



การวิเคราะห์เชิงเทคนิคของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง  
เข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

**Technical Analysis of Offshore Wind Farm Integration with  
the Distribution System of Provincial Electricity Authority**

พิเชฐ เกศมี

**Phichet Ketsamee**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2559**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การวิเคราะห์เชิงเทคนิคของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง  
เข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

**Technical Analysis of Offshore Wind Farm Integration with  
the Distribution System of Provincial Electricity Authority**

พิเชฐ เกศมี

**Phichet Ketsamee**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2559**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เจริญยานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายพิเชฐ เกศมี)

นักศึกษา



ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการขอขึ้นอนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายพิเชฐ เกศมี)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เชิงเทคนิคของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยตู้กึ่งหั่นลม นอกชายฝั่งเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ผู้เขียน	นายพิเชฐ เกศมี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2558

### บทคัดย่อ

บริเวณนอกชายฝั่งอ่าวไทยของเกาะเต่าและเกาะพะงันเป็นแหล่งที่มีศักยภาพลมดี  
เหมาะแก่การพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยตู้กึ่งหั่นลมนอกชายฝั่งขนาดใหญ่เชื่อมเข้ากับระบบ  
ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าตู้กึ่งหั่นลมนอกชายฝั่งจะส่งผลให้การไหลของ  
พลังงานไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงขนาดและทิศทาง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผล  
กระทบต่อความมั่นคง เสถียรภาพ และคุณภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเงื่อนไข  
ปัจจัยและวิธีการเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยตู้กึ่งหั่นลมนอกชายฝั่งเข้า  
กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ การประเมินจุดเชื่อมต่อที่  
เป็นไปได้โดยการพิจารณาจากปัจจัยทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณโหลดหม้อแปลงและระยะห่างของ  
จุดเชื่อมต่อ ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์เชิงเทคนิค ประกอบด้วย การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าใน  
สถานะอยู่ตัว การจำลองการทำงานในสถานะพลวัต และการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า โดยใช้  
แบบจำลองกึ่งหั่นลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบและวิเคราะห์การทำงานด้วยโปรแกรม  
DIgSILENT PowerFactory ทั้งสถานะโหลดสูงและโหลดต่ำเพื่อหากรณีวิกฤติ สุดท้ายประเมินผล  
การจำลองทางเทคนิคด้วยหลักเกณฑ์ของข้อกำหนดการเชื่อมต่อ การปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบ  
ไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เพื่อคัดเลือกจุดเชื่อมต่อและแนะนำแนวทางการเชื่อมต่อที่เหมาะสม ผล  
การวิเคราะห์เชิงเทคนิคพบว่า การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยตู้กึ่งหั่นลมนอกชายฝั่งสามารถผ่าน  
ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงหรือเพิ่มอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า โดย  
รูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมได้แก่ กรณีที่ 2 ตู้กึ่งหั่นลม SPP 1 เชื่อมกับบัส KMA ตู้กึ่งหั่นลม  
SPP 2 เชื่อมกับบัส KCD และตู้กึ่งหั่นลม SPP 3 เชื่อมกับบัส KMB

**คำสำคัญ:** การวิเคราะห์เชิงเทคนิค, กึ่งหั่นลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ, ระบบผลิตไฟฟ้าด้วย  
ตู้กึ่งหั่นลมนอกชายฝั่ง, DIgSILENT PowerFactory

<b>Thesis Title</b>	Technical Analysis of Offshore Wind Farm Integration with the Distribution System of Provincial Electricity Authority
<b>Author</b>	Mr. Phichet Ketsamee
<b>Major Program</b>	Electrical Engineering
<b>Academic Year</b>	2015

### ABSTRACT

The off coast of the Gulf of Thailand around Koh Tao and Koh Pha-Ngan has abundant wind resources, which could be implemented into large-scale offshore wind farms. However, the offshore wind farm integration on the high voltage grid will significantly impact the system operation of security, stability, and quality. Consequently, the suitable interconnection points for the offshore wind farms to the grid have to be investigated. In this thesis, we study the system conditions, the factors, and how to choose the properly connected points of the offshore wind farms to the 115 kV transmission system of the Provincial Electricity Authority (PEA). This study consists of an evaluation of possible connected points, considered on the physical criteria, i.e. an amount of transformer load and transmission line distance to the connected points. Then, technical analysis, including steady-state analysis, dynamic simulation, and power quality are performed with the full-power conversion wind turbine generators by using the DIgSILENT PowerFactory program in both peak load and off-peak load conditions. Finally, we evaluate the results by considering grid connection requirements, electrical device improvements, and grid loss in order to select and recommend the appropriate grid connection point of the offshore wind farms. The simulation results indicate that the offshore wind farm integration can meet PEA grid connection requirements and not necessary to improve electrical devices in the grid. The suitable interconnection point for these offshore wind farms is case study 2, SPP 1 connects to KMA bus, SPP 2 connects to KCD bus, and SPP 3 connects to KMB bus.

**Keywords:** Technical analysis, Full-power conversion wind turbine generator, Offshore wind farm, DIgSILENT PowerFactory

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย ชัดเจนการะบวนการคิดวิเคราะห์ รวมทั้งให้กำลังใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล ดร.มงคล แซ่เจีย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสวัสดิ์ กุลบุญ ก่อเกิด กรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ตลอดจนตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐา จินดาเพ็ชร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์ กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธวัชชัย ทางรัตนสุวรรณ รวมทั้งอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและความคิดเห็นในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ นายบรรเจิด รัตนเลิศ นายณัฐพงศ์ พรหมมาก นางสาวธัญฉัฐ เหลืองอมรสิริ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหารและพี่พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้กรุณาสนับสนุนข้อมูลและโปรแกรมที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งเป็นกำลังใจช่วยเหลือให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา การสนับสนุนในทุกๆ ด้านและให้กำลังใจที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(12)
รายการภาพประกอบ.....	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ.....	(19)
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	14
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.6 วิธีการวิจัย.....	15
1.7 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	18
1.8 โครงสร้างรายงานวิทยานิพนธ์ .....	19
บทที่ 2 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นมนอกชายฝั่ง .....	20
2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	20
2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นมนอกชายฝั่ง .....	22
2.2.1 กัณฑ์นมนผลิตไฟฟ้า .....	22
2.2.2 รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นมนอกชายฝั่ง .....	29
2.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นมนอกชายฝั่ง.....	31
บทที่ 3 การประเมินจุดเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นมนอกชายฝั่ง.....	33
3.1 หลักเกณฑ์การประเมินจุดเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นมนอกชายฝั่ง .....	33
3.2 การวิเคราะห์เชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้า .....	37
3.2.1 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว (Steady-State Analysis) .....	37
3.2.2 การจำลองการทำงานในสภาวะพลวัต (Dynamic Simulation) .....	38
3.2.3 การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality).....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 เครื่องมือจำลองการทำงาน .....	39
3.3.1 คุณลักษณะทั่วไปของโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory .....	40
3.3.2 โครงสร้างพื้นฐานของโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory .....	41
บทที่ 4 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว .....	47
4.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis).....	47
4.1.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า .....	47
4.1.2 การศึกษาผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า .....	56
4.1.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	71
4.1.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า .....	76
4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Variation Analysis).....	77
4.2.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน .....	77
4.2.2 การศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน.....	79
4.2.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน .....	79
4.2.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน .....	81
4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน (Voltage Stability Analysis) .....	82
4.3.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน.....	82
4.3.2 การศึกษาผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน .....	86
4.3.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน .....	87
4.3.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน.....	90
4.4 การวิเคราะห์กระแสลัดวงจร (Fault Current Analysis) .....	91
4.4.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์กระแสลัดวงจร.....	91
4.4.2 การศึกษาผลกระทบกระแสลัดวงจร .....	96
4.4.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบกระแสลัดวงจร .....	100
4.4.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบกระแสลัดวงจร.....	102

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต .....	103
5.1 ทฤษฎีและหลักการการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต .....	103
5.1.1 องค์ประกอบทั่วไปของกั้นลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ .....	103
5.1.2 หลักการควบคุมกั้นลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ.....	105
5.1.3 ความสามารถทนความผิดพลาดของกั้นลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ....	106
5.1.4 แนวทางการควบคุมกั้นลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ.....	106
5.2 การศึกษาผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต .....	107
5.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต.....	107
5.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าใน สถานะพลวัต.....	108
5.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะ พลวัต ด้วยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory .....	108
5.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าใน สถานะพลวัต.....	110
5.3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งหตุการเชื่อมต่อ (Offshore Wind Farm Trip Offline).....	110
5.3.2 สายส่งหตุการเชื่อมต่อ (N-1 Trip Offline) .....	116
5.3.3 การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส (Three Phase Short Circuit).....	122
5.3.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (Wind Speed Variation).....	129
5.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต .....	140
บทที่ 6 การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า .....	142
6.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก .....	142
6.2 การศึกษาผลกระทบฮาร์มอนิก .....	147
6.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบฮาร์มอนิก.....	147
6.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบฮาร์มอนิก .....	147
6.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบฮาร์มอนิกด้วย โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory ....	150

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบฮาร์โมนิก.....	151
6.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบฮาร์โมนิก .....	164
บทที่ 7 การวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมและแนวทางการแก้ไข .....	165
7.1 หลักเกณฑ์การวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง .....	165
7.2 ผลการวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง	167
7.3 การแก้ไขผลกระทบของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง.....	173
บทที่ 8 บทสรุป.....	176
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	176
8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	178
8.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	178
บรรณานุกรม .....	179
ภาคผนวก .....	184
ภาคผนวก ก การตั้งค่าการจำลองการทำงาน .....	185
ภาคผนวก ข ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า .....	192
ภาคผนวก ค การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน .....	198
ประวัติผู้เขียน .....	206



## รายการตาราง

	หน้า
ตาราง 1-1 คุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้ายี่ห้อ Vestas รุ่น V112 .....	14
ตาราง 1-2 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	18
ตาราง 3-1 พื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง ภาคใต้ของประเทศไทย .....	33
ตาราง 3-2 จุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง .....	35
ตาราง 3-3 กรณีศึกษารูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง .....	36
ตาราง 3-4 การเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องมือจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	40
ตาราง 4-1 ข้อมูลของตัวแปร巴士ประเภทต่างๆ .....	56
ตาราง 4-2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	57
ตาราง 4-3 ข้อมูลกำลังไฟฟ้า แรงดัน巴士 และมุมเฟสของจุดเชื่อมต่อในสภาวะโหลดสูงสุด .....	57
ตาราง 4-4 ข้อมูลกำลังไฟฟ้า แรงดัน巴士 และมุมเฟสของจุดเชื่อมต่อในสภาวะโหลดต่ำสุด .....	58
ตาราง 4-5 พารามิเตอร์สายส่งของจุดเชื่อมต่อ .....	58
ตาราง 4-6 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง .....	59
ตาราง 4-7 ระยะทางระหว่างจุดเชื่อมต่อและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง.....	59
ตาราง 4-8 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะกำลังผลิตสูงสุด .....	71
ตาราง 4-9 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะร้อยละ 60 ของกำลังผลิตสูงสุด .....	72
ตาราง 4-10 รูปแบบการเชื่อมต่อที่สามารถรองรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง ...	73
ตาราง 4-11 ปริมาณภาระโหลดของสายส่งภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด .....	74
ตาราง 4-12 ปริมาณภาระโหลดของสายส่งภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด.....	75
ตาราง 4-13 ผลกระทบกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า.....	75
ตาราง 4-14 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค .....	79
ตาราง 4-15 ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่งภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด .....	80
ตาราง 4-16 ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่งภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด.....	80
ตาราง 4-17 ผลการจำลองเสถียรภาพแรงดันในช่วงแรงดันพ่วงหลายภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด.....	88
ตาราง 4-18 ผลการจำลองเสถียรภาพแรงดันในช่วงแรงดันพ่วงหลายภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด .....	89

## รายการตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตาราง 4-19 สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด.....	89
ตาราง 4-20 สัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด.....	90
ตาราง 4-21 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อกระแสลัดวงจรของจุดเชื่อมต่อ .....	96
ตาราง 4-22 พารามิเตอร์ของแบบจำลองกึ่งหั่นลมสำหรับการวิเคราะห์กระแสลัดวงจร .....	98
ตาราง 4-23 กระแสลัดวงจรสูงสุดภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด .....	100
ตาราง 4-24 กระแสลัดวงจรสูงสุดภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด.....	101
ตาราง 5-1 ระยะเวลาปลดวงจรเมื่อแรงดันไม่อยู่ในช่วงแรงดันพิกัด .....	107
ตาราง 5-2 ผลกระทบสูงสุดขณะกึ่งหั่นลมเหตุการณ์เชื่อมต่อในสภาวะโหลดสูงสุด.....	115
ตาราง 5-3 ผลกระทบสูงสุดขณะกึ่งหั่นลมเหตุการณ์เชื่อมต่อในสภาวะโหลดต่ำสุด .....	115
ตาราง 5-4 ผลกระทบสูงสุดขณะสายส่งเคเบิลใต้น้ำเหตุการณ์เชื่อมต่อสภาวะ โหลดสูงสุด .....	121
ตาราง 5-5 ผลกระทบสูงสุดขณะสายส่งเคเบิลใต้น้ำเหตุการณ์เชื่อมต่อสภาวะ โหลดต่ำสุด.....	121
ตาราง 5-6 ผลกระทบสูงสุดขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะ โหลดสูงสุด.....	127
ตาราง 5-7 ผลกระทบสูงสุดขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะ โหลดต่ำสุด .....	128
ตาราง 5-8 เวลาการปลดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะ โหลดสูงสุด .....	128
ตาราง 5-9 เวลาการปลดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะ โหลดต่ำสุด.....	128
ตาราง 5-10 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลดลงในสภาวะ โหลดสูงสุด.....	139
ตาราง 5-11 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลดลงในสภาวะ โหลดต่ำสุด .....	140
ตาราง 5-12 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วเพิ่มขึ้นในสภาวะ โหลดสูงสุด .....	140
ตาราง 5-13 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วเพิ่มขึ้นในสภาวะ โหลดต่ำสุด.....	140
ตาราง 6-1 พารามิเตอร์การวางกึ่งหั่นลมของกึ่งหั่นลม .....	150
ตาราง 6-2 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ความยาวสายส่งกึ่งหั่นลม 0.56 km....	162
ตาราง 6-3 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ความยาวสายส่งกึ่งหั่นลม 0.76 km....	162
ตาราง 6-4 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ความยาวสายส่งกึ่งหั่นลม 0.96 km....	162
ตาราง 6-5 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อปรับระยะสายส่งระหว่างบัสรวม และกึ่งหั่นลม .....	164
ตาราง 7-1 ข้อสรุปผลกระทบการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว .....	168
ตาราง 7-2 ข้อสรุปผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต .....	169

### รายการตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตาราง 7-3 ข้อสรุปผลกระทบการปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า .....	170
ตาราง 7-4 ข้อสรุปผลกระทบกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า .....	170
ตาราง 7-5 ผลการประเมินข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค .....	171
ตาราง 7-6 ผลการประเมินการปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า .....	171
ตาราง 7-7 ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า .....	172
ตาราง 7-8 ผลการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่ง.....	172

## รายการภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1-1 กำลังผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าสะสมรายปีทั่วโลก .....	2
ภาพประกอบ 1-2 กำลังผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในทะเลสะสมปี 2011-2014 .....	2
ภาพประกอบ 1-3 ปัจจัยการวิเคราะห์การเชื่อมต่อ .....	4
ภาพประกอบ 1-4 พื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่งภาคใต้ของประเทศไทย .....	13
ภาพประกอบ 1-5 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าของกังหันลมยี่ห้อ Vestas รุ่น V112 .....	13
ภาพประกอบ 1-6 ลำดับขั้นตอนการวิจัย .....	17
ภาพประกอบ 1-7 กรณีศึกษาและหัวข้อการวิเคราะห์เชิงเทคนิค .....	17
ภาพประกอบ 2-1 โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลัง .....	20
ภาพประกอบ 2-2 รูปแบบการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า .....	22
ภาพประกอบ 2-3 ตัวอย่างกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่น Nordex N80 .....	24
ภาพประกอบ 2-4 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ กรงกระรอก .....	25
ภาพประกอบ 2-5 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบพันขดลวด .....	26
ภาพประกอบ 2-6 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบป้อนสองทาง .....	26
ภาพประกอบ 2-7 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์ เต็มรูปแบบ .....	27
ภาพประกอบ 2-8 ตัวอย่างเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าของกังหันลม .....	28
ภาพประกอบ 2-9 รูปแบบการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งแรงสูงแบบ HVAC .....	29
ภาพประกอบ 2-10 รูปแบบการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งแรงสูงแบบ HVDC .....	30
ภาพประกอบ 2-11 การเชื่อมต่อเบตเตอร์เก็บพลังงานของกังหันลม .....	31
ภาพประกอบ 2-12 แบบจำลองแบบรวมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง .....	32
ภาพประกอบ 2-13 แบบจำลองแบบแยกองค์ประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่ง .....	32

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 3-1 แผนภาพเส้นเคียวจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่ง.....	36
ภาพประกอบ 3-2 หน้าต่าง Data Manager แสดงโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูล .....	41
ภาพประกอบ 3-3 หน้าต่างแสดงโครงสร้างของโครงการใน Data Manager.....	42
ภาพประกอบ 3-4 ส่วนประกอบต่างๆ บนหน้าต่าง Main Window .....	44
ภาพประกอบ 4-1 ความสมดุลของระบบไฟฟ้ากำลัง .....	48
ภาพประกอบ 4-2 อิมพีแดนซ์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	49
ภาพประกอบ 4-3 แอดมิตแตนซ์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง .....	49
ภาพประกอบ 4-4 การไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส $k$ ไปยังบัสอื่นๆ.....	54
ภาพประกอบ 4-5 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส .....	66
ภาพประกอบ 4-6 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	68
ภาพประกอบ 4-7 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า .....	69
ภาพประกอบ 4-8 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า.....	77
ภาพประกอบ 4-9 คุณลักษณะเส้นโค้ง P-V .....	84
ภาพประกอบ 4-10 คุณลักษณะเส้นโค้ง V-Q.....	84
ภาพประกอบ 4-11 คุณลักษณะเส้นโค้ง P-Q .....	85
ภาพประกอบ 4-12 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย 3 บัส .....	92
ภาพประกอบ 4-13 ระบบไฟฟ้ากำลังสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจร .....	92
ภาพประกอบ 4-14 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย 3 บัสเมื่อเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วย กังหันลม .....	92
ภาพประกอบ 4-15 ระบบไฟฟ้ากำลังสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจรหลังเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยกังหันลม .....	93
ภาพประกอบ 4-16 การลดขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน .....	93
ภาพประกอบ 4-17 ตัวอย่างระบบจำหน่ายไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกัน .....	94
ภาพประกอบ 4-18 การทำงานนอกขอบเขตของอุปกรณ์ป้องกัน .....	95
ภาพประกอบ 4-19 หลักการแรงดันไฟฟ้าสำรองของกังหันลมในกรณีที่เกิดความผิดปกติ ในระบบไฟฟ้า.....	97

