation is derived as follows:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \cdot \frac{v_{dc}}{R_f} - \frac{1}{C} i_{dc} \quad (7)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\omega_b C \left(i_{dc} + \frac{v_{dc}}{R_f} \right) \quad (8)$$

The state space equation for DSTATCOM is obtained:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} - \frac{\omega_b}{L} \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Linearising around an operation point and using the fact that no active power is exchanged at the equilibrium point it is possible to get a decoupled expression for i_d and i_q [2].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_f \omega}{L} & 0 \\ 0 & \frac{R_f \omega}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

It can be seen from equation (10) that no cross-coupling between i_d and i_q occurs. Also, if c_1 and c_2 are expressed as in equation (11), a real and reactive power decoupled vector control strategy can be achieved since i_d can be used to regulate the active power and i_q to control the reactive power flow.

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_d^* - i_d) \\ \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_q^* - i_q) \end{bmatrix} \quad (11)$$

The relation between the DC-side voltage and the line to neutral AC side voltage of the inverter terminal can be expressed as follows:

$$e_d = m v_{dc} \cos \alpha \quad (12)$$

$$e_q = m v_{dc} \sin \alpha \quad (13)$$

The modulation index m is the magnitude ratio of the DC and AC side voltage and α is the angle by which the inverter voltages lead or lag the bus voltages. A vector control scheme controls i_d and i_q by varying the modulation index and angle, as shown in Fig. 5. A phase-locked-Loop (PLL) is used to provide the reference voltage angle θ , thereby synchronizing the current vectors to the fundamental of the PCC voltages

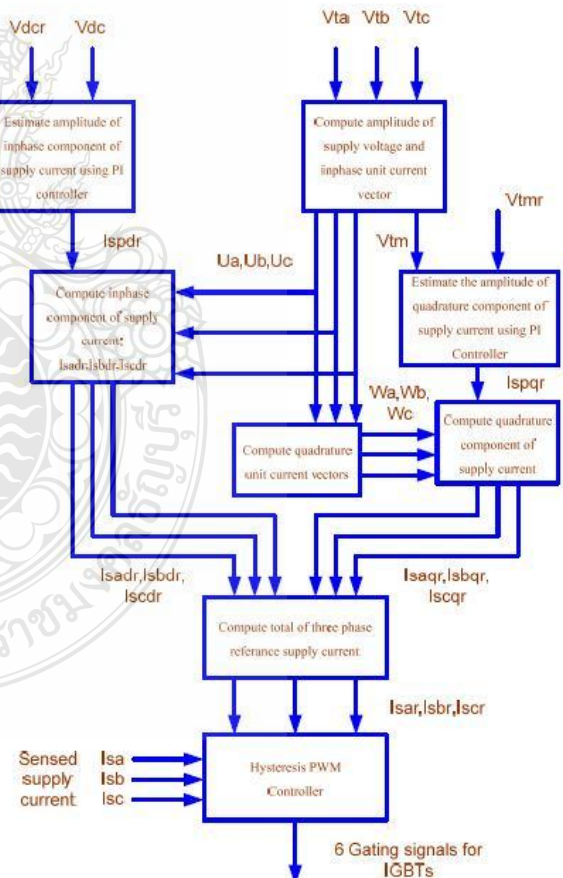


Fig. 5 Control scheme for DSTATCOM connected to grid supply

The three-phase reference source currents are computed using three-phase AC voltages (v_{ta} , v_{tb} and v_{tc}) and DC bus voltage (V_{dc}) of DSTATCOM. These reference supply currents consist

of two components, one in-phase (I_{spdr}) and another in quadrature (I_{spqr}) with the supply voltages. The control scheme is represented in Figure 5.

5. SIMULATION RESULT

Simulation used power distribution of Thailand sizing 22 kV 50 Hz .Connect to transformer 100 kVA . DSTATCOM can compensation voltage flicker more 10 sec with used capacitor sizing 40 mF and control dc voltage at dc link. Fig. 7 shows during voltage flicker at 40 ms . Fig. 8 show current inject to system when during voltage flicker at 40 ms and Fig. 9 shows voltage curve of phase A when DSTATCOM compensation . From simulation DSTATCOM can compensation voltage flicker.

