

การศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อต่อร่วมเข้ากับ  
ระบบไฟฟ้า

SYSTEM IMPACT STUDY FOR INTERCONNECTION WIND GENERATION  
TO ELECTRICAL SYSTEM



T104072



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....104072  
วัน,เดือน,ปี...2.8.ค.ศ. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

การศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อต่อร่วมเข้ากับระบบไฟฟ้า  
SYSTEM IMPACT STUDY FOR INTERCONNECTION WIND GENERATION  
TO ELECTRICAL SYSTEM



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว  
รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อต่อร่วมเข้ากับระบบไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายพุทธิรัตน์ ทองมูล
2. นายไพโรจน์ ขจรจิตเลิศสกุล
3. นายมงคล บวรวิริยะนาถ
4. นายสรวิชัย ศิระไตรรัตน์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อต่อร่วมเข้ากับระบบไฟฟ้า

นายพุทธิรัตน์ ทองมูล  
นายไพโรจน์ ขจรจิตเลิศสกุล  
นายมงคล บวรวิริยะนาถ  
นายสรรชัย ศิระไตรรัตน์  
ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งเมื่อได้ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมแล้วอาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบได้ สำหรับในการศึกษานี้จะพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบในสถานะอยู่ตัว และผลกระทบต่อเสถียรภาพทางแรงดันในสถานะไดนามิก ทั้งก่อนและหลังที่จะทำการติดตั้งชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเข้ากับระบบ โดยเปรียบเทียบวิธีการควบคุมของชุดกังหันลมต่างๆ และเปรียบเทียบเทคโนโลยีของชุดกังหันลมพลังงานลม 2 ชนิด

# SYSTEM IMPACT STUDY FOR INTERCONNECTION WIND GENERATION TO ELECTRICAL SYSTEM

Mr. Phuttharat Thongmoon

Mr. Pairoj Kajojilertsakul

Mr. Mongkol Bowornwiriyanat

Mr. Sanchai Siratirat

Asst.Prof. Dr. Chai Chompoo-inwai Advisor

Assoc.Prof. Monthon Leelachindakaileak Advisor

2008

## ABSTRACT

This thesis is study about Impact Study while connected renewable energy, Wind Generator, to the distribution network where located in the south region of Thailand. Due to when interconnected wind generation to grid may be occur unexpected accident which involved in system stability during fault or specify condition. In this occasion we focus on both of Steady – State and consider in voltage stability during specify dynamic condition which compared the results before and after install wind generator. Moreover we consider about 2 technology of Wind Generator.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทพนธ์เล่มนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินทร์ และ รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโทพนธ์ คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ สำหรับท่านคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาวิชา ตั้งแต่เริ่มเข้าการศึกษา เพื่อนำความรู้ที่ได้จากคณาจารย์ทุกท่าน นำมาประกอบในการทำปริญญาโทพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณพี่ๆทุกท่านที่ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนช่วยเหลือในการทำปริญญาโทพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและนอกภาควิชาที่ให้ความสนใจในการทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบพระคุณ บิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำทุกท่าน ผู้ที่มอบชีวิต การศึกษา และอนาคตที่ดี ตลอดจนให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และกำลังใจในการทำปริญญาโทพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาโทพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีการเกิดลมและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลังงานลม.....	4
2.2 ประวัติการใช้พลังงานจากลม.....	4
2.3 สถานภาพของพลังงานลมในระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน.....	5
2.4 กังหันลมกับการผลิตไฟฟ้า.....	6
2.5 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	7
2.5.1 กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine).....	7
2.5.2 กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine).....	8
2.6 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (ชนิดแกนหมุนแนวนอน).....	8
2.6.1 ชุดแกนหมุนใบพัด (Rotor Blade).....	9
2.6.2 ชุดห้องเครื่อง (Nacelle).....	10
2.6.3 ชุดเสา (Tower).....	11
2.6.4 ฐานราก (Foundation).....	12
2.7 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน.....	13
2.8 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	15
2.8.1 กังหันลมขนาดเล็ก (Micro Wind Turbine).....	15
2.8.2 กังหันลมขนาดเล็ก (Small Wind Turbine).....	15
2.8.3 กังหันลมขนาดกลาง (Medium Wind Turbine).....	16
2.8.4 กังหันลมขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **IV** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.5 กังหันลมขนาดใหญ่มาก (Very Large Wind Turbine).....	16
2.9 ความเร็วลมและกำลังลม.....	16
2.10 การคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากความเร็วลม.....	18
2.11 ศักยภาพพลังงานลม.....	20
2.12 พลังงานลมที่มีอยู่ในประเทศไทย.....	21
2.12.1 ลักษณะของลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้.....	22
2.12.2 ลักษณะของลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ.....	23
2.13 สถานภาพการใช้พลังงานลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย.....	24
2.14 ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจากการใช้กังหันลม.....	25
2.15 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	27
2.15.1 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว.....	27
2.15.2 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง.....	28
2.16 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้า.....	29
2.17 วิธีการแก้ไขปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน ราฟสัน.....	30
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	34
3.1 การควบคุมการทำงานของชุดกังหันลม G.....	38
3.1.1 การควบคุมตัวประกอบกำลัง (Power Factor Control).....	38
3.1.2 การควบคุมแรงดัน (Voltage Control).....	38
3.2 สภาวะอยู่ตัว (Steady – State).....	39
3.2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน.....	39
3.3 การทดสอบ Contingency.....	39
3.3.1 การวิเคราะห์ Contingency.....	41
3.4 สภาวะไดนามิก (Dynamic).....	43
3.4.1 การศึกษาลักษณะการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	44
3.4.2 การวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	45
3.5 คุณภาพกำลังไฟฟ้า (POWER QUALITY).....	46
3.5.1 หลักเกณฑ์ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	46
3.5.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	46
3.6 วิธีทำการทดลอง.....	50
3.6.1 การทดลอง ตอนที่ 1.....	50
3.6.2 การทดลอง ตอนที่ 2.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ **v** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	57
4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1.....	59
4.1.1 การวิเคราะห์ที่สภาวะอยู่ตัว (Steady-state).....	59
4.1.2 การวิเคราะห์ Contingency.....	61
4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2.....	64
4.2.1 การวิเคราะห์ที่สภาวะไดนามิค.....	64
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 ที่มาและแนวคิดที่ใช้ในการทดลอง.....	84
5.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	84
5.2.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ตอนที่ 1.....	84
5.2.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ตอนที่ 2.....	85
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	86
บรรณานุกรม.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **VI** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	6
2.2 กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง.....	8
2.3 กังหันลมแกนหมุนแนวนอน.....	8
2.4 องค์ประกอบของกังหันลมแกนหมุนแนวนอน.....	9
2.5 เครื่องวัดความเร็วและทิศทางการลม.....	11
2.6 เสากลมกลวง (A) และเสาโครงถัก (B).....	11
2.7 แกนคอกหมุนและระบบควบคุมการหมุนเพื่อรับแรงลมตามทิศทางการลม.....	12
2.8 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน.....	14
2.9 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ.....	17
2.10 แผนภูมิแสดงกำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบต่างๆ.....	17
2.11 พื้นที่หน้าตัดของใบพัดกังหันลมที่ตั้งรับกระแสลม.....	18
2.12 แผนที่แสดงพลังงานลมในประเทศไทย (หน่วย : วัตต์/ตารางเมตร).....	21
2.13 ลักษณะลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้.....	22
2.14 ลักษณะลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ.....	23
2.15 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว.....	27
2.16 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่ง.....	28
2.17 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส i.....	30
2.18 Flow Chart ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	33
3.1 บัสที่เลือกไว้ 7 บัส แสดงในแผนภาพของระบบสายส่งทางภาคใต้ของประเทศไทย.....	35
3.2 สถานีวิจัยพลังงานลมและข้อมูลความเร็วลมในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย.....	36
3.3 Block Diagram การทำงานของชุดกังหันลม G.....	37
3.4 Block Diagram การทำงานของชุดกังหันลม V.....	37
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Contingency.....	42
3.6 กระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวเกิดโดยฟ้าผ่า.....	45
3.7 กระแสออสซิลเลทชั่วคราวเกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์.....	45
3.8 แรงดันตกช่วงสั้นจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า.....	48
3.9 แรงดันเกินช่วงสั้นจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า.....	48
3.10 ไฟดับชั่วคราวจากรีโกลสเซอร์ทำงานเนื่องจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า.....	49
3.11 บัสที่ทำการสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม PSS/E.....	50
3.12 การกำหนดจำนวนกังหันลม.....	51
3.13 การกำหนดค่าความเร็วลม.....	51
3.14 การเลือกชนิดการควบคุมชุดกังหันลม.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 การคำนวณด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	52
3.16 วิเคราะห์ Contingency โดยการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออก 1 ตัว.....	53
3.17 การสร้างบัส Fault ขึ้นระหว่างบัสที่จะทำการลัดวงจรที่สายส่ง.....	55
3.18 การกำหนดให้ความผิดพลาดแบบลัดวงจรที่บัส.....	55
3.19 การกำหนดให้เกิดความผิดพลาด โดยการหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	56
4.1 Flow Chart แสดงขั้นตอนในการทำการทดลองทั้งใน ตอนที่ 1 และ ตอนที่ 2.....	58
4.2 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลง กราวด์ที่สายส่ง KA กับ LR เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม G ขนาด 90 MW โดยควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ.....	67
4.3 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลง กราวด์ที่สายส่ง KA กับ LR เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม G ขนาด 90 MW โดยควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ.....	68
4.4 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลง กราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส STU กับบัส HY1 เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม G กำลังผลิต 45 MW ที่การควบคุมแบบต่างๆ.....	69
4.5 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลง กราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส KA กับบัส STU เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม G โดยควบคุม Voltage ที่ 1.0 p.u. ที่กำลังผลิตต่างๆ.....	70
4.6 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลง กราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส KA กับบัส STU เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม V ที่กำลัง ผลิตต่างๆ.....	71
4.7 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลง กราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส KA กับบัส STU เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมต่างชนิดกัน.....	72
4.8 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส KA_GEN เมื่อติดตั้ง ชุดกักหน้ลม G ขนาด 90 MW ที่การควบคุมแบบต่างๆ.....	75
4.9 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส STU_GEN เมื่อติดตั้ง ชุดกักหน้ลม G โดยควบคุม Voltage ที่ 1.0 p.u. ที่กำลังผลิตต่างๆ.....	76
4.10 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส STU_GEN เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม V ที่กำลังผลิตต่างๆ.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ VIII. ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส STU_GEN เมื่อติดตั้งชุดกักกันลมต่างชนิดกัน.....	78
4.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส KA_GEN ขณะชุดกักกันลม G ขนาด 90 MW ซึ่งควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ หยุดทำงาน.....	81
4.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส KA_GEN ขณะชุดกักกันลม G ขนาด 90 MW ซึ่งควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ หยุดทำงาน.....	82
4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส KA_GEN ขณะชุดกักกันลมที่กำลังผลิตต่างๆ และต่างชนิดกัน หยุดทำงาน.....	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา IX และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดต่างๆ.....	15
3.1 จำนวนกังหันลมเทคโนโลยี G และ V ที่ทำการติดตั้งเข้ากับระบบ ที่บัส KA (3711) และ STU (3722).....	54
4.1 จำนวนและพิกัดของกังหันลมที่สามารถติดตั้งเข้ากับระบบได้สูงสุด.....	59
4.2 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อยังไม่ได้ติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบ.....	60
4.3 จำนวนผลกระทบเมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Voltage.....	60
4.4 จำนวนผลกระทบเมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Power Factor.....	61
4.5 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทำการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 ขณะยังไม่ได้ติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบ.....	62
4.6 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นขณะทำการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Voltage.....	62
4.7 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นขณะทำการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Power Factor.....	63
4.8 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปขณะเกิดความผิดปกติต่างๆ เมื่อยังไม่ได้ทำการติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า.....	64
4.9 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่งระหว่างบัส KA กับบัส LR.....	65
4.10 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่งระหว่างบัส STU กับบัส HY1.....	66
4.11 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส KA_GEN.....	73
4.12 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส STU_GEN.....	74
4.13 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังชุดกังหันลมที่บัส KA หยุดทำงาน.....	79
4.14 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังชุดกังหันลมที่บัส STU หยุดทำงาน.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน มนุษย์มีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น น้ำมันดีเซล ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ก็ลดปริมาณลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงเหล่านี้มีราคาสูงขึ้นมาก ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแหล่งพลังงานใหม่ เพื่อนำมาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงดังกล่าวที่กำลังจะหมดไปในการผลิตไฟฟ้าให้มากขึ้น

พลังงานลม ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากพลังลมเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ สามารถใช้ได้โดยไม่มียวันหมด และยังสามารถจัดได้ว่าเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการจะติดตั้งชุดกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเร็วลมในบริเวณพื้นที่ที่จะติดตั้ง สภาพพื้นที่ที่จะติดตั้ง จำนวนหน่วยผลิตที่เหมาะสมในการติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้า รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบในยามที่ระบบทำงานปกติ และในยามที่ระบบเกิดความขัดข้อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทำการติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ เพื่อที่จะสามารถเป็นแนวทางในการติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาถึงปริมาณสูงสุดของกังหันลมที่สามารถติดตั้งได้ในแต่ละพื้นที่โดยไม่ส่งผลให้ระบบเกิดความเสียหาย
2. เพื่อศึกษาผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state)
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของระบบไฟฟ้าที่ได้ทำการติดตั้งชุดกังหันลมแล้ว ภายใต้สภาวะ Contingency แบบ N-1
4. เพื่อศึกษาถึงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ เมื่อทำการเชื่อมต่อชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า แล้วเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ
5. เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้น และเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า เมื่อเชื่อมต่อชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าที่กำลังผลิต การควบคุมและเทคโนโลยีของชุดกังหันลมต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ศึกษาถึงปริมาณสูงสุดและผลกระทบในการติดตั้งชุดกังหันลม G ขนาด 1.5 MW เข้ากับระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ บริเวณภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากมีศักยภาพพลังงานลมที่เพียงพอที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะพิจารณาถึงผลกระทบในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state) และใช้การวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 ด้วยโปรแกรม PSS/E และ PowerWorld Simulation ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน นอกจากนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบที่สภาวะไดนามิกด้วย เมื่อติดตั้งกังหันลม G ที่การควบคุมแบบต่างๆและกังหันลม V โดยจะเลือกบัสที่มีความแข็งแรง (Strong Grid) กับบัสที่ไม่แข็งแรง (Weak Grid) โดยพิจารณาจากจำนวนกังหันลมที่สามารถติดตั้งเข้ากับระบบได้ มาทำการศึกษาและเปรียบเทียบเสถียรภาพด้านแรงดัน โดยใช้โปรแกรม PSS/E เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ระบบสายส่ง (Line Fault) และที่บัสของชุดกังหันลม (Bus Fault) รวมถึงการหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดกังหันลม (Drop Unit)

### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาถึง Base Case ของระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งชุดกังหันลม
2. หาจำนวนของชุดกังหันลมสูงสุดที่สามารถติดตั้งได้ในแต่ละพื้นที่ โดยใช้โปรแกรม PSS/E
3. ศึกษาถึงผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าเมื่อทำการติดตั้งชุดกังหันลมที่พิกัดสูงสุดเข้ากับระบบไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว โดยใช้โปรแกรม PSS/E
4. ทำการวิเคราะห์และศึกษาผลกระทบในสภาวะ Contingency แบบ N-1 กับระบบไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมกับชุดกังหันลม โดยใช้โปรแกรม PowerWorld Simulation
5. ศึกษาถึงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ เมื่อทำการเชื่อมต่อชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า แล้วเกิดความผิดปกติต่างๆขึ้นในระบบ โดยใช้โปรแกรม PSS/E
6. ศึกษาและเปรียบเทียบระบบไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังการติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับระบบ

### 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

เนื้อหางานที่ทำ	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ศึกษาและ ค้นคว้าทฤษฎีที่ เกี่ยวข้อง										
ศึกษาการใช้งาน โปรแกรมต่างๆ ที่ใช้ในการ วิเคราะห์ระบบ ไฟฟ้า										
ศึกษาและ รวบรวมข้อมูล จากการทดลอง										
ทำการทดลอง และวิเคราะห์ผล การทดลอง										
จัดทำรูปเล่ม ปริยญาานิพนธ์										

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้เรียนรู้การใช้งานโปรแกรมที่นิยมใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน
2. ทำให้รู้ถึงปัญหาและผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อติดตั้งชุดกักกันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า
3. ได้รู้ถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลในการติดตั้งชุดกักกันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่
4. ได้เรียนรู้ถึงหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมหรือกังหันลม
5. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ในการตัดสินใจที่จะติดตั้งชุดกักกันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีการเกิดลมและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลังงานลม

ลม (wind) สาเหตุหลักของการเกิดลมมาจากการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์มายังแต่ละตำแหน่งบนพื้นโลกในปริมาณไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศในแต่ละตำแหน่ง บริเวณใดที่มีอุณหภูมิสูงหรือความกดอากาศต่ำ อากาศในบริเวณนั้นก็จะลอยตัวขึ้นสูง ส่วนอากาศจากบริเวณที่เย็นกว่าหรือมีความกดอากาศสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้คือการทำให้เกิดลมนั่นเอง เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าลมเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มีอยู่ในตัวเอง ซึ่งในบางครั้ง แรงแห่งลมอาจทำให้บ้านเรือนที่อยู่อาศัยพังทลายต้นไม้หักโค่นลง สิ่งของวัตถุต่างๆ ล้มหรือปลิวลอยไปตามลม ฯลฯ ในปัจจุบันมนุษย์จึงได้ให้ความสำคัญและนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่โดยทั่วไป ไม่ต้องซื้อหา เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น

#### 2.2 ประวัติการใช้พลังงานจากลม

การใช้ประโยชน์จากพลังงานลมมีมากกว่า 3,000 ปี จนกระทั่งต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 ได้เริ่มมีการใช้พลังงานลมเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกลเพื่อการสูบน้ำและการสีข้าว ต่อมาในช่วงเริ่มต้นของยุคอุตสาหกรรมใหม่การใช้งานพลังงานจากลมถูกแทนที่ด้วยพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1970 เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันทั่วโลก ความสนใจในพลังงานลมจึงกลับมาอีกครั้ง โดยมีเป้าหมายหลักคือการนำพลังงานลมมาใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้า ร่วมกับแหล่งพลังงานฟอสซิลเพื่อความมั่นคงของระบบ และลดปัญหาความไม่แน่นอนของลมตามธรรมชาติ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในช่วงต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 และมีการพัฒนาเทคโนโลยีมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงต้นปี ค.ศ. 1970 จนกระทั่งปลายปี ค.ศ. 1990 พลังงานลมจึงกลับมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนหลักอีกแหล่งหนึ่ง ในช่วงสิบปีหลังของคริสต์ศตวรรษที่ 20 การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า (wind turbines) ทั่วโลกเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าของทุก ๆ สามปี เทคโนโลยีพลังงานลมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วจากในปี ค.ศ. 1989 ขนาดของกังหันลมในขณะนั้นมีขนาด 300 กิโลวัตต์ ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกังหัน 30 เมตร หลังจากนั้นก็ได้มีกังหันลมขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ผลิตออกมา ซึ่งในปัจจุบันกังหันลมขนาดใหญ่แต่ละตัวสามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึง 4 - 5 เมกกะวัตต์ และนับวันจะยิ่งได้รับการพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

### 2.3 สถานภาพของพลังงานลมในระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน

ลมเป็นแหล่งพลังงานสะอาดชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด ในปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า พลังงานลมสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมาก ในปี 2003 ที่เมือง Schleswig-Holstein ประเทศเยอรมัน พลังงานลมถูกนำมาใช้ทั้งหมด 4200 GWh จากระบบไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 13353 GWh คิดเป็น 31.45% ที่ประเทศเดนมาร์ก มีพลังงานลมถูกนำมาใช้ทั้งหมด 3800 GWh จากกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 20800 GWh คิดเป็น 18%

เป็นที่น่าสังเกตว่าในช่วงที่ผ่านมากำลังผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมมีอัตราเติบโตโดยเฉลี่ยสูงถึง 29% ต่อปี นับว่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเติบโตของกำลังผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน 2.5% ต่อปี กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ 1.8% ต่อปี กำลังผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติ 2.5% ต่อปี และกำลังผลิตไฟฟ้าจากน้ำมัน 1.7% ต่อปี อย่างไรก็ตาม การขยายตัวนี้ไม่ได้เกิดขึ้นทั่วโลก การติดตั้งกังหันลมทั่วโลกประมาณกว่า 70% อยู่ในทวีปยุโรป และ 19% ในอเมริกาเหนือ

แม้กำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานลมในปี 2549 อยู่ที่ระดับสูงถึง 74,223 MW แต่คิดเป็นเพียง 1% ของกำลังผลิตไฟฟ้าทั่วโลก อย่างไรก็ตาม สำหรับบางประเทศแล้ว กำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานลมอยู่ในระดับสูงมาก เช่น เดนมาร์กอยู่ในระดับ 20% ของกำลังผลิตไฟฟารวมของประเทศ ในขณะที่สเปนอยู่ในระดับ 9% และเยอรมัน 7.6%

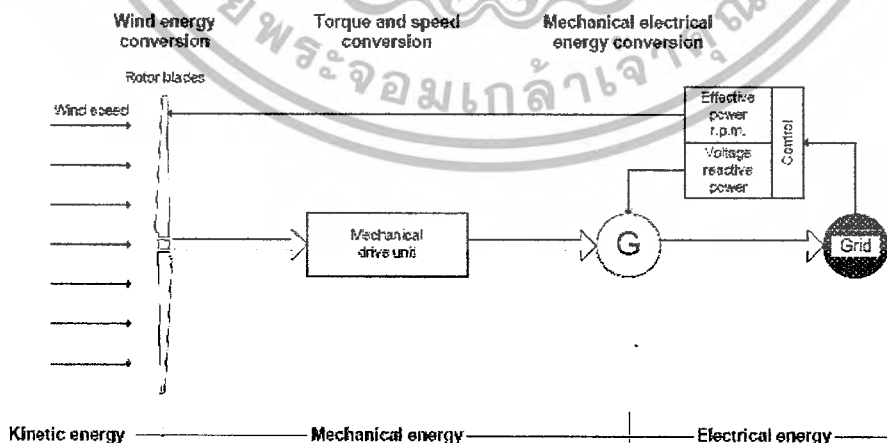
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เยอรมันนับเป็นประเทศที่มีกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานลมสูงที่สุดในโลก คือ 20,622 MW ในปี 2549 คิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 28% ของกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานลมทั่วโลก รองลงมา คือ สเปน 11,615 MW สหรัฐฯ 11,603 MW อินเดีย 6,270 MW เดนมาร์ก 3,140 MW จีน 2,604 MW อิตาลี 2,123 MW และสหราชอาณาจักร 1,963 MW

ในอนาคตข้างหน้า หลายประเทศในโลกน่าจะมีการนำพลังงานลมมาใช้ในสัดส่วนเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่เพียงแต่ลดประมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่ยังเป็นการนำความเร็วลมมาใช้เป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ด้วย การจะทำให้พลังงานลมถูกนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าในสัดส่วนที่สูงๆ โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ขนาดใหญ่อาจต้องการวิธีการใหม่ๆ เข้ามาประยุกต์ เช่น ระบบ isolated wind-diesel เป็นเทคนิคการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานลมที่ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เป็นสัดส่วนถึง 70% ของกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด

## 2.4 กังหันลมกับการผลิตไฟฟ้า

หลักการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหัน พลังงานจลน์ที่เกิดจากลมจะทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุน และได้เป็นพลังงานกลออกมาด้วยแรงบิดและความเร็วรอบของแกนหมุนกังหัน (torque and speed conversion) พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบควบคุมไฟฟ้า และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบต่อไป โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ความยาวของใบพัด และสถานที่ติดตั้งกังหันลม



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความเร็วลมที่แปรผันตามธรรมชาติ และความต้องการพลังงานที่สม่ำเสมอเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานแล้ว จะต้องมิตัวกักเก็บพลังงานและใช้แหล่งพลังงานอื่นที่เชื่อถือได้เป็นแหล่งสำรอง หรือใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่นๆ ตัวกักเก็บพลังงานมีอยู่หลายชนิด ส่วนมากขึ้นอยู่กับงานที่จะใช้ เช่น ถ้าเป็นกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมักนิยมใช้แบตเตอรี่เป็นตัวกักเก็บพลังงาน

การใช้แหล่งพลังงานอื่นที่เป็นตัวหมุน ระบบนี้ปกติกังหันลมจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้ตลอดเวลาที่มีความเร็วลมเพียงพอ หากความเร็วลมต่ำหรือลมสงบ แหล่งพลังงานชนิดอื่นจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานทดแทน (ระบบนี้กังหันลมจ่ายพลังงานเป็นตัวหลักและแหล่งพลังงานส่วนอื่นเป็นแหล่งสำรอง) หรือการใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น อาจเป็นเครื่องจักรดีเซล หรือพลังงานน้ำจากเขื่อน ฯลฯ ระบบนี้ปกติมีแหล่งพลังงานชนิดอื่นจ่ายพลังงานอยู่ก่อนแล้ว กังหันลมจะช่วยจ่ายพลังงานเมื่อมีความเร็วลมเพียงพอ ซึ่งในขณะที่เดียวกันก็ลดการจ่ายพลังงานจากแหล่งพลังงานอื่น (ระบบนี้แหล่งพลังงานอื่นจ่ายพลังงานเป็นหลัก ส่วนกังหันลมทำหน้าที่คอยเสริมพลังงานจากต้นพลังงานหลัก)

## 2.5 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

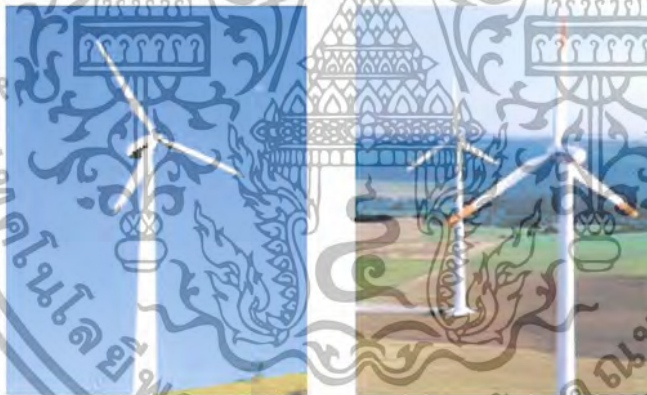
โดยทั่วไปกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามแกนหมุนของกังหันลม ได้แก่ กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง และกังหันลมแกนหมุนแนวนอน ซึ่งทั้งสองชนิดจะประกอบด้วยอุปกรณ์ในการทำงานผลิตไฟฟ้าที่คล้ายกัน เช่น ชุดใบพัด ชุดห้องเกียร์ทดกำลัง ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และชุดเสา โดยจะมีความแตกต่างกันตรงการวางชุดแกนหมุนใบพัด

**2.5.1 กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)** เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นราบหรือตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลม โดยมีใบพัดยึดติดขนานกับแกนหมุน ทำหน้าที่รับแรงลมที่เคลื่อนตัวมากระทบทำให้เกิดการหมุนของใบพัด โดยสามารถรับแรงลมในแนวนอนได้ทุกทิศทาง อย่างไรก็ตามกังหันลมชนิดนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยมีการใช้งานอยู่ประมาณร้อยละ 25 ของกังหันลมที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.2 กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง [2]

**2.5.2 กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)** เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับพื้นราบหรือขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลม โดยมีใบพัดยึดติดตั้งจากกับแกนหมุน ทำหน้าที่รับแรงลมที่เคลื่อนตัวมากระทบทำให้เกิดการหมุนของใบพัด โดยกังหันลมชนิดแกนหมุนแนวนอนแบบสามใบพัดซึ่งมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เป็นกังหันลมที่ได้รับความนิยมใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายมากที่สุดถึงร้อยละ 75 ของกังหันลมที่มีการใช้งานในปัจจุบัน



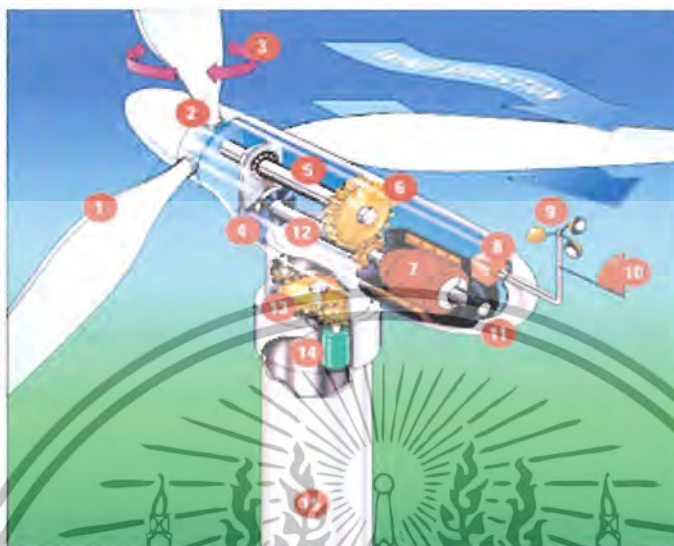
รูปที่ 2.3 กังหันลมแกนหมุนแนวนอน [2]