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 4-20 วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยวิธี Complete.....	99
ภาพประกอบ 5-1 องค์ประกอบพื้นฐานของกักกันลมนชนิดคอนเวอเตอร์เต็มรูปแบบ.....	104
ภาพประกอบ 5-2 หลักการควบคุมกักกันลมนชนิดคอนเวอเตอร์เต็มรูปแบบในสภาวะ เกิดความผิดปกติ ..... 105	105
ภาพประกอบ 5-3 ลำดับขั้นตอนการจำลองการทำงานในสภาวะพลวัติ.....	109
ภาพประกอบ 5-4 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อท่วงกักกันลมหลุดการเชื่อมต่อ .....	110
ภาพประกอบ 5-5 ผลกระทบขณะท่วงกักกันลมหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 1 .....	111
ภาพประกอบ 5-6 ผลกระทบขณะท่วงกักกันลมหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 2 .....	112
ภาพประกอบ 5-7 ผลกระทบขณะท่วงกักกันลมหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 3 .....	113
ภาพประกอบ 5-8 ผลกระทบขณะท่วงกักกันลมหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 4 .....	114
ภาพประกอบ 5-9 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อ.....	116
ภาพประกอบ 5-10 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 1 .....	117
ภาพประกอบ 5-11 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 2 .....	118
ภาพประกอบ 5-12 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 3 .....	119
ภาพประกอบ 5-13 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 4 .....	120
ภาพประกอบ 5-14 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส .....	122
ภาพประกอบ 5-15 ผลกระทบขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสกรณีที่ 1 .....	123
ภาพประกอบ 5-16 ผลกระทบขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสกรณีที่ 2 .....	124
ภาพประกอบ 5-17 ผลกระทบขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสกรณีที่ 3 .....	125
ภาพประกอบ 5-18 ผลกระทบขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสกรณีที่ 4 .....	126
ภาพประกอบ 5-19 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม.....	130
ภาพประกอบ 5-20 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 1 .....	131
ภาพประกอบ 5-21 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 1.....	132
ภาพประกอบ 5-22 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 2 .....	133
ภาพประกอบ 5-23 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 2.....	134
ภาพประกอบ 5-24 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 3 .....	135
ภาพประกอบ 5-25 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 3.....	136

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 5-26 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสถานะโหลดสูงสุดกรณีที่ 4 .....	137
ภาพประกอบ 5-27 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสถานะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 4.....	138
ภาพประกอบ 6-1 การรวมของสัญญาณความถี่หลักมูลและสัญญาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 .....	143
ภาพประกอบ 6-2 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และอิมพีแดนซ์.....	143
ภาพประกอบ 6-3 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิก .....	145
ภาพประกอบ 6-4 ปัจจัยการเกิดผลกระทบฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กึ่งนำสน.....	145
ภาพประกอบ 6-5 วงจรอนุกรม RLC.....	146
ภาพประกอบ 6-6 วงจรขนาน RLC .....	147
ภาพประกอบ 6-7 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมต่ออิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้า .....	148
ภาพประกอบ 6-8 รูปแบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบเรเดียลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย ทู่กึ่งนำสนนอกชายฝั่ง .....	149
ภาพประกอบ 6-9 คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าในสถานะโหลดสูงสุดก่อนเชื่อมต่อ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กึ่งนำสนนอกชายฝั่ง .....	151
ภาพประกอบ 6-10 คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าในสถานะโหลดต่ำสุดก่อนเชื่อมต่อ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กึ่งนำสนนอกชายฝั่ง.....	152
ภาพประกอบ 6-11 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดสูงสุดกรณีที่ 1.....	153
ภาพประกอบ 6-12 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 1 .....	155
ภาพประกอบ 6-13 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดสูงสุดกรณีที่ 2.....	156
ภาพประกอบ 6-14 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 2.....	157
ภาพประกอบ 6-15 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดสูงสุดกรณีที่ 3.....	158
ภาพประกอบ 6-16 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 3 .....	159
ภาพประกอบ 6-17 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดสูงสุดกรณีที่ 4.....	160
ภาพประกอบ 6-18 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สถานะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 4 .....	161
ภาพประกอบ 6-19 ตัวอย่างอัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อปรับความยาวสายส่งระหว่าง ตำแหน่งบัสรวมและกึ่งนำสนกรณีที่ 1 ภายใต้สถานะโหลดสูงสุด.....	163
ภาพประกอบ 7-1 แผนภาพเส้นเคียวจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย ทู่กึ่งนำสนนอกชายฝั่ง .....	173

**สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ**

AEP	Annual Energy Production
BESS	Battery Energy Storage System
C.F.	Capacity Factor
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
DG	Distributed Generation
DSL	Dynamic Simulation Language
EMT	Electromagnetic Transient
FRTC	Fault-Ride Through Capability
GWEC	Global Wind Energy Council
HVAC	High Voltage Alternative Current
HVDC	High Voltage Direct Current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LCC	Line Commutated Converter
LVRT	Low-Voltage Ride Through
RMS	Root Mean Square
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
SCR	Short Circuit Ratio
SPP	Small Power Producer
THD	Total Harmonic Distortion
VSC	Voltage Source Converter
VSPP	Very Small Power Producer
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
WTG	Wind Turbine Generator
ZVRT	Zero-Voltage Ride Through



## บทที่ 1

### บทนำ

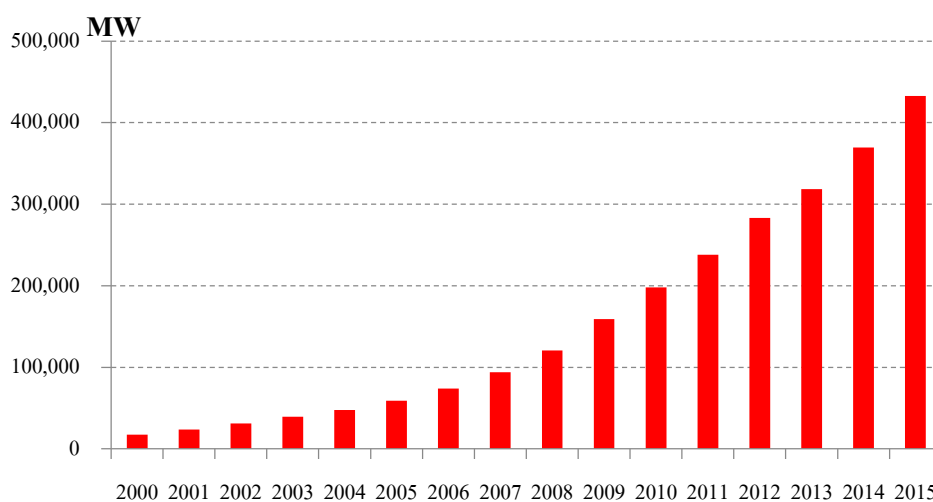
#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และเป็นปัจจัยพื้นฐานในการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีการใช้งานทั้งในภาคอุตสาหกรรมครัวเรือนและการดำเนินชีวิตประจำวัน ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่อาศัยเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เพราะเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก เหมาะแก่การใช้งานในปริมาณมาก แต่จะส่งผลเสียทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน เนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้พลังงานฟอสซิลที่กล่าวมาข้างต้นยังเป็นพลังงานที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้มีปริมาณลดน้อยลงและมีราคาเพิ่มสูงขึ้น

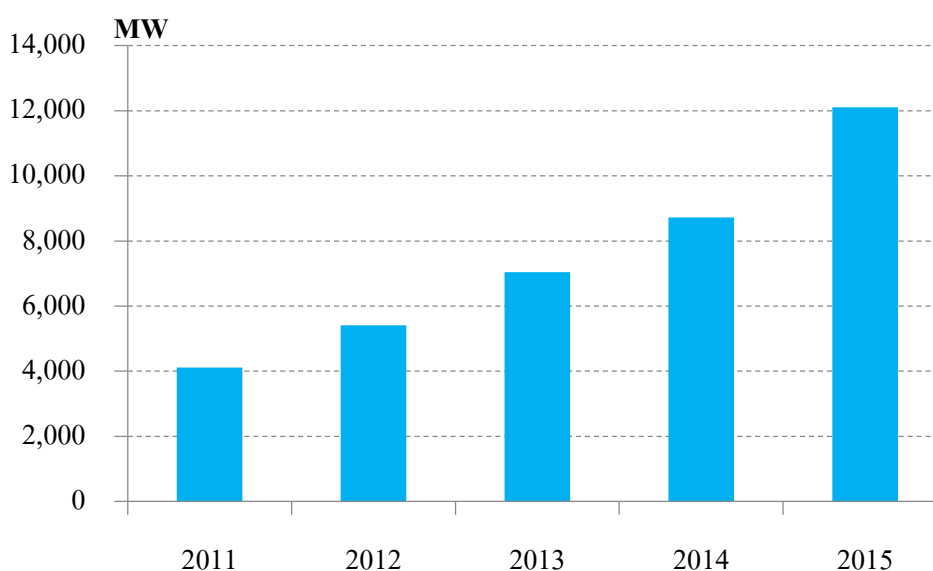
จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) [1] ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลัก โดยข้อมูลในปี 2554 ที่ผ่านมามีแนวโน้มว่าร้อยละ 60 ของการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์มาจากการนำเข้า เพราะฉะนั้นการพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังจะช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานอื่นๆ และยังช่วยกระจายความเสี่ยงการจัดการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้าของประเทศ ซึ่งเดิมต้องพึ่งพาก๊าซธรรมชาติเป็นหลักมากกว่าร้อยละ 70 โดยพลังงานหมุนเวียนถือเป็นเชื้อเพลิงเป้าหมายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อทดแทนพลังงานฟอสซิลที่หมดลงเรื่อยๆ พลังงานหมุนเวียนที่น่าสนใจได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพและขยะ

จากข้อมูลในรายงานประจำปีของ Global Wind Energy Council (GWEC) [2] พบว่าพลังงานลมเป็นแหล่งพลังงานที่มีอัตราการเติบโตสูงที่สุดในบรรดาพลังงานหมุนเวียนทั่วโลก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ไม่มีวันหมด ไม่สร้างมลพิษ ไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อม ทำให้มีการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ การนำพลังงานลมมาใช้ต้องอาศัยเครื่องจักรกลที่สำคัญได้แก่ กังหันลมในการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมเป็นพลังงานกลก่อนนำไปผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า เทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในระดับหลายเมกะวัตต์ โดยมีกำลังผลิตติดตั้งรวมทั้งโลกถึงปี 2015 ประมาณ 432,883 MW ซึ่งมีพัฒนาการของกำลังผลิตติดตั้งกังหันลมรวมของแต่ละปีแสดงดังภาพประกอบ 1-1 และเมื่อพิจารณาพลังงานลมในทะเลที่กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากเป็นแหล่งที่มีทรัพยากรล้น

เหมาะแก่การพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งขนาดใหญ่และยังลดปัญหาเรื่องพื้นที่การติดตั้งเมื่อเทียบกับการติดตั้งกังหันลมบนฝั่ง ภาพประกอบ 1-2 แสดงกำลังผลิตติดตั้งของกังหันลมในทะเลสะสมปี 2011-2015 ซึ่งมีกำลังผลิตติดตั้งเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 12,107 MW และได้มีการคาดการณ์กำลังผลิตติดตั้งกังหันลมในทะเลภายในปี 2020 จะเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 10 ของกำลังผลิตไฟฟ้าทั่วโลก



ภาพประกอบ 1-1 กำลังผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าสะสมรายปีทั่วโลก [2]

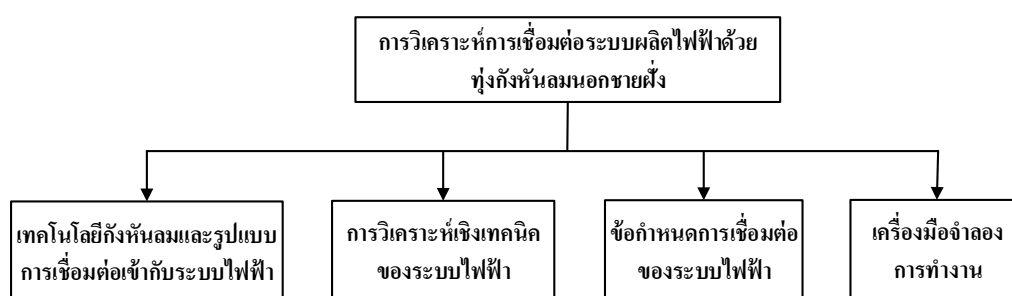


ภาพประกอบ 1-2 กำลังผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในทะเลสะสมปี 2011-2014 [2]

สำหรับประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมภายในปี 2564 เป็น 1,200 MW จากปัจจุบันที่มีกำลังผลิตเพียง 223 MW และข้อมูลจากวารสาร MegaTech [3] ได้ระบุผลการวิจัยของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (สกว.) พบว่าพลังงานลมในอ่าวไทยมีความสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 10,000 MW ซึ่งถือว่ามีศักยภาพสูงมาก โดยเฉพาะในบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และสงขลา ทั้งนี้ความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศมีประมาณ 30,000 MW ซึ่งจะช่วยทดแทนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างมาก นอกจากนี้ผลการประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลและความเป็นไปได้เบื้องต้นของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่ง [4] พบว่าพื้นที่บริเวณรอบๆ เกาะเต่าและเกาะพะงันในอ่าวไทยเป็นแหล่งที่มีศักยภาพลมดีมีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 6.0-7.5 m/s เหมาะกับการพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งในรูปแบบผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่มีกำลังผลิตติดตั้งรวม 720 MW มีค่าประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า คำนวณจากค่าตัวประกอบกำลังผลิต (Capacity Factor, C.F.) ประมาณร้อยละ 14.13–17.60 ซึ่งจะช่วยให้ภาคใต้ของประเทศไทยมีแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้อย่างเพียงพอ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างโรงไฟฟ้าถ่านหินหรือโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่เนื่องจากการเชื่อมต่อบริเวณผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้าจะทำให้การไหลของพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคง เสถียรภาพ และคุณภาพของระบบไฟฟ้า [5-6] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ผลกระทบเชิงเทคนิคที่เกิดขึ้นเพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้า จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการวิเคราะห์การเชื่อมต่อบริเวณผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าจะแบ่งการจำลองการทำงานออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ 1) การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ประกอบด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้า [7-14] การเปลี่ยนแปลงแรงดัน [10, 11, 14] เสถียรภาพแรงดัน [7, 8, 15, 16] และกระแสลัดวงจร [9-14] 2) การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต ประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมเหตุการณ์เชื่อมต่อ [12-14] สายส่งเหตุการณ์เชื่อมต่อ [9, 12, 13, 14] หม้อแปลงเหตุการณ์เชื่อมต่อ [12] การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส [9, 11, 12, 13, 14, 16] และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม [10, 12, 13, 14] ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์ความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นหลัก แต่การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าจะพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงแรงดันเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอที่จะยืนยันได้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่เชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าจะยังคงรักษาคุณภาพไฟฟ้าและไม่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหายจนไม่สามารถส่งพลังงานไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า นอกจากนี้ชนิดของกังหันลมที่ใช้จำลองการทำงานจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าแตกต่างกันแบ่งเป็น 4 ชนิดประกอบด้วย กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ

กรงกระรอก [7] กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด [11] กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16] และกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ [9, 11, 15] ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลม [11] พบว่ากังหันลมที่ใช้เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบจะช่วยให้ระบบไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดโอกาสการเกิดทู่กังหันลมเหตุการณ์เชื่อมต่อได้ดีที่สุด นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ [4] ยังได้ระบุว่ากังหันลมยี่ห้อ Vestas รุ่น V112 ซึ่งเป็นกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบมีความเหมาะสมกับการติดตั้งบริเวณเกาะเต่าและเกาะพะงันมากที่สุด

จากข้อมูลการวิจัยต่างๆ ทั้งในและต่างประเทศ ทางผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการวิเคราะห์การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยมี 4 ปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาได้แก่ เทคโนโลยีกังหันลมและรูปแบบการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์เชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้า ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้า และเครื่องมือจำลองการทำงาน ดังแสดงในภาพประกอบ 1-3



ภาพประกอบ 1-3 ปัจจัยการวิเคราะห์การเชื่อมต่อ

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการวิเคราะห์การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กังหันลมนอกชายฝั่งบริเวณเกาะเต่าและเกาะพะงันเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการใช้เทคโนโลยีกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบยี่ห้อ Vestas รุ่น V112 เชื่อมผ่านสายส่งแรงสูงแบบ HVAC ที่ระดับแรงดัน 115 kV โดยทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต และเพิ่มการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ซึ่งดำเนินการอยู่ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และใช้โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory จำลองการทำงาน เพื่อเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กังหันลมนอกชายฝั่งต่อไป

## 1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 Stability Analysis of Wind Energy Generation in the Electrical System of Puerto Rico [7] งานวิจัยนี้เขียน โดย R.D. Zamora และ M. A. Rosado ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศเปอร์โตริโก ด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันและการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการติดตั้งกังหันลมจำนวน 10 บัส ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยตามตำแหน่งที่ตั้งได้แก่ กลุ่มทิศเหนือ กลุ่มทิศตะวันออกและกลุ่มทิศใต้ โดยการวิเคราะห์จะจำลองสถานการณ์การเพิ่มขึ้นของพลังงานลมเป็นร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ของกำลังผลิตติดตั้ง ผลการจำลองการทำงานแสดงด้วยกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายโหลดระดับแรงดันต่ำสุดก่อนเกิดการพังทลายของแรงดัน และปริมาณภาระโหลดที่เกิดขึ้นในสายส่ง

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดและปริมาณภาระโหลดของสายส่งที่เปลี่ยนแปลงหลังเชื่อมต่อกังหันลมเข้าสู่ระบบไฟฟ้า แต่ไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน กระแสลัดวงจรรวมถึงการจำลองการทำงานของระบบฟ้าในสภาวะพลวัตและผลกระทบของฮาร์มอนิก

1.2.2 Study of Voltage Stability for 22 kV Power System Connected with Lamtakhong Wind Power Plant, Thailand [8] งานวิจัยนี้เขียน โดย K. Bhumkittipich และ C. Jan-Ngurn ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV เพื่อศึกษาข้อจำกัดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้โหลดได้สูงสุดก่อนเกิดการพังทลายของแรงดันหลังการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมต่ำตะคอง ซึ่งใช้กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางจำนวน 2 ต้น กำลังผลิตติดตั้งรวม 2.5 MW ทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะโหลดสูงสุดก่อนและหลังเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานที่ได้แสดงด้วยปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถจ่ายโหลด รวมถึงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดใช้งาน นอกจากนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นก่อนและหลังเชื่อมต่อกังหันลม

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน กระแสลัดวงจร รวมทั้งการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตและฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

### 1.2.3 Voltage Stability Analysis of Grids Connected Wind Generators [15]

งานวิจัยนี้เขียนโดย N. T. Linh และ T. T. Chuong ได้นำเสนอวิธีการการศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์เส้นโค้ง P-V เส้นโค้ง V-Q และเส้นโค้ง P-Q เพื่อประเมินผลกระทบการติดตั้งกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบในระบบไฟฟ้ามาตรฐาน IEEE 20 บัส โดยการเปรียบเทียบปริมาณโหลดสูงสุดที่ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายได้ก่อนเกิดการพังทลายของแรงดันเมื่อมีและไม่มี การติดตั้งกังหันลมในระบบไฟฟ้า โดยในกระบวนการวิเคราะห์ได้เลือกใช้เส้นโค้ง P-V แสดงผลการจำลองการทำงาน เนื่องจากกังหันลมที่ใช้มีความสามารถควบคุมกำลังประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า โดยไม่ได้ให้ความสนใจการวิเคราะห์คุณลักษณะอื่นๆ ของระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว รวมทั้งไม่มีการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต และการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้า