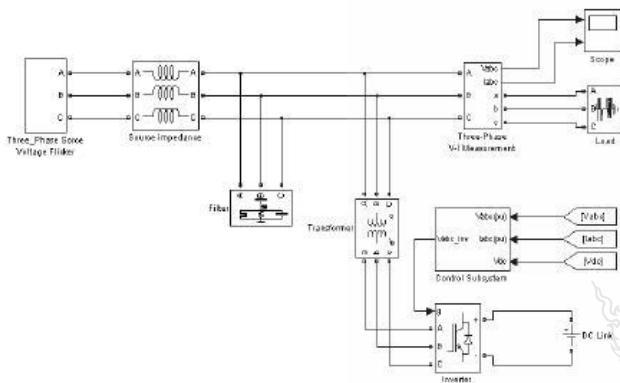


Fig. 6 MATLAB model of DSTATCOM system

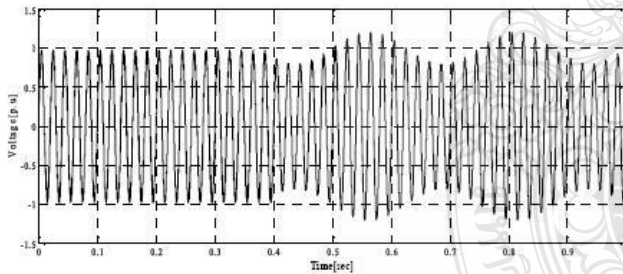


Fig. 7 Voltage Flicker at Phase A

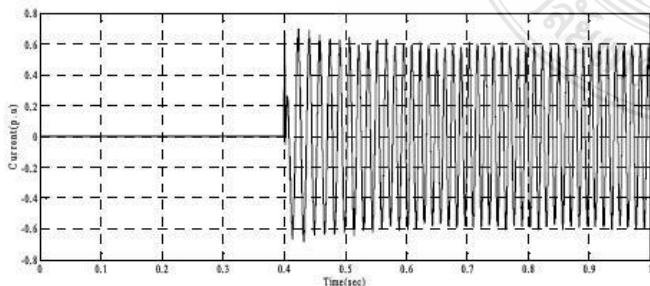


Fig. 8 Output current of the D-STATCOM.

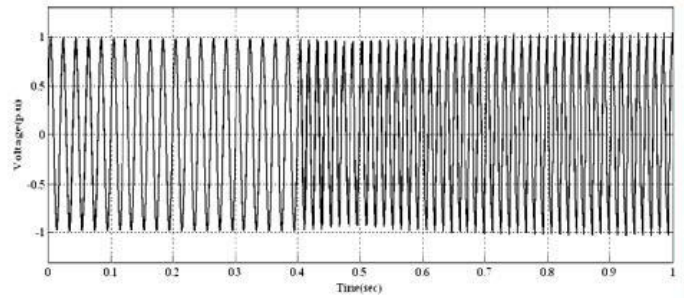


Fig. 9 Voltage waveform before and during the compensation

6. CONCLUSIONS

The use of an energy storage device linked to a DSTATCOM to provide real power as well as reactive power flow was explored in this paper. The results have shown that the DSTATCOM device has the ability to significantly reduce the power fluctuation generated by wind farm comprising fixed speed induction generators, while also keeping the voltage at the PCC at 1 p.u. In addition, the wind farm's fault ride through capability can be greatly improved by the DSTATCOM. For commercial application a more detailed design and technical can economic analysis needs to be carried out. Taking into consideration maintenance and operation costs, this would allow a comparison between a wind farm using fixed speed induction generators combined with DSTATCOM onshore, and wind farms which inherently generate less flicker due to the smoothing effect of the rotor with variable speed.

REFERENCES

- [1] CIGRE Study Committee, "Development of Dispersed Generation and Consequence for Power System," Final Report of WG C6.01 (ex 37.33), July, 2003.
- [2] J.G. Slootweg, W.L. Kling; "Aggregated Modeling of Wind Parks in Power system Dynamic Simulations", Delft University of Technology, the Netherlands
- [3] Rui M.G. Castro, J.M. Ferreira de Jesus; "An Aggregated wind Park Model", Technical University of Lisbon, Portugal
- [4] C. Abbey, B. Khodabakhchian, F. Zhou; "Transient modelling and comparison of wind generator topologies", International conference on power system transients (IPST'05), Canada
- [5] J.G. Slootweg, W.L. Kling; "Modelling of Large Wind Farms in Power System Simulation", Delft University of Technology, the Netherlands
- [6] N. Mithulanathan, Claudio A. Canizares; "Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillation", IEEE Trans. Power Systems, October 2002
- [7] P. Garcia-Gonzalez, A. Garcia C.; "Control system for a PWM-based STATCOM", Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Spain.
- [8] P.S. Sensarma, K.R. Padiyar; "Analysis and erformance Evaluation of a Distribution STATCOM for ompensating Voltage Fluctuations", The Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Science, India