## 2.6 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (ชนิดแกนหมุนแนวนอน)

ในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนแนวนอนเป็นหลัก เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน มีส่วนแบ่งทางการตลาดขนาดใหญ่ และมีส่วนสำคัญในการกำหนดอนาคตของเทคโนโลยีพลังงานลมเป็นอย่างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบที่ประกอบขึ้นเป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าในหนึ่งชุด จะประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลักใหญ่ ๆ ได้แก่ ชุดแกนหมุนใบพัด (Rotor Blade), ชุดห้องเครื่อง (Nacelle), ชุดเสา (Tower) และฐานราก (Foundation)



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของกังหันลมแกนหมุนแนวนอน [2]

2.6.1 ชุดแกนหมุนใบพัด (Rotor Blade) [หมายเลข 2] เป็นส่วนแรกของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ทำหน้าที่รับหรือปะทะกับแรงลม โดยประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ดุมแกนหมุน (Nose Cone) เป็นตัวครอบแกนหมุนที่อยู่ส่วนหน้าสุด มีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายไข่ เพื่อการลู่ลมและมองดูสวยงาม

- ใบพัด (Blade) [หมายเลข 1] เป็นส่วนที่ยึดติดกับแกนหมุน (Rotor Hub) ทำหน้าที่รับพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จากการเคลื่อนที่ของลม และหมุนแกนหมุนเพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังเพลาแกนหมุนหลัก ถูกออกแบบโดยใช้หลักการทางพลศาสตร์ของอากาศ เพื่อให้มีน้ำหนักเบาพอเหมาะและเหนียวทนทานรับกับแรงลมได้ดี ใบกังหันลมถือเป็นหัวใจของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและมีความละเอียดสูงในการออกแบบ เพราะหากสามารถออกแบบให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง ก็จะทำให้กังหันลมสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีที่ความเร็วเปลี่ยนไป

- จุดปรับหมุนใบพัด (Pitch Drive) [หมายเลข 3] อยู่ระหว่างช่วงรอยต่อระหว่างใบพัดกับแกนหมุน ทำหน้าที่ในการปรับใบพัดให้มีความพร้อมและเหมาะสมเมื่อเริ่มรับแรงลมต่ำ ๆ เพื่อการเริ่มหมุนใบพัด (Cut In) และปรับใบพัดให้ลู่ลมโดยอัตโนมัติเพื่อช่วยในการหยุดหมุนของแกนหมุนเมื่อได้รับแรงลมเกินพิกัด (Cut Out) หรือกรณีซ่อมบำรุงรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดปรับยึดแกนหมุน (Rotor Lock) เป็นงานหมุนที่ยึดติดส่วนท้ายของแกนหมุน มีระบบยึดแน่นไม่ให้แกนหมุนมีการหมุน เมื่อได้รับแรงลมเกินพิกัดหรือกรณีซ่อมบำรุงรักษา

**2.6.2 ชุดห้องเครื่อง (Nacelle) [หมายเลข 11]** เป็นส่วนที่สำคัญของกังหันลมเพราะมีองค์ประกอบย่อยมากที่สุด ถูกออกแบบมาให้มีความเหมาะสมเพื่อเป็นตัวป้องกันสภาพอากาศภายนอกให้กับอุปกรณ์ที่อยู่ภายใน และมีพื้นที่ภายในเพียงพอสำหรับการขึ้นไปติดตั้งและบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ ได้ องค์ประกอบย่อยที่ติดตั้งอยู่ภายในชุดห้องเครื่องมีดังนี้

- เพลาแกนหมุนหลัก (Main Shaft) [หมายเลข 5] ทำหน้าที่รับแรงจากแกนหมุนใบพัดและส่งผ่านเข้าสู่ห้องปรับเปลี่ยนทดรอบกำลัง (Gear Box)

- ห้องทดรอบกำลัง (Gear Box) [หมายเลข 6] ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปรับเปลี่ยนทดรอบการหมุนและถ่ายแรงของเพลาแกนหมุนหลักที่มีความเร็วรอบต่ำ ไปยังเพลาแกนหมุนเล็ก (Small Shaft) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้มีความเร็วรอบที่สูงขึ้นและมีความเร็วสม่ำเสมอในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- เบรก (Brake) [หมายเลข 4] เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมและยึดการหยุดหมุนอย่างสิ้นเชิงของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหันลม

- เพลาแกนหมุนเล็ก (Small Shaft) [หมายเลข 12] ทำหน้าที่รับแรงที่มีความเร็วรอบสูงจากห้องทดรอบกำลัง (Gear Box) เพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) [หมายเลข 7] ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลที่ได้รับเป็นพลังงานไฟฟ้า มีใช้ 2 ประเภท คือ

- Synchronous Generator เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ คือความเร็ว Synchronous Speed (50 Hz) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีความถี่และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่ง

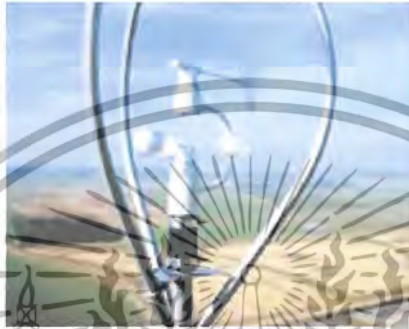
- Induction Generator เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีโครงสร้างเหมือน Induction Motor โดยป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ชุดสเตเตอร์ ทำให้เกิดฟลักซ์เป็นขั้วแม่เหล็กหมุนตามสภาวะกระแสสลับ ไปเหนี่ยวนำแกนโรเตอร์ให้หมุนตามในดอนเริ่มต้น และเมื่อมีแรงมาขับโรเตอร์ให้หมุนเกินกว่า Synchronous Speed จะเกิดการเหนี่ยวนำย้อนกลับ ทำให้เกิดกระแสไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายย้อนกลับเข้าระบบสายส่ง

- ระบบควบคุมไฟฟ้า (Controller System) [หมายเลข 8] เป็นระบบควบคุมการทำงานและการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกสู่ระบบด้วยระบบคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบระบายความร้อน (Cooling) เป็นระบบที่ใช้ระบายความร้อนจากการทำงานของกลไกภายในห้องทดสอบกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา

- เครื่องวัดความเร็วและทิศทางการลม (Anemometer and Wind Vane) [หมายเลข 9, 10] เป็นส่วนที่ติดตั้งอยู่ภายนอกห้องเครื่อง โดยเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ สำหรับเป็นตัววัดปริมาณความเร็วและทิศทางการลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกการทำงานอื่น ๆ ของกังหันลมได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.5 เครื่องวัดความเร็วและทิศทางการลม [2]

2.6.3 ซุคเสา (Tower) [หมายเลข 15] เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นชุดแกนหมุนใบพัดและตัวห้องเครื่องที่อยู่ข้างบน ปัจจุบันมีใช้งาน 2 แบบ คือ แบบเสากลมกลวง (Tubular) และเสาโครงถัก (Lattice) โดยปัจจุบันนิยมใช้เสาแบบกลมกลวงมากกว่า ทั้งนี้ชุดเสาดังกล่าวจะต้องมีการออกแบบในเชิงวิศวกรรมมาเป็นอย่างดีก่อนการติดตั้ง เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักและแรงปะทะของลมต่อพื้นที่กวาดใบพัด ขณะที่ความสูงของเสาจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะความสูงในการรับแรงลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด และขนาดของกังหันลม องค์ประกอบย่อยของซุคเสามีดังนี้



(A)



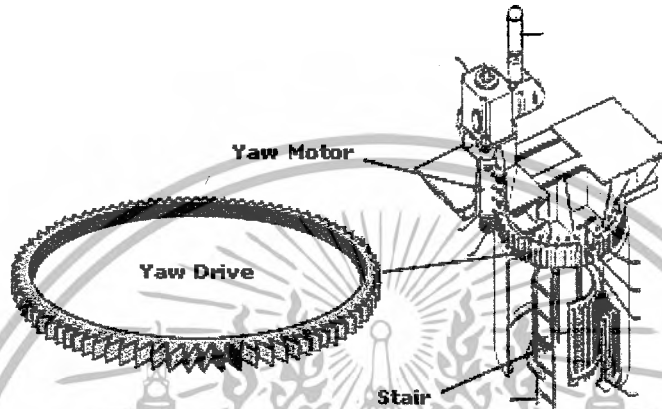
(B)

รูปที่ 2.6 เสากลมกลวง (A) และเสาโครงถัก (B) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แกนคอกหมุนรับทิศทางลม (Yaw Drive) [หมายเลข 13] เป็นตัวขับเคลื่อนหมุนแกนหมุนใบพัด เพื่อให้ใบพัดรับแรงลมตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลม

- ระบบควบคุมการหมุน (Yaw Motor หรือ Hydraulic System) [หมายเลข 14] เป็นตัวบังคับและควบคุมกลไกการขับเคลื่อนหมุนเพื่อให้ใบพัดรับแรงลมตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลม และชะลอการหมุนและหยุดหมุนของใบพัด



รูปที่ 2.7 แกนคอกหมุนและระบบควบคุมการหมุนเพื่อรับแรงลมตามทิศทางลม [2]

- บันไดหรือลิฟต์ (Stair or Lift) ใช้ในการขึ้นลงสำหรับการตรวจหรือซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่อยู่ด้านบนเสา

- ระบบอุปกรณ์ควบคุมและจอภาพ ติดตั้งอยู่ด้านล่างสุดของเสาเพื่อให้เจ้าหน้าที่ใช้ในการติดต่อ ตรวจสอบ และตรวจข้อมูลระบบการทำงานต่าง ๆ ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

**2.6.4 ฐานราก (Foundation)** เป็นส่วนที่รับน้ำหนักทั้งหมดของชุดกังหันลม ทำเป็นฐานคอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่บนเสาเข็มที่ได้รับการคำนวณออกแบบ และทำการก่อสร้างอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรมโยธา

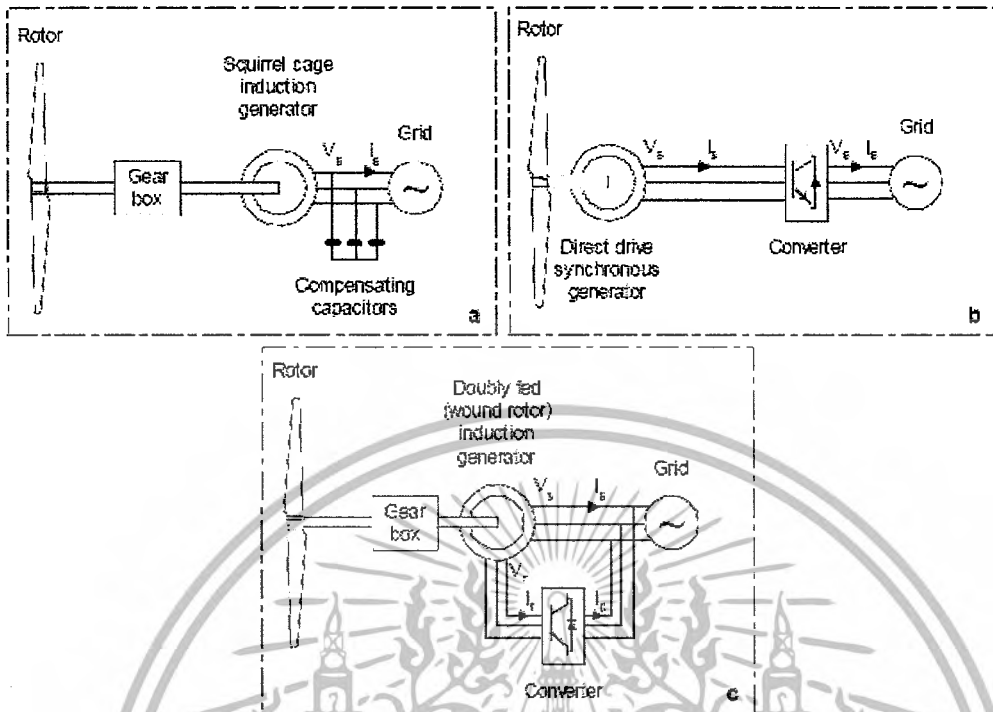
## 2.7 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน

กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ a) fixed speed with directly grid-couple (asynchronous) squirrel cage induction generator b) variable speed with doubly fed induction generator และ c) variable speed based on a direct drive synchronous generator แสดงดังรูปที่ 2.8

กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (fixed speed turbine) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด กล่องเกียร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (squirrel cage induction generator) ชุดสแตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า ในความเป็นจริงแล้วกังหันลมแบบนี้มีค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator slip) ไม่คงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับภาระเปลี่ยนแปลงของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมาก เพียง 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเรียกกังหันลมแบบนี้ว่าเป็นแบบความเร็วคงที่ (fix speed turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำมักจะดึงพลังงาน (reactive power) จากสายส่งมาใช้ โดยเฉพาะในที่มีระบบสายส่งที่ไม่เสถียรภาพ สำหรับเหตุการณ์ลักษณะดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการชดเชยพลังงานจากตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้งอยู่ภายในตัวกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้

กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่(variable speed) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด กล่องเกียร์เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิลเฟ็ด(doubly fed induction generator) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ชุดสแตเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า กังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้

กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดโดยตรง (variable speed with direct drive) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง และมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน [1]

- a) Fixed speed with directly grid-couple (asynchronous) squirrel cage induction generator
- b) Variable speed based on a direct drive and synchronous generator
- c) Variable speed with doubly fed induction generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้ตามความต้องการใช้งาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า (Capacity) เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (Rotor Diameter) และพื้นที่รับลมของใบพัด (Swept Area) ของกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่นนั้น ๆ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดต่างๆ [2]

ขนาดของกังหันลม	ขนาดกำลังผลิต (kW)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่รับลม (m <sup>2</sup> )
ขนาดไมโคร (Micro Wind Turbine)	< 1.5	< 3	< 7
ขนาดเล็ก (Small Wind Turbine)	1.5 - 20	3 - 10	7 - 80
ขนาดกลาง (Medium Wind Turbine)	20 - 200	10 - 25	80 - 500
ขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine)	200 - 1,500	25 - 70	500 - 3,850
ขนาดใหญ่มาก (Very Large Wind Turbine)	> 1,500	> 70	> 3,850

**2.8.1 กังหันลมขนาดไมโคร (Micro Wind Turbine)** มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าน้อยกว่า 1.5 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลเพื่อจัดเก็บกระแสไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ และมีภาระทางไฟฟ้าไม่มากนัก เช่น การใช้กับเครื่องมือสื่อสาร หรือแสงสว่างในบางเวลา

**2.8.2 กังหันลมขนาดเล็ก (Small Wind Turbine)** มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 1.5 - 20 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลเพื่อจัดเก็บกระแสไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ และมีภาระทางไฟฟ้าไม่มากนัก เช่น ใช้ตามครัวเรือนหรือสำนักงานขนาดเล็กที่อยู่ห่างไกล

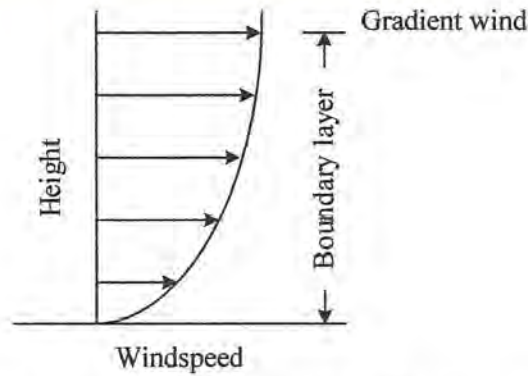
**2.8.3 กังหันลมขนาดกลาง (Medium Wind Turbine)** มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 20 - 200 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งผลิตไฟฟ้าในระบบผสมผสานกับการผลิตไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น ระบบผสมผสานดีเซล-เซลล์แสงอาทิตย์-กังหันลม เพื่อใช้ในระบบ Minigrid ตามชุมชนห่างไกล

**2.8.4 กังหันลมขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine)** มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 200 - 1,500 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งผลิตไฟฟ้าแบบทุ่งกังหันลมบนฝั่ง เพื่อเชื่อมต่อไฟฟ้าเข้ากับระบบสายส่ง (Grid Connection)

**2.8.5 กังหันลมขนาดใหญ่มาก (Very Large Wind Turbine)** มีขนาดกำลังผลิตมากกว่า 1,500 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับติดตั้งผลิตไฟฟ้าแบบทุ่งกังหันลมบนฝั่งและนอกชายฝั่งเพื่อเชื่อมต่อไฟฟ้าเข้ากับระบบสายส่ง (Grid Connection)

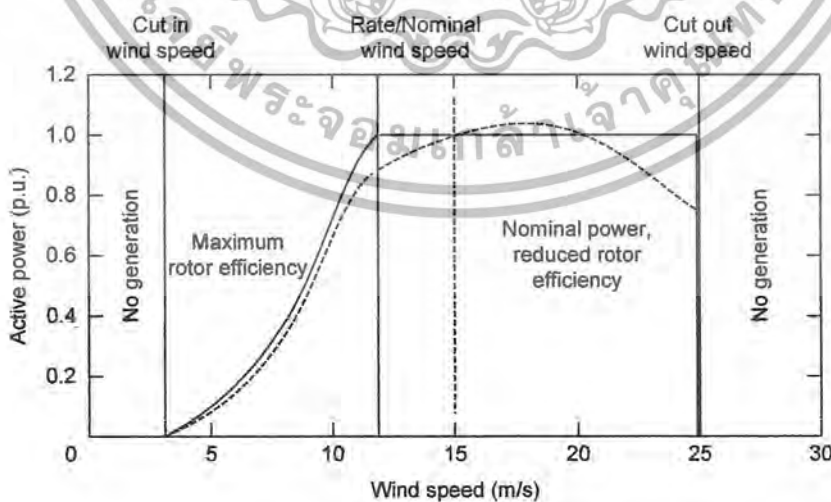
## 2.9 ความเร็วลมและกำลังลม

ลมที่เกิดขึ้นถูกใช้ประโยชน์จากส่วนที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าลมผิวพื้น ซึ่งหมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีการผสมผสานของอากาศกับอนุภาคอื่นๆ และมีแรงเสียดทานในระดับต่ำ โดยเริ่มต้นที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไปแรงเสียดทานจะลดลง ทำให้ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 จนกระทั่งที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบไม่มีแรงเสียดทาน ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระดับความสูง และ สภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกันกับทิศทางของลม จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่ากังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ความเร็วลมเท่าๆ กัน แต่มีทิศทางลมที่แตกต่างกัน เมื่อลมเคลื่อนที่พุ่งเข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลมเป็นอย่างมาก ผลคือแรงลัพธ์ที่ได้จากกังหันลมแตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยเบื้องต้นที่เป็นตัวกำหนดในการใช้พลังงานลมคือความเร็วและทิศทางของลมนั่นเอง



รูปที่ 2.9 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ [1]

พลังงานที่ได้รับจากกังหันลมจะมีเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง ที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1 - 3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่ทำงานจึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ที่ความเร็วลมระหว่าง 2.5 - 5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่าช่วงเริ่มความเร็วลม (cut in wind speed) และที่ความเร็วลมช่วงประมาณ 12 - 15 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงที่เรียกว่าช่วงความเร็วลม (nominal หรือ rate wind speed) ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง ในช่วงที่ความเร็วลมได้ระดับไปสู่ช่วงความเร็วลมเป็นการทำงานของกังหันลมด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (maximum rotor efficiency) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ้นความเร็ว (tip speed ratio) และในช่วงเลยความเร็วลม (cut out wind speed) เป็นช่วงที่ความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้



รูปที่ 2.10 แผนภูมิแสดงกำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบต่างๆ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

104072

## 2.10 การคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากความเร็วลม

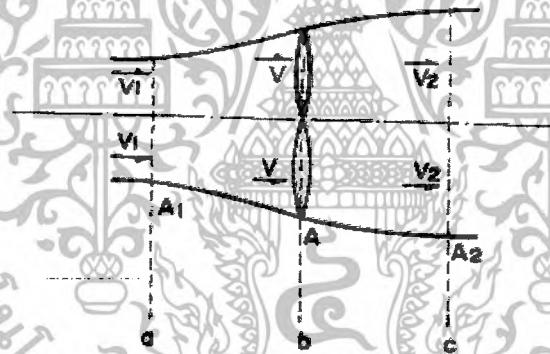
พิจารณากระแสลมที่มีความหนาแน่นและมีความเร็วลม  $V$  พัดผ่านพื้นที่หน้าตัด  $A$  ในช่วงหนึ่งหน่วยเวลา จะมีกำลังลม  $P_1$  ที่ได้จากพลังงานจลน์ ดังนี้

$$P_1 = \frac{1}{2}(\rho AV)V^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (2.1)$$

กังหันลมจะทำหน้าที่สกัดกำลังงานที่มีอยู่ในกระแสลมมาใช้ประโยชน์ได้เพียงบางส่วน เท่านั้น กำหนดให้  $C_p$  เป็นสัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient) ซึ่ง  $C_p$  จะเป็นตัวบ่งชี้ สัดส่วนของกำลังงานที่กังหันจะสามารถสกัดได้จากกระแสลม ถ้า  $P$  แทนกำลังงานที่ได้จาก กังหันลม ดังนั้น

$$P = C_p P_1 = \frac{1}{2} C_p \rho AV^3 \quad (2.2)$$

พิจารณากังหันลมที่มีพื้นที่หน้าตัดรับลม  $A$  ตั้งรับกระแสลมซึ่งมีความเร็วลม  $V_1$  ดัง แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 พื้นที่หน้าตัดของใบพัดกังหันลมที่ตั้งรับกระแสลม [4]

ณ พื้นที่หน้าตัด  $A_1$ ,  $A$  และ  $A_2$  ของตำแหน่ง  $a$ ,  $b$ , และ  $c$  มีค่าความเร็วลม  $V_1$ ,  $V$  และ  $V_2$  ตามลำดับ สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง (Continuity Equations) ได้ ดังนี้

$$A_1 V_1 = AV = A_2 V_2 \quad (2.3)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของกระแสลม ณ หน่วยเวลา  $t$

$$P = \frac{1}{2}(\rho AV)(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมที่มีต่อกังหัน โดยแรง  $F$

$$F = \rho AV(V_1 - V_2) \quad (2.5)$$

คิดเป็นกำลังงาน  $P = FV = \rho AVPV^2(V_1 - V_2) \quad (2.6)$

ดังนั้น  $\rho AV^2(V_1 - V_2) = \frac{1}{2}(\rho AV)(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.7)$

และ  $V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (2.8)$

Betz Coefficient Betz เสนอแนวทางการหาค่าสูงสุดของการสกัดกำลังงานจากกระแสลมให้ได้สูงสุด โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วลม  $V_1$  และ  $V_2$  ถ้ากำหนดให้  $V_2 = dV_1$  แทนค่าลงในสมการ (2.4)

$$P = \frac{1}{2} \rho A \left\{ \frac{1}{2}(V_1 + dV_1) \right\} (V_1^2 - d^2V_1^2) \quad (2.9)$$

$$= \frac{1}{4} \rho AV_1^3 (1+d)(1-d^2) \quad (2.10)$$

ค่า  $P$  มีค่าสูงสุดเมื่อ  $\partial P / \partial d = 0$  และ ณ จุดนี้พบว่า  $d = \frac{1}{3}$

ดังนั้น  $P_{\max} = \frac{1}{4} \rho AV_1^3 \left( 1 + \frac{1}{3} \right) \left( 1 - \frac{1}{9} \right) \quad (2.11)$

หรือ  $= \frac{1}{2} \left( \frac{16}{27} \right) \rho AV_1^3 \quad (2.12)$

ค่า  $\left( \frac{16}{27} \right)$  ก็คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด  $C_{p\max}$  เรียกว่า Betz Coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ศักยภาพพลังงานลม

จากการศึกษาศักยภาพพลังงานลมทั่วโลกพบว่า เป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างมหาศาล ข้อมูลจาก เอกสารอ้างอิงพบว่า เฉพาะในพื้นที่ชายฝั่งของทวีปยุโรปมีพลังงานจากลมถึง 2,500 TWh ต่อปี ซึ่งคิดเป็น 85% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในยุโรปในปี ค.ศ.1997 ซึ่งตัวเลขพลังงานลมดังกล่าวนี้อาจแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลความเร็วลมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมมุติฐานของเทคโนโลยีกังหันลมที่เลือกใช้ในการประเมิน

สำหรับประเทศไทยยังไม่เคยมีการประเมินค่าพลังงานจากลมว่ามีค่าประมาณเท่าไรต่อปี แต่มีการ ศึกษาเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (ปัจจุบันคือ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) พบว่าแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทย มีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ระดับ 3 (Class 3) หรือมีความเร็วลม 6.4 เมตร/วินาที ขึ้นไปที่ความสูง 50 เมตร อยู่ที่ภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก เริ่มตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และปัตตานี และที่อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม นอกจากนี้ยังพบว่ามีแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีอีกส่วนหนึ่ง อยู่บริเวณเทือกเขาด้านทิศตะวันตกตั้งแต่ภาคใต้ตอนบนจรดภาคเหนือตอนล่างในจังหวัดเพชรบุรี กาญจนบุรี ตาก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม แหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ อยู่ในบริเวณเทือกเขาในอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง จังหวัดสุราษฎร์ธานี อุทยานแห่งชาติเขาหลวง และใต้ริมเขื่อน จังหวัดนครศรีธรรมราช ในอุทยานแห่งชาติศรีพังงา จังหวัดพังงา เขาพนมเบญจา จังหวัดกระบี่ ส่วนแหล่งที่มีศักยภาพรองลงมาโดยมีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีตั้งแต่ระดับ 1.3 ถึง 2 (Class 1.3 - Class 2) หรือมีความเร็วลม 4.4 เมตร/วินาที ขึ้นไปที่ความสูง 50 เมตร พบว่าอยู่ที่ภาคใต้ตอนบนบริเวณอ่าวไทยชายฝั่งตะวันตก ตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร จรดจังหวัดสุราษฎร์ธานี และบริเวณเทือกเขาในภาคเหนือ คือ จังหวัดเชียงใหม่ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คือ จังหวัดเพชรบูรณ์ และเลยซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ฝั่งตะวันตก ตั้งแต่จังหวัดพังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง จรดสตูล และในอ่าวไทยชายฝั่งตะวันออก คือ จังหวัดระยองและชลบุรี ซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

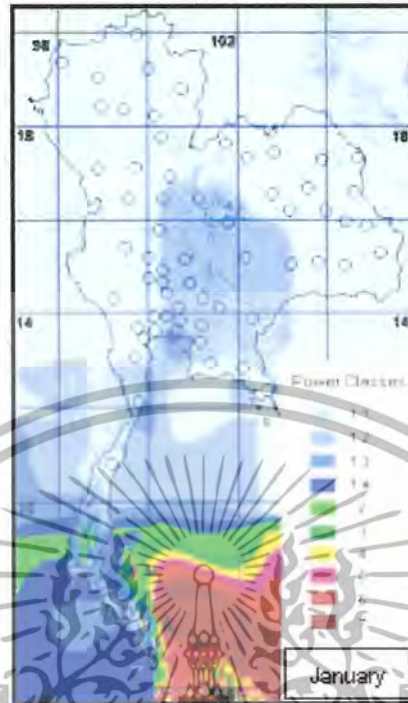
## 2.12 พลังงานลมที่มีอยู่ในประเทศไทย



รูปที่ 2.12 แผนที่แสดงพลังงานลมในประเทศไทย (หน่วย : วัตต์/ตารางเมตร) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.12.1 ลักษณะของลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

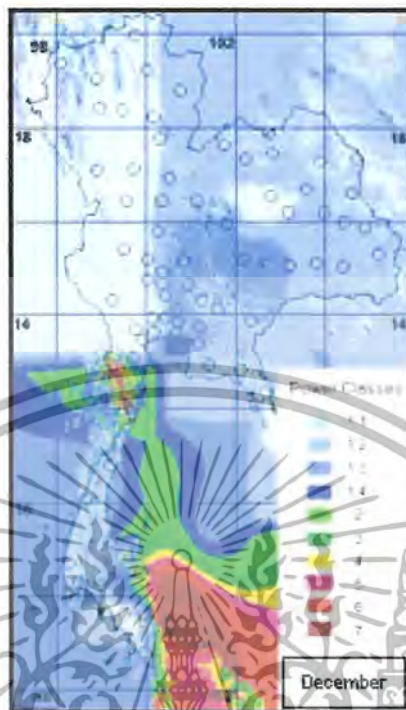


รูปที่ 2.13 ลักษณะลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ [5]

ลมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดผ่านประเทศไทย มีกำลังแรง พัดจากแหลมมาลายู และทะเลอันดามัน เข้าสู่ประเทศไทยทางตอนใต้ฝั่งตะวันตกทำให้ชายฝั่งของจังหวัดกระบี่ ภูเก็ต และพังงา มีกำลังลมค่อนข้างแรง มีความเร็วลมประมาณ 5.6 เมตร/วินาที ขึ้นไป ลมตะวันตกเฉียงใต้พัดจากทะเลเข้าสู่ฝั่งทะเลตะวันออกแต่มีกำลังลมปานกลาง มีความเร็วลมประมาณ 5.1 เมตร/วินาที ขึ้นไปที่บริเวณ จังหวัด ชลบุรี จันทบุรี ระยอง และ ตรัง อีกร่องจากอิทธิพลลมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้มีลมพัดแรงโดยเฉพาะบนที่สูงได้แก่ เทือกเขาในอุทยานแห่งชาติเขาหลวง และใต้ร่มเย็นมีกำลังลมแรงบนยอดเขา มีความเร็วลมประมาณ 7.5 เมตร/วินาที ขึ้นไป และในภาคใต้ตอนบนได้แก่บนเทือกเขาในจังหวัดเพชรบุรีที่เป็นรอยต่อกับประเทศพม่ามีกำลังแรงบนยอดเขาที่มีความเร็วลมประมาณ 8 เมตร/วินาที ขึ้นไป รวมถึงเทือกเขาในภาคกลาง คือ จังหวัดกาญจนบุรีและภาคเหนือตอนล่าง คือ จังหวัดตาก และแม่ฮ่องสอน ที่เป็นรอยต่อกับประเทศเมียนมาร์ มีกำลังลมแรงบนยอดเขาที่มีความเร็วประมาณ 7.5 เมตร/วินาที ขึ้นไป และที่อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ ได้รับอิทธิพลจากลมที่พัดเข้าสู่ประเทศไทย จากอ่าวเบงกอลทางทิศตะวันตกทำให้มีกำลังลมปานกลางบนยอดเขา มีความเร็วลมประมาณ 5.6 เมตร/วินาที ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12.2 ลักษณะของลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ



รูปที่ 2.14 ลักษณะลมในประเทศไทยช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ [5]

ลมที่พัดผ่านประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากความกดอากาศสูงจากประเทศจีนซึ่งจะมีกำลังแรงปกคลุมภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง ทำให้สภาพอากาศบนยอดเขาของประเทศไทย โดยเฉพาะที่ทางภาคเหนือตอนบน เช่นที่อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ มีอากาศเย็นจัด มีกำลังแรง มีความเร็วลมประมาณ 8.5 เมตร/วินาที ขึ้นไป และในภาคกลางได้แก่อุทยานแห่งชาติเขาเขียว เขาใหญ่ ที่อยู่ในรอยต่อของจังหวัดนครนายก นครราชสีมา และ ปราจีนบุรี มีกำลังแรงมีความเร็วลมประมาณ 7.5 เมตร/วินาที ขึ้นไป นอกจากนั้นอิทธิพลตะวันออกเฉียงเหนือ ยังส่งผลให้บริเวณที่สูงในภาคใต้ได้แก่ อุทยานแห่งชาติเขาลวง อุทยานแห่งชาติไทร้มเย็น จังหวัดนครศรีธรรมราช และ อุทยานแห่งชาติเขาปู่-เขาย่า ในรอยต่อของจังหวัดพัทลุง-ตรัง มีกำลังลมแรงบนยอดเขา มีความเร็วลมประมาณ 8.5 เมตร/วินาที ขึ้นไป ความกดอากาศยังแผ่ปกคลุมมายังทะเลในอ่าวไทยทำให้ในทะเลของภาคใต้ตอนกลาง และ ตอนล่างมีคลื่นลมแรง ทิศทางลมพัดจากทะเลเข้าสู่ทางฝั่ง ได้แก่ จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และ นราธิวาส มีกำลังลมแรงบริเวณชายฝั่งมีความเร็วลมประมาณ 7.5 เมตร/วินาที ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.13 สถานภาพการใช้พลังงานลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

งานศึกษาและทดลองใช้พลังงานลมผลิตไฟฟ้า ได้รับการบรรจุเป็นแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนของ กฟผ. มาหลายปีมาแล้ว ในขั้นแรก กฟผ. ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพลังงานลมทั่วประเทศ โดยได้รับความร่วมมือจากกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าความเร็วลมในประเทศไทยโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง-ต่ำ คือต่ำกว่า 4 เมตร/วินาที บริเวณที่มีความเร็วสูงสุดอยู่แถวชายฝั่งและเกาะต่าง ๆ ในอ่าวไทยและทางภาคใต้ สถานที่ที่น่าสนใจในการทดลองใช้พลังงานลมคือแหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ย 5 เมตร/วินาที

ในปี พ.ศ. 2526 กฟผ. ได้ร่วมมือกับหน่วยราชการจังหวัดภูเก็ต จัดตั้งสถานีทดลองใช้งานขึ้นในจังหวัด เพื่อรวบรวมข้อมูลนำไปวิเคราะห์ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ โดยนำกังหันลมผลิตไฟฟ้าซึ่งสั่งซื้อจากต่างประเทศในราคามิตรภาพ ติดตั้งในบริเวณแหลมพรหมเทพ จำนวน 4 ชุด ในขนาด 18.5, 2, 1 และ 0.83 กิโลวัตต์ พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล Digital Data Logger และ Strip Chart Recorder ไว้อย่างครบถ้วน ไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นนำมาใช้ในบริเวณสถานีทดลอง โดยใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ติดตั้งไว้ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่ากังหันลมที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าในสถานีนี้ใช้งานได้ดีพอสมควร แต่มีปัญหาเรื่องชิ้นส่วนบางชนิด เช่น ใบพัดกังหันและดัลลบลูกปืนชำรุด และยังมีปัญหาด้านการจัดซื้ออะไหล่จากต่างประเทศในบางกรณี

เมื่อการทดลองใช้พลังงานลมผลิตไฟฟ้าปรากฏ ผลเป็นที่พอใจ ในปี พ.ศ. 2531 กฟผ. จึงกำหนดแผนงานเชื่อมโยงระบบกังหันลม เพื่อผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่ายของกฟผ. เพื่อการใช้งานจริงและเพื่อศึกษาหาทางพัฒนาการใช้พลังงานลมกับระบบด้วย และด้วยความร่วมมือจากกฟผ. การจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบได้เริ่มขึ้นในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2533 โดยนำกังหันลมขนาด 18.5 กิโลวัตต์ ต่อเข้าระบบไฟฟ้าของกฟผ. เพื่อจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้ในท้องถิ่น นับเป็นการนำไฟฟ้าจากพลังงานลมมาใช้งาน โดยผ่านระบบจำหน่ายเป็นครั้งแรกในประเทศไทย และเมื่อเดือนมีนาคม 2535 ได้ดัดแปลงกังหันลมที่เหลืออีก 3 ชุด จ่ายเข้าระบบไฟฟ้าของกฟผ. ด้วย ต่อมาได้ติดตั้งกังหันลมเพิ่มเติมอีก 2 ชุด ขนาดกำลังผลิตชุดละ 10 กิโลวัตต์ จ่ายเข้าระบบตั้งแต่เดือนตุลาคม 2536 และได้มีการพัฒนากังหันลมที่มีประสิทธิภาพขึ้นอีก 1 ชุด ขนาดกำลังผลิต 150 กิโลวัตต์ จ่ายเข้าระบบเมื่อเดือนกรกฎาคม 2539 รวมกำลังการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมของกฟผ. ทั้งหมด 192 กิโลวัตต์

## 2.14 ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจากการใช้กังหันลม

ปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้ากันอยู่ในหลายประเทศ ซึ่งได้รับการยอมรับจากประชาชนในพื้นที่เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม กังหันลมยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือผลกระทบข้างเคียงอื่นๆ ดังต่อไปนี้

- พื้นที่ : กังหันลมจะต้องติดตั้งอยู่ห่างกันห่างกันห่างถึงสิบเท่าของความสูงกังหัน เพื่อที่กระแสลมจะได้ลดความปั่นป่วนหลังจากที่ผ่านกังหันลมตัวอื่นมา อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่ติดตั้งจริงของกังหันลมจะใช้เพียง 1% ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งจะเป็นส่วนของเสาและฐานรากและเส้นทางสำหรับการเข้าไปติดตั้งและดูแลรักษา กังหันลมขนาดใหญ่ซึ่งมีความสูงของเสากังหันมาก จะต้องติดตั้งอยู่ห่างกันเป็นระยะทางไกล ตัวอย่างเช่น กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดระดับเมกะวัตต์ ต้องการระยะห่างระหว่างกันถึง 0.5 - 1 กิโลเมตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยละเอียด แล้วจะพบว่า การติดตั้งกังหันลมจะไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ต่างๆ อาทิเช่น พื้นที่ทางการเกษตร พื้นที่อุตสาหกรรม หรือแม้แต่พื้นที่ป่าธรรมชาติ ประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวยังคงสามารถใช้ประโยชน์ จากที่ดินได้อย่างปกติ

- ทัศนวิสัย : สำหรับผลกระทบทางด้านสายตาหรือการมองเห็นของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า นั้น ยังไม่ได้มีการประเมินผลออกมาอย่างชัดเจน กังหันลมขนาดใหญ่จะมีความสูงมากกว่า 50 เมตรขึ้นไป ทำให้สามารถมองเห็นได้จากระยะไกล กังหันลมที่ติดตั้งอยู่ตามทุ่งหญ้า สร้างความสวยงาม สร้างจินตนาการ และความคิดต่างๆ ให้กับผู้พบเห็น กังหันลมสามารถใช้เป็นสื่อการเรียนรู้หลักการทางอากาศพลศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อเทคโนโลยีการบินหรืออากาศยานได้

- เสียง : เสียงของกังหันลมเกิดจากการหมุนของปลายใบพัดติดกับอากาศ จากการที่ใบพัดหมุน ผ่านเสากังหัน จากความปั่นป่วนของลมบริเวณใบกังหันลม และจากตัวเครื่องจักรกลภายในตัวกังหันลม โดยเฉพาะส่วนของเกียร์ เสียงดังของกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่สำคัญประการหนึ่งซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพ ของกังหันลม ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตกังหันลมจึงพยายามพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อลดผลกระทบจากเสียง ของกังหันลมในช่วงห้าปีที่ผ่านมา ระดับของเสียงในบริเวณอาคาร บ้านเรือน หรือที่พักอาศัยที่จะเป็นอันตราย ต่อมนุษย์อยู่ที่ไม่เกิน 40 dB ที่ระยะห่างไม่เกิน 250 เมตร ดังนั้นการติดตั้งกังหันลมหากต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะห่างจากเขตที่พักอาศัยของมนุษย์ให้มากขึ้น

- นก : มีการรายงานว่านกในบริเวณใกล้ๆ ฟาร์มกังหันลมมักจะชนกังหันลมอยู่บ่อยครั้ง แต่จากการศึกษาการตายของนกจากการบินชนกังหันลมที่กำลังหมุนอยู่นั้น พบว่ามีอัตราที่น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่นกบินชนรถ หน้าต่างของอาคาร หรือสายไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นอยู่เสมอๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากังหันลมแทบจะไม่มีผลต่อจำนวนนกเลย ยกเว้นในบางกรณี จำนวนการตายของนกในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมอาจสูงอันเนื่องมาจาก มีฝูงนกที่อพยพย้ายถิ่นฐานในบางฤดู การผ่านพื้นที่ดังกล่าวในเวลากลางวัน หรือพื้นที่นั้นเป็นแหล่งหาอาหารของนกนักล่าบางชนิด นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาของผู้เชี่ยวชาญ พบว่าในบริเวณพื้นที่ติดตั้งกังหันลม กลับมีอัตราการผสมพันธุ์ของเกสรดอกไม้ที่สูงมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของกระแสลมในบริเวณนั้น

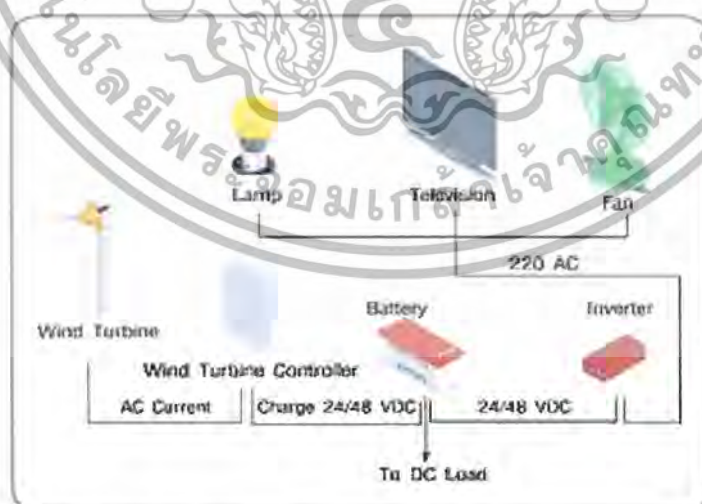
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า : สัญญาณโทรทัศน์ คลื่นวิทยุ และเรดาร์ สามารถถูกรบกวนได้จากการหมุนของกังหันลม ซึ่งสร้างคลื่นรบกวนสัญญาณเหล่านั้น การถูกรบกวนของคลื่นวิทยุหรือโทรทัศน์นั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ ที่ตั้งของกังหันและเสาส่ง, คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และทางกายภาพของใบพัดกังหัน, ลักษณะความถี่ของสัญญาณ และคลื่นแม่เหล็กความถี่สูงในชั้นบรรยากาศ แต่ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุแบบใหม่มาใช้ทำเป็นใบพัด เช่น ไฟเบอร์กลาส และพลาสติก ซึ่งวัสดุเหล่านี้ช่วยลดปัญหาการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมาก

## 2.15 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ระบบการติดตั้งของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ระบบการติดตั้งแบบเดี่ยว (Stand Alone System) และระบบการติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System) การเชื่อมต่อทั้งสองระบบมีทั้งข้อดี-ข้อเสีย และการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป การตัดสินใจในการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ จึงควรมีการศึกษาอย่างรอบคอบในการเลือกชนิดของการติดตั้งให้เหมาะสมกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ต้องการใช้งาน

### 2.15.1 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว (Stand Alone System)

ระบบนี้เหมาะสำหรับการติดตั้งใช้งานในที่พักอาศัย ชุมชน หรือพื้นที่ที่ห่างไกลจากสายส่งหลัก เช่น บนเกาะหรือชนบทห่างไกลที่ระบบสายส่งเข้าไปไม่ถึงและไม่คุ้มค่ากับการติดตั้งระบบสายส่งเข้าไปสู่พื้นที่ที่ต้องการใช้งาน โดยในระบบการติดตั้งแบบเดี่ยวนั้นจะต้องใช้ชุดเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับเป็นที่เก็บพลังงาน (Battery Bank) ซึ่งอาจเป็นระบบการผลิตไฟฟ้าแรงดันตั้งแต่ 12 - 48 โวลท์ แล้วเก็บพลังงานที่ได้ เข้าสู่ชุดแบตเตอรี่ โดยจะต้องทำงานให้สัมพันธ์กับระบบควบคุมการทำงานของกังหันลม (Wind Turbine Controller) ได้อย่างเหมาะสมเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้เป็นไปตามความต้องการ ที่ความเร็วลมต่างกันออกไป นอกจากนี้ระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมยังมีระบบป้องกันตัวเอง (Self Protection) ซึ่งอาจจะมีการทำงานคู่กันระหว่างระบบทางกลและระบบทางไฟฟ้าเพื่อไม่ให้ความเร็วลมของกังหันลมมากเกินไปกว่าที่ออกแบบไว้



รูปที่ 2.15 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว [2]

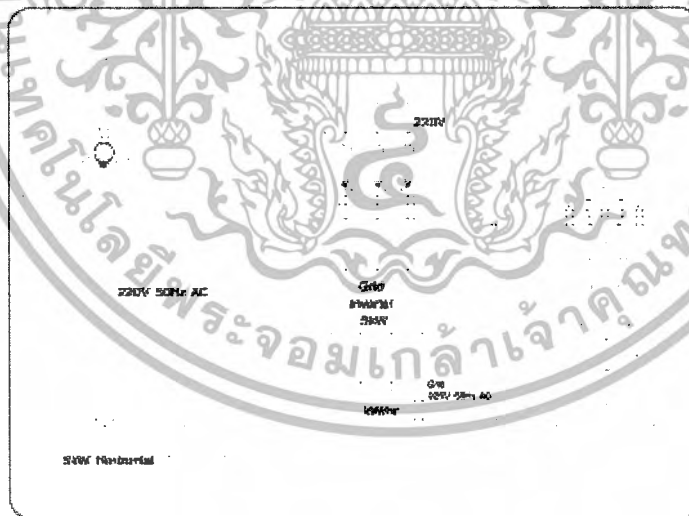
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ไฟฟ้าในระบบการใช้งานแบบเดี่ยวนี้อาจใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยหากต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบกระแสสลับก็จะต้องมีตัวแปลงไฟฟ้า (Inverter) จากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC/DC) โดยอุปกรณ์ Inverter ในแต่ละรุ่นจะทำงานแตกต่างกันออกไปตามความสามารถและภาระทางไฟฟ้าที่นำไปใช้งาน ดังนั้นหากต้องการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับก็ต้องมีการคำนวณภาระทางไฟฟ้าที่จะใช้งานเพื่อการคัดเลือก Inverter ที่มีความเหมาะสมต่อไป

### 2.15.2 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง

#### (Grid Connected System)

การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในระบบนี้เป็นการติดตั้งใช้งานในกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งจะทำการเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องมีชุดเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่ (Battery Bank) โดยชุดแปลงไฟฟ้า (Inverter) ของระบบนี้จะมีราคาสูงกว่าชุดแปลงไฟฟ้าทั่วไป เนื่องจากมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนและต้องสามารถเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่งได้ (Grid Tie Transfer) นอกจากนั้นชุดแปลงไฟฟ้าของระบบนี้ยังมีหน้าที่สำคัญที่จะต้องควบคุมแรงดันหรือความถี่ทางไฟฟ้าให้เหมาะสมและสามารถป้องกันกระแสไฟฟ้าขนานไปกับไฟฟ้าจากสายส่งหลักได้



รูปที่ 2.16 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่ง [2]

ในส่วนของระบบควบคุมกังหันลมนั้นจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างชุดควบคุมการปล่อยไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายใต้ชุดแปลงไฟฟ้า (Inverter) และระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine Controller) เพื่อให้ระบบมีการปล่อยพลังงานไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องเหมาะสมต่อความเร็วลมขนาดต่าง ๆ กันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.16 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้า

ในการจำลองระบบไฟฟ้าตามรูปแบบของโปรแกรม PSS/E สามารถแบ่งประเภทของบัสที่สำคัญๆออกเป็น 4 ชนิดด้วยกัน คือ

1. Load Bus เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่และไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ สำหรับบัสโหลด มีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า บัส PQ เหตุที่เรียกเช่นนี้ก็เพราะว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนถูกกำหนดโดยบัสนี้

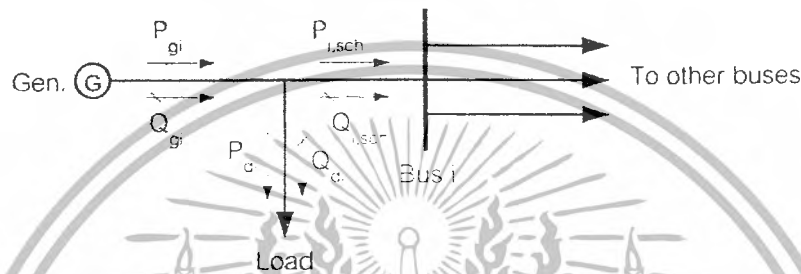
2. Voltage – Controlled Bus หรือ Generator Bus เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ เราสามารถควบคุมขนาดของแรงดัน โดยการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า บัส PV

3. Swing Bus ในการจำลองระบบไฟฟ้าจะต้องมี Swing Bus 1 บัส และกำหนดให้เป็นบัสที่ 1 โดยกำหนดขนาดแรงดันมีค่าเท่ากับหนึ่งและมุมของแรงดันเป็นศูนย์ ( $V_1 = 1 \angle 0^\circ$ ) โดยปกติ Swing Bus จะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ แต่แตกต่างกับ Generator Bus ตรงที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างไม่จำกัดจำนวน

4. Isolate Bus เป็นบัสที่ไม่ได้ใช้งานอยู่ในระบบ และอุปกรณ์ทุกชนิดที่ต่ออยู่กับบัสประเภทนี้ถูกปลดออกจากระบบทั้งหมด รวมทั้งจะต้องไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจะไม่นำบัสประเภทนี้มาคิด

## 2.17 วิธีการแก้ไขปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างหนึ่งก็คือ สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นสมการไม่เชิงเส้น และต้องใช้วิธีอิตเทอเรทีฟ (Iterative) ในการแก้สมการ ซึ่งในโปรแกรม PSS/E มีอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ นิวตัน-ราฟสัน และเกาส์ไซเดล แต่ในโครงการนี้จะเลือกใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า รูปที่ 2.17 แสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส  $i$  ที่ใช้ในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 แผนภาพเส้นเดียวแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส  $i$

จากรูปที่ 2.17 เมื่อกำหนดให้  $v_i = |v_i| \angle \delta_i$ ,  $v_n = |v_n| \angle \delta_n$  และ  $Y_{in} = |Y_{in}| \angle \theta_n$  สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส  $i$  ได้ดังสมการ (2.13) และสมการ (3.2) ตามลำดับ

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_n + \delta_n - \delta_i) \quad (2.13)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 G_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \sin(\theta_n + \delta_n - \delta_i) \quad (2.14)$$

เมื่อพิจารณาที่บัสควบคุมแรงดันโดยจะกำหนดให้บัสอื่นๆ ทั้งหมดในระบบเป็นโหลดบัส (ยกเว้น Swing Bus) ซึ่งทราบค่าความต้องการใช้ไฟฟ้า  $P_{di}$  และ  $Q_{di}$  และกำหนดขนาดและมุมของแรงดัน Swing Bus เป็น  $|V_1| \angle \delta_1$  และบัสอื่นๆในระบบจะมีตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าอยู่ 2 ตัวแปร คือ  $|V_i|$  และมุม  $\delta_i$  และในการประมาณค่าขนาดและมุมของแรงดันที่โหลดบัสจะมี Power mismatch ดังนี้

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc} \quad (2.15)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,calc} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น จึงเขียนสมการของ Power mismatch ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ของระบบไฟฟ้าที่มี 3 บัสได้ดังสมการที่ (2.13) เมื่อบัสที่ 1 เป็น Swing Bus ในการคำนวณจะเริ่มจากบัสที่ 2 เนื่องจากที่ Swing Bus ได้กำหนดทั้งขนาดและมุมของแรงดันไว้แล้ว

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta |V_2| \\ \Delta |V_3| \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

ระบบไฟฟ้าแต่ละระบบจะมีขนาดไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงเขียนสมการให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ของระบบไฟฟ้าทั่วไปได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $[J]$  คือ จาคอบีเยนเมตริกซ์ (Jacobian matrix)

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้วิธีนิวตัน ราฟสัน มีขั้นตอนดังนี้

1. สมมุติค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ไม่ทราบค่าทุกบัส โดยการประมาณค่าขนาด  $|V_i|$  และมุม  $\delta_i^{(0)}$  ของแรงดันในการคำนวณแรก
2. คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า  $P_{i,calc}$  และ  $Q_{i,calc}$  จากสมการที่ (2.13) และ (2.14), Power mismatch  $\Delta P_i$  และ  $\Delta Q_i$  จากสมการที่ (2.15) และ (2.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ตรวจสอบเงื่อนไข

- ถ้า  $\Delta P_i$  และ  $\Delta Q_i \leq \epsilon$  (Tolerance  $\epsilon$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ซึ่งมีค่าเป็นบวกเสมอ เช่น 0.0001 p.u.) แล้วให้ไปคำนวณหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เป็นอันสิ้นสุดการคำนวณ

- แต่ถ้า  $\Delta P_i$  และ  $\Delta Q_i > \epsilon$  ให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 4

### 4. คำนวณหาค่าจากจาโคเบียนเมตริกซ์

5. คำนวณหาค่า  $\Delta \delta_i$  และ  $\Delta |V_i|$  ของรอบการคำนวณถัดไป โดยการอินเวอร์สจาโคเบียนเมตริกซ์ ดังสมการ (3.7)

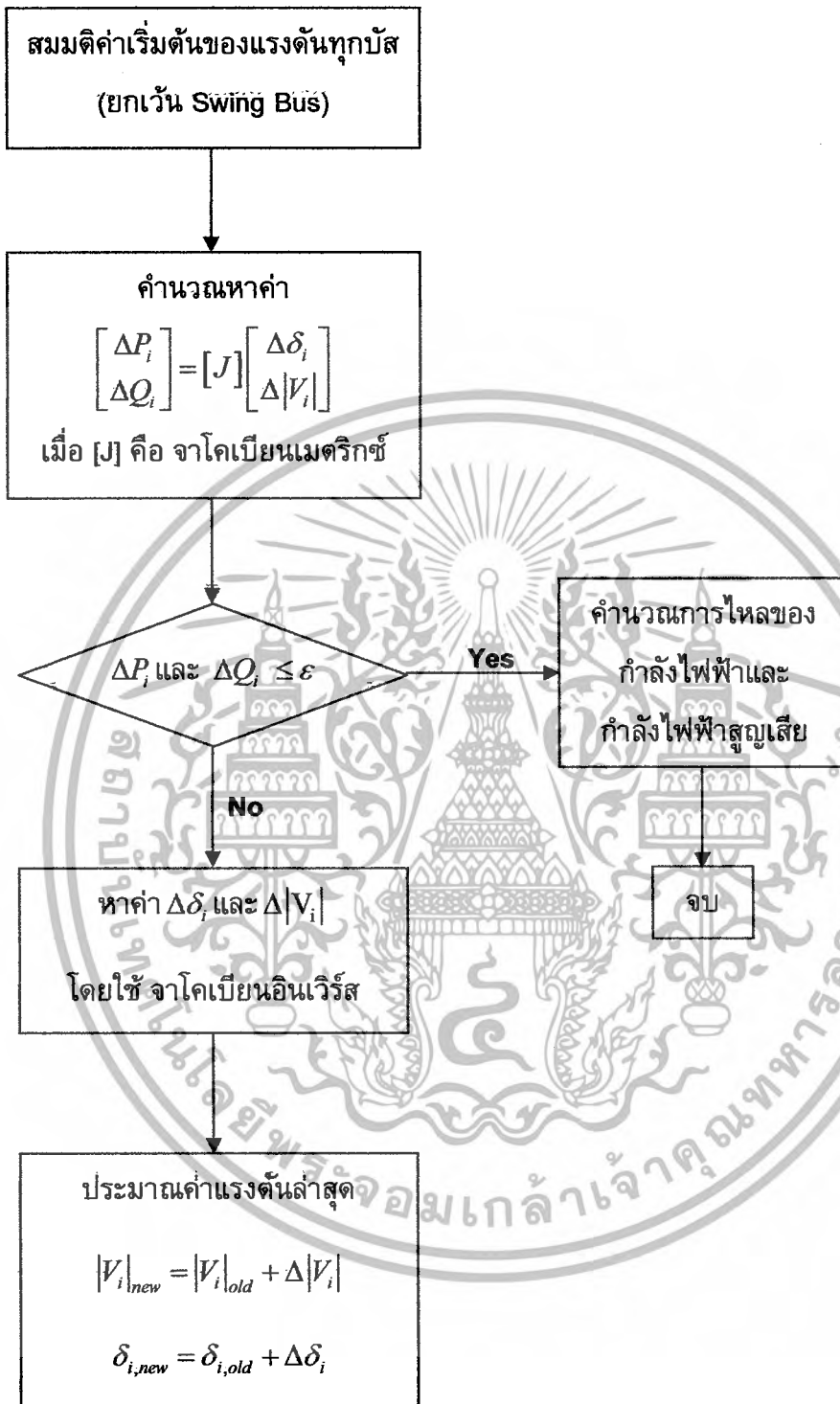
$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

6. คำนวณหาค่าขนาด  $|V_i|$  และมุม  $\delta_i$  ของแรงดันใหม่ล่าสุด (Update) โดยใช้  $\Delta |V_i|$  และ  $\Delta \delta_i$  ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5

$$|V_{i,new}| = |V_{i,old}| + \Delta |V_i| \quad (2.20)$$

$$\delta_{i,new} = \delta_{i,old} + \Delta \delta_i \quad (2.21)$$

7. กลับไปคำนวณซ้ำที่ข้อที่ 2 โดยใช้ขนาด  $|V_{i,new}|$  และมุม  $\delta_{i,new}$  ของแรงดันที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 และสามารถเขียน Flow chart ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตันราฟสัน ได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 Flow Chart ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบการทดลอง

ในการพัฒนาทางระบบเศรษฐกิจของประเทศนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าพลังงานเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยในการผลักดัน สืบเนื่องจากความต้องการของพลังงานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ในปัจจุบัน จึงจำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนพัฒนา เพื่อหาแหล่งพลังงานอื่นๆ ให้มีเพียงพอกับ ปริมาณความต้องการพลังงาน

อย่างไรก็ตาม ในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานอื่นๆ นั้น เช่น กังหัน ลม จำเป็นที่จะต้องมีการคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบที่ได้ทำการติดตั้งนั้นด้วย ดังนั้นเราจึงได้ ทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบและเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