### 1.2.4 Capacity and Location Effects of Wind Turbine Energy Systems on Power

Systems Stability [16] งานวิจัยนี้เขียนโดย S. M. Said, M. M. Aly และ M. Abdek-Akher ได้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งและกำลังผลิตติดตั้งของกังหันลมที่เหมาะสมจากการติดตั้งกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางเข้ากับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน IEEE 9 บัส ด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันและการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส โดยตำแหน่งที่เหมาะสมกับการติดตั้งกังหันลมควรเป็นตำแหน่งบัสอ่อนแอของระบบไฟฟ้า นั่นคือบัสที่มีปริมาณโหลดสูงสุด สำหรับกำลังผลิตติดตั้งและตัวประกอบกำลังที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันและการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่บัสจะมีค่าแตกต่างกัน ค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับผลจากการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสเป็นหลัก เนื่องจากผลกระทบดังกล่าวมีความรุนแรงต่อระบบไฟฟ้ามากกว่า

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงการหาตำแหน่งการติดตั้งกังหันลมที่เหมาะสมจากการพิจารณาเสถียรภาพแรงดันและจำลองการลัดวงจรไฟฟ้าแบบ 3 เฟสเท่านั้น โดยยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า กระแสลัดวงจร การเปลี่ยนแปลงแรงดัน รวมถึงการจำลองการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับกังหันลม สายส่ง และความผันผวนจากความเร็วลม นอกจากนี้ยังไม่ได้วิเคราะห์ความผิดปกติของสัญญาณที่เกิดจากผลกระทบของฮาร์มอนิก

1.2.5 Kriegers Flak 640 MW Offshore Wind Power Grid Connection-A Real Project Case Study [9] งานวิจัยนี้เขียน โดย D. Andersson, A. Petersson, E. Agneholm และ D. Karlsson ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่ง Kriegers Flak ขนาด 640 MW ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย E.ON ขนาดแรงดัน 130 kV ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศสวีเดน โดยจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า กระแสลัดวงจร และการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต ซึ่งประกอบด้วย การเกิดสายส่งหลุดการเชื่อมต่อและการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส โดยให้ความสนใจชนิดของกังหันลมที่ใช้จำลองการทำงาน 2 ชนิดได้แก่ กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางและกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ เนื่องจากกังหันลมดังกล่าวมีความสามารถทนความผิดปกติ (Fault-Ride Through Capability, FRTC) ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า แต่กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางจะมีค่ากระแสลัดวงจรเริ่มต้นที่สูงกว่าชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้แสดงผลการวิเคราะห์ชนิดของกังหันลมที่เหมาะสมของการติดตั้งกังหันลมอย่างชัดเจน อีกทั้งยังไม่ได้ให้ความสนใจการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน เสถียรภาพแรงดัน ฮาร์มอนิก การเกิดความผิดปกติของกังหันลมและความผันผวนที่เกิดจากความเร็วลม เมื่อมีการเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า

1.2.6 Choice of Interconnected Points for Large-Scale Offshore Wind Farms in Taiwan [10] งานวิจัยนี้เขียน โดย Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, C.-J. Chou และ W.-M. Liao ได้นำเสนอวิธีการเลือกจุดเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่งในประเทศไต้หวันที่มีกำลังผลิตติดตั้ง 864 MW โดยมีจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ทั้งหมด 21 จุดเชื่อมต่อทางด้านชายฝั่งตะวันตกของประเทศ และใช้แบบจำลองของกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางจำลองการทำงาน สำหรับหลักเกณฑ์การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าคำนวณค่า SCR (Short Circuit Ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนกระแสลัดวงจรสูงสุดก่อนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่งและกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่งที่จุดเชื่อมต่อแต่ละจุด ( $SCR = SCC/S_{base}$ ) ถ้าค่า SCR น้อยกว่า 6 แสดงว่าจุดเชื่อมต่อ นั้นเป็นจุดที่อ่อนแอในระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม นอกชายฝั่งและการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ซึ่งประกอบด้วยลมกระโชก (Wind Speed Gust) ความเร็วลมเพิ่มขึ้นทันที (Wind Ramp Up) และความเร็วลมลดลงทันที (Wind Ramp Down) โดยในการวิเคราะห์จะจำลองการทำงานของกังหันลมเป็น 2 โหมดนั่นคือ โหมดควบคุมแรงดัน (Voltage Control Mode หรือ PV

Mode,  $V=1$ ) และ โหมดควบคุมตัวประกอบกำลัง (Power Factor Control Mode หรือ PQ Mode,  $pf=1$ ) ผลการจำลองการทำงานพบว่า การทำงานของกังหันลมในโหมดควบคุมแรงดันจะช่วยให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันหลังการเชื่อมต่อบนผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นยังมีความสัมพันธ์กับค่า SCR โดยจุดเชื่อมต่อที่มีค่า SCR น้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูง ในส่วนการการเปลี่ยนแปลงแรงดันจากความผันผวนของความเร็วลมเลือกใช้โหมดการควบคุมแรงดันจำลองการทำงาน ผลที่ได้พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงแรงดันที่รุนแรงแตกต่างกัน การเกิดลมกระโชกจะทำให้แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงรุนแรงมากที่สุดประมาณร้อยละ 0.1–1.0 รองลงมาคือ การเกิดความเร็วลมลดลงทันทีจะทำให้แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2–0.7 และสุดท้ายการเกิดความเร็วลมเพิ่มขึ้นทันทีจะทำให้แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.15–0.25 ซึ่งจะต้องมีการจ่ายหรือลดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากกังหันลมเพื่อให้แรงดันกลับเข้าสู่สภาวะปกติ นอกจากนี้ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงยังส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของกังหันลมและความถี่ของระบบไฟฟ้าด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเพียงวิธีการเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมจากอัตราส่วน SCR และผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันเมื่อเชื่อมต่อบนผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าและการเกิดความผันผวนของความเร็วลม โดยที่ไม่ได้ให้ความสนใจการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ารวมทั้งการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพแรงดัน และฮาร์มอนิก

1.2.7 Taiwan's First Large-Scale Offshore Wind Farm Connection-A Real Project Case Study with a Comparison of Wind Turbine [11] งานวิจัยนี้เขียน โดย Y.-K. Wu, C.-Y. Lee และ G.-H. Shu ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง Jhang-Bin ขนาด 108 MW เข้ากับสถานี Sian-Si H แรงดัน 161 kV ในประเทศไต้หวัน โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกังหันลมผลิตไฟฟ้า 3 ชนิดประกอบด้วย กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ ซึ่งทำการวิเคราะห์เชิงเทคนิคที่สำคัญต่อระบบไฟฟ้าได้แก่ การไหลของกำลังไฟฟ้า กระแสลัดวงจร การเปลี่ยนแปลงแรงดัน และการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส ผลการจำลองการทำงานพบว่า การเชื่อมต่อบนผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งขนาด 108 MW จะไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณภาระโหลดของสายส่งทั้งสภาวะปกติ (N-0) และสภาวะฉุกเฉิน (N-1) ในส่วนระดับกระแสลัดวงจรสูงสุด กังหันลมทั้ง 3 ชนิดยังคงรักษาระดับกระแสลัดวงจรไม่ให้เกินค่าพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์เดิมของระบบไฟฟ้า โดยกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์



เต็มรูปแบบจะมีค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดเมื่อเทียบกับกังหันลมอีก 2 ชนิด สำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกิดขึ้นกับกังหันลมทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักเป็นนัยสำคัญและยังคงอยู่ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ ( $\pm 2.5\%$ ) และสุดท้ายการจำลองการลัดวงจรไฟฟ้าแบบ 3 เฟสจะจำลองการเกิดลัดวงจรที่บัส Jhang-Bin E แรงดัน 345 kV และบัส Jhang-Bin H แรงดัน 161 kV ในสถานะโหลดสูงสุด (Peak System) และสถานะโหลดต่ำสุด (Off-Peak System) ผลปรากฏว่าการลดลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อจะส่งผลให้กังหันลมมีโอกาสหลุดการเชื่อมต่อมากกว่าการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะอื่นๆ โดยกังหันลมทั้ง 3 ชนิดจะมีความสามารถทนการลดลงของแรงดันที่แตกต่างกัน กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวดจะมีเพียงรีเลย์ป้องกันในกังหันลมเท่านั้น ทำให้มีโอกาสสูงที่กังหันลมจะหลุดการเชื่อมต่อได้ง่าย ส่วนกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางจะมีความสามารถทนแรงดันต่ำ (Low-Voltage Ride Through, LVRT) เนื่องจากมีความสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟทำให้สามารถทนต่อสถานะแรงดันต่ำรวมถึงการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ และสุดท้ายกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบจะมีความสามารถพิเศษเพิ่มเติมจากกังหันลมชนิดอื่นนั่นคือ การทนสถานะแรงดันตกเป็นศูนย์ (Zero-Voltage Ride Through, ZVRT) ในช่วงเวลา 0.5–5 วินาที ทำให้โอกาสหลุดการเชื่อมต่อของกังหันลมน้อยที่สุด ดังนั้นกังหันลมชนิดนี้จึงมีความสามารถช่วยให้ระบบไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลม 3 ชนิดจากการวิเคราะห์กระแสลัดวงจร การเปลี่ยนแปลงแรงดัน และการลัดวงจรไฟฟ้าแบบ 3 เฟส แต่ยังไม่ได้อธิบายผลกระทบความผันผวนของความเร็วลม และความคิดเหี่ยของสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากการเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า

1.2.8 System Impact Study for the Future Large-Scale Offshore Wind Farm around Penghu Archipelago [12] งานวิจัยนี้เขียนโดย Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, H.-Y. Chao และ M.-J. Chang ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางขนาด 403.2 MW บริเวณเกาะ Penghu ในประเทศไต้หวัน จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรและจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต ซึ่งให้ความสนใจผลกระทบจากความผันผวนของความเร็วลมและการเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าประกอบด้วย กังหันลมหลุดการเชื่อมต่อ การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส การลดลงของความเร็วลมอย่างทันที สายเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อ และหม้อแปลงหลุดการเชื่อมต่อ ผลการจำลองการทำงานที่ได้พบว่าปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลงไปยังคงอยู่ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ ในส่วนการ

จำลองการทำงานในสภาวะพลวัตจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่รุนแรงแตกต่างกันและมีโอกาสทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมหยุดการเชื่อมต่อ หากระบบไฟฟ้าหรือกังหันลมไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อกลับเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการกำจัดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้า ยกเว้นหม้อแปลงหยุดการเชื่อมต่อเนื่องจากผลกระทบของโหลดที่หายไปกับสายป้อนของหม้อแปลงจะส่งผลให้แรงดันของระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและไม่มีผลกระทบใดๆ กับการทำงานของกังหันลม

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์การไหลของกำลังฟ้า กระแสลัดวงจร และให้ความสนใจการจำลองสถานการณ์การเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเป็นหลัก โดยไม่ได้วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน การเปลี่ยนแปลงแรงดันและฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่จะช่วยประเมินเสถียรภาพและคุณภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ

1.2.9 Onshore Wind Farm Planning and System Simulation Analysis under Low-Carbon-Island Project at Penghu [13] งานวิจัยนี้เขียนโดย Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, C.-R. Chen และ S.-H. Tsai ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์การจำลองการทำงานโครงการเกาะคาร์บอนต่ำบนเกาะ Penghu ในประเทศไต้หวัน โดยการใช้พลังงานลมเป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าแทนพลังงานฟอสซิล ซึ่งได้มีการวางแผนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมบนเกาะ 10 แห่ง มีกำลังผลิตติดตั้งรวม 147.6 MW และใช้กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง โดยขั้นตอนเริ่มต้นของแผนการดำเนินงานจะเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงเทคนิคที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมบนเกาะเข้ากับระบบไฟฟ้า ประกอบด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า กระแสลัดวงจร และการจำลองการทำงานในระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต ได้แก่ การเกิดความเร็วลมลดลงทันที การเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัส การเกิดสายส่งระหว่างบัสหยุดการเชื่อมต่อ และการเกิดหยุดการเชื่อมต่อของกังหันลม ผลจากการจำลองการทำงานกรณีศึกษาต่างๆ พบว่าไม่มีสายส่งเส้นใดในระบบไฟฟ้ามีปริมาณภาระโหลดเกินมาตรฐานและระดับแรงดันบัสยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่ค่ากระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีการเปลี่ยนแปลงเกินค่าพิกัดกระแสลัดวงจรจำนวน 3 จุด ซึ่งจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อรองรับการติดตั้งกังหันลมที่เพิ่มขึ้น ในส่วนการจำลองระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตสามารถยืนยันได้ว่าไม่มีกังหันลมใดหยุดการเชื่อมต่อจากระบบไฟฟ้าและไม่มีผลกระทบรุนแรงต่อแรงดัน ความถี่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันเสถียรภาพแรงดัน ฮาร์มอนิก รวมทั้งพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมลดลงแบบทันที โดยไม่สนใจการเกิดลมกระโชกและการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมแบบทันที

1.2.10 Planning 10 Onshore Wind Farms with Corresponding Interconnection Network and Power System Analysis for Low-Carbon-Island Development on Penghu Island, Taiwan [14] งานวิจัยนี้เขียนโดย Y.-K. Wu, G.-Y. Han และ C.-Y. Lee ได้นำเสนอการวิเคราะห์แผนการดำเนินงานโครงการระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมจำนวน 10 แห่งบนเกาะ Penghu ในประเทศไต้หวัน ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 143.4 MW ใช้กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเป็นเกาะคาร์บอนต่ำที่สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 50 ภายในปี 2015 ซึ่งขั้นตอนเริ่มต้นของแผนดำเนินงานจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงเทคนิคที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าประกอบด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า กระแสลัดวงจร การเปลี่ยนแปลงแรงดัน และการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต เพื่อตรวจสอบความสามารถของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติหรือความผันผวนของความเร็วลม โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นและลดลง การหลุดการเชื่อมต่อของสายส่ง การหลุดการเชื่อมต่อของกังหันลม และการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้าประกอบด้วย อัตราส่วนโวลตจของแต่ละสายส่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 12–71 หลังการเชื่อมต่อกังหันลมซึ่งไม่เกินข้อกำหนดการเชื่อมต่อ กระแสลัดวงจรหลังเชื่อมต่อกังหันลมมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1-6 kA แต่ยังคงอยู่ภายใต้พิสัยของเซอร์กิตเบรกเกอร์เดิมในระบบไฟฟ้า ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโหมดควบคุมการทำงานของกังหันลม โดยโหมดควบคุมตัวประกอบกำลังจะส่งผลให้แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าโหมดควบคุมแรงดัน อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ต้องมีขนาดใหญ่กว่าเนื่องจากได้รับผลกระทบจากกระแสอัดประจุในสายส่ง นอกจากนี้ผลการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ทั้ง 2 โหมดควบคุมพบว่า โหมดควบคุมแรงดันมีความเหมาะสมกับการดำเนินการของระบบไฟฟ้าบนเกาะ Penghu มากกว่า เนื่องจากโหมดควบคุมแรงดันจะได้รับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้อยเมื่อเกิดความผันผวนของความเร็วลม นอกจากนี้การทำงานในโหมดควบคุมตัวประกอบกำลังยังจำกัดความสามารถการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในส่วนการลัดวงจรไฟฟ้าแบบ 3 เฟสที่บัส ขนาดแรงดัน 11.4 kV และ 69 kV จะไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งกังหันลมหลุดการเชื่อมต่อจากระบบไฟฟ้า และการจำลองกังหันลมหลุดการเชื่อมต่อก็ไม่ส่งผลให้กังหันลมอื่นๆ หลุดการเชื่อมต่อด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันและผลกระทบจากความผิดปกติของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากฮาร์มอนิกเมื่อมีการเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าบนเกาะ Penghu

1.2.11 การประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลและความเป็นไปได้เบื้องต้นของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล [4] งานวิจัยนี้เขียนโดย จอมภพ แววศักดิ์, กุศุมลย์ เฉลิมยานนท์, พะยอม รัตนมณี, ธเนศ ไชยชนะ และ จลอง แก้วประเสริฐ ได้นำเสนอการประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลและความเป็นไปได้เบื้องต้นของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล โดยทำการศึกษาคลอบคลุมพื้นที่บริเวณนอกชายฝั่งทะเลภาคใต้ของประเทศไทยที่มีพื้นที่ทั้งหมด 115,534 ตารางกิโลเมตร ผลจากการวิเคราะห์แผนที่ลมในระดับเมโซสเกล (Meso-Scale) ที่มีความแยกชัด 5 km และระดับจุลภาค (Micro-Scale) ที่มีความแยกชัด 200 m ในระดับความสูง 80 m, 100 m และ 120 m เหนือพื้นดิน สามารถวิเคราะห์พื้นที่ที่สามารถพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลภาคใต้ในรูปแบบผู้ผลิตไฟฟ้าย่อยเล็ก (Small Power Producer, SPP) 3 บริเวณด้วยกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 1-4 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. บริเวณทิศเหนือของเกาะเต่า มีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 6.0-6.5 m/s สามารถพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งที่มีกำลังผลิตติดตั้ง 180 MW

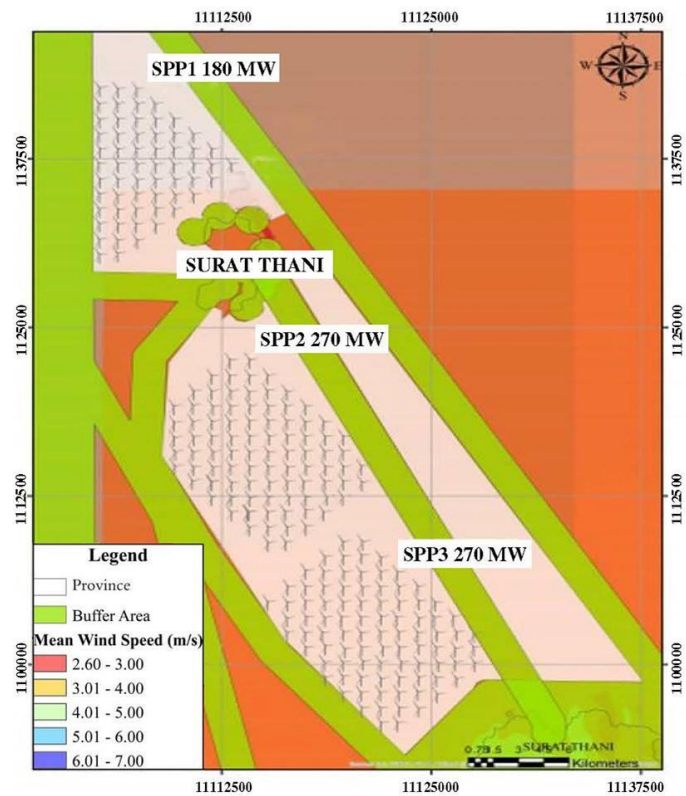
2. บริเวณทิศใต้ของเกาะเต่า มีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 6.0-6.5 m/s สามารถพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งที่มีกำลังผลิตติดตั้ง 270 MW

3. บริเวณทิศตะวันตกเฉียงเหนือของเกาะพะงัน มีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 6.0-6.5 m/s สามารถพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งที่มีกำลังผลิตติดตั้ง 270 MW