Proceedings

The 1st Thailand Renewable Energy Community Configuration Conference (TREC)



School of Renewable Energy Technology, Naresuan University

1st TREC

การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า
ก่อเกียรติ อีตททรัพย์¹, โปศาล บุญเจียม¹, บุญยัง ปลั่งกลาง¹ และ อาทิตย์ โสตรโยม²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทร 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail kokiati_07@hotmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพมหานคร 10163

โทร 0-2457-0068 โทรสาร 0-2457-3982 E-mail

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าเมื่อเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ใช้ระบบของ IEEE 14บัส มาวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Generator) ขนาด 1 MW หาค่าโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ทั้งก่อนติดตั้งกังหันลมและหลังจากติดตั้งกังหันลมและมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมระหว่าง 3 m/s กับ 7 m/s โดยใช้เทคนิค CPF (Continuation Power Flow) ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Matlab จากการ โดยค่าโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ก่อนการติดตั้งมีค่าเท่ากับ 0.7040 p.u หลังจากติดตั้งกังหันลมที่ความเร็วลมเท่ากับ 3 m/s สามารถรับโหลดสูงสุดได้ 0.6420 pu และที่ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s สามารถรับโหลดสูงสุดได้ 0.6798 p.u จากวิจัยจะเห็นได้ว่าการติดตั้งกังหันลมชนิดนี้ถ้าไม่มีอุปกรณ์ป้องกันก่อนเชื่อมต่อเข้ากับระบบที่ดีอาจทำให้เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าลดลง

คำสำคัญ: เสถียรภาพแรงดัน, กังหันลม

1. คำนำ

ปัจจุบันได้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าน้อย่างกว้างขวาง อันเนื่องมาจากการลดลงอย่างมากของพลังงานจากซากพืชซากสัตว์ และราคาของพลังงานจากซากพืชซากสัตว์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในพลังงานที่นำมาใช้ก็คือ พลังงานลม เนื่องมาจากพลังงานลมเป็นพลังงานที่สะอาดและมีอยู่ทั่วไป กังหันลมโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. แบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Wind Turbine)
2. แบบปรับความเร็ว (Variable Speed wind Turbine)

กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Wind Turbine) จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Generator) ส่วนในแบบปรับความเร็ว (Variable Speed wind Turbine) จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด (Wound Rotor Induction Generator) สำหรับกังหันลมขนาดใหญ่นิยมใช้กังหันลมแบบความเร็วคงที่เนื่องจากมีราคาถูกกว่า ระบบไม่ซับซ้อน และมีกำลังมาก แต่กังหันชนิดนี้จะดูดกลืนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน(Reactive Power) จากระบบซึ่งเราไม่สามารถควบคุมได้และทำให้เราไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าของบัสที่มาเชื่อมต่อกับระบบได้

งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของกังหันลมต่อเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และวิธีการเขียนโปรแกรมโดยใช้เทคนิค Continuation

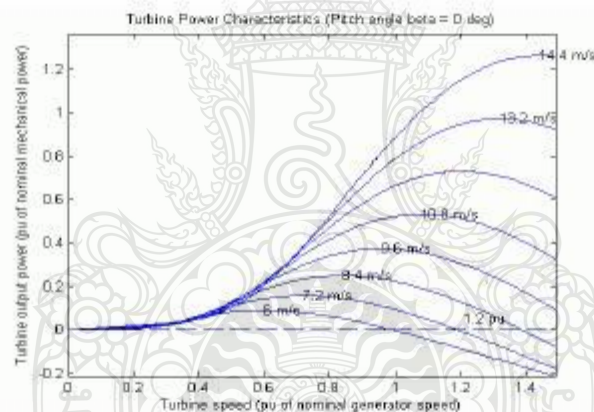
Power Flow ซึ่งจะเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Matlab และใช้โปรแกรม UWPFLOW เป็นโปรแกรมอ้างอิง และจะแสดงผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม และสรุปผลจากการวิจัย