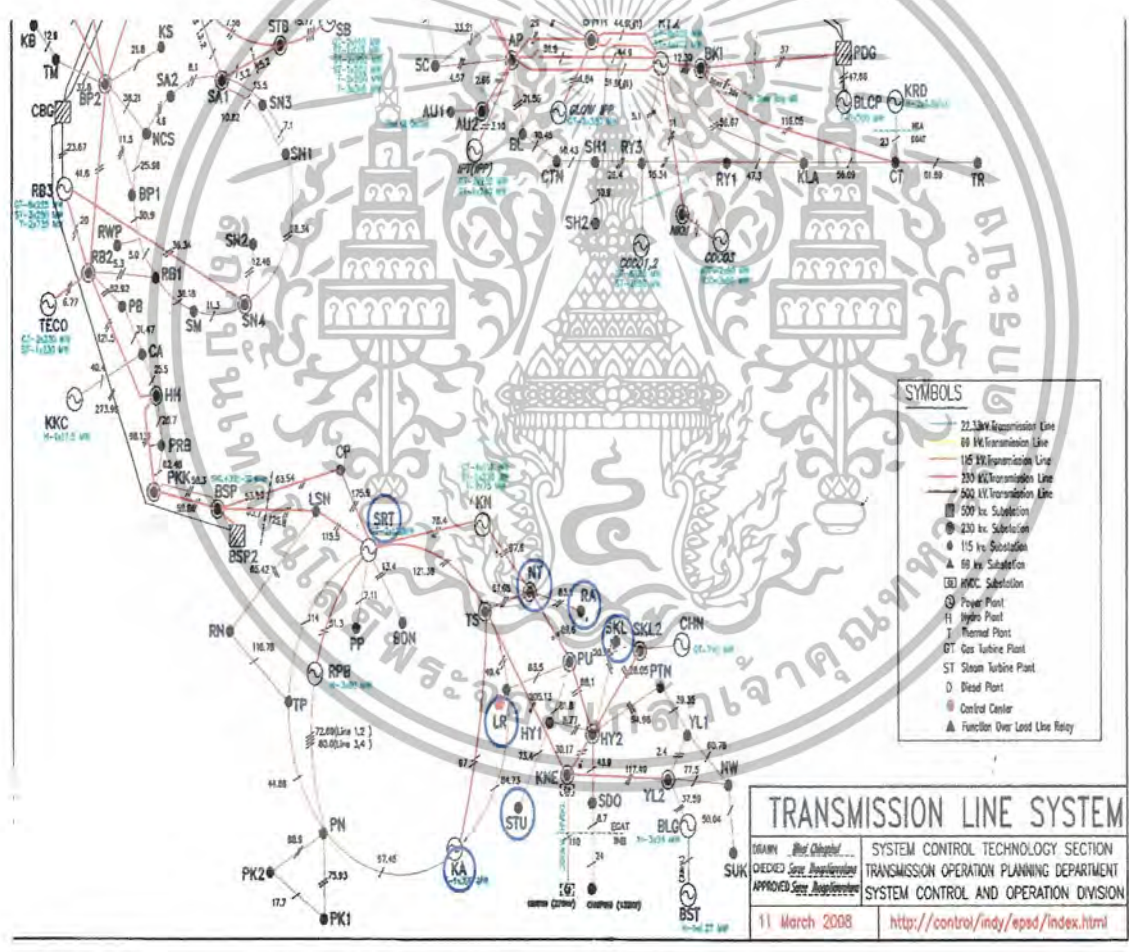
1. ทำการคำนวณหาจำนวนกังหันลมที่สามารถติดตั้งได้สูงสุด และศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบ รวมถึงการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 โดยจะทำการศึกษาและ เปรียบเทียบในพื้นที่บริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งสามารถกำหนดบัสที่จะทำการติดตั้งชุด กังหันลมได้เป็น 7 บัส โดยแบ่งตามพื้นที่ที่มีสถานีวิจัยพลังงานลมอยู่ ดังต่อไปนี้

- บัส SKL (3721) ครอบคลุมพื้นที่ – สิงหนคร, จะนะ
- บัส RA (3736) ครอบคลุมพื้นที่ – ระโนด, สทิงพระ
- บัส NT (3714) ครอบคลุมพื้นที่ – ปากพนัง, หัวไทร, ท่าศาลา, ชนอม, ลิขล
- บัส SRT (3703) ครอบคลุมพื้นที่ – ท่าชนะ, ท่าฉาง, กาญจนดิษฐ์ ตอนสัก
- บัส KA (3711) ครอบคลุมพื้นที่ – เหนือคลอง, เกาะสันดา
- บัส LR (3712) ครอบคลุมพื้นที่ – หาดสำราญ, ห้วยยอด
- บัส STU (3722) ครอบคลุมพื้นที่ – ท่งหว้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

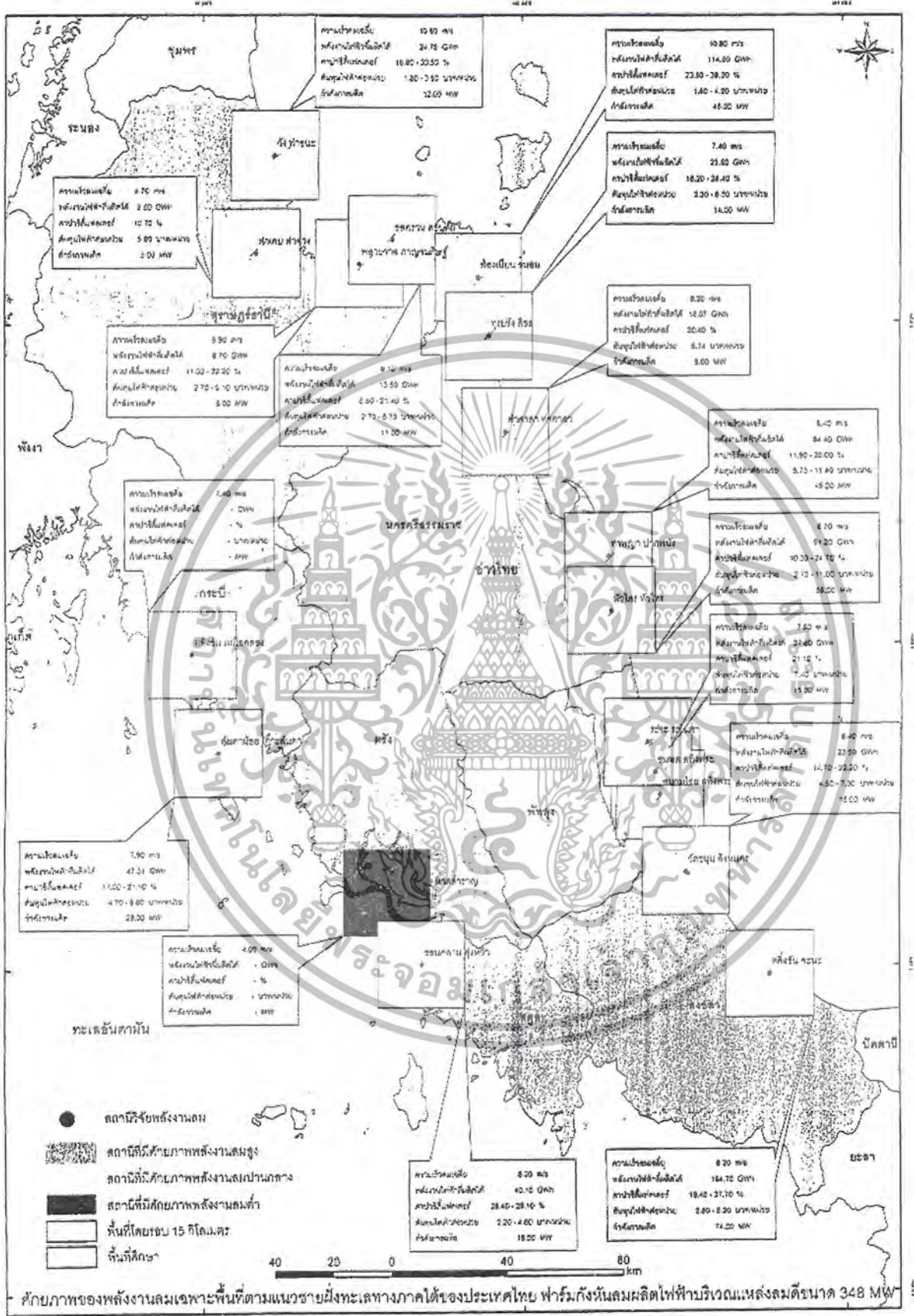
ในการทดลองนี้ เราจะใช้ชุดกักหน้ลม G ติดเข้ากับบัส 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยจะแบ่งวิธีการควบคุมการทำงานออกเป็น 2 วิธี คือ 1. การควบคุมแรงดัน (Voltage Control) 2. การควบคุมตัวประกอบกำลัง (Power Factor Control)

2. วิเคราะห์ถึงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ เมื่อพิจารณาถึงความผิดปกติ (Fault) ที่เกิดขึ้นภายในระบบเนื่องจากการลัดวงจร และการหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของกักหน้ลมเนื่องจากความเสียหาย ขัดข้องหรือลมหยุดพัดอย่างกะทันหัน ซึ่งจะทำให้การศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมที่บัส KA (3711) และบัส STU (3722) โดยจะเปรียบเทียบถึงการทำงานของชุดกักหน้ลม 2 เทคโนโลยี คือ G และ V ด้วย ซึ่งแสดงถึง Block Diagram การทำงานของชุดกักหน้ลม ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ



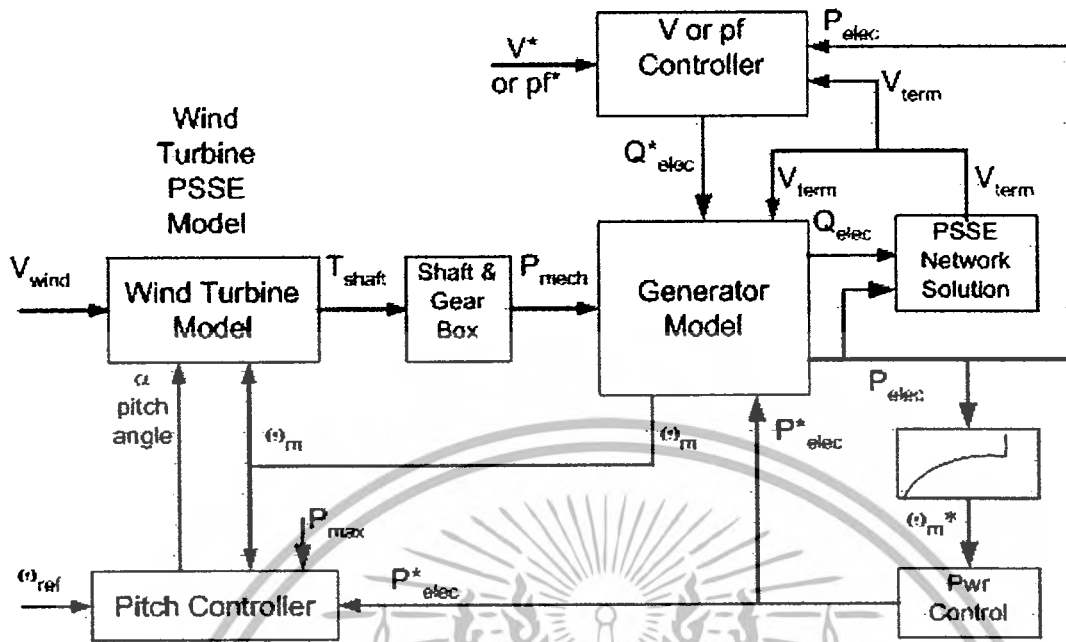
รูปที่ 3.1 บัสที่เลือกไว้ 7 บัส แสดงในแผนภาพของระบบสายส่งทางภาคใต้ของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

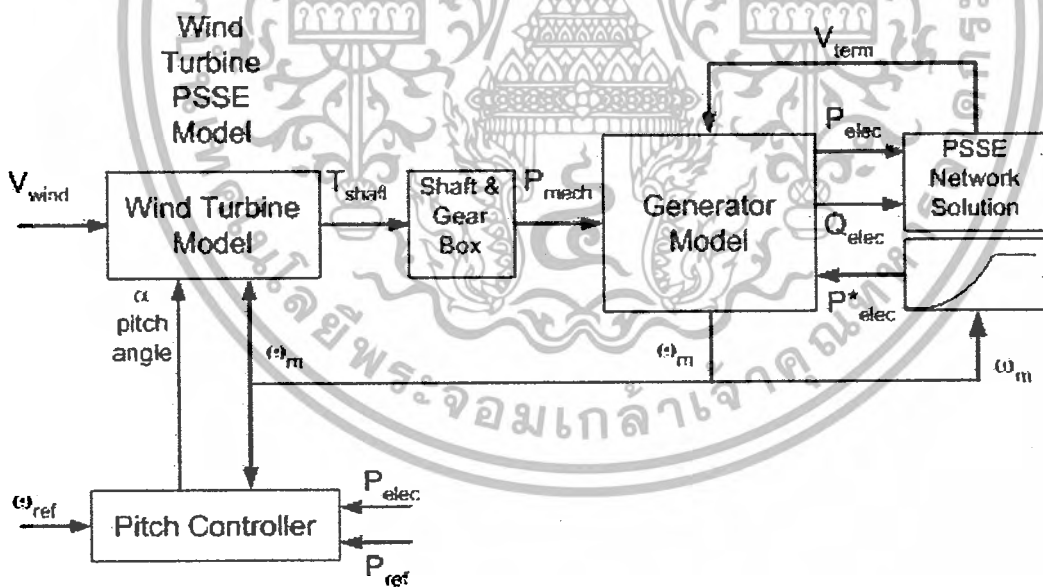


**รูปที่ 3.2** สถานีวิจัยพลังงานลมและข้อมูลความเร็วลมในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 Block Diagram การทำงานของชุดกังหันลม G [9]



รูปที่ 3.4 Block Diagram การทำงานของชุดกังหันลม V [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การควบคุมการทำงานของชุดกังหันลม G

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เราได้ทำการติดตั้งชุดกังหันลมบริเวณทางภาคใต้ของประเทศไทยเพื่อดูเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยชุดกังหันลม G ซึ่งสามารถทำการควบคุมการทำงานได้ 2 วิธี คือ

#### 3.1.1 การควบคุมตัวประกอบกำลัง (Power Factor Control)

เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power : Q) ที่บัสของกังหันลม ซึ่งในการทดลองจะแบ่งการควบคุมนี้เป็น 3 ระดับ คือ

1. ควบคุมที่ 0.95 Lagging หมายถึง การควบคุมให้บัสของกังหันลมรับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากกังหันลมแล้วจ่ายให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ควบคุมที่ 0.95 Leading หมายถึง การควบคุมให้บัสของกังหันลมจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่รับมาจากระบบไฟฟ้ากำลังให้กับกังหันลม
3. ควบคุมที่ 1.00 Unity หมายถึง การควบคุมให้บัสของกังหันลม ไม่ทำการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังกับกังหันลม

#### 3.1.2 การควบคุมแรงดัน (Voltage Control)

เป็นการควบคุมแรงดันที่บัสของกังหันลมให้มีค่าตามที่กำหนด ซึ่งในการทดลองจะแบ่งการควบคุมนี้เป็น 3 ระดับ คือ

1. ควบคุมที่ 0.95 p.u. หมายถึง การควบคุมแรงดันที่บัสของกังหันลมให้มีค่าเป็น 0.95 เท่าของค่าแรงดันเบสที่บัสนี้
2. ควบคุมที่ 1.00 p.u. หมายถึง การควบคุมแรงดันที่บัสของกังหันลมให้มีค่าเท่ากับค่าแรงดันเบสที่บัสนี้
3. ควบคุมที่ 1.05 p.u. หมายถึง การควบคุมแรงดันที่บัสของกังหันลมให้มีค่าเป็น 1.05 เท่าของค่าแรงดันเบสที่บัสนี้

### 3.2 สภาวะอยู่ตัว (Steady – State)

สภาวะอยู่ตัว (Steady-state) หมายถึงสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณใดๆ ภายในระบบ ไม่ว่าจะเวลาจะผ่านไปนานเท่าใดก็ตาม หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นสภาวะที่ไม่มีการรบกวนอันเนื่องมาจากความผิดปกติทั้งภายนอกและภายในระบบเลย

#### 3.2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q)

ในการทดสอบระบบในสภาวะอยู่ตัวจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ภายในกัมมันต์เป็นค่าที่สภาวะอยู่ตัวโดยจะไม่พิจารณาการทำงานในสภาวะไดนามิกและให้ถือว่าค่าความสูญเสียที่เกิดมีค่าคงที่ตลอดการทดลองและกำหนดให้ค่าความเร็วลมมีค่าคงที่ที่ 15 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่ทำให้กัมมันต์ทำงานที่พิกัด
2. ระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถทำงานได้ คือ  $\pm 5\%$  หรือ  $\pm 0.05$  p.u. ของแรงดันปกติ ยกเว้นในกรณีที่ไม่สามารถปรับแท็ป (Tap Changer) ของหม้อแปลง
3. ความถี่ของระบบไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $\pm 1\%$  ของความถี่มูลฐาน 50 Hz

### 3.3 การทดสอบ Contingency

การทดสอบ Contingency หมายถึง การวางแผนและตรวจสอบสมมติฐานต่างๆ ว่าเมื่อระบบเกิดความผิดปกติขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง แล้วจะมีผลกระทบอย่างไรบ้างต่อระบบ หลักการพื้นฐานในการวางแผน คือในสภาวะปกติ อุปกรณ์ทุกชนิดในระบบจะต้องทำงานอยู่ในพิกัดทางความร้อน และระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และเมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในระบบ รวมถึงการปลดหรือการ Trip ของอุปกรณ์ไฟฟ้าออกจากระบบ อุปกรณ์ที่เหลืออยู่ในระบบจะต้องทำงานไม่เกินขีดความสามารถการใช้งานในกรณีฉุกเฉิน และระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยที่พนักงานศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าไม่ได้ดำเนินการใดๆ ระบบจะต้องรองรับเหตุการณ์ต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ซึ่งระยะเวลาการใช้งานในกรณีฉุกเฉินของอุปกรณ์จะต้องสั้นที่สุด

โดยทั่วไปในการทดสอบ Contingency แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามลำดับความรุนแรงของเหตุการณ์ ดังนี้

**1. Single Contingency (N-1)** เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง หม้อแปลงไฟฟ้า 1 ชุด สายส่งไฟฟ้า 1 วงจร Trip ออกจากระบบ ซึ่งเกิด N-1 จะมีความเป็นไปได้มากกว่าการเกิด Contingency แบบอื่นๆ

**2. Double Contingency (N-2)** เช่น สายส่งไฟฟ้าที่สถานีเดียวกัน Trip ออกจากระบบพร้อมกัน 2 วงจร

**3. การทดสอบทางไดนามิก** เป็นการทดสอบการขัดข้องต่างๆตามที่กำหนด

**4. Contingency ที่รุนแรงที่สุด (Extreme Contingency)** เช่น สายส่งไฟฟ้าที่สร้างในเขตเดินสายไฟฟ้าเดียวกัน เกิดข้อขัดข้อง Trip ออกจากระบบทุกวงจร โรงไฟฟ้าทุกโรงที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องเกิดข้อขัดข้องหยุดจ่ายไฟฟ้าทั้งหมด สายส่งในระดับแรงดันเดียวกันของสถานีไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้อง Trip ออกจากระบบทุกวงจร หรือการเกิดลัดวงจรที่บัสของสถานีไฟฟ้า

ในการวางแผนระบบไฟฟ้าจะต้องมีการทดสอบระบบไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยวิธีการวิเคราะห์สภาวะอยู่ตัว และวิเคราะห์เสถียรภาพของกำลังไฟฟ้า รวมทั้งทดสอบ Voltage Collapse และการจ่ายโหลดเกินพิกัดอย่างต่อเนื่องของอุปกรณ์ ซึ่งการทดสอบ Contingency มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- กำหนดสภาพระบบก่อนจะทำการทดสอบ
- กำหนด Contingency หรือเหตุการณ์ผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบ
- กำหนดสภาพที่สามารถยอมรับได้หลังจากเกิดเหตุผิดปกติ
- กำหนดการควบคุมระบบไฟฟ้าโดยใช้ระบบอัตโนมัติ หรือดำเนินการโดยพนักงานศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า หรือใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขยายและปรับปรุงระบบสายส่งจะอยู่บนพื้นฐานของสภาพระบบทั้งในสภาวะปกติ และสภาวะที่เกิดข้อขัดข้องบางส่วน ในการวางแผนระยะยาวจะต้องมีการทดสอบ Contingency ที่รุนแรงที่สุด เพื่อประเมินความสามารถของระบบว่าสามารถที่จะทน Contingency ที่รุนแรงที่สุดได้โดยไม่มีการ Trip อย่างต่อเนื่อง ไม่มีไฟดับเป็นบริเวณกว้างหรือไม่มีไฟฟ้าดับทั่วประเทศ หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างว่าการทดสอบ Contingency ที่รุนแรงที่สุด เพื่อตรวจสอบความไม่มั่นคงของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิด Contingency ที่รุนแรงที่สุด และประเมินความต้องการใช้ระบบป้องกันชนิดพิเศษ (ปลดโหลดเมื่อความถี่ต่ำ หรือเมื่อแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด) หรือนำมาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางแก้ไข เมื่อเกิดข้อขัดข้องขึ้นในระบบ ถึงแม้ว่าการทดสอบ Contingency ที่รุนแรงที่สุดจะไม่ได้ใช้เกณฑ์กำหนดในการศึกษาขยายระบบส่ง แต่ผลการศึกษาที่ได้จะมีอิทธิพลต่อการเลือกแนวทางขยายระบบส่ง เลือกลักษณะการจัดบัสของสถานีไฟฟ้า เลือกระบบป้องกัน และกำหนดจำนวนวงจรสูงสุดของสายส่งที่อยู่ในเขตเดินสายไฟฟ้าเดียวกันที่เหมาะสมกับสภาพระบบ การศึกษาผลตอบแทนของระบบเมื่อเกิด Contingency ที่รุนแรงที่สุด จะทำให้สามารถเข้าใจถึงลักษณะการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติที่เป็นสาเหตุของไฟฟ้าดับทั่วประเทศได้เป็นอย่างดี และด้วยเหตุนี้จึงนำมาใช้วางแผนป้องกันไม่ให้เกิดไฟฟ้าดับทั่วประเทศ รวมทั้งแผนในระบบไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั่วประเทศได้อย่างรวดเร็ว

สำหรับการทดลองนี้ จะทำวิเคราะห์เพียงในกรณีของ Single Contingency เนื่องจากเป็นภาวะที่สามารถเกิดขึ้นได้มากที่สุด

### 3.3.1 การวิเคราะห์ Contingency

การวิเคราะห์ Contingency เป็นขบวนการเลือก หรือกำหนดข้อขัดข้องที่เกิดขึ้นในระบบ และประเมินผลข้อขัดข้องที่เกิดขึ้น เพื่อประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ Contingency โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายระบบไฟฟ้า เช่น การประเมินโหลดหลายๆระดับ การวิเคราะห์ขีดจำกัดในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า และการคำนวณค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ขั้นตอนในการวิเคราะห์ Contingency จะต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการการคำนวณ ซึ่งมีสิ่งที่จะต้องพิจารณาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข้อกำหนดความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ามีอะไรบ้าง
- การกำหนด Contingency ต่างๆที่มีความเป็นไปได้และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากข้อขัดข้องของเหตุการณ์อื่นๆ มีอะไรบ้าง
- Contingency มีผลกระทบต่อระบบอย่างไรบ้าง ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้องหรือโหลดหาย กำลังไฟฟ้ายังสมดุลอยู่หรือไม่ การควบคุมกำลังไฟฟ้าใช้วิธีการนำเข้า-ปลดออกคาปาซิเตอร์/รีแอกเตอร์แบบขนาน การเลื่อนเฟสหรือการเปลี่ยน Tap หม้อแปลง
- วิธีใช้แก้มการการไหลของกำลังไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับข้อกำหนดอย่างไร
- เวลาไหนที่มีความเหมาะสมจะยอมให้มีการปลดโหลดได้



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Contingency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 สภาวะไดนามิก (Dynamic)

สภาวะไดนามิก (Dynamic) หมายถึงสภาวะที่มีปริมาณตั้งแต่หนึ่งปริมาณขึ้นไปเปลี่ยนแปลงอย่างสังเกตเห็นได้ ภายในช่วงเวลาสั้นๆ ช่วงเวลาหนึ่ง หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นสภาวะที่มีการรบกวนอันเนื่องมาจากความผิดปกติภายนอกหรือภายในระบบ

ในการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของระบบนั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงผลตอบสนองของชุดกังหันลมที่ต่อเข้ากับระบบเมื่อเกิดการรบกวนระบบ (System Disturbance) ด้วย เพื่อวิเคราะห์ว่าระบบยังคงสามารถกลับมาทำงานที่สภาวะปกติหรือสภาวะอยู่ตัวได้หรือไม่หลังจากเกิดการรบกวน ซึ่งสามารถแบ่งประเภทการรบกวนระบบได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. การรบกวนระบบขนาดเล็ก (Small Disturbance) เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลด หรือพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2. การรบกวนระบบขนาดใหญ่ (Large Disturbance) เช่น การการลัดวงจรภายในระบบ ซึ่งบริเวณที่เกิดการรบกวนอาจจะเป็นที่ สายส่งระหว่างบัสของระบบไฟฟ้า หรืออาจเกิดโดยตรงที่บัสที่เชื่อมต่อกับชุดกังหันลมก็ได้

อาจจะกล่าวได้ว่าเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการศึกษานั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของชุดกังหันลม รวมไปถึงโหลดที่ทำการเชื่อมต่ออยู่กับระบบในขณะนั้น เนื่องจากค่าพลังงานที่ได้จากชุดกังหันลมมีค่าไม่แน่นอน โดยมีค่าแปรผันขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่ผ่านใบพัด ตำแหน่งพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง อย่างไรก็ตามผลกระทบดังกล่าว หากเกิดความผิดปกติภายนอกเข้ามากระทบต่อระบบ อาจส่งผลกระทบต่อระบบ อาจส่งผลกระทบต่อระบบเกิดการรบกวนอย่างรุนแรง โดยเฉพาะที่ตัวชุดกังหันลม เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแกว่งของ มุมระหว่างโหลดกับตัวกังหันลม (Rotor Angle) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้สมการสถานะ (State Equation) นอกจากนี้แล้วยังสามารถที่จะคำนวณหาค่าเวลาวิกฤต (Critical Clearing Time) ที่ใช้ในการเคลียร์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงเวลาสูงสุด เมื่อเกิดการรบกวนระบบแล้วยังสามารถที่จะทำให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ สำหรับสภาวะที่ทำการศึกษานั้น เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงก่อนการเกิดความผิดปกติ (Pre Fault) ช่วงการเกิดความผิดปกติ (During Fault Condition) และช่วงหลังการเกิดความผิดปกติ (Post Fault)

สำหรับการทดลองนี้ จะศึกษาถึงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ (Voltage Stability) เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ เนื่องจากการรบกวนระบบที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังได้มากที่สุด ที่สายส่งระหว่างบัส 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่มีการติดตั้งชุดกักกันลมเข้าไปกับบัสใกล้เคียง และโดยตรงที่บัสของชุดกักกันลม นอกจากนี้จะทำการศึกษา เมื่อเกิดการรบกวนระบบจากการที่ชุดกักกันลมหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบด้วย

### 3.4.1 การศึกษาลักษณะการไหลของกำลังไฟฟ้า (System Load Flow)

ระบบที่เรานำมาศึกษานั้นเป็นระบบไฟฟ้าของประเทศไทย ซึ่งเป็นระบบขนาดใหญ่มีจำนวนบัสประมาณ 1,468 บัส นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจำนวน 287 ยูนิต โดยการศึกษาถึงลักษณะการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะไดนามิก สามารถที่จะพิจารณาถึงพฤติกรรมของระบบได้จากสมการสวิง (Swing Equation) ดังแสดงในสมการ 3.1

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (3.1)$$

นอกจากนี้ยังสามารถแสดงถึงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า ได้ดังสมการ 3.2

$$P_m = \omega_m T_m \quad (3.2)$$

ในการศึกษาสภาวะทางไดนามิกนั้น เราได้ทำการพิจารณาที่ 2 พื้นที่ ตามลักษณะโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทำการวิเคราะห์ถึงระบบที่มีความแข็งแกร่งมากทางโครงสร้างไฟฟ้ากำลัง (Strong Grid) ซึ่งหมายถึงระบบที่มีการเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆในระบบหลายบัส ทำให้มีเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) ได้หลายทาง ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพสูง กับระบบที่มีความแข็งแกร่งน้อยทางโครงสร้างไฟฟ้ากำลัง (Weak Grid) ซึ่งหมายถึงระบบที่มีการเชื่อมต่อกับบัสอื่นๆในระบบน้อย ทำให้มีเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) น้อย ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพต่ำ

### 3.4.2 การวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Fault Analysis)

ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ระบบผลิต (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ระบบส่งจ่าย (สายส่ง) และระบบจำหน่าย (โหลด) ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ ซับซ้อนและมีการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูง ทำให้การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น การวิเคราะห์การทำงานของระบบในสภาวะผิดปกติจึงเป็นประเด็นสำคัญ ที่ต้องนำมาใช้พิจารณา ซึ่งความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. ความผิดปกติแบบเปิดวงจร (open-circuit faults) ได้แก่ การหลุดของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงหรืออุปกรณ์อื่นๆ

2. ความผิดปกติแบบลัดวงจร (short-circuit faults) ได้แก่ การลัดวงจรของสายส่ง หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งสามารถแยกย่อยได้อีกเป็น 4 ประเภทหลักๆ คือ

2.1 การลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงกราวด์ (single-line-to-ground fault)

2.2 การลัดวงจรแบบ 2 เฟส ไม่ลงกราวด์ (line-to-line fault)

2.3 การลัดวงจรแบบ 2 เฟส ลงกราวด์ (double-line-to-ground fault)

2.4 การลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ (3-phase-to-ground fault)