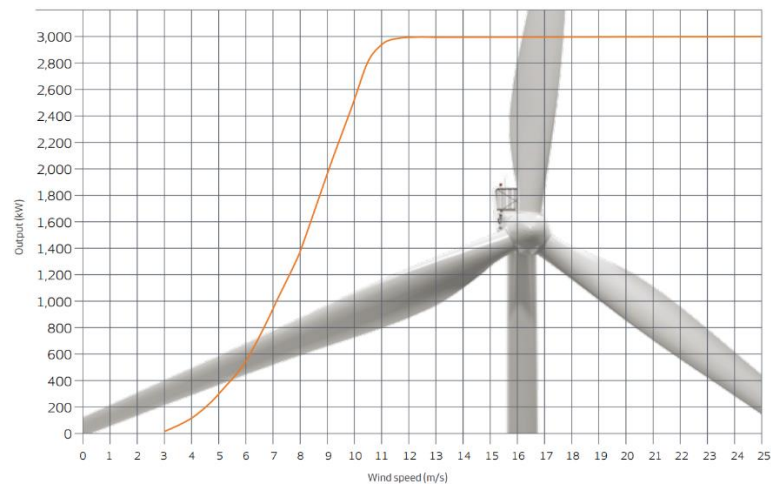
สำหรับการคัดเลือกชนิดกังหันลมที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ติดตั้งและอัตราเร็วลมบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้ของประเทศไทยสามารถคัดเลือกออกมาได้ 5 รุ่น ดังนี้

1. Vestas V112
2. Vestas V164
3. Siemens WST-3.6
4. RE Power RE6000
5. Sinovel SL5000

จากชนิดกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั้ง 5 รุ่นเมื่อนำไปวิเคราะห์หน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีเพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยกังหันลมจากค่า C.F. พบว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้ายี่ห้อ Vestas รุ่น V112 มีค่า C.F. สูงที่สุดทุกกรณี ดังนั้นกังหันลมชนิดนี้จึงมีความเหมาะสมกับพื้นที่ติดตั้งดังกล่าวมากที่สุด โดยมีเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและคุณลักษณะของกังหันลมดังแสดงในภาพประกอบ 1-5 และตาราง 1-1 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 1-4 พื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม  
นอกชายฝั่งภาคใต้ของประเทศไทย [4]



ภาพประกอบ 1-5 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าของกังหันลมยี่ห้อ Vestas รุ่น V112 [17]

ตาราง 1-1 คุณสมบัติของกังหันลมผลิตไฟฟ้ายี่ห้อ Vestas รุ่น V112 [17]

WTG	Generator	Converter	Rotor diameter (m)	Hub height (m)	Rated capacity (MW)	Rate speed (m/s)	Cut-in speed (m/s)	Cut-off speed (m/s)	Swept area (m <sup>2</sup> )
Vestas V112	Permanent magnet generator	Full scale converter	112	119	3	12.5	3	25	9,852

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเงื่อนไขและปัจจัยการวิเคราะห์การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
2. เพื่อวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
3. เพื่อเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พร้อมเสนอแนะแนวทางการดำเนินงานที่เหมาะสม

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เงื่อนไขและปัจจัยการวิเคราะห์การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
2. วิธีการเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
3. จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
4. ผลการวิจัยที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางอ้างอิงในการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งในอนาคตต่อไป

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิเคราะห์ของงานวิจัยทั้งหมดถูกจำลองขึ้นในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน DIgSILENT PowerFactory
2. จำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งบริเวณทิศเหนือของเกาะเต่า (SPP 1) ทิศใต้ของเกาะเต่า (SPP 2) และทิศตะวันตกเฉียงเหนือของเกาะพะงัน (SPP 3) ซึ่งมีกำลังผลิตติดตั้งเท่ากับ SPP1 180 MW, SPP2 270 MW และ SPP3 270 MW ตามลำดับ
3. การวิเคราะห์เชิงเทคนิคทั้งหมดถูกดำเนินการอยู่ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551
4. การวิเคราะห์การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งทั้งหมดใช้แบบจำลองของกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบยี่ห้อ Vestas รุ่น V112 จำลองการทำงาน
5. การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้าเลือกใช้เทคโนโลยีสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบ HVAC ที่ระดับแรงดัน 115 kV
6. วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวและคุณภาพกำลังไฟฟ้าเมื่อมีและไม่มี การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง ประกอบด้วย การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงแรงดัน เสถียรภาพแรงดัน กระแสลัดวงจร และฮาร์มอนิก
7. จำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง ประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง หลุดการเชื่อมต่อ สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ การเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม

## 1.6 วิธีการวิจัย

วิธีการวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เริ่มด้วยการพิจารณาจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งทั้ง 3 โดยพิจารณาจากปัจจัยทางกายภาพของจุดเชื่อมต่อ ได้แก่ ปริมาณโหลดหม้อแปลงและระยะทางของจุดเชื่อมต่อ จากนั้นนำรูปแบบการเชื่อมต่อที่ได้เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์เชิงเทคนิคไฟฟ้า แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ประกอบด้วย การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต และการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

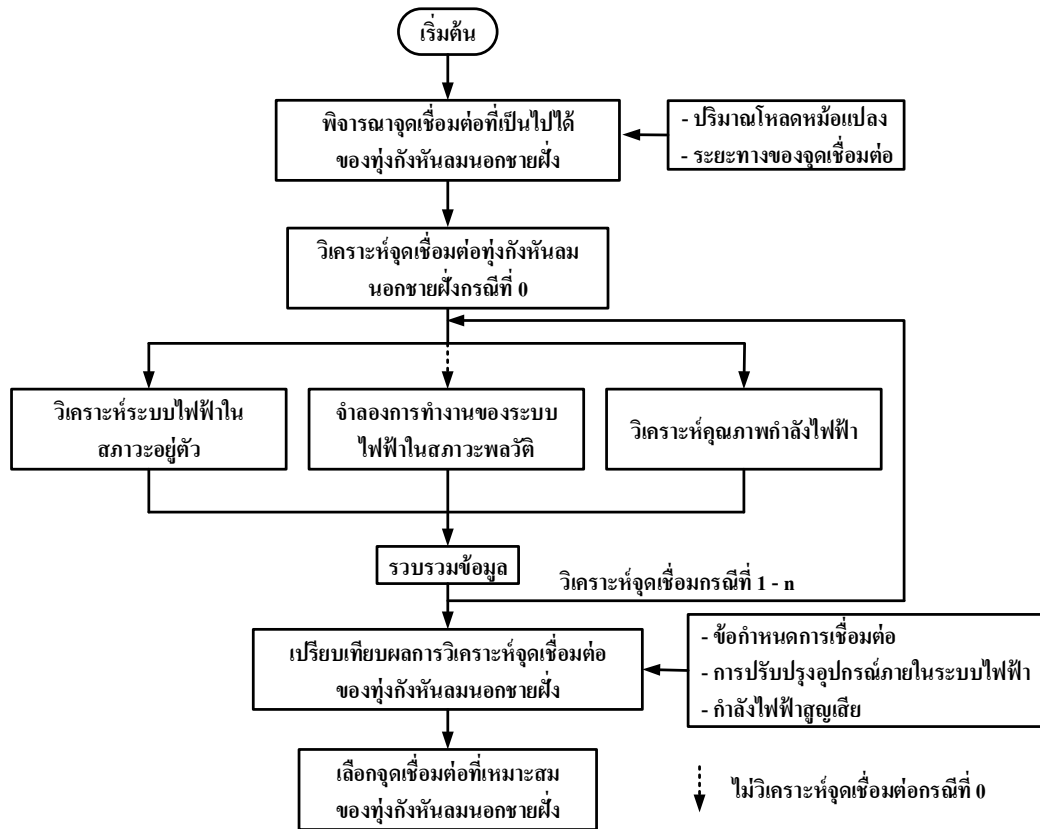
1. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว คือการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าเทียบกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประกอบด้วย การไหลของกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงแรงดัน เสถียรภาพแรงดัน และกระแสลัดวงจร

2. การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต คือการประเมินความสามารถของระบบไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นลมนอกชายฝั่งเมื่อเกิดความผิดปกติหรือความผันผวนของความเร็วลมประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นลมนอกชายฝั่ง หลุดการเชื่อมต่อ สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อเทียบกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

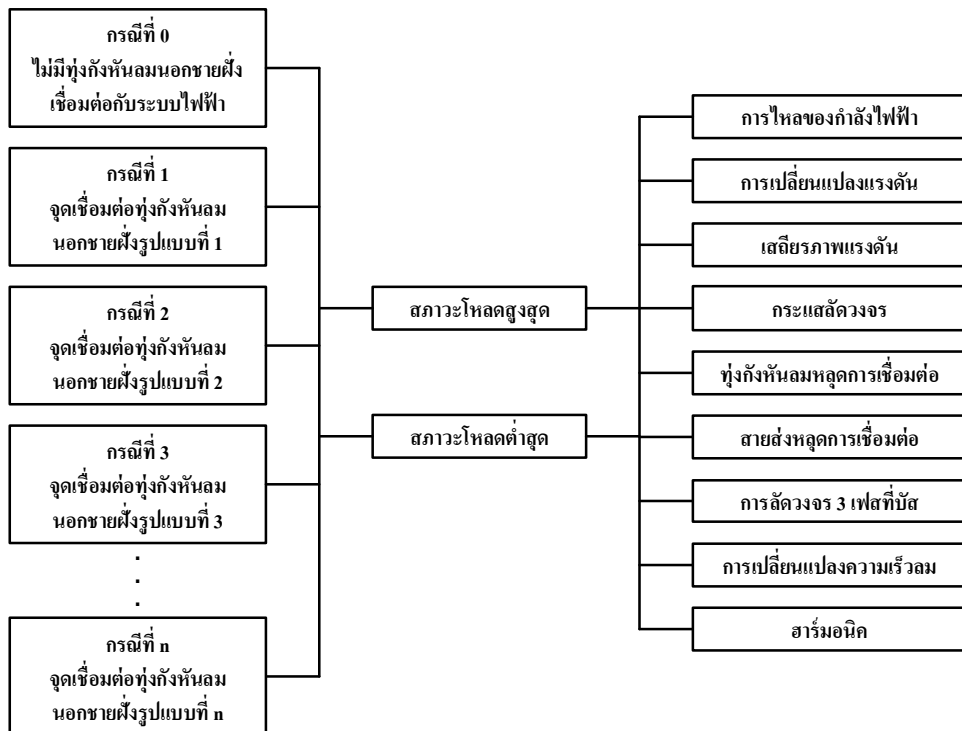
3. การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า คือการวิเคราะห์อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นลมนอกชายฝั่ง โดยพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของจุดเชื่อมต่อ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการขยายแรงดันฮาร์มอนิก นอกจากนี้อัตราส่วนการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่สามารถใช้ออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิก หากมีความจำเป็นต้องติดตั้งใช้งาน

การวิเคราะห์ทั้ง 3 ส่วนจะใช้แบบจำลองของกัณฑ์นลมนชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบยี่ห้อ Vestas รุ่น V112 จำลองการทำงาน ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 1-6 และมีกรณีศึกษาและหัวข้อการวิเคราะห์เชิงเทคนิคแสดงดังภาพประกอบ 1-7 ผลการจำลองการทำงานที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นลมนอกชายฝั่งทั้ง 3 ซึ่งพิจารณาจาก 3 ปัจจัยหลักได้แก่ ข้อกำหนดการเชื่อมต่ออ้างอิงจากระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551 การปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายหลังการเชื่อมต่อ โดยจะจำลองสถานการณ์โหลดของระบบไฟฟ้าทั้งสถานะโหลดสูงสุดและสถานะโหลดต่ำสุด เพื่อหากรณีวิกฤติของระบบไฟฟ้า





ภาพประกอบ 1-6 ลำดับขั้นตอนการวิจัย



ภาพประกอบ 1-7 กรณีศึกษาและหัวข้อการวิเคราะห์เชิงเทคนิค



## 1.8 โครงสร้างรายงานวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์แบ่งเนื้อหาเป็น 8 บท มีรายละเอียดแสดงดังนี้  
 บทที่ 2 นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลังและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้ง  
 กังหันลมนอกชายฝั่ง รวมถึงแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่ง

บทที่ 3 นำเสนอวิธีการประเมินจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย  
 ทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่ง รวมถึงอธิบายหลักการวิเคราะห์เชิงเทคนิคและแนะนำการใช้งาน  
 โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory เบื้องต้น

บทที่ 4 นำเสนอทฤษฎีและหลักการ วิธีการ ผลการจำลองการทำงาน การอภิปราย  
 และสรุปผลกระทบเชิงเทคนิคของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ประกอบด้วย การไหล  
 ของกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงแรงดัน เสถียรภาพแรงดัน และกระแสลัดวงจร

บทที่ 5 นำเสนอทฤษฎีและหลักการ วิธีการ ผลการจำลองการทำงาน การอภิปราย  
 และสรุปผลกระทบเชิงเทคนิคของการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต  
 ประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมหลุดการเชื่อมต่อ สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ การ  
 ลัดวงจร 3 เฟส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม

บทที่ 6 นำเสนอทฤษฎีและหลักการ วิธีการ ผลการจำลองการทำงาน การอภิปราย  
 และสรุปผลกระทบเชิงเทคนิคของการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

บทที่ 7 นำเสนอหลักเกณฑ์และผลการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบ  
 ผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รวมถึงการ  
 แนะนำแนวทางแก้ไขผลกระทบเชิงเทคนิคที่เกิดขึ้น

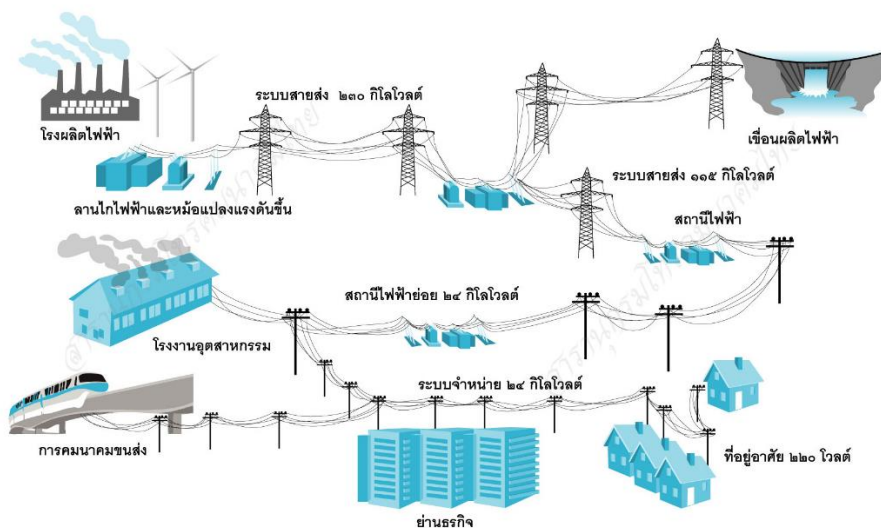
บทที่ 8 นำเสนอบทสรุปของงานวิจัย ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม และแนวทางการ  
 ดำเนินงานที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

### การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ่งกั้นหมอนอกชายฝั่ง

#### 2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันถูกต่อเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายดังภาพประกอบ 2-1 โดยทั่วไปจะจำแนกเป็น 3 ส่วนย่อยได้แก่ ระบบผลิต (Generation System) ระบบส่ง (Transmission System) และระบบจำหน่าย (Distribution System) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 2-1 โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลัง

ที่มา: <http://thaitelecomkm.org/>

1. ระบบผลิต หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าโรงไฟฟ้า เป็นระบบที่เปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานรูปอื่นเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น เปลี่ยนจากพลังงานศักย์ของน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเปลี่ยนพลังงานความร้อนจาก ถ่านหิน แก๊ส น้ำมัน เป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการที่เปลี่ยนพลังงานรูปอื่นเป็นพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะผ่านรูปของพลังงานกลก่อนเสมอและใช้พลังงานกลเป็นตัวขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยทั่วไปมีค่าไม่เกิน 20 kV จำเป็นต้องเพิ่มขนาดแรงดันก่อนส่งผ่านระบบส่ง โดยขนาดแรงดันขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใช้ส่งเป็นสำคัญ

2. ระบบส่ง คือระบบที่รับแรงดันจากระบบผลิตเพื่อส่งไปยังระบบจำหน่ายโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแปลงแรงดันขึ้น (Step-Up Transformer) เพื่อแปลงแรงดันจากระบบผลิตให้สูงขึ้น ซึ่งมีสายส่งพลังงานไฟฟ้าทำหน้าที่เชื่อมโยงไปยังระบบจำหน่าย สำหรับประเทศไทย ระดับแรงดันของระบบส่งไฟฟ้ามีขนาด 69 kV, 115 kV, 230 kV และ 500 kV ระดับแรงดันเหล่านี้จะถูกแปลงให้ลดลงผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแปลงแรงดันลง (Step-Down Transformer) ก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายต่อไป

3. ระบบจำหน่าย คือระบบที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงระบบส่งกับผู้ใช้ไฟฟ้า โดยรับแรงดันที่ถูกลดให้ต่ำลงจากระบบส่ง ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทยมีขนาด 11 kV, 12 kV, 22 kV, 24 kV และ 33 kV และจ่ายไฟไปยังผู้ใช้ไฟผ่านหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution Transformer) เพื่อลดระดับแรงดันให้เหมาะสมกับผู้ใช้ไฟที่มีขนาด 220 V สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 380 V สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ทั้ง 3 ระบบที่กล่าวไปข้างต้น ทุกส่วนมีความสำคัญสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง หากขาดส่วนใดส่วนหนึ่งจะทำให้การส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และด้วยความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้ารวมถึงปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศของโลกที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่งผลให้มีความพยายามหาแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าจากธรรมชาติหรือพลังงานหมุนเวียน ซึ่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมมากคือ พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเรียกการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนทั้งพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์นี้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation, DG) ที่สามารถขายพลังงานไฟฟ้าให้กับทางการไฟฟ้า ซึ่งมีการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้า 2 ประเภทดังนี้

1. ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer, SPP) คือการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้าร่วมกัน หรือการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีกำลังผลิตระหว่าง 10–90 MW

2. ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก (Very Small Power Producer, VSPP) คือการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้าร่วมกัน หรือการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีกำลังผลิตไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW

การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวดังกล่าว โดยเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าที่อาศัยพลังงานหมุนเวียนเป็นเชื้อเพลิง ถึงแม้จะมีข้อดีหลายประการ เช่น ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ แหล่งพลังงานที่ใช้มีความสะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะจากการผลิตไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจะส่งผลกระทบต่อเชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้า

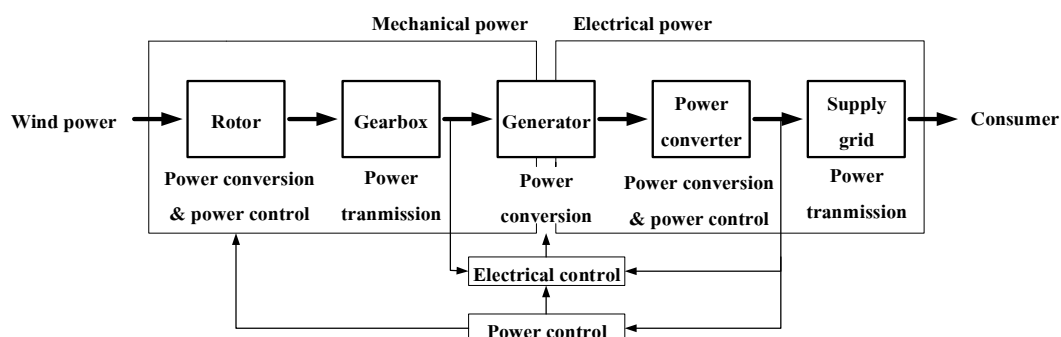
โดยเฉพาะผลกระทบต่อความมั่นคง เสถียรภาพ และคุณภาพของระบบไฟฟ้า เนื่องจากความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานส่งผลให้ปริมาณกำลังผลิตไฟฟ้ามีการแกว่งตัวตลอดเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ผลกระทบเชิงเทคนิคไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบความสามารถการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟก่อนการเชื่อมต่อ