2. กังหันลมผลิตไฟฟ้า

การใช้ประโยชน์พลังงานลมโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือการสูบน้ำ และการผลิตไฟฟ้า การที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จึงต้องมีอุปกรณ์ที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล อุปกรณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่ากังหันลม ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะแปรผันตามความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไป เราสามารถเขียนได้จากสมการ

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

เมื่อ มีกระแสมมีความหนาแน่น (ρ) มีความเร็วลม (U) พัดผ่านพื้นที่หน้าตัด(A) และมีสัมประสิทธิ์กำลังงาน C_p (Power Coefficient) จะเห็นได้ว่าความเร็วลมมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าดังรูปที่ 1



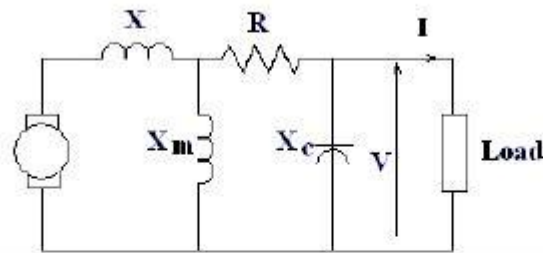
รูปที่ 1 ผลของความเร็วลมต่อกำลังไฟฟ้า

ค่ากำลังไฟฟ้านี้แอดทีฟสามารถหาได้จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q = V^2 \left(\frac{X_c - X_m}{X_c X_m} \right) + X \left(\frac{V^2 + 2RP}{2(R^2 + X^2)} \right) - \frac{X \sqrt{(V^2 + 2RP)^2 - 4P^2(R^2 + X^2)}}{2(R^2 + X^2)} \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 เนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ $R \ll X$ จึงไม่นำมาคิดในส่วนของความต้านทานทำให้สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

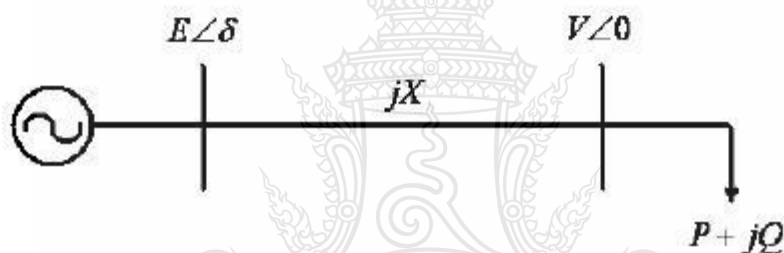
$$Q = V^2 \left(\frac{X_c - X_m}{X_c X_m} \right) + \frac{X}{V^2} P^2 \quad (3)$$



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 3 เป็นตัวอย่างของระบบ 2 บัส เพื่อให้เกิดความเร็วใช้ในคุณลักษณะของ เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3 เป็นตัวอย่างของระบบ 2 บัส

จากรูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกถ่ายให้กับโหลดผ่านสายส่งที่มีค่ารีแอกแตนของสาย (jX) แรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $E\angle\delta$ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดคงที่เขียนอยู่ในรูปคอมเพล็กซ์ (Complex number) , $P + jQ$ จะได้

$$P = \frac{EV}{X} \sin\delta \quad (4)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos\delta \quad (5)$$

จากสมการที่ 4 และ 5 จะได้สมการใหม่คือ

$$V^2 = \frac{PX}{E} + \left[\frac{QX + V^2}{E} \right] \quad (6)$$

เพราะฉะนั้นแรงดันที่โหลดจะมีค่าตั้งสมการ คือ

$$V = \sqrt{\frac{E^2 - 2QX \pm \sqrt{(E^2 - 2QX)^2 - 4(P^2 + Q^2)X^2}}{2}} \quad (7)$$

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ เราจะใช้วิธีการของ Continuation power Flow (CPF) Technique. เพื่อหาค่าโหลดสูงสุดของระบบ