กรณีของสายส่งบนอากาศนั้น ฉนวนจะเป็นอากาศหรือสารความต้านทานสูง สายส่งบนอากาศอาจถูกลัดวงจรได้โดย นก กระรอก วัว หรือกิ่งไม้ โดยปกติแล้วการเกิดลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงกราวด์จะมีโอกาสเกิดได้มากที่สุด แต่ส่งผลเสียต่อระบบได้น้อยกว่าการลัดวงจรแบบอื่นๆ ซึ่งการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์นั้น แม้จะมีโอกาสเกิดได้น้อย แต่สามารถส่งผลเสียต่อระบบได้มากที่สุด

### 3.5 คุณภาพกำลังไฟฟ้า (POWER QUALITY)

หมายถึง คุณลักษณะกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องพิจารณาศึกษาในปัจจุบัน เนื่องจากปัญหาทางเสถียรภาพนั้นจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าตลอดจนกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมได้

#### 3.5.1 หลักเกณฑ์ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า

สำหรับข้อกำหนดของคุณภาพกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้ให้บริการไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างกันในการใช้กำลังไฟฟ้า ความถี่ ระดับแรงดันในการส่งจ่าย ลักษณะโดยรวมของโหลด ลักษณะของระบบไฟฟ้า รวมไปถึงความหนาแน่นของผู้ใช้ ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวนี้เราจะยึดตามมาตรฐานระดับสากล เช่น IEEE และ IEC เป็นต้น

#### 3.5.2 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า

ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปเกิดมาจาก 5 สาเหตุใหญ่ๆ คือ

1. ปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น พายุ
2. เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย
3. จากการกระทำการสวิตชิงอุปกรณ์ในระบบ
4. จากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม
5. จากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

ซึ่งสาเหตุดังกล่าวข้างต้น ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าในสภาวะต่างๆ ได้ดังนี้

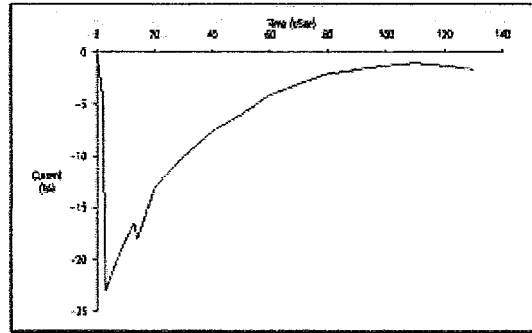
##### 1. สภาวะชั่วคราว (Transient)

คือปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพไฟฟ้า (แรงดัน กระแส) ในเวลาทันทีทันใด จากสภาพปกติ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

##### 1.1 อิมพัลส์ชั่วคราว (Impulsive Transients)

คือขนาดกระแสและแรงดันที่มีค่าความชันสูงมาก เกิดขึ้นในทันทีทันใด โดยความถี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง กำหนดให้มีชีวิตทางเดียวหรือเรียกว่าเสิร์จ (Surge) ดังรูปที่ 3.6 มีสาเหตุเกิดจากฟ้าผ่า ซึ่งอาจเกิดได้โดยตรงหรือในบริเวณใกล้เคียง ผลทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

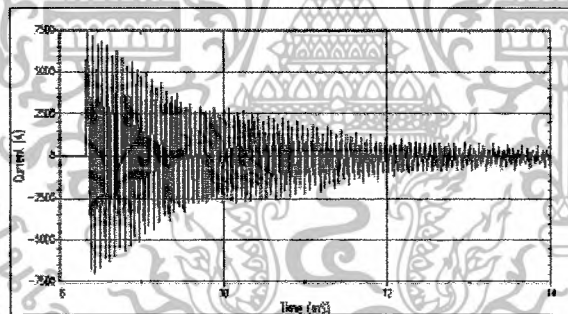


Lightning Stroke Current Impulsive Transient

รูปที่ 3.6 กระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวเกิดโดยฟ้าผ่า [10]

### 1.2 ออสซิลเลทชั่วคราว (Oscillatory Transient)

คือลักษณะของแรงดันหรือกระแสแรงดันมีค่าสูง เกิดขึ้นในทันทีทันใด ความถี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง มีการเปลี่ยนแปลงชั่ว (บวกลบ) ของรูปคลื่นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 3.7 มีสาเหตุเกิดจากการสวิตชิงของอุปกรณ์ในระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย และฉนวนของอุปกรณ์มีการเสื่อมสภาพหรือมีการสูญเสียความเป็นฉนวนเร็วขึ้น



Oscillatory Transient Current Caused by Back-to-Back Capacitor Switching

รูปที่ 3.7 กระแสออสซิลเลทชั่วคราวเกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์ [10]

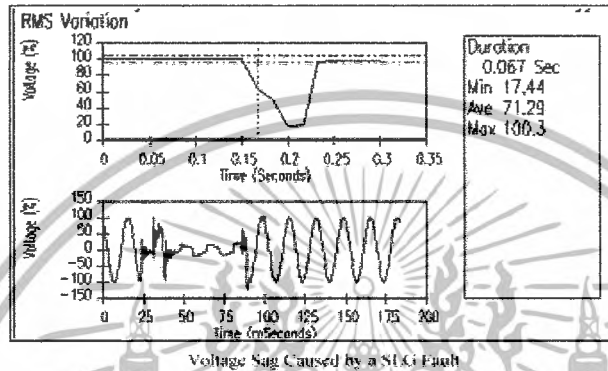
## 2. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation)

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเฉลี่ย ( $V_{rms}$ ) ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาที แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)

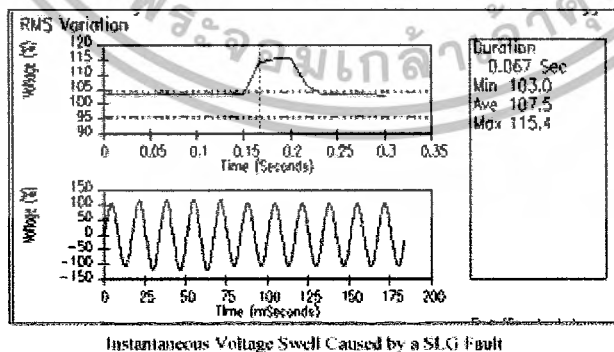
คือค่าแรงดันเฉลี่ยมีขนาดลดลงระหว่าง 0.1 - 0.9 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 มิลลิวินาที - 1 นาที มักเกิดที่เฟสที่มีความผิดปกติทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.8 และจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟ มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



รูปที่ 3.8 แรงดันตกช่วงสั้นจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า [10]

## 2.2 แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell)

คือค่าแรงดันเฉลี่ย มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 - 1.8 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 มิลลิวินาที - 1 นาที ดังรูปที่ 3.9 มักเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าโดยตรง หรืออาจเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ และการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้ากับระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟมีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน

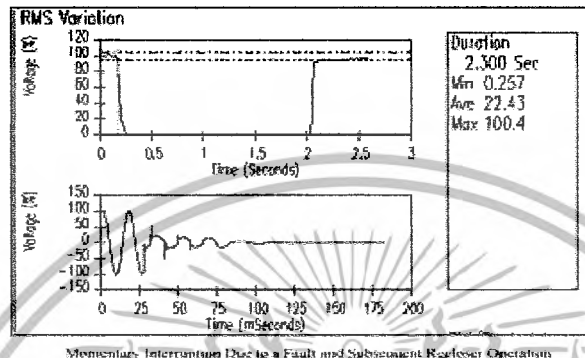


รูปที่ 3.9 แรงดันเกินช่วงสั้นจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ไฟดับชั่วคราว (Voltage Interruption)

คือค่าแรงดันเฉลี่ย มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 p.u. ในช่วงระหว่าง 10 มิลลิวินาที - 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น รีโคสเซอร์ มีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออก ดังรูปที่ 3.10 ผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงานชั่วคราว



รูปที่ 3.10 ไฟดับชั่วคราวจากรีโคสเซอร์ทำงานเนื่องจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า [10]

## 3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variation)

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเฉลี่ย ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าเกิน 1 นาที สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลด แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

### 3.1 แรงดันตก (Under-voltage)

คือค่าแรงดันเฉลี่ย มีขนาดลดลงระหว่าง 0.8-0.9 p.u. ในชวงเวลานานกว่า 1 min มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการสวิตชิงโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบ หรือมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย เนื่องจากเกิดการรับภาระเกิน (Overload)

### 3.2 แรงดันเกิน (Over-voltage)

คือค่าแรงดันเฉลี่ย มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.2 p.u. ในชวงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์เข้าระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน

## 3.3 ไฟดับ (Sustained Interruption)

คือค่าแรงดันเฉลี่ย มีค่าลดลงถึง 0.0 p.u. ในชวงเวลาเกินกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติพร่องทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออกถาวร เป็นผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว การเกิดแรงดันไม่สมดุล ฮาร์มอนิก แรงดันกระเพื่อม หรือการแปรปรวนของควมถี่ ก็เป็นปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยเช่นกัน แต่ในโครงการนี้จะพิจารณาเฉพาะในสภาวะการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงสั้นและช่วงยาวเท่านั้น

### 3.6 วิธีทำการทดลอง

ในโครงการนี้จะทำการแบ่งการทดลองเป็น 2 ตอน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้โดยละเอียด ซึ่งการทดลองตอนที่ 1 จะเป็นการวิเคราะห์ผลในสภาวะอยู่ตัว ส่วนการทดลองตอนที่ 2 จะเป็นการวิเคราะห์ผลในสภาวะไดนามิก

#### 3.6.1 การทดลอง ตอนที่ 1

1. เลือกตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งกังหันลม G ขนาด 1.5 MW เข้ากับระบบ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 7 กลุ่มพื้นที่ ดังที่กล่าวไว้แล้ว
2. สร้างบัสของชุดกังหันลมเพื่อทำการเชื่อมต่อเข้ากับบัสของระบบไฟฟ้าในตำแหน่งที่ได้เลือกไว้ โดยใช้โปรแกรม PSS/E ดังรูปที่ 3.11

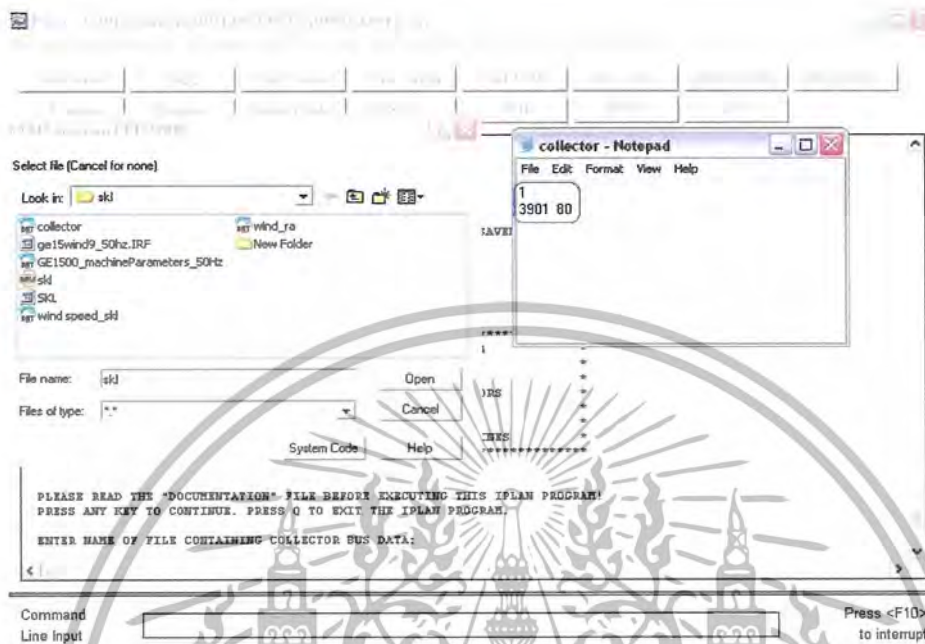
Bus Number	Bus Name	Base kV	Area Number	Area Name	Zone Number	Zone Name	Owner Number	Owner Name	Code	G-Str (PV)
16167	NPC-C16	10.5	6 6		5 5		1 1		2	
16170	TLP-C11	11.0	6 6		5 5		1 1		2	
16171	TLP-C12	11.0	6 6		5 5		1 1		2	
16172	TLP-C10	11.0	6 6		5 5		1 1		2	
17061	SNO-PEA	115.0	1 1		1 1		1 1		1	
26111	RYRE-G1	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26112	RYRE-G2	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26113	RYRE-G3	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26114	RYRE-G4	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26115	RYRE-G5	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26141	SPRC-G1	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26142	SPRC-G2	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26143	SPRC-G3	11.5	6 6		3 3		1 1		-2	
26181	TPI-P1	11.0	6 6		3 3		1 1		-2	
26182	TPI-P2	11.0	6 6		3 3		1 1		-2	
26183	TPI-P3	13.8	6 6		3 3		1 1		-2	
26184	TPI-P4	11.0	6 6		3 3		1 1		-2	
39031	KNL-11-13	230.0	3 3		1 1		1 1		1	
39032	KNL-10&14	230.0	3 3		1 1		1 1		1	
3900	SKL_COL	33.0	3 3		1 1		1 1		1	
3901	SKL_GEN	33.0	3 3		1 1		1 1		1	

รูปที่ 3.11 บัสที่ทำการสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม PSS/E

3. ติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับบัสที่สร้างขึ้น ให้ได้กำลังผลิตที่สูงที่สุด โดยระบบยังคงมีเสถียรภาพอยู่ โดยใช้โปรแกรม PSS/E ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ติดตั้งชุดกั้นลมเข้ากับบัสที่สร้างขึ้น โดยใส่เลขที่บัสที่จะทำการติดตั้ง และจำนวนของกั้นลม ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การกำหนดจำนวนกั้นลม

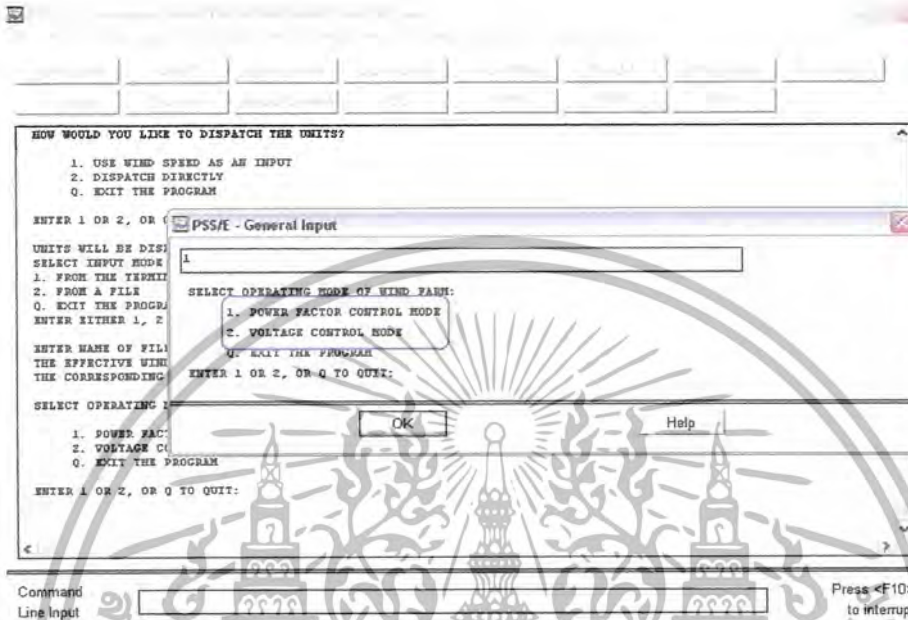
3.2 กำหนดค่าความเร็วลม โดยกำหนดให้มีค่าที่ 15 m/s ซึ่งเป็นค่าที่กั้นลมสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การกำหนดค่าความเร็วลม

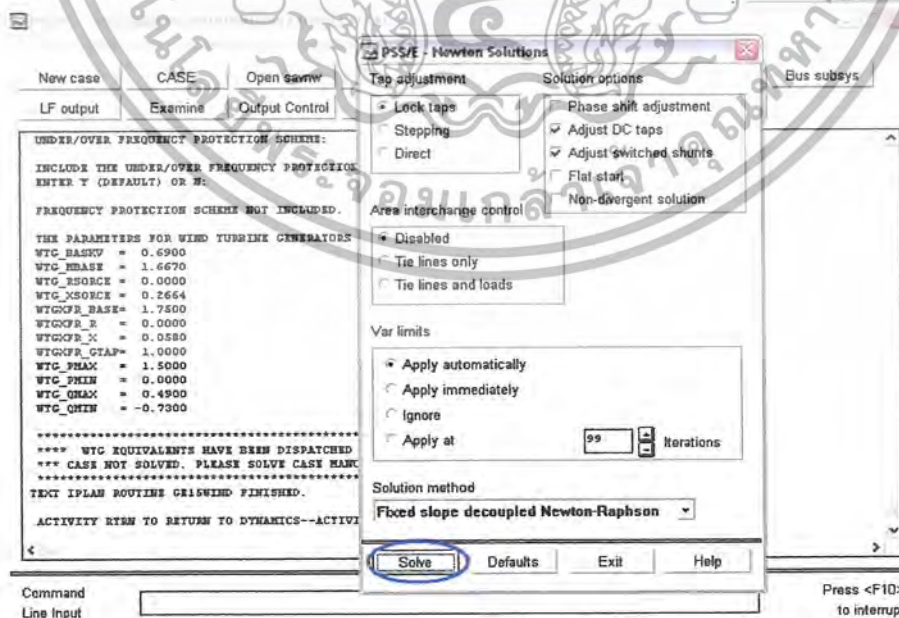
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สำหรับชุดกังหันลม G สามารถที่จะเลือกประเภทการควบคุมได้ว่าจะใช้การควบคุมแรงดัน (Voltage Control) หรือการควบคุมตัวประกอบกำลัง (Power Factor Control) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเลือกชนิดการควบคุมชุดกังหันลม

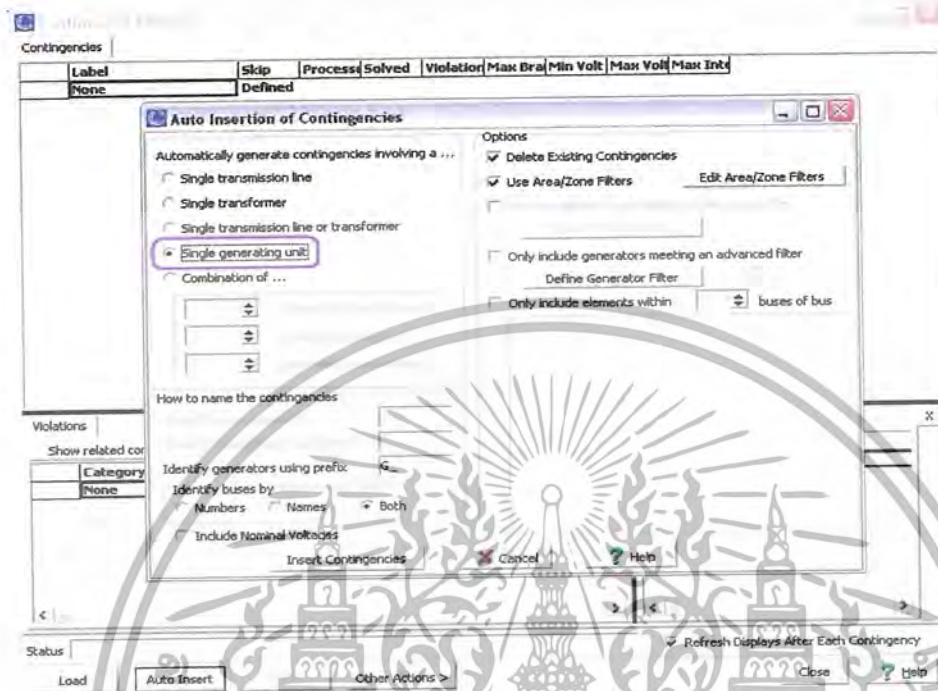
3.4 ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้ฟังก์ชันการคำนวณด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Steady - State) ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การคำนวณด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 (Single Contingency) โดยปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ 1 ตัว โดยใช้โปรแกรม PowerWorld Simulation ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วิเคราะห์ Contingency โดยการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออก 1 ตัว

5. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ โดยพิจารณาที่จำนวนสายส่งที่มีกระแสไหลเกินพิกัด (Line Overload), จำนวนบัสที่เกิดแรงดันเกิน (Over-voltage) และจำนวนบัสที่เกิดแรงดันตก (Under-voltage) เมื่อทำการติดตั้งชุดกั้นหน้ลมเข้าไปในแต่ละบัส ทั้งสภาวะปกติและสภาวะที่ทำการวิเคราะห์ Contingency

### 3.5.2 การทดลอง ตอนที่ 2

1. เลือกตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งชุดกังหันลม โดยเลือกบัสที่มีความแข็งแรงทางโครงสร้างไฟฟ้ากำลังมากที่สุดและน้อยที่สุด ซึ่งก็คือ บัส KA (3711) ที่สามารถติดตั้งกังหันลมได้มากที่สุด และบัส STU (3722) ที่สามารถติดตั้งกังหันลมได้น้อยที่สุด ตามลำดับ

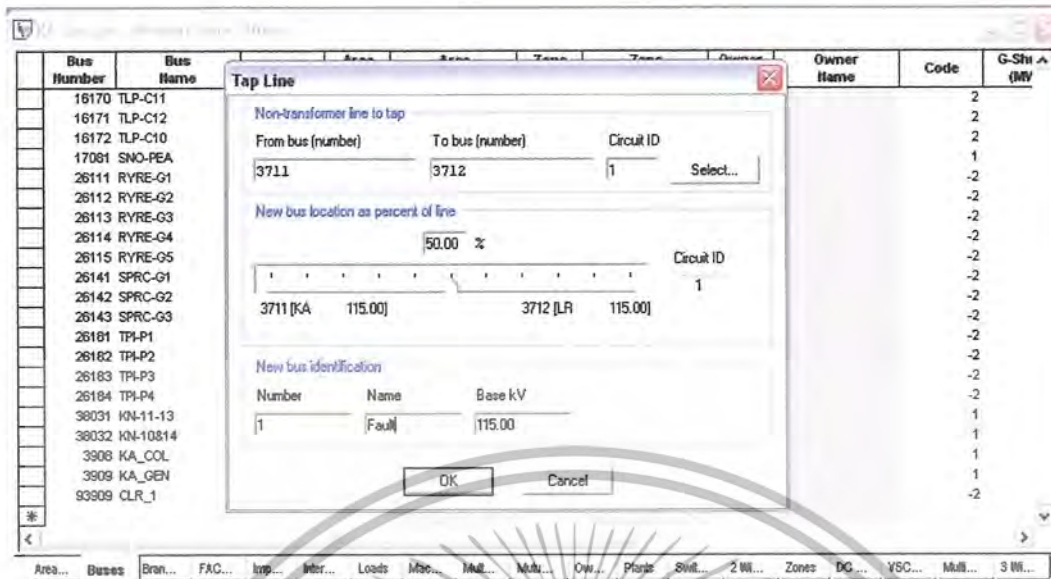
2. ติดตั้งกังหันลม G ขนาด 1.5 MW เข้ากับบัสที่เลือกไว้ โดยที่บัส KA (3711) จะติดตั้งที่กำลังผลิต 10.5 MW กับ 90 MW และบัส STU (3722) จะติดตั้งที่กำลังผลิต 10.5 MW กับ 45 MW ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยทำการควบคุม Power Factor และ Voltage

ตารางที่ 3.1 จำนวนกังหันลมเทคโนโลยี G และ V ที่ทำการติดตั้งเข้ากับระบบ ที่บัส KA (3711) และ STU (3722)

เทคโนโลยีของชุดกังหันลม	จำนวนกังหันลมที่ทำการติดตั้ง (กำลังผลิต)			
	KA (3711)		STU (3722)	
G	7 ตัว (10.5 MW)	60 ตัว (90 MW)	7 ตัว (10.5 MW)	30 ตัว (45 MW)
V	15 ตัว (9.9 MW)	135 ตัว (89.1MW)	15 ตัว (9.9 MW)	70 ตัว (46.2 MW)

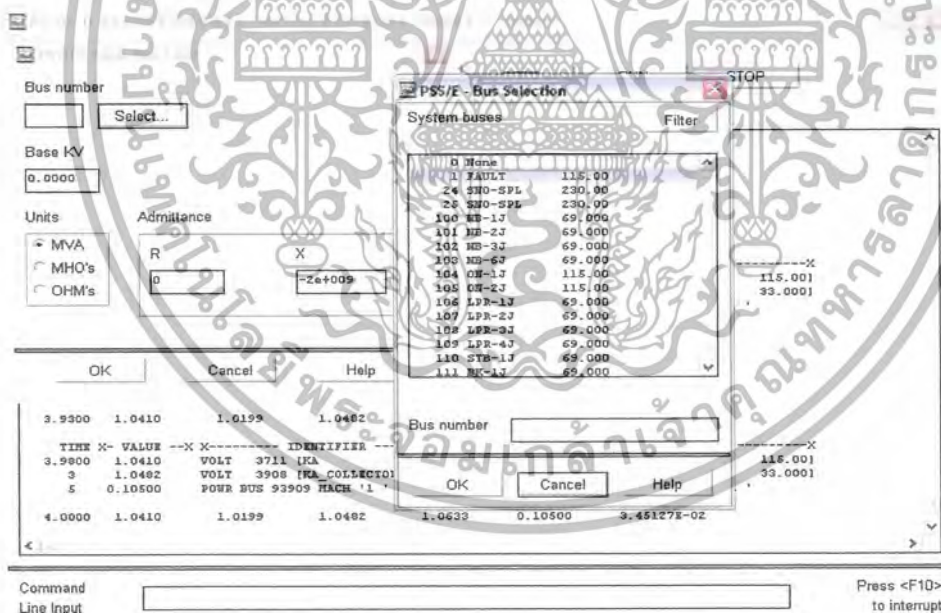
3. กำหนดให้เกิดความผิดปกติ แบบลัดวงจร 3-เฟสลงกราวด์ (3 – Phase to Ground Fault) ที่สายส่งระหว่างบัส KA (3711) กับ บัส LR (3712) เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่บัส KA (3711) และที่สายส่งระหว่างบัส STU (3722) กับ บัส HY1 (3719) เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่บัส STU (3722) โดยใช้โปรแกรม PSS/E ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 สร้างบัส Fault (1) ขึ้นระหว่างบัสที่จะทำการลัดวงจรที่ระยะ 50% ของสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การสร้างบัส Fault ขึ้นระหว่างบัสที่จะทำการลัดวงจรที่สายส่ง

3.2 ทำการลัดวงจรที่บัส Fault (1) ซึ่งมีค่าเท่ากับการลัดวงจรที่ความยาว 50% ของสายส่งระหว่างบัส ดังรูปที่ 3.18

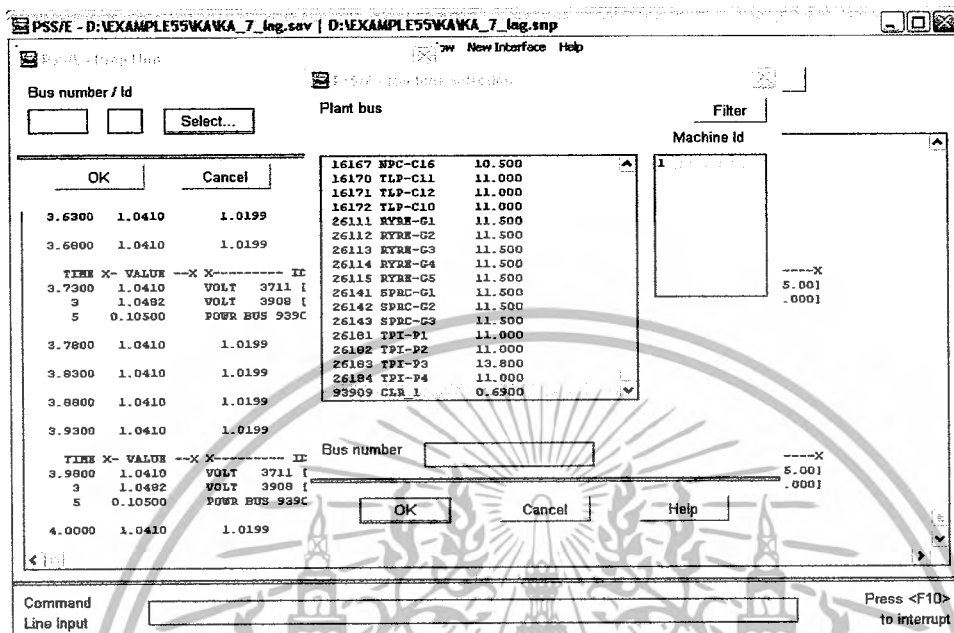


รูปที่ 3.18 การกำหนดให้ความผิดปกติแบบลัดวงจรที่บัส

4. กำหนดให้เกิดความผิดปกติ แบบลัดวงจร 3-เฟสลงกราวด์ (3 – Phase to Ground Fault) ที่บัสของชุดกังหันลม หรือที่บัส KA\_GEN (3909) เมื่อทำการติดตั้งกังหันลมที่บัส KA (3711) และที่บัส STU\_GEN (3913) เมื่อทำการติดตั้งกังหันลมที่บัส STU (3722)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กำหนดให้เกิดความผิดปกติ โดยการหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดกังหันลม ดังแสดง  
ในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การกำหนดให้เกิดความผิดปกติ โดยการหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ก่อน-หลังและขณะเกิดความผิดปกติต่างๆ เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่การควบคุมต่างกันและกำลังผลิตต่างกัน โดยพิจารณาจากขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เกินชั่วขณะ (Voltage Swell)