## 2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง คือการผลิตพลังงานไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ประกอบด้วยกลุ่มกังหันลมที่ติดตั้งในทะเลที่มีความแตกต่างกันทั้งชนิดของกังหันลมภายในกังหันลม รวมถึงรูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมผลิตไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากลมเป็นพลังงานกลด้วยการหมุนของใบพัด พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยรูปแบบการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแสดงดังภาพประกอบ 2-2

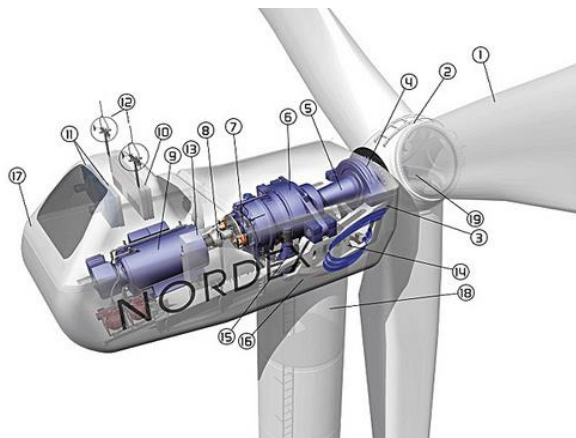


ภาพประกอบ 2-2 รูปแบบการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า [18]

กังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนหยุดนิ่ง (Stationary Part) และส่วนหมุน (Rotating Part) นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบตัวกังหันลมที่สำคัญอย่างเช่น ตัวอย่างส่วนประกอบที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่น Nordex N80 แสดงดังภาพประกอบ 2-3 ซึ่งประกอบด้วย

1. ใบพัด (Rotor Blades) ทำจากไฟเบอร์กลาสผสมพลาสติก
2. ศูนย์กลางใบพัด (Hub) ทำจากเหล็กหล่อ (Cast Iron)

3. ห้องเครื่องของกังหันลม (Turbine Frame) มีลักษณะเป็นท่อทำจากเหล็กหล่อซึ่ง  
เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อการสั่นและมีลักษณะลดการเกิดเสียง
4. ตลับลูกปืนของส่วนหมุน (Rotor Bearing) เป็นตลับลูกปืนทรงกลมแข็งสองชั้น  
มีลักษณะของกล่องเป็นท่อ
5. เพลาของส่วนหมุน (Rotor Shaft) มีลักษณะเป็นท่อทำจากเหล็กหล่อ
6. กล่องเกียร์ (Gearbox) เป็นแบบเกียร์ทศรอบ 2 ชั้น
7. จานเบรก (Disk Brake) ประกอบด้วยเบรกแบบปากคีบอยู่ที่เพลาความเร็วรอบ  
สูงของกล่องเกียร์
8. ส่วนคู่ควบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Coupling)
9. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) มีระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวเป็นแบบ  
อะซิงโครนัสแบบป้อนสองทาง
10. ตัวระบายความร้อน (Cooling Radiator) เป็นส่วนทำความเย็นสำหรับกล่อง  
เกียร์
11. พัดลมระบายความร้อน (Fan Coolers) สำหรับระบายความร้อนของเครื่อง  
กำเนิดไฟฟ้า
12. ระบบวัดลม (Wind Measuring System) ประกอบด้วยแอนิโมมิเตอร์และสรลม  
ซึ่งสามารถวัดเงื่อนไขของลมและส่งสัญญาณไปยังระบบควบคุมกังหันลม
13. ระบบควบคุม (Control System) ทำหน้าที่ติดตามและควบคุมการทำงานของ  
กังหันลม
14. ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) ทำหน้าที่รักษาและควบคุมความดัน  
ไฮดรอลิกของจานเบรกและระบบเบรกสำหรับการขับเคลื่อนกังหันลม
15. ระบบขับเคลื่อนกังหันลม (Yaw Drive) ประกอบด้วยเกียร์ 2 ตัว ขับเคลื่อนโดย  
มอเตอร์ไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยความถี่
16. ตลับลูกปืนของตัวขับเคลื่อน (Yaw Bearing) เป็นแบบ 4-Point Ball-Bearing  
with Outer Teething และมีระบบจานเบรกของตัวขับเคลื่อน
17. ส่วนครอบนักเซลล์ (Nacelle Cover) ทำจากไฟเบอร์กลาสผสมด้วยพลาสติก  
วางอยู่บนโครงสร้างเหล็ก
18. หอคอย (Tower) มีหลายระดับความสูงและมีรูปทรงแตกต่างกัน
19. ระบบพิช (Pitch System) ประกอบด้วยเกียร์พิชอิสระกัน 3 ตัว ขับเคลื่อนด้วย  
มอเตอร์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 2-3 ตัวอย่างกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่น Nordex N80

ที่มา: <http://www.power-technology.com/>

เนื่องจากพลังงานลมมีความไม่แน่นอนสูง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความผันผวน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยแบ่งการควบคุมเป็น 3 ประเภท [19] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การควบคุมแบบ Pitch เมื่อความเร็วลมมีค่าเกินพิกัดที่กังหันลมหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรองรับได้หรือมีปริมาณเกินความต้องการของระบบไฟฟ้า มุมเอียงใบพัดกังหันลมจะถูกปรับเปลี่ยนด้วยระบบไฮดรอลิก เพื่อระบายลมบางส่วนออกไป

2. การควบคุมแบบ Stall ใบพัดจะลดการรับลมอย่างอัตโนมัติเมื่อลมมีปริมาณมากเกินไป โดยจะทำให้ไม่มีการหมุนหรือเคลื่อนที่ใดๆ การควบคุมลักษณะนี้เรียกว่า การควบคุมแบบ Passive การออกแบบอากาศพลศาสตร์ของใบพัดของการควบคุมแบบ Stall ได้กำหนดให้การบิดตัวของใบพัดเป็นฟังก์ชันของระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของใบพัด ดังนั้นเมื่อใบพัดหมุนเร็วขึ้นจะส่งผลให้กังหันลมลดแรงยกอย่างช้าๆ ได้

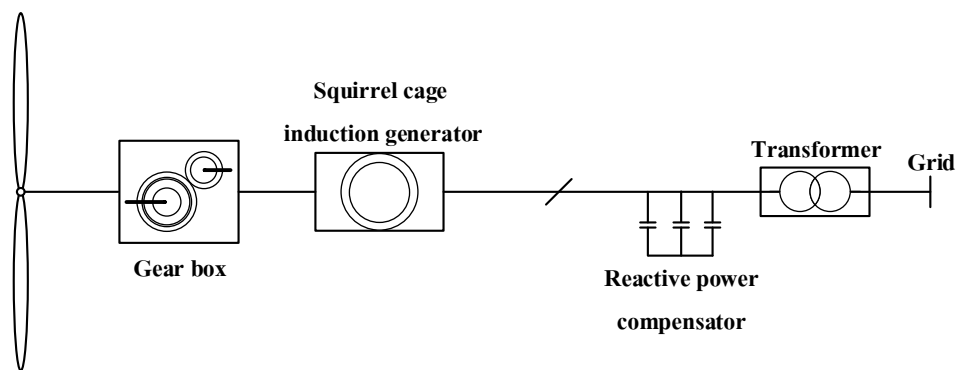
3. การควบคุมแบบ Active-Stall ที่ความเร็วลมต่ำ กังหันลมจะใช้การควบคุมแบบ Pitch เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการรับลมสูงสุด สำหรับที่ความเร็วลมสูงหรือความเร็วลมมีค่าเกินพิกัด กังหันลมจะใช้การควบคุมแบบ Stall ในทิศทางของมุมใบพัดที่ตรงข้ามกับการควบคุมแบบ Pitch เพื่อให้เกิดการหยุดกลางคันหรือ Stall ขึ้น (ในขณะที่กังหันลมมีการควบคุมแบบ Pitch เมื่อความเร็วลมเกินค่าพิกัด กังหันลมจะลดมุมด้านของใบพัดลง)

สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน นอกจากให้ความสำคัญกับความสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้นแล้ว ยังคำนึงถึงความสามารถในการช่วยให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [20] ซึ่งได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังขั้นสูงที่สามารถควบคุมขนาดและความถี่ของกระแสไฟฟ้า สามารถทนการเกิดความร้อน และ



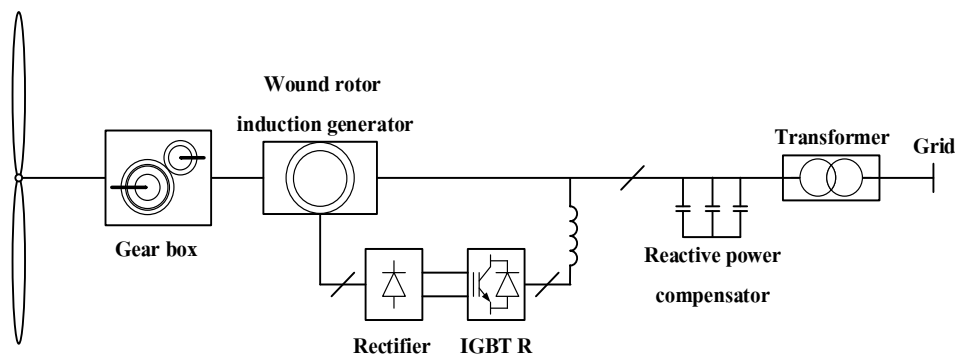
สามารถทำงานที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงได้ช่วงกว้างมากขึ้น [21] เพราะฉะนั้นหากแบ่งประเภทของกังหันลมตามโครงสร้างของอุปกรณ์และรูปแบบการเชื่อมต่อสามารถแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบดังนี้

1. กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Generator, SCIG) กังหันลมชนิดนี้เป็นกังหันลมที่มีความสามารถควบคุมความเร็วลมของการหมุนใบพัดได้เพียง 1–2 % ของความเร็วใช้งานซึ่งถือได้ว่ามีความเร็วคงที่ [20] ทำให้พลังงานไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลมตลอดเวลา ส่งผลให้เกิดความผันผวนของพลังงานไฟฟ้าในระบบ นอกจากนี้กังหันลมชนิดนี้ยังจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power Compensator) เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้จะมีการกักเก็บกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบ โดยรูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก แสดงดังภาพประกอบ 2–4



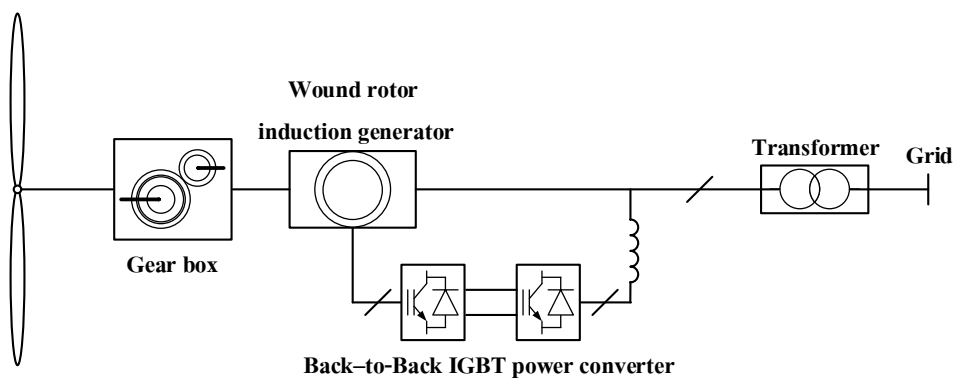
ภาพประกอบ 2–4 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

2. กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด (Wound Rotor Induction Generator, WRIG) กังหันลมชนิดนี้เป็นกังหันลมที่มีความสามารถควบคุมความเร็วของการหมุนใบพัดได้ประมาณ 10% ของความเร็วใช้งาน [20] เนื่องจากมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุมขนาดและความถี่ของกระแสไฟฟ้าก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบ ทำให้ความผันผวนของพลังงานไฟฟ้าขาออกน้อยลงและมีคุณภาพทางไฟฟ้าดีขึ้นในขณะที่เกิดความเร็วลมเปลี่ยนแปลง แต่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับกังหันลมชนิดที่ 1 โดยรูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด แสดงดังภาพประกอบ 2–5



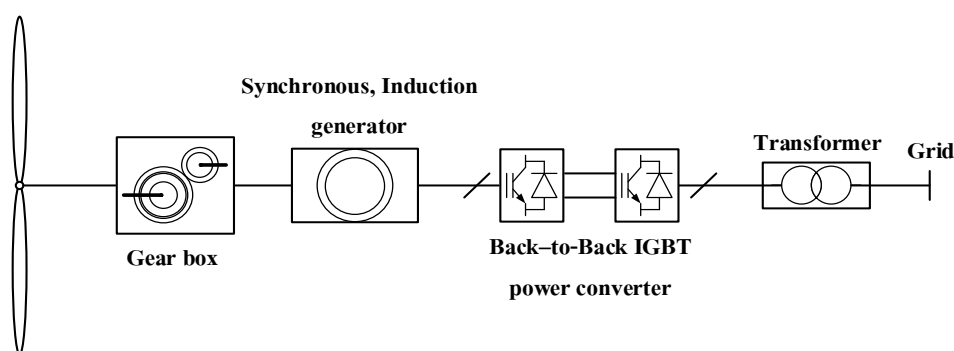
ภาพประกอบ 2-5 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
แบบพื่นขดลวด

3. กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) กังหันลมชนิดนี้เป็นกังหันลมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย [20] มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังขั้นสูงที่เรียกว่า Back-to-Back Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Power Converter ทำหน้าที่ควบคุมขนาดและความถี่ของกระแสไฟฟ้าประมาณ 40% ก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนของใบพัดได้ประมาณ 40% ของความเร็วใช้งาน โดยอุปกรณ์ Back-to-Back IGBT ชนิดนี้ยังสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ทำให้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟในการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบ แต่อย่างไรก็ตามพลังงานส่วนใหญ่ยังคงถูกส่งตรงไปยังระบบไฟฟ้า จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าและแก้ปัญหาการเชื่อมต่อได้ทั้งหมด โดยรูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง แสดงดังภาพประกอบ 2-6



ภาพประกอบ 2-6 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
แบบป้อนสองทาง

4. กังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ (Full-Power Conversion Wind Turbine Generator) กังหันลมชนิดนี้เป็นกังหันลมที่กำลังได้รับการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในปัจจุบัน โดยพลังงานไฟฟ้าขาออกทั้งหมดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์ Back-to-Back IGBT ก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า [20] พลังงานที่ผลิตได้จากกังหันลมจึงถูกแยกออกจากระบบสายส่งอย่างสิ้นเชิงทำให้สามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าไม่ให้กระทบต่อระบบสายส่ง นอกจากนี้ใบพัดยังสามารถรับพลังงานลมได้ช่วงกว้างมากขึ้น และกระแสไฟฟ้าขาออกที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังสามารถควบคุมให้ลดลงจนเป็นศูนย์ ทำให้สามารถจำกัดการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ จะใกล้เคียงกับกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง โดยรูปแบบการเชื่อมต่อของกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ แสดงดังภาพประกอบ 2-7



ภาพประกอบ 2-7 รูปแบบการเชื่อมต่อกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ

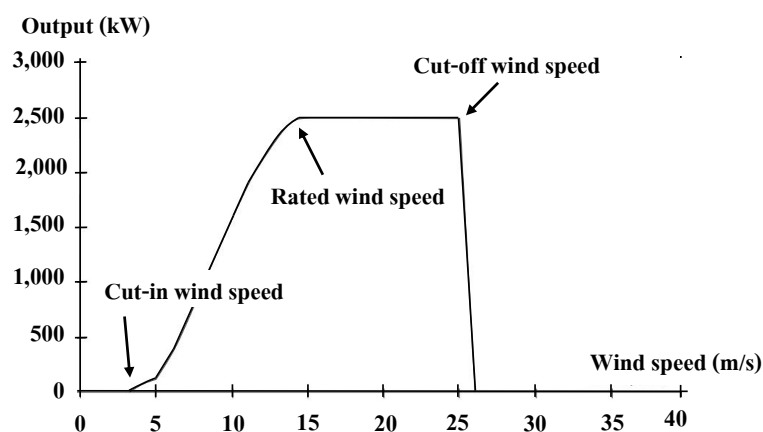
นอกจากนี้การทำงานของกังหันลมแต่ละชนิดจะแบ่งเป็น 2 โหมดการทำงานซึ่งแต่ละโหมดจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าแตกต่างกัน [19] ประกอบด้วย โหมดการทำงานแบบควบคุมตัวประกอบกำลัง เป็นโหมดควบคุมค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าคงที่ โดยกำหนดให้มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟรีแอกทีฟเป็นสัดส่วนคงที่เทียบกับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และโหมดที่สองคือ โหมดการทำงานแบบควบคุมค่าแรงดัน เป็นโหมดควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าแรงดันให้มีค่าคงที่ โหมดการทำงานนี้ขนาดของกำลังไฟรีแอกทีฟที่ผลิตจากกังหันลมอาจมีค่าไม่คงที่ในแต่ละช่วงเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณการจ่ายหรือรับกำลังไฟรีแอกทีฟเพื่อควบคุมแรงดัน

สำหรับการประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมเป็นการประเมินจากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้า (Power Curve) [18, 22] ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแต่ละชนิดที่แตกต่างกันดังตัวอย่างภาพประกอบ 2-8 โดยสามารถอธิบายลักษณะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมได้ดังนี้

1. Cut-in Wind Speed คือความเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า หากความเร็วลมต่ำกว่าความเร็วดังกล่าว กังหันลมก็จะไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า
2. Rated Wind Speed คือ ความเร็วลมที่กังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด
3. Cut-off Wind Speed คือ ความเร็วลมที่กังหันลมจะหยุดการทำงาน เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับ โครงสร้างของกังหันลม

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมมักจะแสดงด้วยค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (Annual Energy Production, AEP) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลของการกระจายความเร็วลม (Speed Frequency Distribution) คูณเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วพิกัด [18] โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นยังไม่รวมค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องคูณด้วยตัวประกอบประสิทธิภาพ (Efficiency Factor) ของกังหันลมที่มีค่าประมาณ 0.8 เพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยกังหันลมจากค่าตัวประกอบกำลังผลิตหรือ C.F. ซึ่งใช้พิจารณาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมก่อนทำการติดตั้ง โดยคำนวณได้จากสมการ 2-1

$$C.F. = \frac{\text{Annual Energy Production}}{8760 \times \text{Rated Capacity of WTG}} \quad (2-1)$$