4. Continuation Power Flow (CPF) Technique

CPF คือวิธีการพล็อตค่า P - V Curve ทั้งบนและล่างเพื่อหาค่าโหลดสูงสุดของระบบ ซึ่งจะใช้กับระบบที่มีใหญ่ เพื่อใช้วิเคราะห์ระบบที่จะเกิดขึ้นในอนาคต วิธีการของ CPF จะทำงานเข้าไปเป็นขั้น ๆ คือ การประมาณค่า (Predictor) และ การหาค่าจริง (Corrector) ซึ่งสามารถดูได้ดังรูปที่ 4

พื้นฐานบนสมการของ CPF มีลักษณะคล้ายกับการวิเคราะห์โหลดโพล်แต่จะมีการเพิ่มโหลดคือเพิ่มค่าพารามิเตอร์ λ ต่อท้ายสมการโหลดโพล် สำหรับการเริ่มต้นของการเพิ่มโหลดสามารถเขียนเขียนสมการได้

$$\lambda K - f(\delta, V) = 0 \quad (8)$$

หรือ

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (9)$$

เมื่อ K คือ ลักษณะของโหลด และ λ คือ ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนถึงค่าโหลดสูงสุด (Maximum loadability) จากสมการที่ 9 เขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\frac{\partial F}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial F}{\partial V} dV + \frac{\partial F}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 มีตัวแปรอีกหนึ่งตัวตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ λ ซึ่งจะทำให้มีตัวแปรมากกว่าสมการ ดังนั้นเราต้องเพิ่มสมการอีกหนึ่งสมการคือ

$$e_x \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \pm 1 \quad (11)$$

เมื่อ e_x คือแถวของเวกเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าจะมีค่าเป็น 1 ค่าตัวของ การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า (λ) จะมีค่าเป็นบวกเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นและค่าแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในสภาวะตามการ

เพิ่มขึ้นของโหลด แต่จะมีค่าเป็นลบเมื่อค่าของแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจากจุดที่ระบบสามารถรับโหลดได้สูงสุด (Maximum loadability) ค่าการประมาณ (Predicted) หาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{predicted} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (12)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ \dots \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ J_{LF} \vdots K \\ \vdots \\ \dots \\ e_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

และ σ คือ ขนาดของขั้นการเปลี่ยนแปลงในการประมาณการครั้งต่อไป ที่ค่าการเพิ่มขึ้นของโหลด $dx_k=1$ จะได้

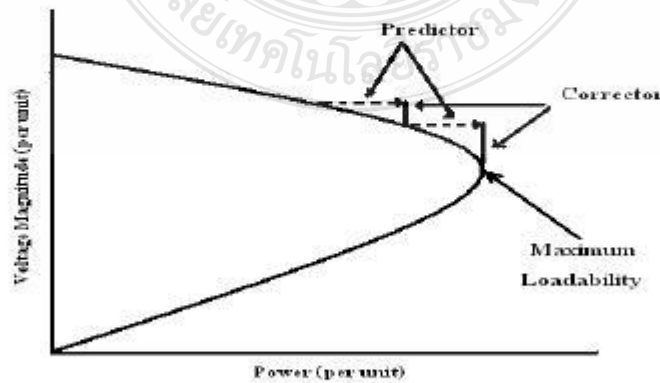
$$x_k^{predict} = x_{k0} + \sigma \quad (14)$$

วิธีการคำนวณหาค่าจริง (Corrector) หาได้จากสมการ

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (15)$$

$$x_k - x_k^{predict} = 0 \quad (16)$$

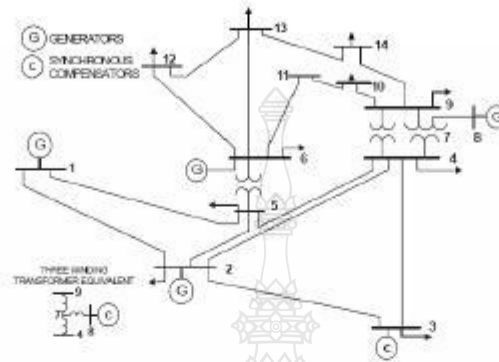
เมื่อ x_k คือ ค่าพารามิเตอร์ของความต่อเนื่องที่เลือกใช้



รูปที่ 4 การประมาณค่า (Predictor) และ การหาค่าจริง (Corrector)