7. เปลี่ยนชุดกังหันลม G เป็นชุดกังหันลม V ขนาด 0.66 MW โดยที่บัส KA (3711) จะติดตั้งที่กำลังผลิต 9.9 MW กับ 89.1 MW และบัส STU (3722) จะติดตั้งที่กำลังผลิต 9.9 MW กับ 46.2 MW ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แล้วกำหนดความผิดปกติเช่นเดียวกัน

8. วิเคราะห์และเปรียบเทียบเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ระหว่างชุดกังหันลม G และชุดกังหันลม V

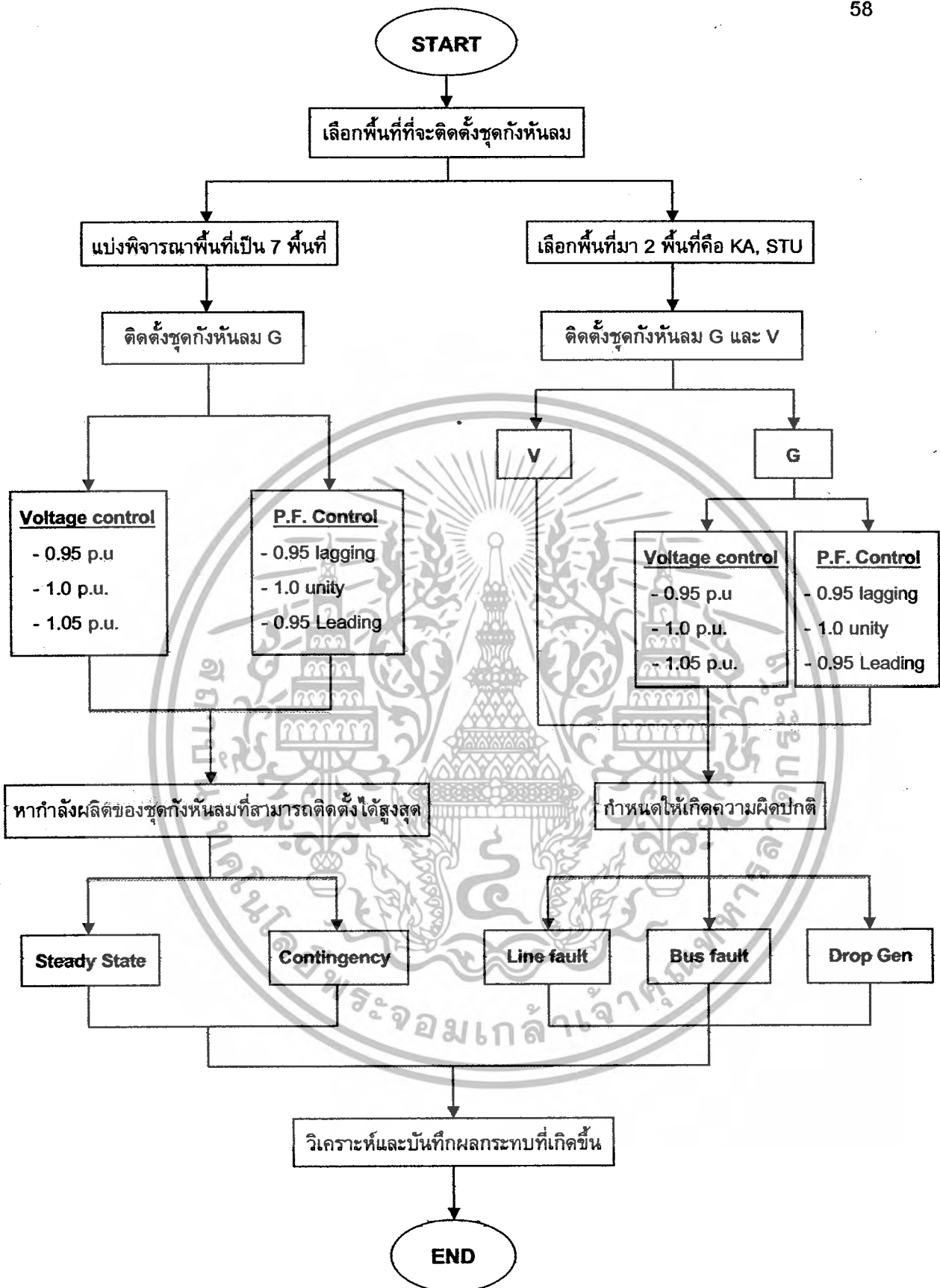
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงถึงผลการทดลอง ซึ่งจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ตอน ตามวิธีการทดลอง เพื่อให้ง่ายและสะดวกในการศึกษา กล่าวคือ ในตอนที่ 1 จะเป็นการหาพิกัดสูงสุดของชุดกังหันลมที่สามารถติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังได้ โดยที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพอยู่ และศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบ ในสภาวะอยู่ตัว โดยใช้โปรแกรม PSS/E รวมถึงการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 โดยใช้โปรแกรม PowerWorld Simulation ส่วนในตอนที่ 2 จะเป็นการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้สภาวะไดนามิก เมื่อเกิดความผิดปกติภายในระบบ โดยใช้โปรแกรม PSS/E ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนผังขั้นตอนการทดลองทั้งในตอนที่ 1 และ ตอนที่ 2 ได้ดังรูปที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 Flow Chart แสดงขั้นตอนในการทำการทดลองทั้งใน ตอนที่ 1 และ ตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ที่สภาวะอยู่ตัว (Steady-state)

สำหรับการวิเคราะห์ที่สภาวะอยู่ตัว ในการหาพิกัดสูงสุดของชุดกังหันลม เมื่อทำการติดตั้งในแต่ละพื้นที่ที่ได้ทำการกำหนดไว้ โดยแบ่งตามลักษณะของการควบคุม จะสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนและพิกัดของกังหันลมที่สามารถติดตั้งเข้ากับระบบได้สูงสุด

ชื่อบัส (เลขที่บัส)	จำนวนกังหันลมที่สามารถติดตั้งเข้ากับระบบได้ (กำลังผลิต)					
	ควบคุม Power Factor			ควบคุม Voltage		
	0.95 lagging	1.0 unity	0.95 leading	0.95 p.u.	1.0 p.u.	1.05 p.u.
SKL (3721)	120(180 MW)	80(120MW)	55(82.5MW)	120(180 MW)	120(180MW)	120(180MW)
RA (3736)	105(157.5MW)	70(105MW)	45(67.5MW)	105(157.5MW)	105(157.5MW)	105(157.5MW)
NT (3714)	130(195MW)	90(135MW)	60(90MW)	130(195MW)	130(195MW)	130(195MW)
SRT (3703)	130(195MW)	85(127.5MW)	60(90MW)	130(195MW)	130(195MW)	130(195MW)
KA (3711)	135(202.5MW)	90(135MW)	60(90MW)	135(202.5MW)	135(202.5MW)	135(202.5MW)
LR (3712)	120(180MW)	80(120MW)	55(82.5MW)	120(180MW)	120(180MW)	120(180MW)
STU (3722)	95(142.5MW)	55(82.5MW)	35(52.5MW)	90(135MW)	95(142.5 MW)	95(142.5 MW)
7-BUS	90(135MW)	55(82.5MW)	30(45MW)	75(112.5 MW)	80(120 MW)	85(127.5 MW)

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าที่บัส KA สามารถติดตั้งกังหันลม G ขนาด 1.5 MW ได้มากที่สุดที่ 135 ตัว หรือที่กำลังผลิต 202.5 MW เมื่อทำการควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆหรือควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging ส่วนที่บัส STU สามารถติดตั้งกังหันลม G ขนาด 1.5 MW ได้น้อยที่สุดที่ 35 ตัว หรือที่กำลังผลิต 52.5 MW เมื่อทำการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 leading และเมื่อติดตั้งชุดกังหันลมพร้อมกันทั้ง 7 บัส การควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging จะทำให้สามารถติดตั้งชุดกังหันลมในแต่ละที่ได้ที่พิกัดสูงกว่าการควบคุมแบบอื่นๆ

หลังจากที่ทราบพิกัดสูงสุดของชุดกังหันลมที่สามารถติดตั้งได้ในแต่ละพื้นที่ จะสามารถหาจำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อติดตั้งกังหันลมที่พิกัดสูงสุดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อทำการควบคุม Voltage และ ตารางที่ 4.4 เมื่อทำการควบคุม Power Factor ซึ่งจะแสดงถึงจำนวนสายส่งที่มีกระแสไหลเกินพิกัด (Line Overload), จำนวนบัสที่เกิดแรงดันเกิน (Over-voltage) และจำนวนบัสที่เกิดแรงดันตก (Under-voltage) โดยสามารถเปรียบเทียบได้กับกรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบ (Base Case) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อยังไม่ได้ติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบ

	Line Overload	Over-voltage	Under-voltage
Base case	2(N)	-	-

ตารางที่ 4.3 จำนวนผลกระทบเมื่อติดตั้งชุดกังหันลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Voltage

ชื่อบัส	จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้น								
	ควบคุมแรงดันที่ 0.95 p.u.			ควบคุมแรงดันที่ 1.0 p.u.			ควบคุมแรงดันที่ 1.05 p.u.		
	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage
SKL	2(N)	-	15(0.915)	2(N)	-	14(0.915)	2(N)	-	15(0.916)
RA	2(N)	-	19(0.891)	2(N)	-	16(0.916)	2(N)	-	16(0.916)
NT	2(N)	-	16(0.911)	2(N)	-	15(0.915)	2(N)	-	15(0.915)
SRT	2(N)	-	22(0.907)	2(N)	-	21(0.915)	2(N)	-	21(0.915)
KA	2(N)	-	15(0.915)	2(N)	-	15(0.915)	2(N)	-	15(0.915)
LR	2(N)	-	15(0.916)	2(N)	-	15(0.916)	2(N)	-	15(0.916)
STU	2(N)	-	17(0.915)	2(N)	-	14(0.916)	2(N)	-	15(0.916)
7 BUS	5(N)	3(1.05)	84(0.85)	5(N)	-	64(0.864)	5(N)	12(1.064)	57(0.875)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 จำนวนผลกระทบเมื่อติดตั้งชุดกักกันลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Power Factor

ชื่อบัส	จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ								
	ควบคุม PF ที่ 0.95 lagging			ควบคุม PF ที่ 1.0 unity			ควบคุม PF ที่ 0.95 leading		
	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage
SKL	2(N)	1(01.061)	15(0.916)	2(N)	-	24(0.880)	3(C)	-	25(0.72)
RA	2(N)	-	16(0.916)	3(N)	-	20(0.54)	3(N)	-	20(0.78)
NT	2(N)	-	15(0.915)	3(N)	-	18(0.81)	3(C)	-	17(0.748)
SRT	2(N)	-	21(0.915)	2(N)	2(1.056)	14(0.916)	3(C)	-	24(0.724)
KA	2(N)	-	15(0.915)	2(N)	-	19(0.81)	3(N)	-	19(0.786)
LR	2(N)	-	15(0.916)	3(N)	-	19(0.854)	3(C)	-	19(0.715)
STU	2(N)	1(1.086)	14(0.916)	2(N)	-	17(0.911)	3(N)	-	20(0.754)
7 BUS	5(C)	13(1.119)	60(0.880)	3(N)	3(1.05)	31(0.796)	3(N)	-	29(0.791)

จากตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 ตัวอักษรในวงเล็บข้างหลังจำนวน Line Overload หมายถึงขนาดของกระแสที่เกินพิกัด โดยให้ N = ขนาดของกระแสเกินพิกัดน้อยกว่า 120%, C = ขนาดของกระแสเกินพิกัดมากกว่า 120% แต่ไม่เกิน 130% และ E = ขนาดของกระแสเกินพิกัดมากกว่า 130% ขึ้นไป ส่วนตัวเลขในวงเล็บข้างหลังจำนวนบัสที่เกิดแรงดันเกิน (Over-voltage) และจำนวนบัสที่เกิดแรงดันตก (Under-voltage) หมายถึง ขนาดแรงดันที่บัสที่มากที่สุดและน้อยสุด ตามลำดับ

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ Contingency

สำหรับการวิเคราะห์ Contingency ในการทดลองนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบ N-1 โดยการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ 1 ตัว เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ ถ้าหากเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นจริงเมื่อติดตั้งกักกันลมที่พิกัดสูงสุด โดยพิจารณาจากจำนวนสายส่งที่มีกระแสไหลเกินพิกัด (Line Overload), จำนวนบัสที่เกิดแรงดันเกิน (Over-voltage) และจำนวนบัสที่เกิดแรงดันตก (Under-voltage) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อทำการควบคุม Voltage และตารางที่ 4.7 เมื่อทำการ Power Factor ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับกรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งกักกันลมเข้ากับระบบ (Base Case) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทำการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 ขณะยัง  
ไม่ได้ติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบ

	Line Overload	Over-voltage	Under-voltage
Base case	80(E)	-	35(0.831)

ตารางที่ 4.6 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นขณะทำการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 เมื่อติดตั้ง  
ชุดกังหันลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Voltage

ชื่อบัส	จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ								
	ควบคุมแรงดันที่ 0.95 p.u.			ควบคุมแรงดันที่ 1.0 p.u.			ควบคุมแรงดันที่ 1.05 p.u.		
	Line Overload	Over- Voltage	Under- Voltage	Line Overload	Over- Voltage	Under- Voltage	Line Overload	Over- Voltage	Under- Voltage
SKL	22(E)	9(1.119)	35(0.832)	22(E)	-	35(0.832)	22(E)	-	35(0.832)
RA	24(E)	-	36(0.831)	23(E)	-	35(0.831)	23(E)	-	35(0.831)
NT	21(E)	2(1.103)	37(0.832)	32(E)	-	35(0.831)	21(E)	-	37(0.832)
SRT	21(E)	4(1.114)	37(0.832)	21(E)	-	37(0.832)	21(E)	-	37(0.832)
KA	20(E)	-	37(0.832)	20(E)	-	37(0.832)	22(E)	-	37(0.832)
LR	20(E)	-	35(0.832)	21(E)	-	36(0.832)	20(E)	-	36(0.832)
STU	35(E)	-	33(0.831)	32(E)	-	33(0.831)	31(E)	-	33(0.831)
7 BUS	5(E)	6(1.104)	65(0.856)	5(E)	-	36(0.857)	5(E)	-	49(0.859)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นขณะทำการวิเคราะห์ Contingency แบบ N-1 เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมที่พิกัดสูงสุด โดยการควบคุม Power Factor

ชื่อบัส	จำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ								
	ควบคุม PF ที่ 0.95 lagging			ควบคุม PF ที่ 1.0 unity			ควบคุม PF ที่ 0.95 leading		
	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage	Line Overload	Over-Voltage	Under-Voltage
SKL	22(E)	-	40(0.832)	41(E)	-	33(0.831)	49(E)	-	595(0.789)
RA	23(E)	-	35(0.831)	40(E)	-	590(0.831)	51(E)	-	596(0.759)
NT	21(E)	-	37(0.832)	32(E)	-	35(0.832)	42(E)	-	594(0.773)
SRT	21(E)	-	37(0.832)	35(E)	-	33(0.831)	42(E)	-	593(0.806)
KA	22(E)	-	37(0.832)	34(E)	-	33(0.831)	45(E)	-	592(0.831)
LR	22(E)	-	35(0.832)	40(E)	-	591(0.831)	48(E)	-	552(0.766)
STU	31(E)	-	33(0.831)	49(E)	-	39(0.831)	55(E)	-	878(0.709)
7 BUS	285(E)	287(1.305)	5(0.862)	17(E)	-	54(0.852)	9(E)	-	607(0.833)

จากตารางที่ 4.3 ถึง 4.4 และ 4.6 ถึง 4.7 จะแสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะ Steady-state และ สภาวะที่ทำการทดสอบ Contingency เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมเข้ากับระบบไฟฟ้าในแต่ละบัส โดยการควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆจะมีจำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันและเท่าๆกับการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging ซึ่งมีจำนวนผลกระทบน้อยกว่าค่า Power Factor ที่ 1.0 unity และ 0.95 leading แต่เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมเข้ากับทุกบัสพร้อมกัน ที่สภาวะ Steady-state การควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging รวมทั้งการควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ กลับมีจำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุม Power Factor ที่ 1.0 unity และ 0.95 Leading ส่วนในการวิเคราะห์ Contingency การควบคุม Voltage จะช่วยลดจำนวน Line Overload ได้มากกว่าการควบคุม Power Factor อีกทั้งยังมีจำนวนผลกระทบโดยรวมที่น้อยกว่าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

### 4.2.1 การวิเคราะห์ที่สภาวะไดนามิก

สำหรับการวิเคราะห์ที่สภาวะไดนามิก จะศึกษาถึงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ซึ่งพิจารณาจากขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ที่มีรอบๆบริเวณที่เกิดความผิดปกติ โดยตารางที่ 4.9 และ 4.10 แสดงถึงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังการเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ลงกราวด์ที่สายส่ง (Line fault) ตารางที่ 4.11 และ 4.12 แสดงถึงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เกินชั่วขณะ (Voltage Swell) หลังการเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่บัสของชุดกังหันลม (Bus fault) ซึ่งผลของแรงดันที่เปลี่ยนไปสามารถเปรียบเทียบได้กับขณะที่ไม่ได้เชื่อมต่อชุดกังหันลมเข้ากับระบบในตารางที่ 4.8 นอกจากนี้ตารางที่ 4.13 และ 4.14 จะแสดงถึงผลของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป หลังการหยุดทำงานของชุดกังหันลม (Bus fault) ด้วย

ตารางที่ 4.8 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปขณะเกิดความผิดปกติต่างๆ เมื่อยังไม่ได้ทำการติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า

Location	Steady-state	Line fault	Bus fault	
	V.Sag	V.Sag	V.Sag	V.Swell
KA (3711)	1.0398	0.6055	0.85618	-
LR (3712)	1.0199	0.4888	0.9182	-
KA_COL (3908)	1.0451	0.6086	0.6141	-
KA_GEN (3909)	1.0517	0.6124	0	-
STU (3722)	1.0118	0	0.5218	-
HY1 (3719)	1.0569	0.5476	0.9025	-
STU_COL (3912)	1.0169	0	0.3743	-
STU_GEN (3913)	1.0233	0	0	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลง  
กราวด์ที่สายส่งระหว่างบัส KA กับบัส LR

Location	Control			Steady state		Line fault	
				10.5 MW	90 MW	10.5 MW	90 MW
KA (3711)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0411	1.0395	0.6085	0.6030
			1.0 unity	1.0400	1.0329	0.6096	0.6112
			0.95 leading	1.0389	1.0293	0.6107	0.6236
		Voltage	0.95 p.u.	1.0384	1.0280	0.6113	0.6158
			1.0 p.u.	1.0384	1.0325	0.6113	0.6116
			1.05 p.u.	1.0397	1.0370	0.6100	0.6074
	V		1.0396	1.0389	0.6055	0.6195	
LR (3712)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0200	1.0171	0.4893	0.4886
			1.0 unity	1.0197	1.0160	0.4899	0.4932
			0.95 leading	1.0194	1.0171	0.4905	0.4994
		Voltage	0.95 p.u.	1.0193	1.0147	0.4908	0.4957
			1.0 p.u.	1.0193	1.0159	0.4908	0.4934
			1.05 p.u.	1.0196	1.0171	0.4901	0.4910
	V		1.0196	1.0177	0.4888	0.4927	
KA_COL (3908)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0489	1.0414	0.6174	0.5965
			1.0 unity	1.0445	1.0098	0.6185	0.6025
			0.95 leading	1.0400	0.9798	0.6196	0.6141
		Voltage	0.95 p.u.	1.0377	0.9896	0.6202	0.6064
			1.0 p.u.	1.0377	1.0082	0.6202	0.6028
			1.05 p.u.	1.0430	1.0268	0.6189	0.5994
	V		1.0430	0.9957	0.6078	0.6106	
KA_GEN (3909)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0647	1.0900	0.6403	0.7081
			1.0 unity	1.0522	1.0020	0.6414	0.7093
			0.95 leading	1.0391	0.9126	0.6425	0.7171
		Voltage	0.95 p.u.	1.0324	0.9476	0.6430	0.7110
			1.0 p.u.	1.0324	0.9978	0.6430	0.7094
			1.05 p.u.	1.0477	1.0480	0.6417	0.7080
	V		1.0475	0.9392	0.6111	0.6076	

ตารางที่ 4.10 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส

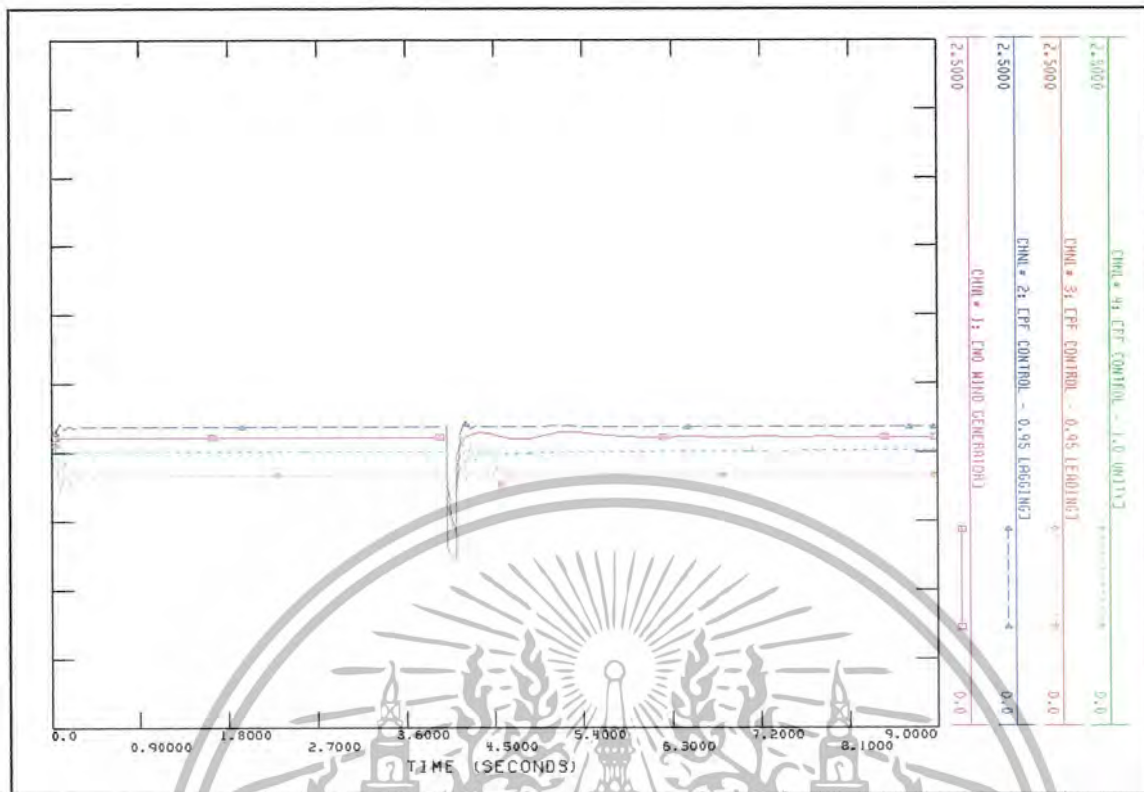
ลงกราวด์ที่สายส่งระหว่างบัส STU กับบัส HY1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Location	Control			Steady state		Line fault	
				10.5 MW	45 MW	10.5 MW	45 MW
STU (3722)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0386	1.0762	0.0146	0.0692
			1.0 unity	1.0266	1.0470	0.0150	0.0667
			0.95 leading	1.0135	0.9758	0.0165	0.0633
		Voltage	0.95 p.u.	1.0068	1.0122	0.0140	0.0647
			1.0 p.u.	1.0207	1.0375	0.0227	0.0661
			1.05 p.u.	1.0385	1.0609	0.0146	0.0677
	V			1.0243	1.0188	0	0.0007
HY1 (3719)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0655	1.0819	0.5453	0.5428
			1.0 unity	1.0622	1.0701	0.5460	0.5426
			0.95 leading	1.0586	1.0499	0.5467	0.5466
		Voltage	0.95 p.u.	1.0567	1.0603	0.5470	0.5445
			1.0 p.u.	1.0605	1.0674	0.5463	0.5431
			1.05 p.u.	1.0655	1.0732	0.5453	0.5409
	V			1.0638	1.0646	0.5482	0.5465
STU_COL (3912)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0464	1.0791	0.0287	0.1336
			1.0 unity	1.0310	1.045	0.0294	0.1294
			0.95 leading	1.0143	0.9547	0.0326	0.1239
		Voltage	0.95 p.u.	1.0057	1.0005	0.0276	0.1260
			1.0 p.u.	1.0235	1.033	0.0456	0.1283
			1.05 p.u.	1.0463	1.063	0.0287	0.1312
	V			1.0275	1.0082	0	0.0014
STU_GEN (3913)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0622	1.0967	1.0622	0.3040
			1.0 unity	1.0386	1.052	1.0386	0.2956
			0.95 leading	1.0129	0.9186	1.0129	0.2846
		Voltage	0.95 p.u.	0.9997	0.9855	0.9997	0.2886
			1.0 p.u.	1.0270	1.0339	1.0270	0.2934
			1.05 p.u.	1.0620	1.0794	1.0620	0.2995
	V			1.0316	0.9957	0	1.1604

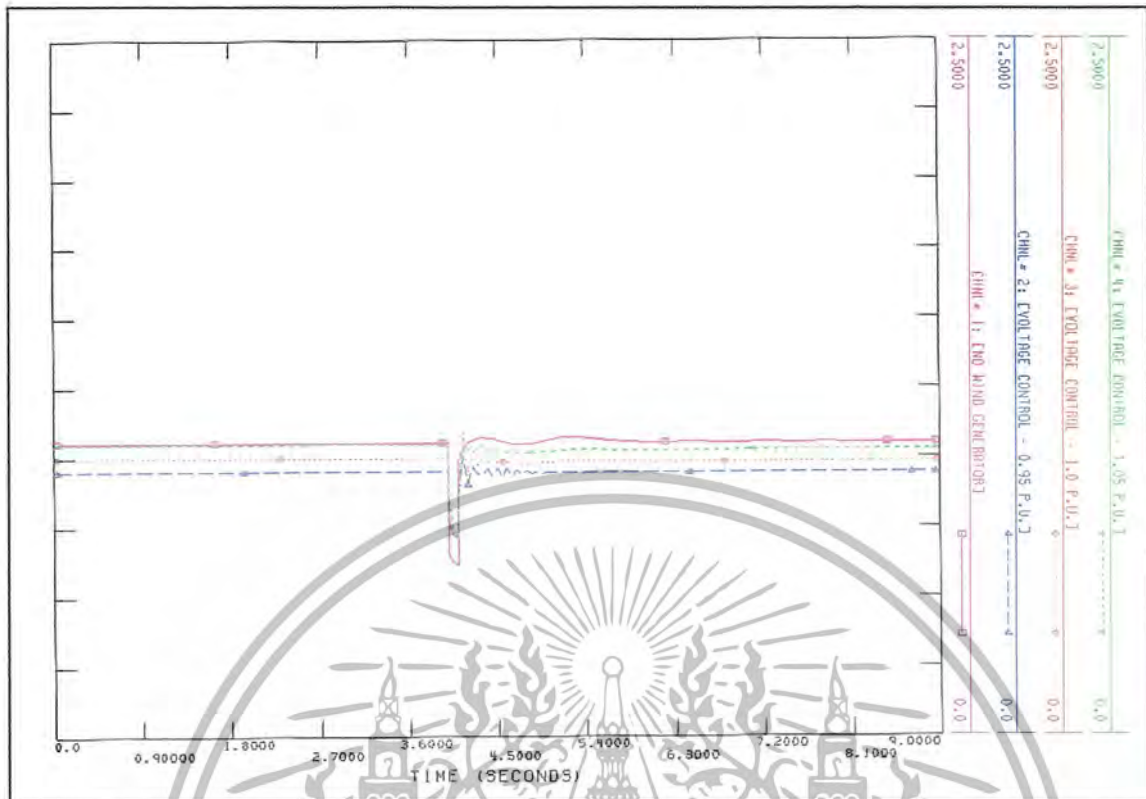
จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบเพื่อให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงผลของแรงดันที่บัส KA\_GEN ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง โดยเปรียบเทียบการควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ และเปรียบเทียบการควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟส ลมกราวด์ที่สายส่ง KA กับ LR เมื่อติดตั้งชุดกักหน้สม G ขนาด 90 MW โดยควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ