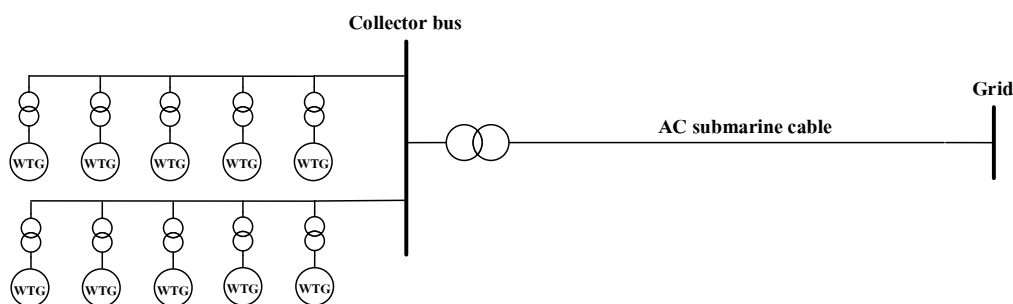


ภาพประกอบ 2-8 ตัวอย่างเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าของกังหันลม [18]

### 2.2.2 รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

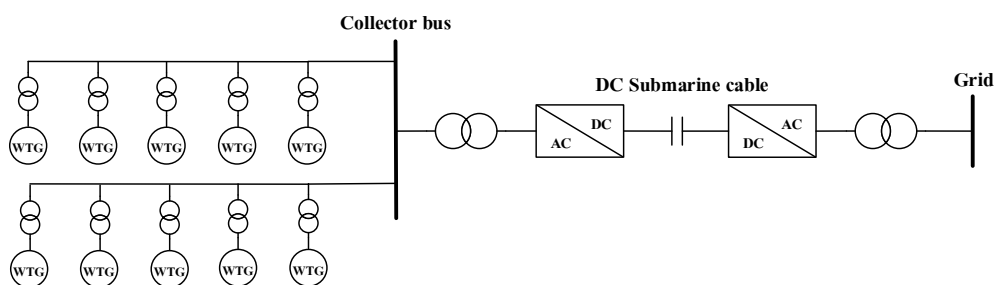
การเชื่อมต่อพลังงานที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งสามารถทำได้ในหลายระดับแรงดัน เช่น ระดับแรงดันต่ำ ระดับแรงดันปานกลาง ระดับแรงดันสูง หรืออาจเป็นระดับแรงดันสูงมาก ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งและระยะทางในการส่ง โดยกังหันลมแต่ละตัวจะมีหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงระดับแรงดันให้สูงขึ้นก่อนจะส่งไปยังสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะต้องมีการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมแต่ละตัว [20] เพื่อจัดรูปแบบวงจรภายในสำหรับการรวบรวมพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมที่เรียกว่า การจัดรูปแบบสายป้อน (Feeder Topology) หรือการจัดรูปแบบของระบบรวบรวม (Collection System) เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าตามปริมาณกำลังผลิตผ่านระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. สายส่งแรงสูงแบบ HVAC (High Voltage Alternative Current) เป็นระบบสายส่งแบบง่ายและมีค่าต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง [23-24] นอกจากนี้การแปลงแรงดันกระแสสลับถือเป็นเรื่องง่ายโดยการใช้หม้อแปลง ดังนั้นระบบจะไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการดูแลรักษามากมาย แต่จะมีข้อจำกัดของระยะทางและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งจากกังหันลมไปยังระบบไฟฟ้า เนื่องจากค่าคาปาซิแตนซ์ในสายส่งมีค่าสูงทำให้เกิดกระแสอัดประจุที่ทำให้สัญญาณแรงดันเกิดความผิดเพี้ยน ส่งผลกระทบกับการทำงานของระบบไฟฟ้าโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามสายส่งแรงสูงแบบ HVAC ยังคงสามารถเชื่อมต่อผ่านสายเคเบิลใต้น้ำเข้ากับสถานีไฟฟ้าได้ที่ระดับแรงดันสูงถึง 155 kV และมีความยาวของสายส่งได้ถึง 100 km [25] โดยรูปแบบการเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบ HVAC แสดงดังภาพประกอบ 2-9



ภาพประกอบ 2-9 รูปแบบการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งแรงสูงแบบ HVAC [23]

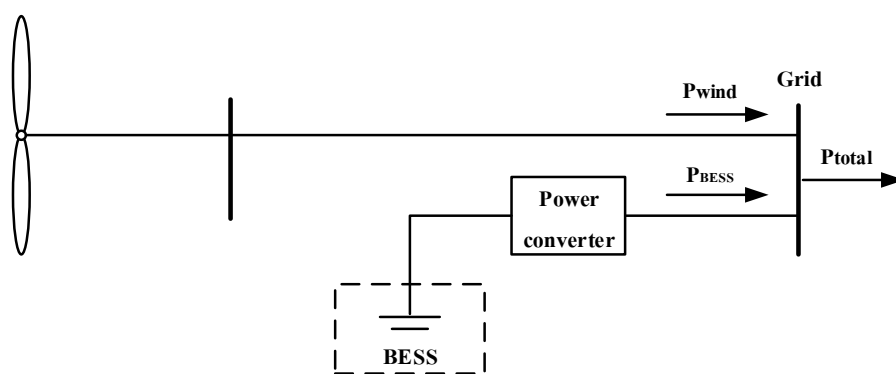
2. สายส่งแรงสูงแบบ HVDC (High Voltage Direct Current) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเชื่อมต่อทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้าและส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ได้อย่างมั่นคงและมีประสิทธิภาพ มีความเหมาะสมกับการส่งพลังงานไฟฟ้าที่มีระยะทางมากกว่า 100 km หรือมีระดับการส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 200 ถึง 900 MW [23-24] โดยระบบสายส่งแรงสูงแบบ HVDC จะแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่ 1) สายส่งแรงสูง HVDC แบบ Line Commutated Converter (LCC-HVDC) ใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor) เป็นสวิตช์ควบคุมการทำงาน ทำให้สามารถส่งพลังงานได้สูงขึ้นในระดับแรงดันสูงมาก [25] แต่มีข้อเสียเนื่องจากไม่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้อย่างอิสระ นอกจากนี้ยังสร้างฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องมีตัวกรองฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ 2) สายส่งแรงสูง HVDC แบบ Voltage Source Converter (VSC-HVDC) ใช้อุปกรณ์ IGBT ที่สามารถควบคุมการเปิดและปิดสวิตช์ จึงมีความสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้อย่างอิสระ สามารถเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าด้วยตัวเอง (Black Start Capacity) ในสถานะที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้า และสามารถกลับทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ทันที แต่ก็มีข้อเสียบางประการคือ มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความถี่สวิตซ์การทำงานสูง การส่งพลังงานไฟฟ้าและแรงดันได้ในระดับต่ำกว่าประเภท LCC-HVDC และมีค่าใช้จ่ายสูง โดยรูปแบบการเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบ HVDC แสดงดังภาพประกอบ 2-10



ภาพประกอบ 2-10 รูปแบบการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งแรงสูงแบบ HVDC [23]

นอกจากนี้ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Battery Energy Storage System, BESS) ทำให้สามารถแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า [26] เนื่องจากความไม่แน่นอนของพลังงานลม การเพิ่มแบตเตอรี่เก็บพลังงานสำหรับพลังงานลมจะช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า และยังช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้า ภาพประกอบ 2-11 แสดงการใช้แบตเตอรี่เก็บพลังงานสำหรับพลังงานลม โดยแบตเตอรี่จะเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อทุ้งกังหันลม ซึ่งจะเก็บหรือคายประจุผ่านคอนเวอร์เตอร์ โดยมีเงื่อนไขขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการของโหลดและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังนี้ [27]

1. ช่วงสภาวะโหลดต่ำ พลังงานส่วนเกินจากกังหันลมจะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่
2. หากพลังงานที่ผลิตได้เกินความจุของแบตเตอรี่แล้ว ให้จ่ายพลังงานส่วนเกินเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
3. ช่วงสภาวะโหลดสูง พลังงานที่ผลิตได้จากกังหันลมและพลังงานที่เก็บในแบตเตอรี่ให้จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

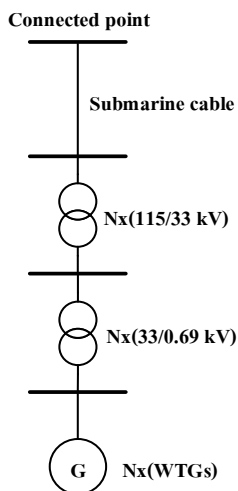


ภาพประกอบ 2-11 การเชื่อมต่อแบตเตอรี่เก็บพลังงานของกังหันลม [26]

แต่การใช้แบตเตอรี่เก็บพลังงานไฟฟ้าจะมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถใช้งานได้เต็มความจุ [27] เนื่องจากจะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการซ่อมบำรุงสูง

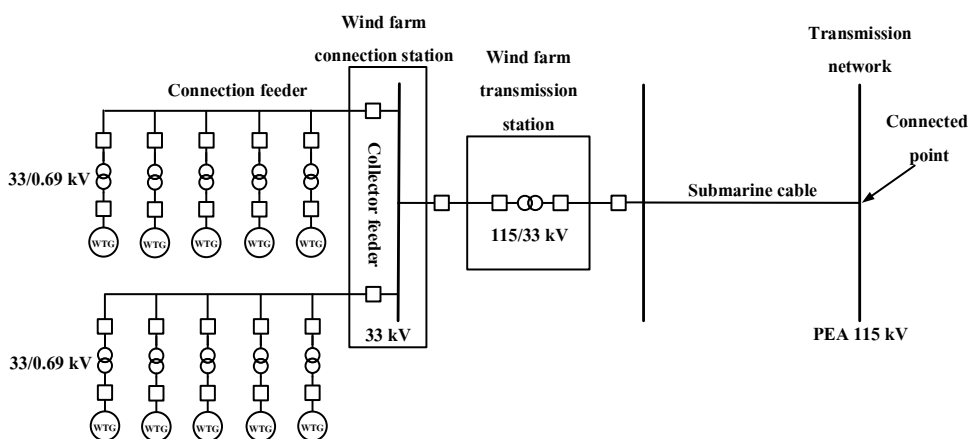
### 2.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมโดยทั่วไปมี 2 ประเภท คือการสร้างแบบจำลองทุกๆ กังหันลมแยกจากกันหรือการรวมกังหันลมจำนวนมากเหล่านั้นแทนเป็นหนึ่งกังหันลม [6] สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองกังหันลมทั้ง 2 แบบในการสร้างแบบจำลองกังหันลม แบ่งเป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัวและการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตจะเลือกสร้างแบบจำลองที่แทนกังหันลมทั้งหมดในกังหันลมให้เหลือเพียง 1 กังหันลม เนื่องจากการวิเคราะห์ทางเทคนิคดังกล่าวไม่จำเป็นต้องคำนึงผลกระทบที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้น้ำภายในกังหันลม แต่จะพิจารณาการเพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเท่านั้น รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมแบบรวมแสดงดังภาพประกอบ 2-12



ภาพประกอบ 2-12 แบบจำลองแบบรวมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง [20]

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก แบบจำลองแบบรวมดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้ เนื่องจากผลกระทบของฮาร์มอนิกขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการจัดวางสายเคเบิลใต้น้ำภายในกังหันลม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนเป็นแบบจำลองที่แสดงให้เห็นทุกๆ กังหันลมรวมถึงต้องมีการออกแบบการวางสายเคเบิลใต้น้ำภายในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง (รายละเอียดการออกแบบรูปแบบการวางสายเคเบิลใต้น้ำแสดงในบทที่ 6) รูปแบบตัวอย่างการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งแบบแยกองค์ประกอบกังหันลมแสดงดังภาพประกอบ 2-13



ภาพประกอบ 2-13 แบบจำลองแบบแยกองค์ประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง [20]



### บทที่ 3

## การประเมินจุดเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

### 3.1 หลักเกณฑ์การประเมินจุดเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

การประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลและความเป็นไปได้เบื้องต้นของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล [4] ได้ระบุพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลภาคใต้ในรูปแบบผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กบริเวณเกาะเต่าและเกาะพะงัน ประกอบด้วยกังหันลม SPP 1, SPP 2 และ SPP 3 ดังแสดงในตาราง 3-1

ตาราง 3-1 พื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งภาคใต้ของประเทศไทย

กังหันลม นอกชายฝั่ง	พื้นที่ติดตั้ง	ความเร็วลม (m/s)	กำลังผลิตติดตั้ง (MW)	ตัวประกอบกำลังผลิต (%)
SPP 1	ทิศเหนือของเกาะเต่า	6.0–6.5	180	17.60
SPP 2	ทิศใต้ของเกาะเต่า	6.0–6.5	270	14.13
SPP 3	ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ของเกาะพะงัน	6.0–6.5	270	14.13

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งทั้ง 3 สามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในระดับแรงดัน 115 kV (อ้างอิงตามข้อกำหนดของการเชื่อมต่อที่ระบุให้แหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่มีกำลังผลิตมากกว่า 10 MW ต้องเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าในระดับแรงดัน 115 kV) [28] แต่การเชื่อมต่อกังหันลมดังกล่าวจำเป็นต้องเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนการคัดเลือก 3 ขั้นตอนได้แก่ 1) การประเมินจุดเชื่อมต่อที่เป็นได้หรือจุดเชื่อมต่อที่สามารถรองรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง 2) การวิเคราะห์เชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้า และ 3) การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสม สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะเป็นการอธิบายในส่วนของขั้นตอนที่ 1 การพิจารณาจุดเชื่อมต่อที่สามารถรองรับการเชื่อมต่อกังหันลม โดยการใช้หลักเกณฑ์การประเมินหรือการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้จากจุดเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority, PEA) เนื่องจากเป็นจุดเชื่อมต่อที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางโหลดมากที่สุด โดยหลักเกณฑ์การประเมินจะเป็นการพิจารณาปัจจัยทางกายของจุดเชื่อมต่อตามคำแนะนำจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งประกอบด้วย การพิจารณาปริมาณโหลดหม้อแปลงของ

จุดเชื่อมต่อและระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง โดยปริมาณโหลดหม้อแปลงของจุดเชื่อมต่อที่ยังสามารถรองรับการเชื่อมต่อได้จะต้องมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 80 ของพิกัด และระยะห่างของจุดเชื่อมต่อและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งต้องมีระยะห่างน้อยกว่า 100 km ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบช่วงคะแนนของแต่ละหลักเกณฑ์ เพื่อคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่สามารถรองรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้า ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1. ปริมาณโหลดของหม้อแปลง คิดเป็นร้อยละ 50 ประกอบด้วย

ปริมาณโหลดน้อยกว่า 20 %	คะแนน 50
ปริมาณโหลด 21–35 %	คะแนน 40
ปริมาณโหลด 36–50 %	คะแนน 30
ปริมาณโหลด 51–65 %	คะแนน 20
ปริมาณโหลด 66–80 %	คะแนน 10
ปริมาณโหลดมากกว่า 80 %	คะแนน 0

2. ระยะห่างของจุดเชื่อมต่อ คิดเป็นร้อยละ 50 ประกอบด้วย

ระยะทางน้อยกว่า 20 km	คะแนน 50
ระยะทาง 21–40 km	คะแนน 40
ระยะทาง 41–60 km	คะแนน 30
ระยะทาง 61–80 km	คะแนน 20
ระยะทาง 81–100 km	คะแนน 10
ระยะทางมากกว่า 100 km	คะแนน 0

สำหรับเกณฑ์การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง ได้มีการกำหนดช่วงคะแนนความเหมาะสมสำหรับการคัดเลือก ดังนี้

1. จุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมสูง คะแนน 71-100
2. จุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมปานกลาง คะแนน 31-70
3. จุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมต่ำ คะแนน 0-30

เมื่อนำหลักเกณฑ์ดังกล่าวข้างต้นทำการคัดเลือกกับจุดเชื่อมต่อในระดับแรงดัน 115 kV ที่มีอยู่ในบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานีและนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นพื้นที่รับผิดชอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคใต้เขต 2 จำนวน 9 จุดเชื่อมต่อ ประกอบด้วย บัส KMA (เกาะสมุย A), บัส KMB (เกาะสมุย B), บัส KCD (กาญจนดิษฐ์), บัส CAY (ไชยา), บัส WSA (เวียงสระ), บัส NTB (นครศรีฯ B), บัส PPN (ปากพนัง), บัส PPB (พุนพิน B) และบัส TYI (ทุ่งใหญ่) ผลการคัดเลือก

จุดเชื่อมต่อที่มีความเป็นไปได้สำหรับรองรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งมีดังต่อไปนี้

1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 1 มีจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้สำหรับการเชื่อมต่อในระดับปานกลาง 2 จุด ได้แก่ บัส KMA และบัส KMB

2. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 2 มีจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้สำหรับการเชื่อมต่อในระดับปานกลาง 4 จุด ได้แก่ บัส KMA บัส KMB บัส KCD และบัส CAY

3. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 3 มีจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้สำหรับการเชื่อมต่อในระดับปานกลาง 4 จุด ได้แก่ บัส KMA บัส KMB บัส KCD และบัส CAY

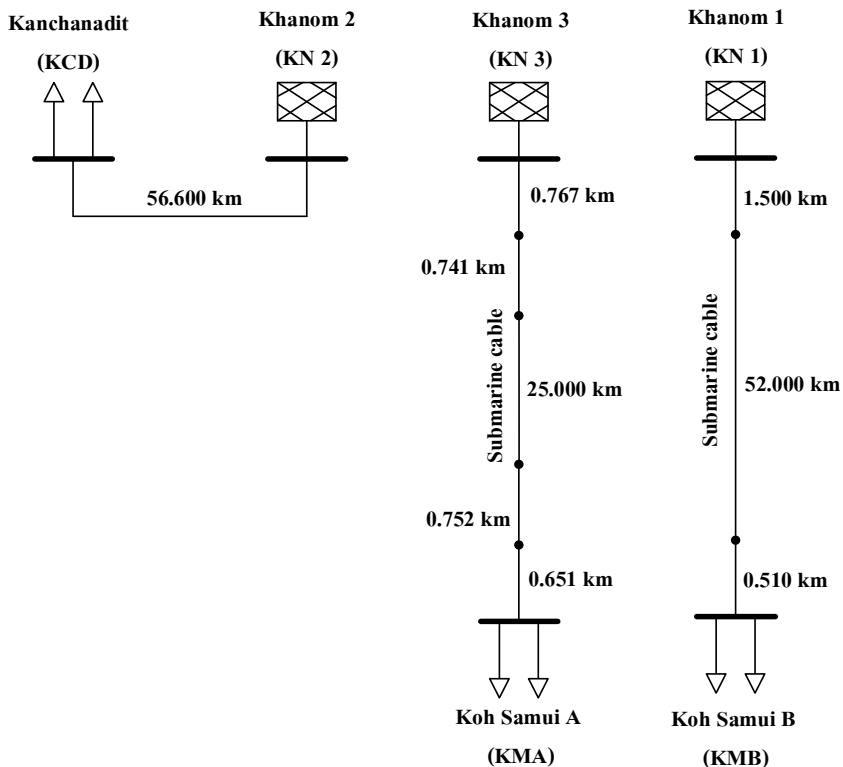
นอกจากนี้ตามคำแนะนำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งดังกล่าวควรจะเป็นจุดที่อยู่บริเวณเกาะหรือใกล้กับบริเวณชายฝั่งและมีปริมาณโหลดของจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมกับปริมาณกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม ดังนั้นจึงสามารถสรุปจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ดังตาราง 3-2 โดยไม่พิจารณาบัส CAY เนื่องจากจุดเชื่อมต่อดังกล่าวมีปริมาณโหลดน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม สำหรับแผนภาพเส้นเดียวของแต่ละจุดเชื่อมต่อแสดงดังภาพประกอบ 3-1 ดังนั้นจะได้รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ 18 กรณี ดังตาราง 3-3