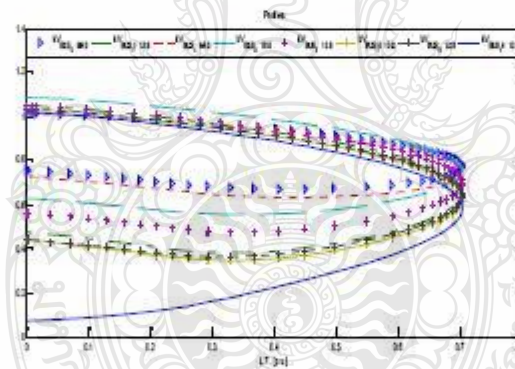
5. ผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำระบบของ IEEE 14 Bus มาศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลทางด้านเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อกับกังหันลม

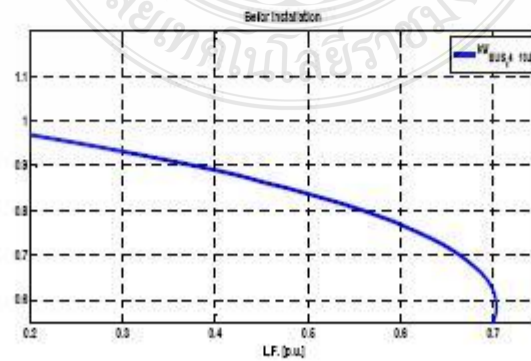


รูปที่ 5 ระบบ IEEE 14 Bus

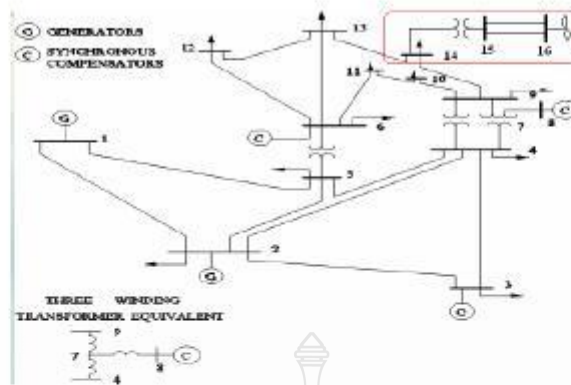
รูปที่ 6 P-V curve ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14 Bus ก่อนติดตั้งกังหันลม บัสที่มีเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าน้อยที่สุดคือบัสที่ 14 ซึ่งระบบสามารถรับโหลดเพิ่มได้ 0.7040 p.u



รูปที่ 6 P-V curve ของระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 14

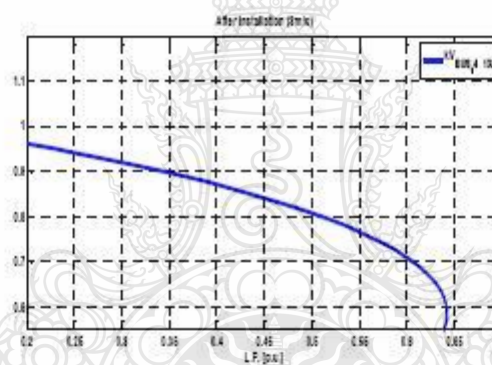


รูปที่ 7 P-V curve บัสที่ 14 ก่อนติดตั้งกังหันลม



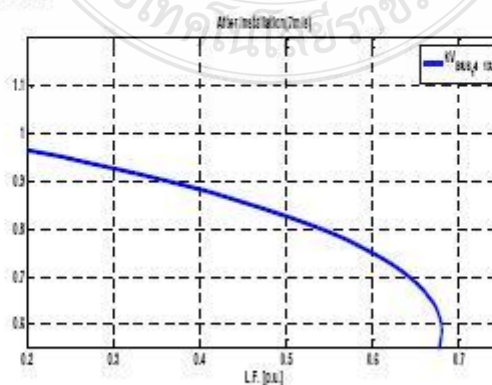
รูปที่ 8 ติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบ IEEE 14 Bus ที่มี 14

รูปที่ 8 ทำการติดตั้งกังหันลมเข้าที่บัสที่ 14 โดยให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งระหว่างบัสที่ 14 – 15 เท่ากับ $j0.55618$ และค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงเท่ากับ $j0.969$ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งระหว่างบัสที่ 15-16 เท่ากับ $0.03181+j0.08450$ และเปรียบเทียบค่าโหลดสูงสุดของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมระหว่าง 3 m/s กับ 7m/s