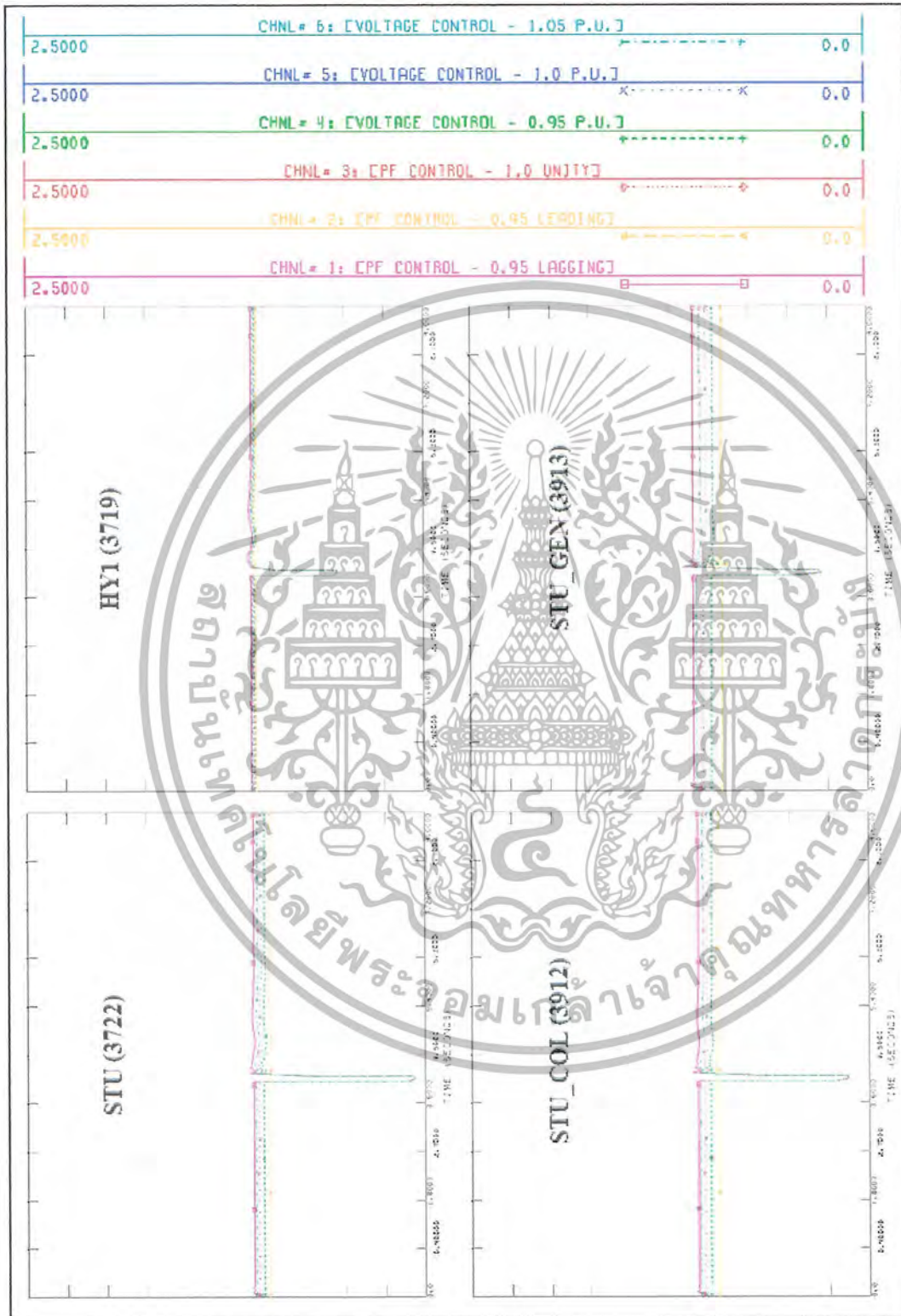
จากกราฟในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging จะมีแรงดันที่บ้สมมากที่สุด ส่วนการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 leading จะมีแรงดันที่บ้สน้อยที่สุด และจะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้งชุดกักหน้สมเข้ากับระบบ โดยควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ ขนาดแรงดันที่ตกชั่วขณะจะมีค่ามากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟส ลมกราวด์ที่สายส่ง KA กับ LR เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม G ขนาด 90 MW โดยควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการควบคุม Voltage ที่ 1.05 p.u. จะมีแรงดันที่บ้สมมากที่สุด ส่วนการควบคุม Voltage ที่ 0.95 p.u. จะมีแรงดันที่บ้สน้อยที่สุด และจะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมเข้ากับระบบ โดยควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ ขนาดแรงดันที่ตกชั่วขณะจะมีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน

สามารถเปรียบเทียบผลของแรงดันจากการควบคุม Power Factor และ Voltage เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ได้ดังรูปที่ 4.4

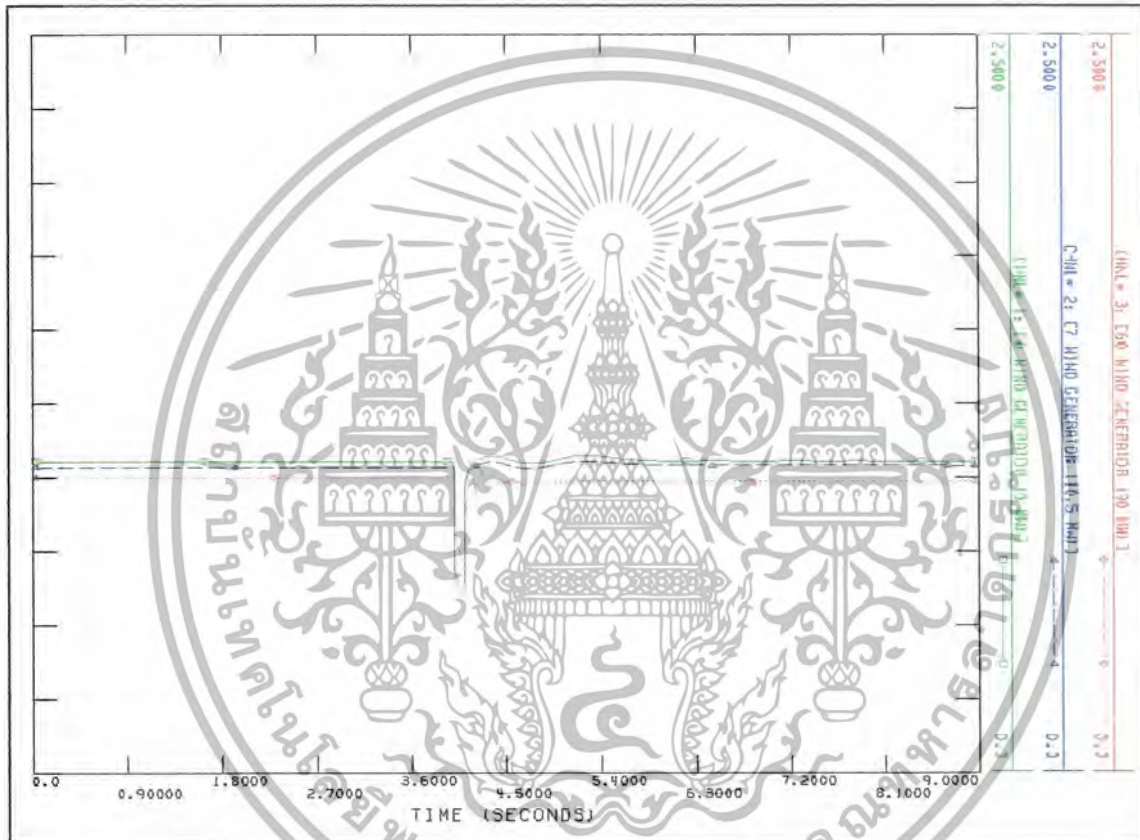


**รูปที่ 4.4** กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส STU กับบัส HY1 เมื่อติดตั้งชุดกักทันลม G กำลังผลิต 45 MW ที่การควบคุมแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 2 แบบ คือ การควบคุม Power Factor กับการควบคุม Voltage จากกราฟในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging จะมีแรงดันที่บัสมากที่สุด ส่วนการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 leading จะมีแรงดันที่บัสน้อยที่สุด ส่วนขนาดแรงดันที่ตกชั่วขณะมีค่าใกล้เคียงกันทุกการควบคุม

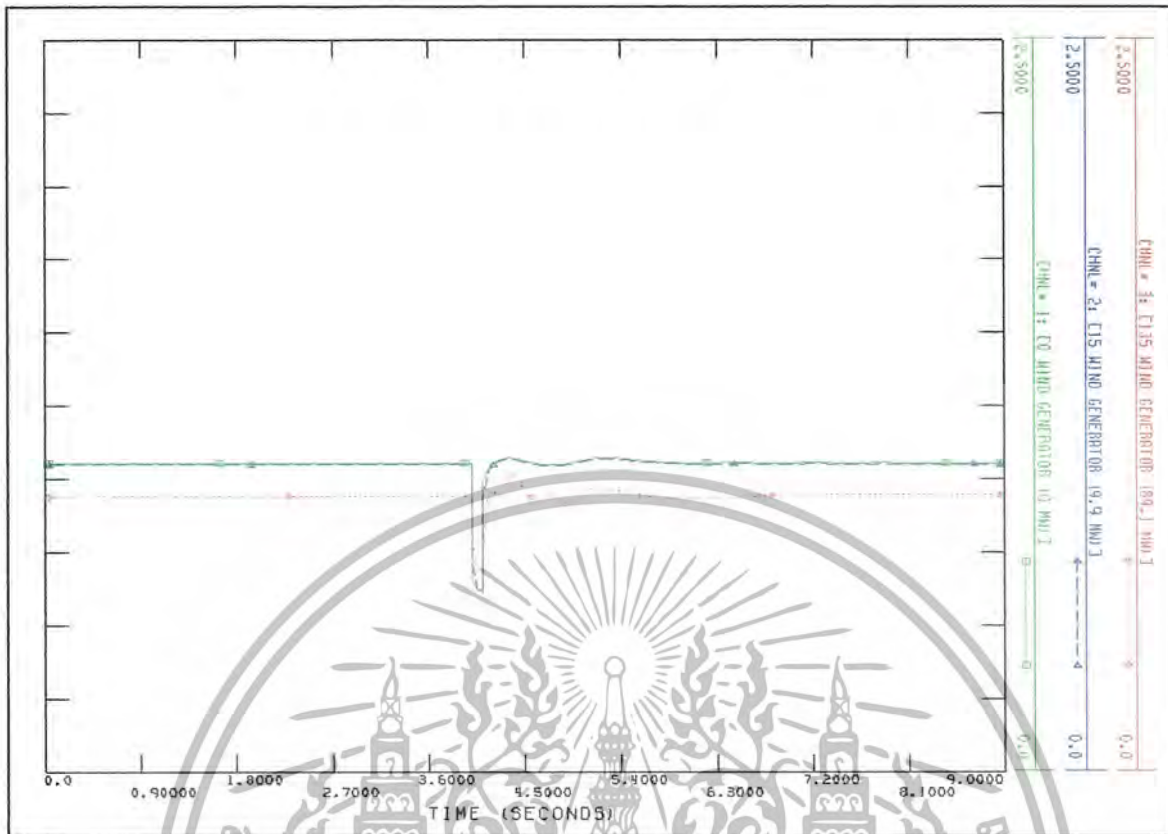
สามารถเปรียบเทียบผลของแรงดันเมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม G ที่กำลังผลิตต่างๆ และเมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม V ที่กำลังผลิตต่างๆ ขณะเกิดการล้ดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการล้ดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส KA กับบัส STU เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม G โดยควบคุม Voltage ที่ 1.0 p.u. ที่กำลังผลิตต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมที่กำลังผลิต 10.5 MW (กักหน้ลม G 7 ตัว) ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ จะมีค่าน้อยกว่า กรณีที่ติดตั้งชุดกักหน้ลมที่กำลังผลิต 90 MW (กักหน้ลม G 60 ตัว) แต่จะมีค่ามากกว่า กรณีที่ไม่ได้ทำการติดตั้งชุดกักหน้ลมเข้ากับระบบเลย

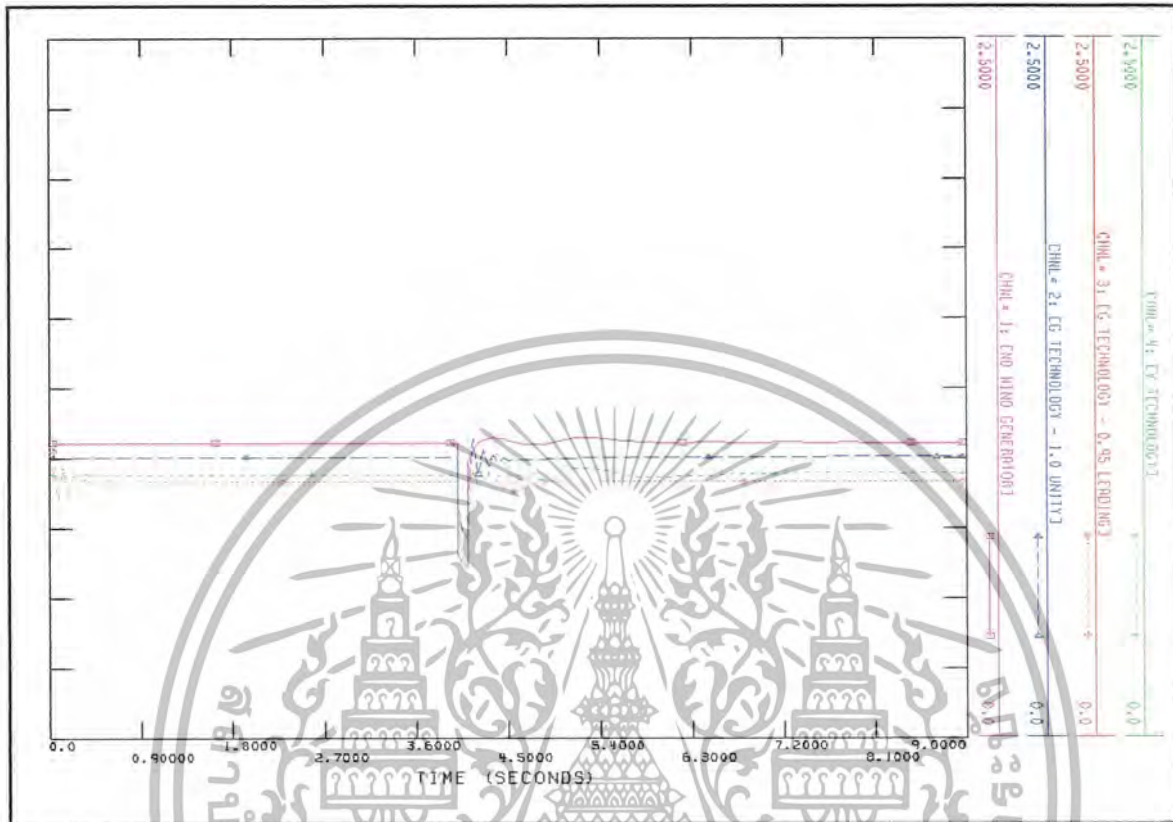
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.6** กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟส ลงกราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส KA กับบัส STU เมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลม V ที่กำลังผลิตต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 4.6 จะแสดงให้เห็นว่า ไม่ว่าจะติดตั้งชุดกักหน้ลมที่กำลังผลิต 9.9 MW (กักหน้ลม V 15 ตัว) หรือติดตั้งชุดกักหน้ลมที่กำลังผลิต 89.1 MW (กักหน้ลม V 135 ตัว) ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ จะมีค่าเท่ากับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งกักหน้ลมเข้ากับระบบเลย แต่แรงดันที่บัสเมื่อติดตั้งชุดกักหน้ลมที่กำลังผลิต 89.1 MW จะมีค่าน้อยกว่า ในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งชุดกักหน้ลมที่กำลังผลิต 9.9 MW และในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งชุดกักหน้ลมเข้ากับระบบเลย

สามารถเปรียบเทียบผลของแรงดันระหว่างการติดตั้งชุดกังหันลม G กับ V ขณะเกิด การลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ระหว่างบัส KA กับบัส STU เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมต่างชนิดกัน

จากกราฟในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า แรงดันที่บัสเมื่อติดตั้งชุดกังหันลม V จะต่ำกว่ากรณีติดตั้งชุดกังหันลม G โดยควบคุม Power Factor ที่ 1.0 unity แต่สูงกว่ากรณีติดตั้งชุดกังหันลม G โดยควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging และจะแสดงให้เห็นด้วยว่า ขนาดแรงดันตกชั่วขณะ เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G ที่กำลังผลิต 90 MW จะมีค่ามากกว่า ในกรณีที่ติดตั้งชุดกังหันลม V ที่กำลังผลิต 89.1 MW

ตารางที่ 4.11 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส KA\_GEN

Location	Control		Steady state		Bus fault				
			10.5 MW	90 MW	10.5 MW		90 MW		
					Sag	Swell	Sag	Swell	
KA (3711)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0411	1.0395	0.8540	-	0.8484	-
			1.0 unity	1.0400	1.0329	0.8552	-	0.8593	-
			0.95 leading	1.0389	1.0293	0.8566	-	0.8737	-
		Voltage	0.95 p.u.	1.0384	1.0280	0.8572	-	0.8651	-
			1.0 p.u.	1.0384	1.0325	0.8572	-	0.8597	-
			1.05 p.u.	1.0397	1.0370	0.8557	-	0.8543	-
	V			1.0396	1.0389	0.8558	-	0.8755	-
LR (3712)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0200	1.0171	0.9162	-	0.9160	-
			1.0 unity	1.0197	1.0160	0.9173	-	0.9195	-
			0.95 leading	1.0194	1.0171	0.9184	-	0.9309	-
		Voltage	0.95 p.u.	1.0193	1.0147	0.9189	-	0.9243	-
			1.0 p.u.	1.0193	1.0159	0.9189	-	0.9199	-
			1.05 p.u.	1.0196	1.0171	0.9176	-	0.9153	-
	V			1.0196	1.0177	0.9177	-	0.9271	-
KA_COL (3908)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0489	1.0414	0.6174	-	0.6085	-
			1.0 unity	1.0445	1.0098	0.6185	-	0.6163	-
			0.95 leading	1.0400	0.9798	0.6196	-	0.6267	-
		Voltage	0.95 p.u.	1.0377	0.9896	0.6149	-	0.6205	-
			1.0 p.u.	1.0377	1.0082	0.6149	-	0.6167	1.1080
			1.05 p.u.	1.0430	1.0268	0.6138	-	0.6128	1.1152
	V			1.0430	0.9957	0.6139	-	0.6280	-
KA_GEN (3909)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0647	1.0900	0	-	0	1.4966
			1.0 unity	1.0522	1.0020	0	-	0	1.4854
			0.95 leading	1.0391	0.9126	0	-	0	1.4476
		Voltage	0.95 p.u.	1.0324	0.9476	0	-	0	1.4627
			1.0 p.u.	1.0324	0.9978	0	-	0	1.4849
			1.05 p.u.	1.0477	1.0480	0	-	0	1.4888
	V			1.0475	0.9392	0	-	0	-

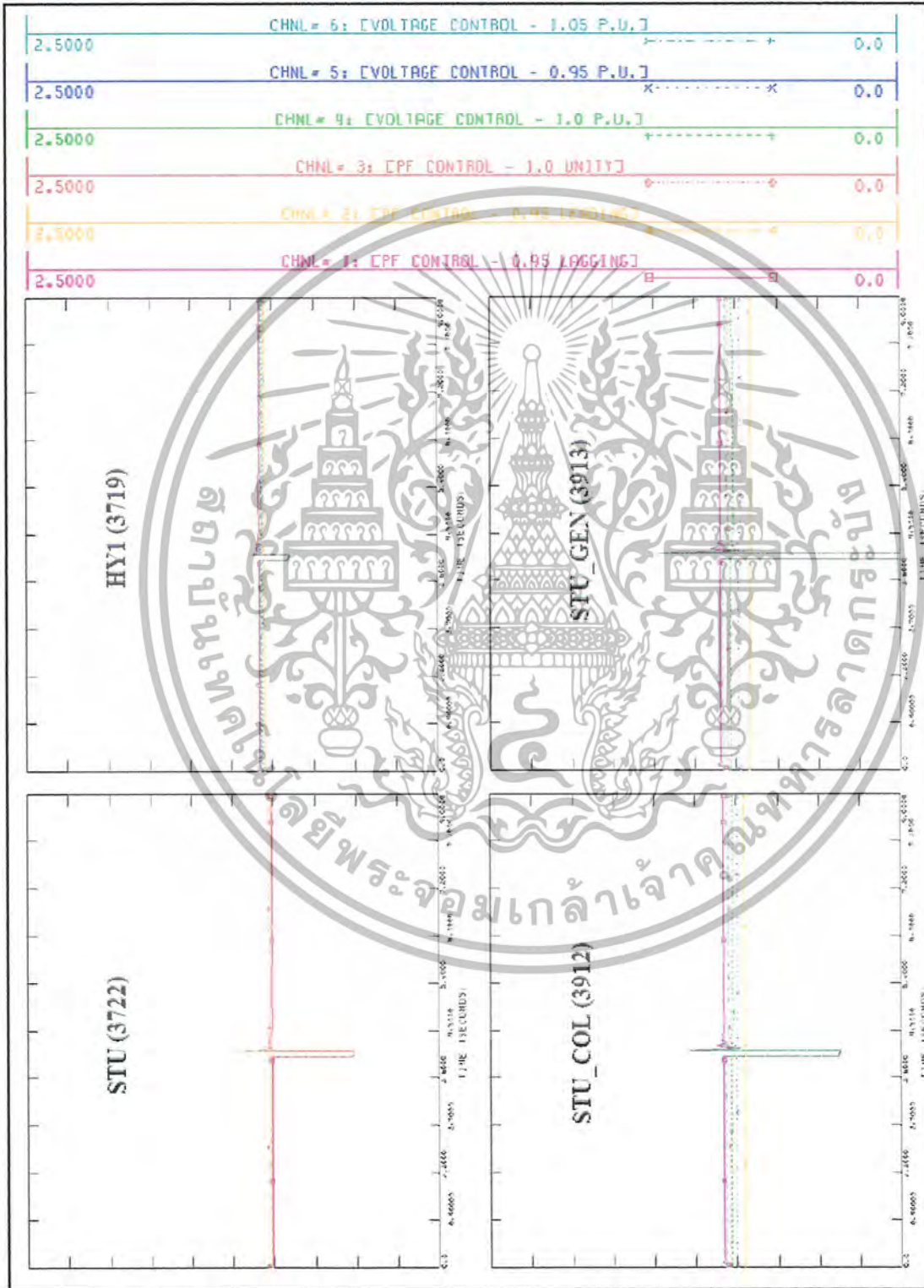
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) หลังเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส STU\_GEN

Location	Control			Steady state		Bus fault			
				10.5 MW	45 MW	10.5 MW		45 MW	
						Sag	Swell	Sag	Swell
STU (3722)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0386	1.0762	0.5223	-	0.0526	1.2412
			1.0 unity	1.0266	1.0470	0.5218	-	0.5202	1.2310
			0.95 leading	1.0135	0.9758	0.5212	-	0.0516	1.2027
	Voltage	0.95 p.u.	1.0068	1.0122	0.5208	-	0.5187	1.2190	
		1.0 p.u.	1.0207	1.0375	0.5215	-	0.5198	1.2306	
		1.05 p.u.	1.0385	1.0609	0.5223	-	0.5203	1.2314	
	V			1.0343	1.0188	0.5234	-	0.5204	-
HY1 (3719)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0655	1.0819	0.9006	-	0.9007	-
			1.0 unity	1.0622	1.0701	0.9010	-	0.8970	-
			0.95 leading	1.0586	1.0499	0.9013	-	0.8988	-
	Voltage	0.95 p.u.	1.0567	1.0603	0.9015	-	0.8980	-	
		1.0 p.u.	1.0605	1.0674	0.9011	-	0.8973	-	
		1.05 p.u.	1.0655	1.0732	0.9006	-	0.8955	-	
	V			1.0638	1.0646	0.9041	-	0.9009	-
STU_COL (3912)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0464	1.0791	0.3746	1.1529	0.3773	1.2830
			1.0 unity	1.0310	1.045	0.3743	1.1280	0.3732	1.2739
			0.95 leading	1.0143	0.9547	0.3738	-	0.3702	1.2830
	Voltage	0.95 p.u.	1.0057	1.0005	0.3736	-	0.3721	1.2602	
		1.0 p.u.	1.0235	1.0330	0.3741	-	0.3729	1.2738	
		1.05 p.u.	1.0463	1.0630	0.3746	-	0.3732	1.2602	
	V			1.0275	1.0082	0.3755	-	0.3733	-
STU_GEN (3913)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0622	1.0967	0	1.2313	0	1.4705
			1.0 unity	1.0386	1.0520	0	1.1893	0	1.4659
			0.95 leading	1.0129	0.9186	0	1.1591	0	1.4313
	Voltage	0.95 p.u.	0.9997	0.9855	0	1.1502	0	1.4521	
		1.0 p.u.	1.0270	1.0339	0	1.1754	0	1.4678	
		1.05 p.u.	1.0620	1.0794	0	1.1502	0	1.4612	
	V			1.0316	0.9957	0	-	0	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบเพื่อให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.8 แสดงผลของแรงดันที่บัสต่างๆ ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัสของชุดกังหันลม โดยเปรียบเทียบการควบคุม Power Factor และ Voltage ที่ค่าต่างๆ และ

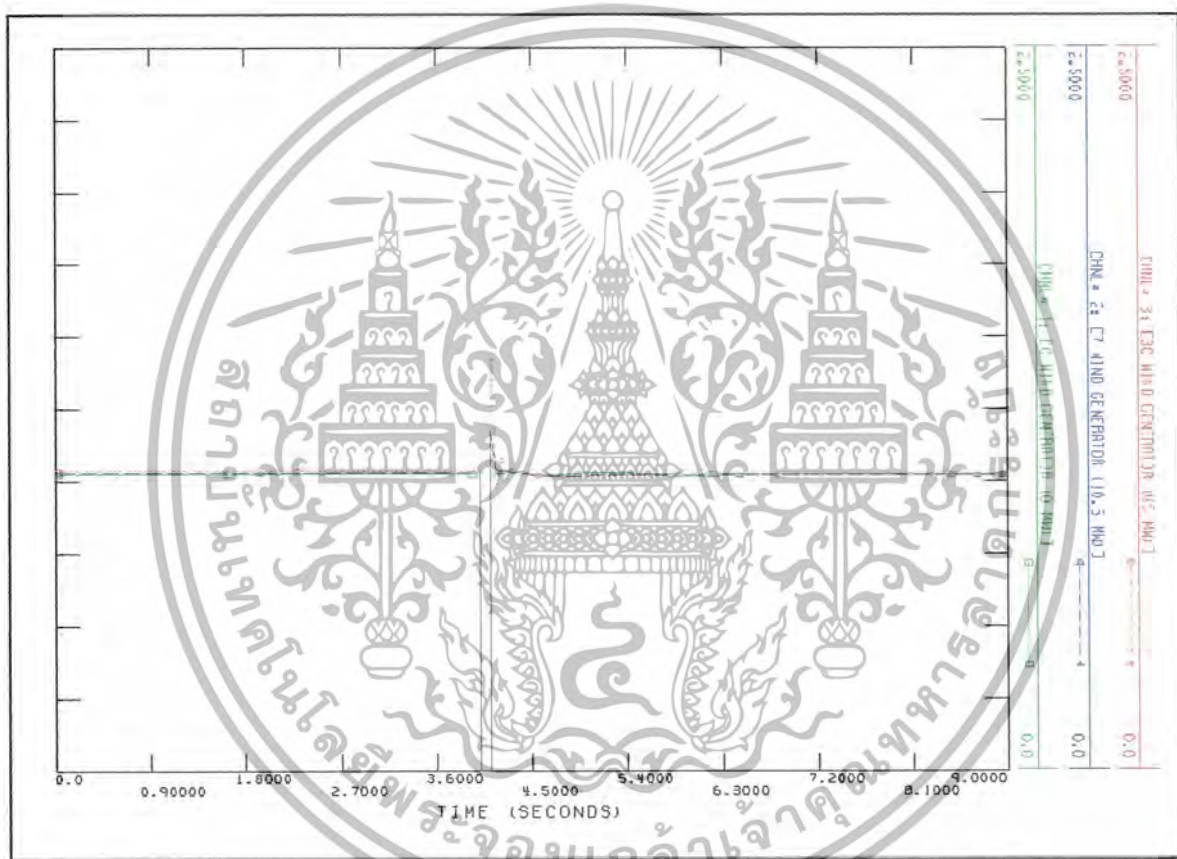


**รูปที่ 4.8** กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส KA\_GEN เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G ขนาด 90 MW ที่การควบคุมแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่บัสของชุดกังหันลม หลังการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ จะเกิดแรงดันเกินชั่วขณะด้วย โดยเฉพาะที่บัสของชุดกังหันลมจะมีขนาดของแรงดันเกินชั่วขณะมาก ขณะที่การลัดวงจรที่สายส่งไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ ซึ่งขนาดของแรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะมีค่าใกล้เคียงกันทุกการควบคุม