ตาราง 3-2 จุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

จุดเชื่อมต่อ	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
KMA	✓	✓	✓
KMB	✓	✓	✓
KCD	✗	✓	✓

✓ หมายถึง จุดเชื่อมต่อสามารถรองรับการเชื่อมต่อกังหันลม

✗ หมายถึง จุดเชื่อมต่อไม่สามารถรองรับการเชื่อมต่อกังหันลม



ภาพประกอบ 3-1 แผนภาพเส้นเคเบิลเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย  
 ท่อกังหันลมนอกชายฝั่ง

ตาราง 3-3 กรณีศึกษารูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่อกังหันลมนอกชายฝั่ง

กรณีศึกษา	รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่อกังหันลมนอกชายฝั่ง		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
0	-	-	-
1	KMA	KMA	KMA
2	KMA	KMA	KMB
3	KMA	KMA	KCD
4	KMA	KMB	KMA
5	KMA	KMB	KMB
6	KMA	KMB	KCD
7	KMA	KCD	KMA
8	KMA	KCD	KMB
9	KMA	KCD	KCD

10	KMB	KMA	KMA
11	KMB	KMA	KMB
12	KMB	KMA	KCD
13	KMB	KMB	KMA
14	KMB	KMB	KMB
15	KMB	KMB	KCD
16	KMB	KCD	KMA
17	KMB	KCD	KMB
18	KMB	KCD	KCD

กรณีที่ 0 ไม่มีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้า

### 3.2 การวิเคราะห์เชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้า

จุดเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งจำเป็นต้องเลือกให้เหมาะสม เพื่อให้มั่นใจได้ว่าระบบไฟฟ้ายังสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและส่งไปยังผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [20] โดยหลักเกณฑ์การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อนอกจากขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพของระบบไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 พฤติกรรมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งที่จุดเชื่อมต่อและพฤติกรรมภายในของระบบไฟฟ้ายังเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา [11] ประกอบด้วยการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต และการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.2.1 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว (Steady-State Analysis)

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว คือการตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าภายหลังการเชื่อมต่อทุ้งกังหันลม เช่น ขนาดและมุมเฟสของแรงดันรวมถึงปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ประกอบด้วย การไหลของกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงแรงดันเสถียรภาพแรงดัน และกระแสลัดวงจร ซึ่งมีรายละเอียดเบื้องต้นดังนี้

1. การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) คือการตรวจสอบปริมาณภาระไหลของอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า เช่น สายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้ายังคงอยู่ภายใต้ขีดจำกัดหรือพิสัยของอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าภายหลังการเชื่อมต่อทุ้งกังหันลม

2. การเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Variation) คือการตรวจสอบระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อทุ้งกังหันลมยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

3. เสถียรภาพแรงดัน (Voltage Stability) คือการตรวจสอบจุดสูงสุด (Critical Point) ของระบบไฟฟ้าที่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้โดยยังรักษาระดับแรงดันไม่ให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง (Blackout) [29] อีกทั้งยังสามารถบอกระดับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ระบบไฟฟ้าต้องการ

4. กระแสลัดวงจร (Fault Current) คือการตรวจสอบความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ายังทนต่อระดับกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลง และหากอุปกรณ์ตัวใดไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็สามารถวางแผนเปลี่ยนอุปกรณ์ดังกล่าวให้สามารถทนกระแสลัดวงจรได้

### 3.2.2 การจำลองการทำงานในสภาวะพลวัต (Dynamic Simulation)

การจำลองการทำงานในสภาวะพลวัต คือการจำลองสถานการณ์การเกิดความผิดปกติที่เกิดในระบบไฟฟ้าหรือความผันผวนของกังหันลมภายหลังการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า ประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งหลุดการเชื่อมต่อ สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ซึ่งมีรายละเอียดเบื้องต้นดังนี้

1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งหลุดการเชื่อมต่อ (Offshore Wind Farm Trip Offline) คือการสร้างสถานการณ์เพื่อศึกษาผลกระทบเมื่อพลังงานทั้งหมดที่จ่ายจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งหายไปอย่างทันทีทันใด

2. สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ (N-1 Trip Offline) คือการสร้างสถานการณ์เพื่อศึกษาผลกระทบของพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งหายจากระบบไฟฟ้าเนื่องจากสายเคเบิลใต้น้ำหลุดการเชื่อมต่อ

3. การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส (Three Phase Short Circuit) คือการสร้างสถานการณ์เพื่อศึกษาผลกระทบการเกิดความผิดปกติรอบๆ จุดเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นการตรวจสอบความสามารถเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง หากเกิดความผิดปกติขั้นรุนแรงสุดในระบบไฟฟ้า รวมถึงการประเมินเวลาการตัดการเชื่อมต่อกังหันลมออกจากระบบไฟฟ้า เพื่อใช้ตั้งค่าเวลาการปลดกังหันลมอย่างเหมาะสม

4. การเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (Wind Speed Change) คือการสร้างสถานการณ์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง เนื่องจากความไม่แน่นอนของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

### 3.2.3 การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality)

การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า คือการตรวจสอบอัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าเมื่อมีและไม่มีการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์ลุม อัตราส่วนที่ได้จะแสดงถึงอัตราขยายกระแสฮาร์โมนิกที่ส่งผลโดยตรงต่ออัตราขยายแรงดันฮาร์โมนิก

สำหรับรายละเอียดทั้งหมดของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต และการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า ได้มีการอธิบายไว้ในบทที่ 4 บทที่ 5 และบทที่ 6 ตามลำดับ โดยการวิเคราะห์แต่ละเทคนิคจะกล่าวถึง ทฤษฎี และหลักการ วิธีการศึกษาผลกระทบ ผลการจำลองการทำงานงานและอภิปรายผลกระทบ รวมถึงผลสรุปของการวิเคราะห์ จากนั้นเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบเชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วน ผลการจำลองการทำงานที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ลุมนอกชายฝั่งทั้ง 3 แห่ง ซึ่งจะได้อธิบายและแสดงรายละเอียดการคัดเลือกในบทที่ 7 ต่อไป

### 3.3 เครื่องมือจำลองการทำงาน

เครื่องมือจำลองการทำงานสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังมิให้เลือกใช้งานอย่างหลากหลายทั้งซอฟต์แวร์ระบบเปิด (Open-Source Software) เช่น กล่องเครื่องมือในเมทแลบ (Matlab Toolbox) [30] หรือซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (Commercial Software) เช่น โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory, PSS/E, PSCAD และ PowerWorld เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้งาน โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory (DIgital SIMuLator for Electrical NeTwork Calculation Program) วิเคราะห์การทำงานของระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถครอบคลุมการวิเคราะห์ทั้งหมดของงานวิจัย ดังแสดงในตาราง 3-4 โดยโปรแกรมสามารถสร้างแบบจำลองด้วยรูปภาพหรือป้อนไฟล์ข้อมูล (Text File) [31] และสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในระบบผลิต ระบบส่ง ระบบจำหน่าย และภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory ยังเป็นโปรแกรมเดียวกับที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้วิเคราะห์การทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทย ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือและเป็นมาตรฐานเดียวกัน

ตาราง 3-4 การเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องมือจำลองการทำงานระบบไฟฟ้ากำลัง

โปรแกรม	การไหลของกำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงแรงดัน	เสถียรภาพแรงดัน	กระแสตัวจริง	การจำลองการทำงานในสถานะพลวัต	ฮาร์มอนิก
Matlab Tool Box	✓	✓	✓	✗	✗	✗
DIgSILENT PowerFactory	✓	✓	✓	✓	✓	✓

### 3.3.1 คุณสมบัติทั่วไปของโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังได้ทั้งในสถานะอยู่ตัว (Steady State) และสถานะชั่วคราว (Transient State) [31] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- Power Flow and Fault Analysis of complete AC/DC network representation, meshed & mixed 1-,2-and 3-phase AC and /or DC networks
- Low Voltage Network Analysis
- Distribution Network Optimization
- IEC Cable Sizing
- Dynamic Simulation
- EMT Simulation
- Eigenvalue Analysis
- System Identification
- Protection Analysis
- Harmonic Analysis
- Reliability
- Production Planning
- Voltage Stability Analysis
- Contingency Analysis
- Power Electronic Device Modeling



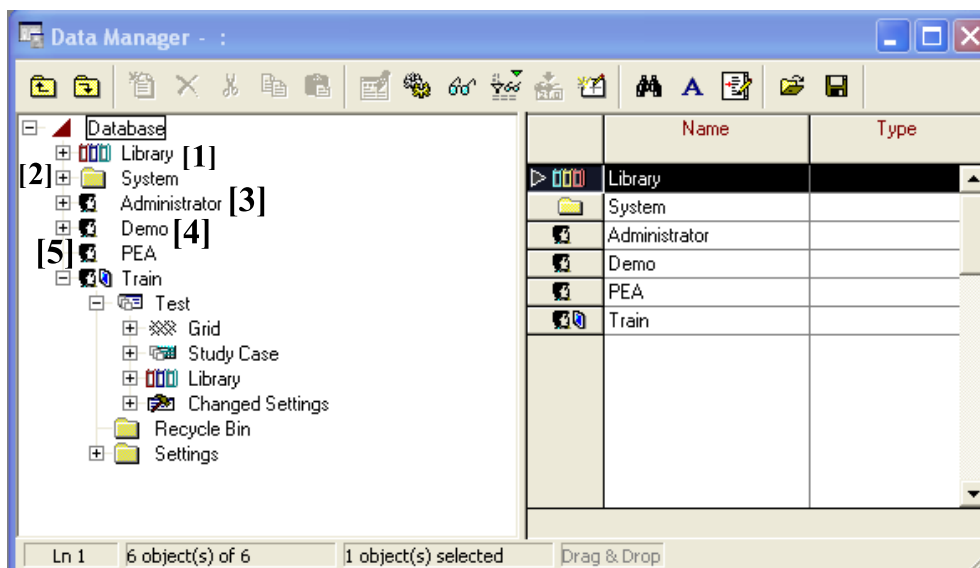
- DPL User Script
- A/D Interfacing
- DOLE Interface for SCADA/GIS
- PSS/E & PSS/U Compatibility
- Multi-User Database
- Virtual Instruments

### 3.3.2 โครงสร้างพื้นฐานของโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างการจัดการข้อมูลระบบไฟฟ้าต่างๆ ที่ถูกสร้างและจัดเก็บในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory รวมถึงส่วนประกอบต่างๆ ของหน้าต่าง Main Window และแนะนำ Tool Bar ต่างๆ ที่ใช้งานพื้นฐาน [31] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.3.2.1 โครงสร้างการจัดการข้อมูลภายในโปรแกรม

โครงสร้างการจัดการข้อมูลภายในโปรแกรมอยู่ในหน้าต่างของ Data Manager แสดงถึงโครงสร้างการจัดเก็บของไฟล์เตอร์ข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ภายใต้ Database ดังภาพประกอบ 3-2



ภาพประกอบ 3-2 หน้าต่าง Data Manager แสดงโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูล [31]

หมายเลข 1 คือ Main Library Folder ประกอบด้วยชนิดและแบบจำลองมาตรฐานต่างๆ ของโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory การจะปรับปรุงแก้ไขได้ต้องเข้าสู่ระบบของโปรแกรมด้วยบัญชีผู้ใช้ Administrator เท่านั้น โดยถ้าเข้าสู่ระบบในบัญชีผู้ใช้ทั่วไป (Normal User) จะสามารถดูข้อมูลได้อย่างเดียวแต่ไม่สามารถปรับปรุงแก้ไขได้

หมายเลข 2 คือ System Folder ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่ใช้ภายในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory การจะปรับปรุงแก้ไขได้จะต้องเข้าสู่ระบบของโปรแกรมด้วยบัญชีผู้ใช้ Administrator เท่านั้น และหากต้องการแก้ไขควรทำภายใต้การแนะนำจากฝ่ายสนับสนุนลูกค้าของ DIgSILENT PowerFactory เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของโปรแกรมได้

หมายเลข 3 Administrator Folder ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้งานสำหรับการสร้าง การจัดการกับกลุ่มผู้ใช้หรือบัญชีผู้ใช้และการปรับปรุงแก้ไขข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดค่าต่างๆ ที่เป็นการตั้งค่าส่วนกลาง (Global Setting)

หมายเลข 4 Demo Folder ประกอบด้วยตัวอย่างโครงการงาน (Project) ต่างๆ ที่เตรียมไว้สำหรับให้ผู้ใช้ทดลองใช้งาน

หมายเลข 5 User Account Folders ประกอบด้วยโฟลเดอร์ของโครงการงานต่างๆ และการกำหนดค่าต่างๆ ที่ถูกกำหนดโดยผู้ใช้ทั่วไป ตามตัวอย่างมี 2 ผู้ใช้ คือ PEA และ Train



ภาพประกอบ 3-3 หน้าต่างแสดงโครงสร้างของโครงการงานใน Data Manager [31]

สำหรับการจัดเก็บข้อมูลใน User Account Folder ในภาพประกอบ 3-3 จะประกอบด้วยโฟลเดอร์ดังต่อไปนี้

1. Project Folder เป็น โฟลเดอร์ของโครงการงานที่สร้างขึ้นใหม่หรือนำเข้ามา
2. Recycle Bin Folder เป็น โฟลเดอร์ที่จัดเก็บข้อมูลที่ถูกลบไปในบัญชีผู้ใช้นั้นๆ
3. Settings Folder เป็น โฟลเดอร์ที่จัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดค่าในการใช้งานต่างๆ ของโปรแกรมสำหรับบัญชีผู้ใช้นั้นๆ

และใน Project Folder หนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้

1. Grid Folder เป็นโฟลเดอร์ที่จัดเก็บส่วนประกอบต่างๆ ของระบบไฟฟ้าในโครงการนั้น (Element Data) โดยจัดเก็บทั้งในส่วนของรูปภาพ (Graphic) และค่าพารามิเตอร์ (Attribute) ตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายไฟ จุดโนด สายไฟ โหลด และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นค่าเฉพาะของแต่ละอุปกรณ์ เช่น ระยะเวลาของสายไฟและค่าการะทางไฟฟ้าของโหลด เป็นต้น

2. Study Case Folder เป็นโฟลเดอร์ที่จัดเก็บเกี่ยวกับการกำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้ในการรันโปรแกรม เช่น Grid ใดบ้างที่ต้องการรัน รูปแบบการแสดงผลลัพธ์ในการรัน และตัวเลือกที่ใช้ในการรันการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

3. Library Folder เป็นโฟลเดอร์ที่จัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับชนิดต่างๆ ของอุปกรณ์ (Library) ที่จัดเก็บอยู่ในบัญชีผู้ใช้นั้นๆ ตัวอย่างเช่น ค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยของสายไฟ ค่าพิคคของหม้อแปลง และค่าแรงดันระบุ เป็นต้น

### 3.3.2.2 ส่วนประกอบของหน้าต่าง Main Window

ส่วนประกอบต่างๆ ของหน้าต่าง Main Window ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังภาพประกอบ 3-4 ได้แก่

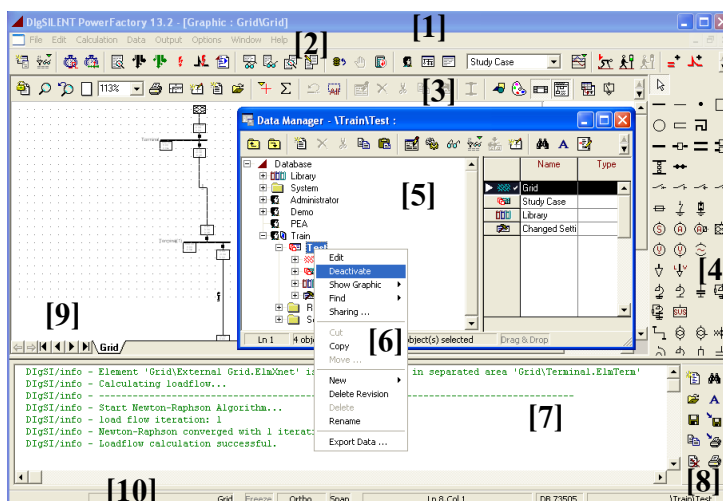
1. Title Bar แสดงชื่อและรุ่นของโปรแกรม
2. Menu Bar แสดงรายชื่อคำสั่งหลักของโปรแกรม
3. Main Tool Bar เป็นปุ่มที่แทนคำสั่งใน Menu Bar สามารถเรียกใช้งานได้ทันที
4. Drawing Tool Bar เป็นปุ่มที่ใช้สร้างอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าในแบบจำลองต่างๆ
5. Data Manager Window เป็นหน้าต่างย่อยที่แสดงโครงสร้างการจัดเก็บของข้อมูลทั้งหมดโดยมีการใช้งานคล้ายกันกับ Window Explorer คือเมื่อคลิกเลือกโฟลเดอร์ที่อยู่ด้านซ้าย ทางฝั่งขวาก็จะแสดงโฟลเดอร์ต่างๆ ที่อยู่ภายใต้โฟลเดอร์นั้น

6. Context Menu เป็นหน้าต่างที่แสดงเมื่อคลิกขวาที่วัตถุของโฟลเดอร์ใน Data Manager

7. Output Window เป็นหน้าต่างที่แสดงผลการคำนวณหรือแสดงค่าความผิดพลาด
8. Output Tool Bar เป็นแถบเครื่องมือซึ่งใช้งานประกอบกับหน้าต่างของ Output Window

9. Workspace เป็นพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างแผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้า










10. Status Bar แสดงสถานะการกระทำใดๆ บนชิ้นงานที่กำลังทำงานอยู่





ภาพประกอบ 3-4 ส่วนประกอบต่างๆ บนหน้าต่าง Main Window [31]


### 3.3.2.3 ส่วนประกอบของแถบเครื่องมือ


1. ส่วนของ Main Tool Bar คือ ปุ่มใช้งานพื้นฐาน ประกอบด้วย


- New Database Manager  ใช้เปิดหน้าต่าง Data Manager ซึ่งสามารถเปิดได้พร้อมกันมากกว่า 1 หน้าต่าง
- Edit Relevant Objects for Calculation  ใช้เป็นตารางสำหรับเรียกดูและแก้ไขข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ใน Study Case
- Calculate Power Flow  ใช้คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบตามที่มีอยู่ใน Study Case
- Calculate Short Circuit  ใช้คำนวณกระแสลัดวงจรในระบบตามที่มีอยู่ใน Study Case
- Output Calculation Analysis  ใช้สำหรับเลือกรูปแบบการแสดงผลงานผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ
- Documentation of Device Data  ใช้แสดงข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่มีในระบบ
- Update Database  ใช้เมื่อต้องการให้นำค่าการตั้งค่าของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการคำนวณไปปรับปรุงในฐานข้อมูล
- Reset Calculation  ใช้กำหนดค่าใหม่ที่ตั้งไว้สำหรับการคำนวณหลังจากการคำนวณครั้งล่าสุด
- User Settings  ใช้สำหรับตั้งค่าต่างๆ ของระบบที่ต้องการใช้งานภายในบัญชีผู้ใช้นั้นๆ

- Select Toolbar  ใช้เลือกกลุ่มของแถบเครื่องมือ เช่น Stability, Data Acquisition, Harmonics, Optimal Capacitor Placement

- Rebuild  ใช้วาดหน้าจอกราฟฟิคใหม่อีกครั้ง


- Freeze Mode  ใช้ตรึงหน้าจอการวาดกราฟฟิคไว้หลังจากวาดอุปกรณ์ต่างๆ แล้วเสร็จ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถแก้ไขรูปได้