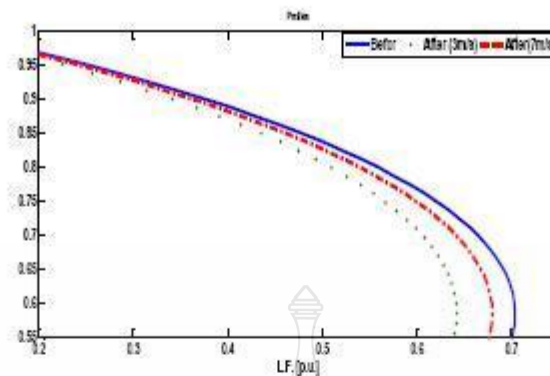


รูปที่ 9 P-V curve บัสที่ 14 เมื่อมีการติดตั้งกังหันลมที่ความเร็ว 3m/s

จากรูปที่ 9 หลังจากติดตั้งกังหันลมค่าโหลดสูงสุดที่ระบบรับได้ลดลงเหลือเพียง 0.6420 pu ที่ความเร็วลมเท่ากับ 3 m/s และในรูปที่ 10 ที่ความเร็วลม เท่ากับ 7 m/s ระบบสามารถรับโหลดสูงสุดได้ 0.6798 p.u และในรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างก่อนติดตั้งกังหันลมและหลังจากติดตั้งกังหันลม เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่10 P-V curve บัสที่14เมื่อมีการติดตั้งกังหันลมที่ความเร็ว 7m/s



รูปที่ 11 เปรียบเทียบ P-Vcurve บัสที่ 14 ก่อนและหลังติดตั้งกังหันลม

6. สรุปผลการทดลอง

จากการการศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้าเมื่อเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ใช้ระบบของ IEEE 14 บัส มาวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการเชื่อมโยงกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Generator) ขนาด 1 MW หาค่าโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ทั้งก่อนติดตั้งกังหันลมและหลังจากติดตั้งกังหันลมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมนั้น ค่าโหลดสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ก่อนการติดตั้ง มีค่าเท่ากับ 0.7040 p.u. และหลังจากติดตั้งกังหันลมมีความเร็วลมเท่ากับ 3 m/s สามารถรับโหลดสูงสุดได้ 0.6420 pu และที่ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s สามารถรับโหลดสูงสุดได้ 0.6798 p.u. ดังนั้นการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่ และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกนั้นอาจทำให้เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าลดลง

บรรณานุกรม

- [1] Nadarajah Mithulananthan, Arthit Sode-yome, Naresh Acharya, "Application of FACTS Controllers in Thailand Power Systems," Asian Institute of Technology, Thailand, 2003.
- [2] Arthit Sode-Yome, Nadarajah Mithulananthan, "Static Voltage Stability Margin Enhancement Using STATCOM, TCSC and SSSC," IEEE/PES, 2005.
- [3] Edvina Uzunovic, "EMTP, Transient stability and Power flow model and Control of VSC Based FACTS controllers," Waterloo, Ontario, Canada, 2001.
- [4] Mariesa Crow, "Computational methods for electric power systems," University of Missouri Rolla, Missouri.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายก่อเกียรติ อ็อคทรัพย์
วัน เดือน ปีเกิด	26 มิถุนายน 2525
ที่อยู่	49/1 หมู่ 1 ต.หนองบัวใต้ อ.เมือง จ.ตาก 63000
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ.2548
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2548 - 2549	ตำแหน่งวิศวกรซ่อมบำรุง บริษัท วาย เอส ภัณฑ์
พ.ศ. 2550 - ปัจจุบัน	อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

ผลงานวิจัย

K. Aodsup, P. Boonchiam, A. Sode-Yome, P. Kongsuk, N. Mithulanathan, "Response of DSTATCOM under Voltage Flicker In Farm Wind," **Power Electronic and Drives**, Thailand , 2007

K. Aodsup, P. Boonchiam, A. Sode-Yome, P. Kongsuk, B.Plangklang, "Voltage Flicker Mitigation in Wind Farm by Using DSTATCOM," **5th EMSES**, Pattaya, November 2007

ก่อเกียรติ อ็อคทรัพย์, ไพศาล บุญเจียม, บุญยัง ปลั่งกลาง, อาทิตย์ ไสตรโยม, "การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อกับกังหันลม," การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย TREC 1', วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก, ธันวาคม 2551