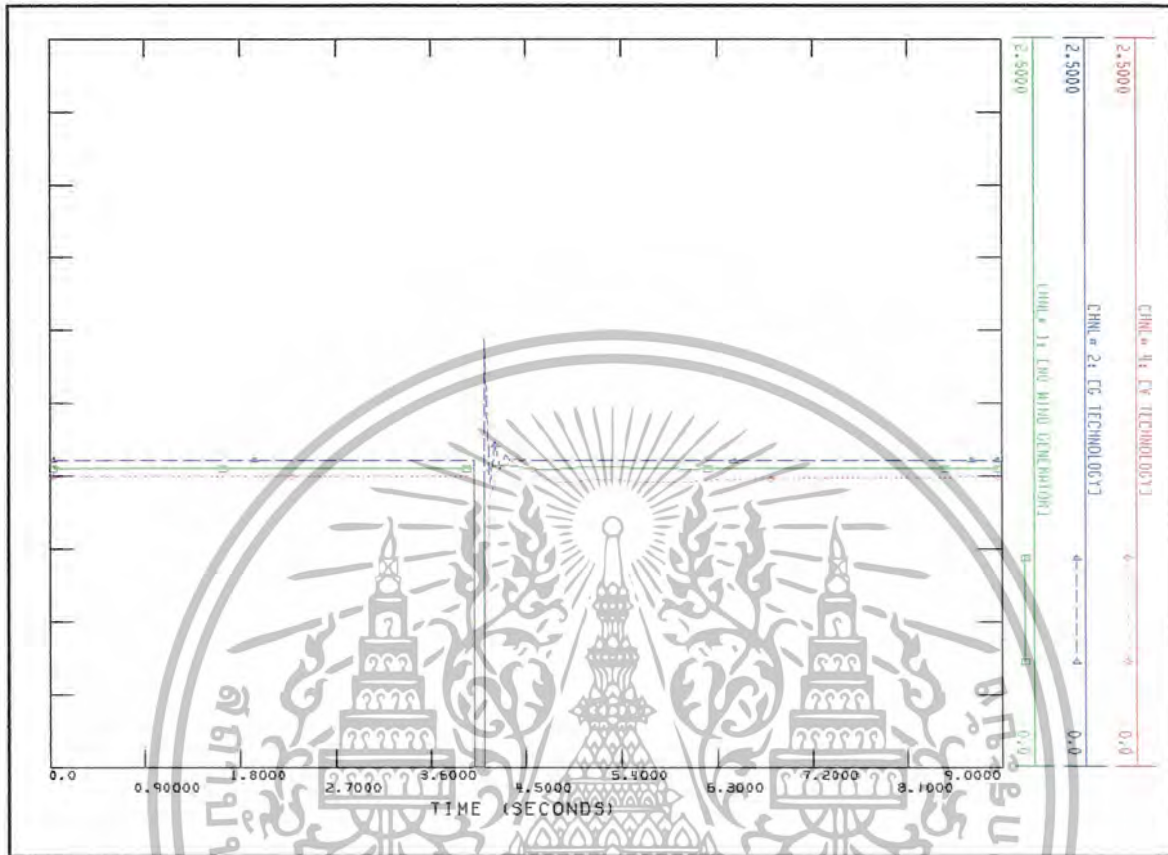
สามารถเปรียบเทียบผลของแรงดันเมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G ที่กำลังผลิตต่างๆ และเมื่อติดตั้งชุดกังหันลม V ที่กำลังผลิตต่างๆ ขณะเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



**รูปที่ 4.9** กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส STU\_GEN เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G โดยควบคุม Voltage ที่ 1.0 p.u. ที่กำลังผลิตต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเปรียบเทียบผลของแรงดันระหว่างการติดตั้งชุดกังหันลม G กับ V ขณะเกิด การลัดวงจรแบบ 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง ได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) และแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส STU\_GEN เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมต่างชนิดกัน

จากกราฟในรูปที่ 4.11 จะแสดงให้เห็นว่า แรงดันที่บัสและขนาดแรงดันเกินชั่วขณะ เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G ขนาด 45 MW โดยควบคุม Voltage ที่ 1.0 p.u. จะมีค่ามากกว่า ในกรณีที่ติดตั้งชุดกังหันลม V ขนาด 46.2 MW แต่จะมีค่าเข้าสู่สภาวะปกติที่เร็วกว่า

ตารางที่ 4.13 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังชุกักันล้มที่บัส KA หยุดทำงาน

Location	Control			Steady state		Drop gen	
				10.5 MW	90 MW	10.5 MW	90 MW
KA (3711)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0411	1.0395	1.0392	1.0384
			1.0 unity	1.0400	1.0329	1.0398	1.0439
			0.95 leading	1.0389	1.0293	1.0403	1.0532
		Voltage	0.95 p.u.	1.0384	1.0280	1.0406	1.0465
			1.0 p.u.	1.0384	1.0325	1.0406	1.0441
			1.05 p.u.	1.0397	1.0370	1.0518	1.0417
	V			1.0396	1.0389	1.0420	1.0810
LR (3712)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0200	1.0171	1.0194	1.0190
			1.0 unity	1.0197	1.0160	1.0198	1.0227
			0.95 leading	1.0194	1.0171	1.0202	1.0289
		Voltage	0.95 p.u.	1.0193	1.0147	1.0204	1.0244
			1.0 p.u.	1.0193	1.0159	1.0204	1.0228
			1.05 p.u.	1.0196	1.0171	1.0199	1.0213
	V			1.0196	1.0177	1.0208	1.0367
KA_COL (3908)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0489	1.0414	1.0444	1.0436
			1.0 unity	1.0445	1.0098	1.0450	1.0492
			0.95 leading	1.0400	0.9798	1.0456	1.0586
		Voltage	0.95 p.u.	1.0377	0.9896	1.0459	1.0517
			1.0 p.u.	1.0377	1.0082	1.0459	1.0494
			1.05 p.u.	1.0430	1.0268	1.0452	1.0470
	V			1.0430	0.9957	1.0514	1.1299
KA_GEN (3909)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0647	1.0900	1.0510	1.0502
			1.0 unity	1.0522	1.0020	1.0516	1.0558
			0.95 leading	1.0391	0.9126	1.0522	1.0652
		Voltage	0.95 p.u.	1.0324	0.9476	1.0524	1.0584
			1.0 p.u.	1.0324	0.9978	1.0524	1.0560
			1.05 p.u.	1.0477	1.0480	1.0518	1.0536
	V			1.0475	0.9392	1.0683	1.2451

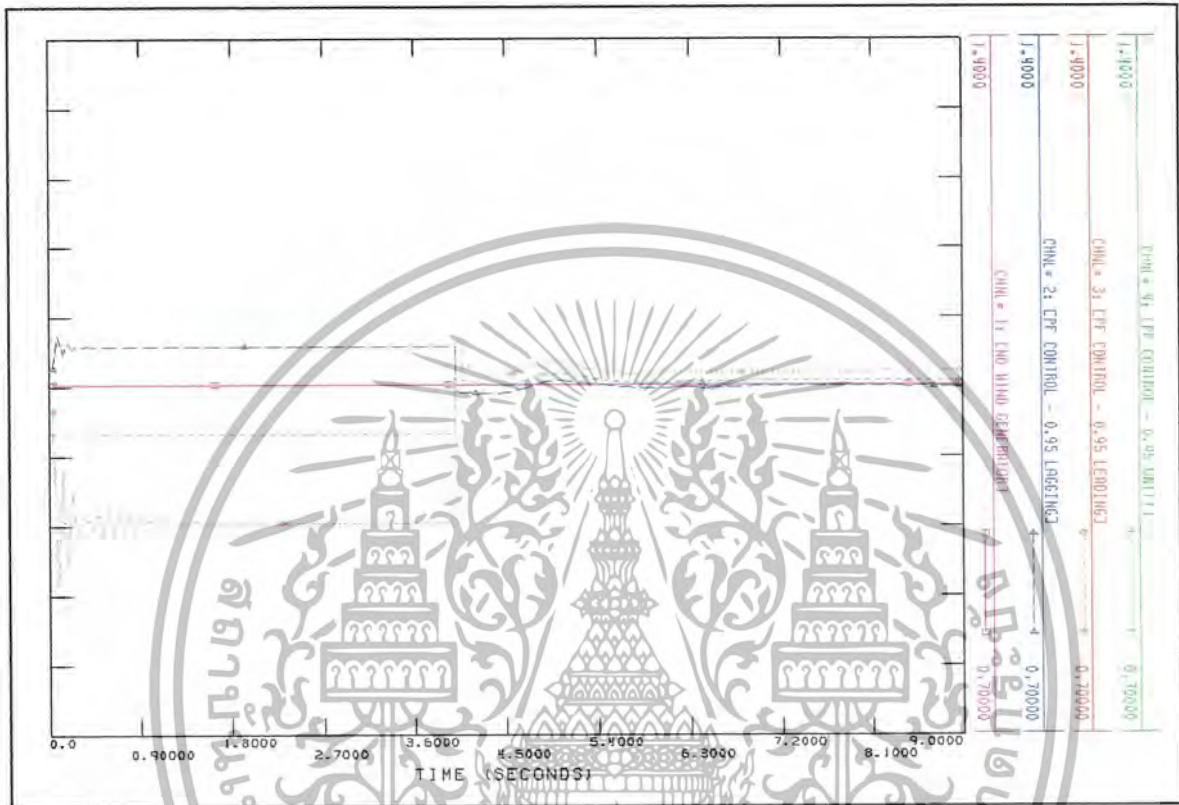
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) หลังชุกกัณฑ์ลมที่บัส STU หยุดทำงาน

Location	Control			Steady state		Drop gen	
				10.5 MW	45 MW	10.5 MW	45 MW
STU (3722)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0386	1.0762	1.0176	1.0359
			1.0 unity	1.0266	1.047	1.0151	1.0194
			0.95 leading	1.0135	0.9758	1.0122	1.0013
	Voltage	0.95 p.u.	1.0068	1.0122	1.0107	1.0117	
		1.0 p.u.	1.0207	1.0375	1.0138	1.0173	
		1.05 p.u.	1.0385	1.0609	1.0176	1.0217	
	V			1.0243	1.0188	1.0292	1.0766
HY1 (3719)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0655	1.0819	1.0591	1.069
			1.0 unity	1.0622	1.0701	1.0582	1.0604
			0.95 leading	1.0586	1.0499	1.0573	1.0542
	Voltage	0.95 p.u.	1.0567	1.0603	1.0567	1.0577	
		1.0 p.u.	1.0605	1.0674	1.0578	1.0597	
		1.05 p.u.	1.0655	1.0732	1.0591	1.0605	
	V			1.0638	1.0646	1.0641	1.0748
STU_COL (3912)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0464	1.0791	1.0228	1.0411
			1.0 unity	1.031	1.045	1.0202	1.0245
			0.95 leading	1.0143	0.9547	1.0173	1.0064
	Voltage	0.95 p.u.	1.0057	1.0005	1.0158	1.0168	
		1.0 p.u.	1.0235	1.033	1.0189	1.0225	
		1.05 p.u.	1.0463	1.063	1.0227	1.0269	
	V			1.0275	1.0082	1.0384	1.1013
STU_GEN (3913)	G	Power Factor	0.95 lagging	1.0622	1.0967	1.0292	1.0477
			1.0 unity	1.0386	1.052	1.0266	1.0309
			0.95 leading	1.0129	0.9186	1.0237	1.0127
	Voltage	0.95 p.u.	0.9997	0.9855	1.0222	1.0232	
		1.0 p.u.	1.027	1.0339	1.0253	1.0289	
		1.05 p.u.	1.062	1.0794	1.0292	1.0333	
	V			1.0316	0.9957	1.0551	1.1604

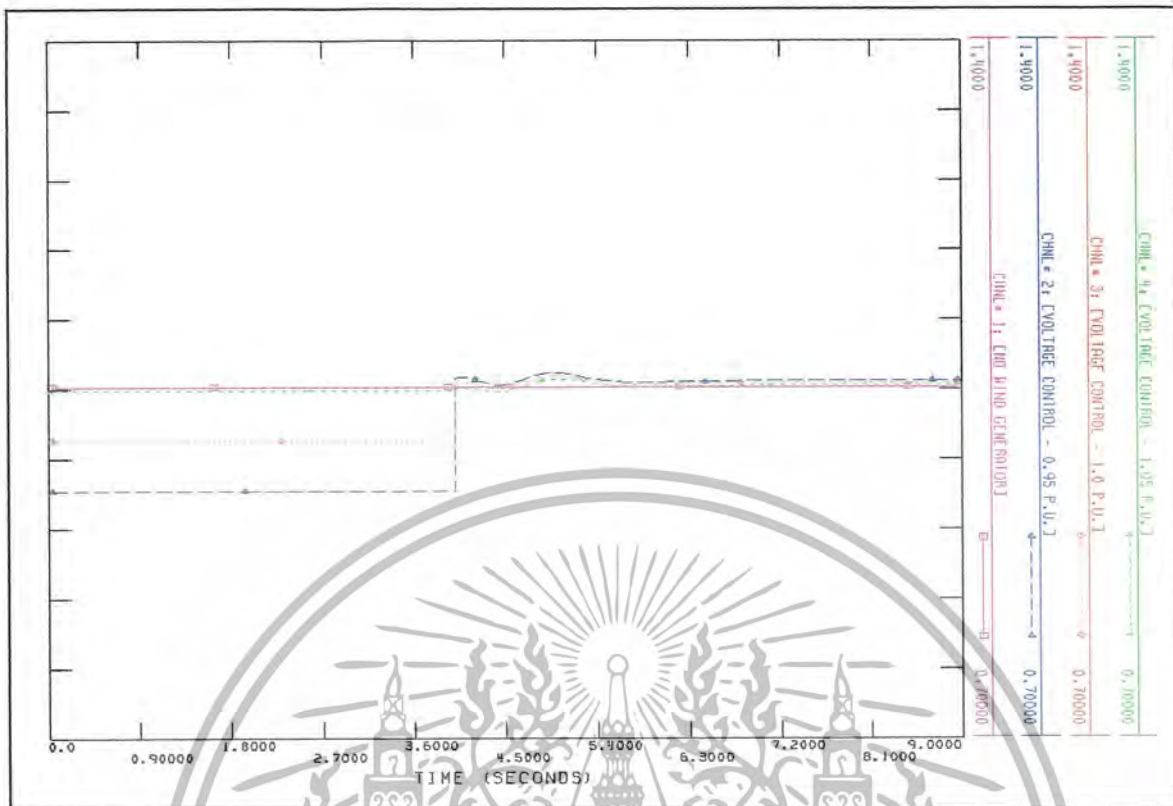
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.13 และ 4.14 สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบเพื่อให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงผลของแรงดันที่บัสของชุดกังหันลม ขณะชุดกังหันลมหยุดทำงาน โดยเปรียบเทียบการควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ และเปรียบเทียบการควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส KA\_GEN ขณะชุดกังหันลม G ขนาด 90 MW ซึ่งควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ หยุดทำงาน

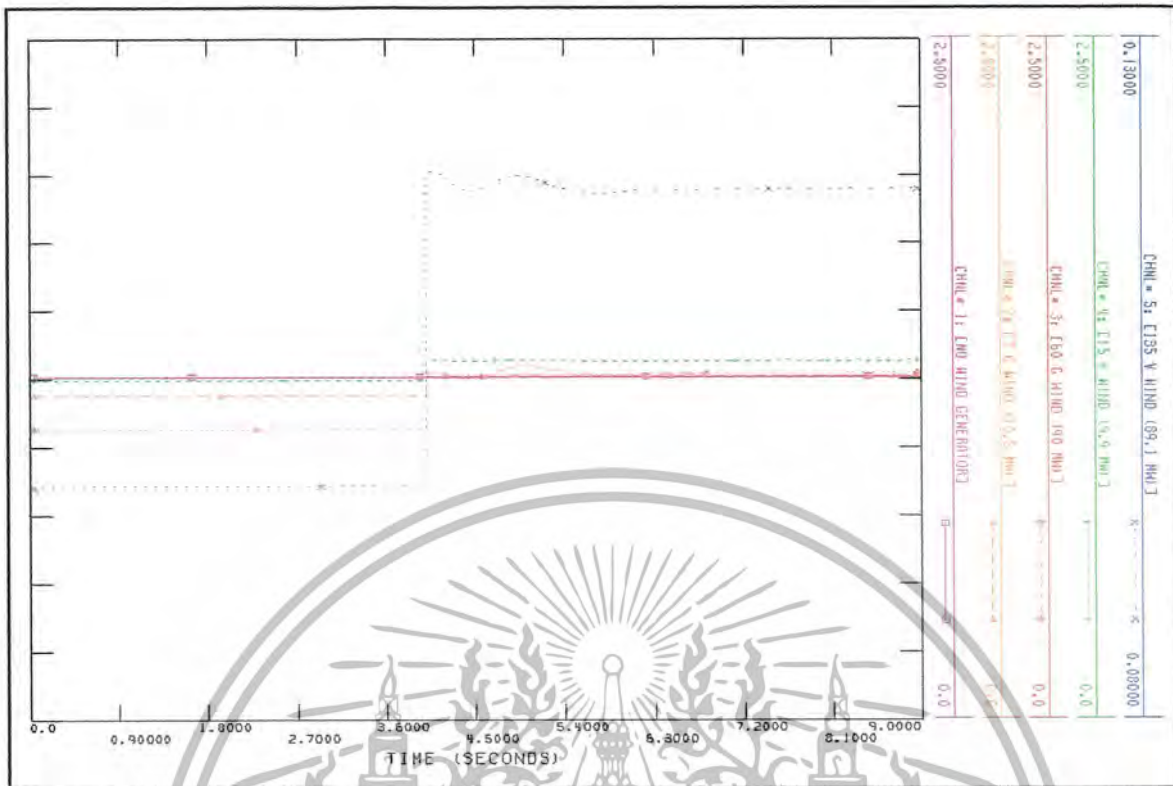
จากกราฟในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า แรงดันที่บัสเมื่อติดตั้งชุดกังหันลม โดยควบคุม Power Factor ที่ 0.95 leading และ 1.0 Unity ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่บัสเมื่อไม่ได้ติดตั้งชุดกังหันลม จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อชุดกังหันลมหยุดทำงานหรือหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่วนแรงดันที่บัสเมื่อติดตั้งชุดกังหันลม โดยควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันที่บัสเมื่อไม่ได้ติดตั้งชุดกังหันลม จะมีค่าลดลง เมื่อชุดกังหันลมหยุดทำงานหรือหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งค่าแรงดันสุดท้ายจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันที่บัสเมื่อไม่ได้ติดตั้งชุดกังหันลม



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส KA\_GEN ขณะชดกึ่งหันลม G ขนาด 90 MW ซึ่งควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ หยุดทำงาน

จากกราฟในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า หลังจากชดกึ่งหันลม ที่ทำการควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ หยุดทำงานหรือหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า ค่าแรงดันสุดท้ายจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันที่บัสเมื่อไม่ได้ติดตั้งชดกึ่งหันลมเช่นเดียวกับกรณีที่ทำการควบคุม Power Factor ที่ค่าต่างๆ

สามารถเปรียบเทียบผลของแรงดัน เมื่อชดกึ่งหันลม G กับ V ที่กำลังผลิตต่างๆ หยุดทำงาน ได้ดังรูปที่ 4.14



**รูปที่ 4.14** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส KA\_GEN ขณะชดกังหันลมที่กำลังผลิตต่างๆ และต่างชนิดกัน หยุดทำงาน

จากกราฟในรูป 4.14 แสดงให้เห็นว่าชดกังหันลม G ไม่ว่าจะติดตั้งที่กำลังผลิต 10.5 MW หรือ 90 MW เมื่อหยุดทำงานหรือหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า แรงดันสุดท้ายที่บัสจะใกล้เคียงกับแรงดันที่บัสเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งชดกังหันลม แต่ชดกังหันลม V เมื่อหยุดทำงานหรือหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า แรงดันสุดท้ายที่บัสจะมากกว่าเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้งชดกังหันลม โดยในกรณีที่ติดตั้งที่กำลังผลิต 89.1 MW แรงดันสุดท้ายที่บัสจะมากกว่ากรณีที่ติดตั้งที่กำลังผลิต 9.9 MW ซึ่งส่งผลให้เกิด Over-voltage ตามมา

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ที่มาและแนวคิดที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจาก ปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น จึงทำให้ต้องหาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าใหม่ๆมาใช้มากขึ้น เช่น กังหันลมหรือที่เรียกว่ากังหันลม แต่การติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้านั้น ย่อมทำให้เกิดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้า ในการทดลองนี้จึงได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น ทั้งในสภาวะอยู่ตัวและสภาวะไดนามิก เพื่อเป็นแนวทางในการติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพสูงสุด

#### 5.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เพื่อให้ง่ายและสะดวกในการศึกษาและทำความเข้าใจ เราจะแบ่งการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองนี้ออกเป็น 2 ตอน ตามวิธีการทำทดลอง โดยในตอนแรก 1 จะเป็นการวิเคราะห์ระบบในสภาวะอยู่ตัว และการวิเคราะห์ Contingency ส่วนในตอน 2 จะเป็นการวิเคราะห์ระบบในสภาวะไดนามิก

##### 5.2.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ตอนที่ 1

ในการวิเคราะห์ระบบที่สภาวะอยู่ตัว เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G เข้ากับแต่ละบัสที่ทำการเลือกไว้ โดยการควบคุม Power Factor จะพบว่าเมื่อควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging จะสามารถติดตั้งได้ที่พิกัดสูงสุด ส่วนการควบคุม Voltage ไม่ว่าจะควบคุม Voltage ที่ค่าใด (0.95 p.u., 1.0 p.u. หรือ 1.05 p.u.) ก็สามารถติดตั้งได้ที่พิกัดสูงสุดเท่าๆกัน และใกล้เคียงกับกรณีทำการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging ซึ่งที่บัส KA (3711) สามารถที่จะติดตั้งได้ที่พิกัดสูงสุดเมื่อเทียบกับบัสอื่นๆ แต่เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับทุกบัสพร้อมกัน การควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging จะสามารถติดตั้งได้ที่พิกัดสูงกว่าการควบคุม Voltage ทุกๆการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อติดตั้งกังหันลมที่พิกัดสูงสุดเข้ากับแต่ละบัสที่เลือกไว้ โดยพิจารณาจากจำนวน Line Overload, จำนวนบัสที่เกิด Over-voltage และ จำนวนบัสที่เกิด Under-voltage การควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆจะมีจำนวนผลกระทบที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันและเท่าๆกับการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging ซึ่งมีจำนวนผลกระทบน้อยกว่าค่า Power Factor ที่ 1.0 unity และ 0.95 leading

และเมื่อทำการทดสอบ Contingency แบบ N - 1 พบว่าเมื่อติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับแต่ละบัสที่เลือกไว้ จะสามารถช่วยลดจำนวน Line Overload ที่เกิดขึ้นให้น้อยลงได้ โดยการควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ จะช่วยลดจำนวน Line Overload ได้ใกล้เคียงกันและเท่าๆกับการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging ซึ่งมีจำนวน Line Overload น้อยกว่าค่า Power Factor ที่ 1.0 unity และ 0.95 leading แต่เมื่อติดตั้งชุดกังหันลมเข้ากับทุกบัสพร้อมกัน การควบคุม Voltage จะช่วยลดจำนวน Line Overload ได้มากกว่าการควบคุม Power Factor อีกทั้งยังมีจำนวนผลกระทบโดยรวมที่น้อยกว่าด้วย

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ้าต้องการเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าให้มากขึ้น ควรเลือกติดตั้งชุดกังหันลม G เข้ากับระบบไฟฟ้าที่บัส KA (3711) โดยใช้การควบคุม Power Factor ที่ 0.95 Lagging หรือใช้การควบคุม Voltage ที่ 0.95 p.u., 1.0 p.u. หรือ 1.05 p.u. ก็ได้ เนื่องจากมีผลกระทบที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ถ้าต้องการติดตั้งชุดกังหันลม G เข้ากับทุกบัสที่เลือกไว้ทั้ง 7 บัส ควรใช้การควบคุม Voltage ที่ค่าต่างๆ ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังผลิตได้มาก และให้ผลที่ดีกว่าในสภาวะที่ทำการทดสอบ Contingency

### 5.2.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ตอนที่ 2

ในการวิเคราะห์ระบบในสภาวะไดนามิก ก่อนการเกิดความผิดปกติใดๆ เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G โดยควบคุม Power Factor ที่ 0.95 lagging แรงดันที่บัสจะมีค่ามากที่สุด ส่วนการควบคุม Power Factor ที่ 0.95 leading จะทำให้แรงดันที่บัสมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการควบคุมทุกๆแบบและชุดกังหันลม V

ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่สายส่ง เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G จะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันทุกการควบคุม ที่กำลังผลิตเท่ากัน แต่จะมีขนาดมากขึ้นเมื่อกำลังผลิตมากขึ้น ส่วนชุดกังหันลม V ไม่ว่าจะมีกำลังผลิตเท่าไร ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะจะมีค่าเท่ากับในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งกังหันลมเข้ากับระบบเลย

ขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ที่บัสของชุดกังหันลม เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G จะเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ หลังการเกิดแรงดันตกชั่วขณะด้วย ซึ่งขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ และแรงดันเกินชั่วขณะมีค่าใกล้เคียงกันทุกการควบคุมที่กำลังผลิตเท่ากัน และจะมีขนาดมากขึ้นเมื่อกำลังผลิตมากขึ้น ส่วนชุดกังหันลม V ก็จะมีขนาดของแรงดันเกินชั่วขณะมากขึ้นเมื่อกำลังผลิตมากขึ้นเช่นกัน แต่จะมีขนาดของแรงดันเกินชั่วขณะที่น้อยกว่ามาก

เมื่อติดตั้งชุดกังหันลม G ไม่ว่าจะที่กำลังผลิตเท่าไร หรือควบคุมแบบใด ค่าแรงดันที่บัสหลังจากชุดกังหันลมหยุดทำงานหรือหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันที่บัสเมื่อไม่ได้ติดตั้งชุดกังหันลม แต่ชุดกังหันลม V ค่าแรงดันที่บัสหลังจากชุดกังหันลมหยุดทำงานหรือหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าแรงดันที่บัสเมื่อไม่ได้ติดตั้งชุดกังหันลม และเมื่อกำลังผลิตมากขึ้นค่าแรงดันที่บัสก็มากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากที่กังหันลม V แต่ละตัวจะมีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่ด้วย เมื่อชุดกังหันลมหยุดทำงาน ทำให้คาปาซิเตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ให้กับระบบ แรงดันที่บัสจึงสูงขึ้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อกำหนดให้เกิดความผิดปกติต่างๆขึ้นในระบบ ชุดกังหันลม G จะรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบได้ดีกว่าชุดกังหันลม V และยังมีการผลิตมากก็จะให้ผลที่ดีกว่ากำลังผลิตน้อยหรือกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งชุดกังหันลมเลย โดยการควบคุม Voltage และ Power Factor ที่ค่าต่างๆจะให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลอง จะทำให้ทราบถึงกำลังผลิตสูงสุดของชุดกังหันลมที่สามารถติดตั้งได้ในแต่ละพื้นที่ แต่เมื่อจะทำการติดตั้งจริง ไม่ควรที่จะติดตั้งที่กำลังผลิตสูงสุดเลย เนื่องจากระบบจะมีความเสถียรภาพน้อย หากเกิดความผิดปกติใดๆขึ้น อาจทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้
2. จากการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น ได้กำหนดความยาวสายส่งระหว่างบัสของชุดกังหันลมกับบัสของระบบไฟฟ้าไว้ 10 km ซึ่งถ้านำไปติดตั้งจริงที่ความยาวสายส่งมากกว่า 10 km อาจทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียในสายส่งมากขึ้น
3. ในการเลือกกำลังผลิตติดตั้งของชุดกังหันลม เพื่อต่อเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าในภาคใต้นั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ด้วย เช่น ขนาด ตำแหน่งและลักษณะของพื้นที่นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์, “เทคโนโลยีพลังงานลม”, วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร. 2547
- [2] **About Wind Energy.** (2551). Available URL: <http://www.prapai.co.th/listgroupknowledge.php?gid=3>
- [3] H. Siegfried, **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems.** London : John Wiley & Sons. 1998
- [4] Ddesir LE GOURIERES, **Wind power plant Theory and Design,** Headingtonhill Hall, Pergamon Press Ltd.1982
- [5] กพพ.กับการศึกษาพลังงานลมเพื่อนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า. กองพัฒนาพลังงานลมและแสงอาทิตย์ สำนักวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [6] Thomas Ackermann. **Wind Power in Power System.** West Sussex. 2005
- [7] หนังสือโครงการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน จัดทำโดย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2549
- [8] พลังงานลม. กองพัฒนาพลังงานทดแทนฝ่ายพัฒนาและแผนงานโรงไฟฟ้า. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [9] E. Muljadi, C.P. Butterfield, J. Conto, and K. Donoho, **ERCOT's Dynamic Model of Wind Turbine Generators : Preprint.** 2005
- [10] IEEE Std 1159 – 1995, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** 1995
- [11] ศักดิ์ชัย นรสิงห์, **คุณภาพกำลังไฟฟ้า (POWER QUALITY).** ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2546

## ประวัติผู้เขียน



นายพุทธรรัตน์ ทองมूल (ปั๊ป)

เกิดวันที่ 8 เมษายน 2530

ที่อยู่ 424/1 หมู่ 8 ต.น้ำรึม อ.เมือง จ.ตาก 63000

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนตากพิทยาคม

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนตากพิทยาคม

E- Mail : [greatpup@hotmail.com](mailto:greatpup@hotmail.com) Tel. 085-979-7272



นายไพโรจน์ ขจรจิตเลิศสกุล (กอล์ฟ)

เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน 2530

ที่อยู่ 33/23 ถ.สุขุมวิท 101/1 ซ.วชิรธรรมสาธิต 8 เขต บางนา กทม.

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)

E- Mail : [kppairoj@live.com](mailto:kppairoj@live.com) Tel. 089-488-9585



นายมงคล บุรววิริยะนาถ (มง)

เกิดวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2530

ที่อยู่ 34 ถ.ประจักษ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนบุญวัฒนา

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนบุญวัฒนา

E- Mail : [m\\_rocky99@hotmail.com](mailto:m_rocky99@hotmail.com) Tel. 086-727-1291



นายสรราชัย ศิระไตรรัตน์ (แจ๊ค)

เกิดวันที่ 31 กรกฎาคม 2529

ที่อยู่ 608 ม.1 ถ.มิตรสัมพันธ์ ต.วังทอง อ.วังทอง จ.พิษณุโลก 65130

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม

E- Mail : [shindo\\_31918@hotmail.com](mailto:shindo_31918@hotmail.com) Tel. 086-735-7727

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้