- Graphic Options  ใช้สำหรับจัดการกับหน้าจอที่ใช้วาดกราฟฟิค เช่น แสดง/ไม่แสดงจุดกริด, Snap or Not, วาดเส้นตั้งฉากหรือไม่

- Show Layer  ใช้สำหรับเลือกชั้นข้อมูลต่างๆ ที่ต้องการให้แสดงบนหน้าจอกราฟฟิค เช่น ผลหรือชื่อวัตถุ เป็นต้น

- Mark All Elements  ใช้เลือกอุปกรณ์ทุกตัวที่อยู่บนหน้าจอกราฟฟิค เช่น ต้องการย้ายทั้งระบบไปบริเวณอื่น เป็นต้น


- Edit and Browse Data  ใช้แสดงข้อมูลที่ถูกเลือกในหน้าจอกราฟฟิค เพื่อให้ทำการแก้ไขข้อมูล


- Color Representation  ใช้เป็นตัวเลือกในการให้แสดงเฉดสีต่างๆ บนหน้าจอกราฟฟิค เช่น แสดงสีบริเวณที่ไม่มีมีการจ่ายไฟไปถึง


- Default Voltage Levels for Terminals and Busbars  ใช้เมื่อสร้างจุด โหนดหรือบัสในกราฟฟิค โปรแกรมจะนำค่าที่อยู่ในกล่องนี้ไปเป็นค่าแรงดันของบัสนั้น

- Default Phase Technologies for Terminals  ใช้เมื่อสร้างจุด โหนดหรือบัสในกราฟฟิค โปรแกรมจะนำค่าที่อยู่ในกล่องนี้ไปเป็นค่าเฟสของบัสนั้น


2. ส่วนของ Drawing Toolbar คือปุ่มอุปกรณ์พื้นฐานซึ่งใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าประกอบด้วย

- Terminal  ใช้สร้างจุด โหนดซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น บัสที่สถานีไฟฟ้า

- Short Terminal  ใช้สร้างจุด โหนดซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น บัสที่สถานีไฟฟ้า

- Point Terminal  ใช้สร้างจุด โหนดซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า ในกรณีนี้มักใช้บริเวณที่เป็นทางแยก

- Disconnect  ใช้สร้างสวิตช์ในสถานีไฟฟ้า ระบบส่ง หรือระบบจำหน่าย

- External Grid  ใช้สร้างแหล่งจ่ายไฟของระบบไฟฟ้า ได้แก่ แหล่งจ่ายจาก EGAT หรือจากสถานีไฟฟ้าของ PEA

- General Load  ใช้สร้างโหลดของระบบไฟฟ้า
- Shunt/Filter C  ใช้สร้างคาปาซิเตอร์แบบต่อขนานระบบไฟฟ้า
- Line  ใช้สร้างสายส่ง หรือสายจำหน่าย
- Fuse  ใช้สร้างฟิวส์ เช่น ฟิวส์ที่ต่ออยู่บริเวณสายแยกของระบบจำหน่าย
- 2-Winding Transformer  ใช้สร้างหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้า และหม้อแปลงจำหน่าย 22 หรือ 33/0.4 kV
- 3-Winding Transformer  ใช้สร้างหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวดซึ่งมีอยู่ในบางพื้นที่
- Auto Transformer  ใช้สร้าง Auto Voltage Regulator ในระบบจำหน่าย

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว

การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังโดยปกติจะทราบสถานะการทำงาน ณ เวลาใดๆ อย่างแน่นอน เช่น ขนาดและมุมของแรงดันในแต่ละจุดเชื่อมต่อหรือที่เรียกว่าบัส (Bus) กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง เป็นต้น [19] อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่วงก้งหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้า ส่งผลให้สถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์สถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าใหม่ด้วยการเริ่มวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์ การไหลของกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงแรงดัน เสถียรภาพแรงดัน และกระแสลัดวงจร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis)

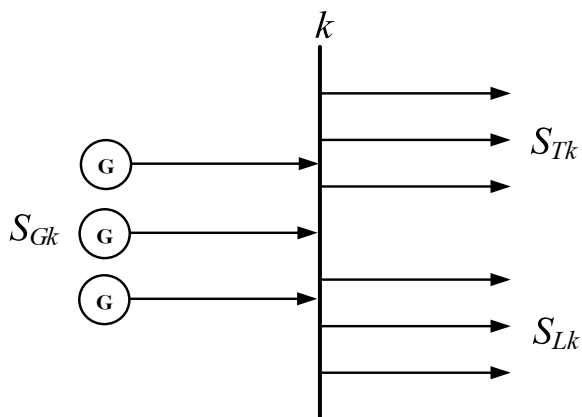
##### 4.1.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นการวิเคราะห์การส่งและรับกำลังไฟฟ้าของบัสในระบบไฟฟ้าโดยการคำนวณหาขนาดและมุมของแรงดันบัส เพื่อนำไปใช้คำนวณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ส่งหรือรับจากแต่ละบัส รวมถึงการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง [19] หากระบบไฟฟ้ามีการเชื่อมแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าใหม่ โดยเฉพาะแหล่งพลังงานที่มีความไม่แน่นอนสูงอย่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่วงก้งหันลม สถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารวมถึงขนาดและมุมของแรงดันในแต่ละจุดเชื่อมต่อ ดังนั้นการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานภายในระบบไฟฟ้าภายหลังการเชื่อมต่อ

สำหรับแนวคิดการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าถูกสร้างจากความเชื่อมโยงของ 2 สมการหลัก คือ

##### 1. สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้า

ความสมดุลของกำลังไฟฟ้า คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส ภาพประกอบ 4-1 แสดงความสมดุลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส  $k$  และกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส  $k$  ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ รวมถึงโหลดที่บัส  $k$  ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการ (4-1)



ภาพประกอบ 4-1 ความสมดุลของระบบไฟฟ้ากำลัง

$$S_{Gk} = S_{Tk} + S_{Lk} \quad (4-1)$$

โดยที่

- $S_{Gk}$  คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัส  $k$   
 $S_{Tk}$  คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลออกจากบัส  $k$  ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ  
 $S_{Lk}$  คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนของโหลดที่ติดตั้ง ณ บัส  $k$

เมื่อพิจารณาแยกเป็นส่วนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะได้ดังสมการ (4-2) และสมการ (4-3) ตามลำดับ

$$P_{Gk} = P_{Tk} + P_{Lk} \quad (4-2)$$

$$Q_{Gk} = Q_{Tk} + Q_{Lk} \quad (4-3)$$

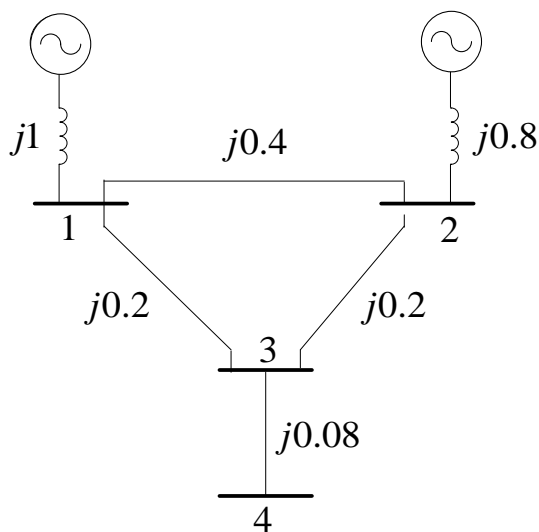
โดยที่

- $P_{Gk}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัส  $k$   
 $P_{Tk}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ไหลออกจากบัส  $k$  ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ  
 $P_{Lk}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลดที่ติดตั้ง ณ บัส  $k$   
 $Q_{Gk}$  คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ บัส  $k$   
 $Q_{Tk}$  คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลออกจากบัส  $k$  ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ  
 $Q_{Lk}$  คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟของโหลดที่ติดตั้ง ณ บัส  $k$

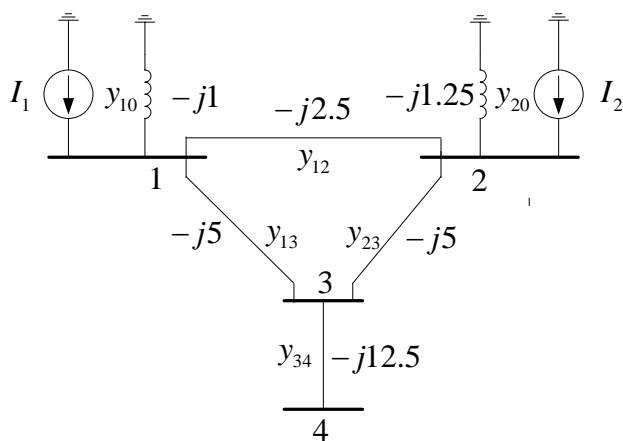


2. สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวประกอบ 4-2 ค่าอิมพีแดนซ์ถูกแสดงในระบบต่อหน่วย และละเลยค่าความต้านทาน สามารถแทนด้วยวงจรแอดมิตแตนซ์ดังภาพประกอบ 4-3 ซึ่งจะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ถูกแทนด้วยเทอมของแอดมิตแตนซ์ตามสมการ (4-4) และแหล่งจ่ายแรงดันถูกเปลี่ยนเป็นแหล่งจ่ายกระแส [32]



ภาพประกอบ 4-2 อิมพีแดนซ์ไคอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง



ภาพประกอบ 4-3 แอดมิตแตนซ์ไคอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลัง

$$y_{km} = \frac{1}{z_{km}} = \frac{1}{R_{km} + jX_{km}} \tag{4-4}$$

ประยุกต์ใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law, KCL) ในการวิเคราะห์วงจรแอดมิตแตนซ์ จะได้สมการจากการใช้กฎ KCL ดังนี้

$$I_1 = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3)$$

$$I_2 = y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3)$$

$$0 = y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4)$$

$$0 = y_{34}(V_4 - V_3)$$

จัดสมการใหม่

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3$$

$$I_2 = -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3$$

$$0 = -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4$$

$$0 = -y_{34}V_3 + y_{34}V_4$$

เมื่อเขียนเป็นสมการโนด (Nodal Equation) จะได้

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4$$

$$I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4$$

$$I_4 = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4$$

จากสมการโนดทั้ง 4 สมการจะได้สมการสมรรถนะหรือบัลแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ของระบบไฟฟ้า กำลังจำนวน 4 บัสดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23}$$

$$Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{34}$$

$$Y_{44} = y_{34}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34}$$

หากเป็นระบบสมการขนาดใหญ่จำนวน  $n$  บัส สามารถเขียนบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์จำนวน  $n$  สมการได้ดังสมการ (4-5)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1k} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2k} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \cdots & Y_{kk} & \cdots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nk} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

หรือเขียนในรูปย่อได้ดังสมการ (4-6)

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (4-6)$$

โดยที่

$I_{bus}$  คือ เวกเตอร์ของกลุ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส

$V_{bus}$  คือ เวกเตอร์ของกลุ่มแรงดันบัส

$Y_{bus}$  คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปวิธีการหาค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ได้ ดังนี้

1. จำนวนมิติของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์เท่ากับจำนวนบัสของระบบ ( $n \times n$ )
2. แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบด้วยแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับแอดมิตแตนซ์
3. แทนสายส่งด้วยวงจรสมมูล พิจารณาตามระยะทางหรือวงจรสมมูลที่มีความเหมาะสม
4. แทนหม้อแปลงด้วยวงจรสมมูลในระบบต่อหน่วยด้วยแอดมิตแตนซ์
5. บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์  $Y_{bus}$  จะเกิดจากเงื่อนไขต่อไปนี้

5.1 ส่วนขององค์ประกอบแนวเส้นทแยงมุม คือผลรวมแอดมิตแตนซ์ที่ต่อที่บัส  $k$

$$Y_{kk} = \sum_{m=0}^n y_{km} \quad k \neq m \quad (4-7)$$

5.2 ส่วนขององค์ประกอบนอกแนวเส้นทแยงมุม คือค่าลบของแอดมิตแตนซ์ที่ต่อระหว่างบัส  $k$  และบัส  $m$

$$Y_{km} = Y_{mk} = -y_{km} \quad (4-8)$$

6. บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์จะมีความสมมาตรกันรอบแนวเส้นทแยงมุม

เพราะฉะนั้นจากความเชื่อมโยงของสมการหลักทั้ง 2 ส่วน จะได้สมการของกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส  $k$  ดังสมการ (4-9)

$$I_k = \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m \quad \text{เมื่อ } m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-9)$$

และกระแสที่ไหลเข้าบัส  $k$  จะเท่ากับกระแสที่ไหลออกจากบัส  $k$  ผ่านสายส่งไปยังบัสอื่นๆ ดังสมการ (4-10)

$$I_{Tk} = I_k = \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m \quad \text{เมื่อ } m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-10)$$

จากสมการ (4-10) สามารถเขียนสมการกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ไหลออกจากบัส  $k$  ไปยังบัสอื่นๆ ได้ดังสมการ (4-11)

$$S_{Tk} = V_k I_{Tk}^* = V_k \left( \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m \right)^* \quad \text{เมื่อ } m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-11)$$

แทนค่า  $S_k$  ในสมการ (4-1) จะได้

$$S_{Gk} - S_{Lk} = V_k \left( \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m \right)^* \quad \text{เมื่อ } m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-12)$$

โดยที่

$S_k$  คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส  $k$  ( $S_k = S_{Gk} - S_{Lk}$ )

ดังนั้น

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k \left( \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m \right)^* \quad \text{เมื่อ } m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-13)$$

และ

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* \left( \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m \right) \quad \text{เมื่อ } m = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-14)$$

โดยสมการ (4-14) คือ สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีความไม่แน่นอนเชิงเส้น กำหนดให้

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k$$

$$V_m = |V_m| \angle \delta_m$$

$$Y_{km} = |Y_{km}| \angle \theta_{km}$$

ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส  $k$  ดังสมการ (4-15)

$$S_k^* = P_k - jQ_k = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{m=1}^n |Y_{km}| |V_m| \angle (\theta_{km} + \delta_m) \quad \text{เมื่อ } m=1,2,3,\dots,n \quad (4-15)$$

เมื่อพิจารณาแยกเป็นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้ผลลัพธ์ดังสมการ (4-16) และสมการ (4-17) ตามลำดับ

$$P_k = \sum_{m=1}^n |V_k| |V_m| |Y_{km}| \cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad \text{เมื่อ } m=1,2,3,\dots,n \quad (4-16)$$

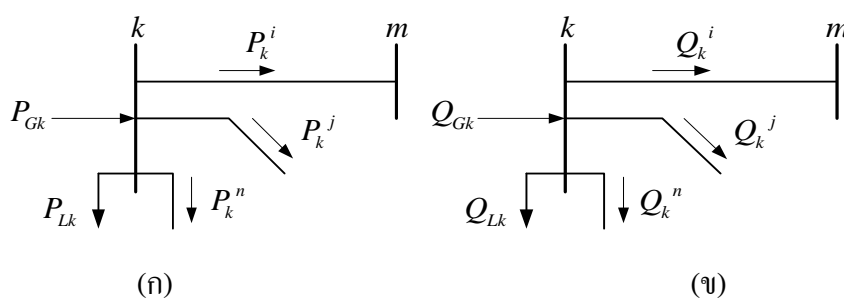
$$Q_k = -\sum_{m=1}^n |V_k| |V_m| |Y_{km}| \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad \text{เมื่อ } m=1,2,3,\dots,n \quad (4-17)$$

โดยที่

$P_k$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส  $k$

$Q_k$  คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟรวมสุทธิที่ไหลเข้าสู่บัส  $k$

อย่างไรก็ตามที่บัสใดๆ จะประกอบด้วยสายส่งจำนวนหลายชุด สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสต่างๆ ได้ดังภาพประกอบ 4-4



ภาพประกอบ 4-4 การไหลของกำลังไฟฟ้าที่บัส  $k$  ไปยังบัสอื่นๆ

(ก) กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส  $k$ , (ข) กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส  $k$

จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้งสมการ (4-16) และสมการ (4-17) มีความไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ต้องใช้วิธีการแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมักใช้คอมพิวเตอร์ในการหาผลเฉลยด้วยวิธีการทำซ้ำ (Iterative Approach) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีหลายวิธี เช่น วิธีของเกาส์ (Gauss Method) วิธีของเกาส์-ไซต์เดล (Gauss-Seidel Method) หรือวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เป็นต้น โดยวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการหาผลเฉลยของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามากที่สุดคือ วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้อง การลู่เข้าของคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว [32]

สำหรับการคำนวณไหลของกำลังไฟฟ้าจะอธิบายด้วยตัวแปร 4 ค่าคือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ( $P$ ) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ( $Q$ ) ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ( $|V| \angle \delta$ ) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Variables) ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของโหลด ( $P_D, Q_D$ )
2. ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable Variables) ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $P_G, Q_G$ )
3. ตัวแปรสถานะ (State Variables) ได้แก่ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ( $|V| \angle \delta$ )

ในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งประเภทของบัสตามลักษณะการติดตั้งของส่วนประกอบที่ต่ออยู่กับบัสนั้นซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่และบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ สำหรับบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ( $P_G$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและขนาดของแรงดันบัส ( $|V|$ ) มีค่าคงที่ แต่เนื่องจากไม่สามารถทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียก่อนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ทุกตัว จึงต้องมีการกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใดบัสหนึ่งทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่จะเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิตสูงสุดเพื่อที่จะสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อย่างเพียงพอ และกำหนดให้มุมเฟสของแรงดันบัสมีค่าคงที่ ซึ่งมุมเฟสแรงดันที่บัสนี้จะเป็นมุมเฟสอ้างอิงสำหรับบัสอื่นๆ ทั้งหมดในระบบไฟฟ้า การจำแนกประเภทของบัสตามลักษณะการควบคุมค่าตัวแปรมี 3 ประเภทดังนี้

1. บัสโหลด (Load Bus หรือ PQ Bus) คือ บัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ( $P_G$ ) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ( $Q_G$ ) เป็นศูนย์ ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของโหลดถูกควบคุมให้คงที่ทำให้สามารถรู้ค่า ( $P_D$ ) และ ( $Q_D$ ) ดังนั้นขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสจึงถูกคำนวณ

2. บัสควบคุมขนาดแรงดัน (Voltage Controlled Bus หรือ PV Bus) คือ บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยที่กำลังไฟฟ้แอกทีฟ ( $P_G$ ) และขนาดของแรงดันบัส ( $|V|$ ) สามารถควบคุมให้คงที่โดยการปรับกระแสสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟกับระบบไฟฟ้า ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ( $Q_G$ ) และมุมเฟสแรงดัน ( $\delta$ ) จึงถูกคำนวณและต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของระบบไฟฟ้าที่ว่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีค่าอยู่ในช่วง ( $Q_{G,\min} < Q_G < Q_{G,\max}$ ) หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถสร้างกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว ในกรณีนี้การสร้างกำลังไฟฟ้แอกทีฟ ( $P_G$ ) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ( $Q_G$ ) จะถูกควบคุมให้คงที่แทน และคำนวณขนาดของแรงดันและมุมเฟสเหมือนกับการคำนวณในบัสโหลด

3. บัสอ้างอิง (Slack Bus หรือ Reference Bus) ระบบไฟฟ้ากำลังมี 1 บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่ออยู่ถูกเลือกให้เป็นบัสอ้างอิง การทำงานของบัสอ้างอิงคือ ผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดและระบบไฟฟ้าเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้แอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่สูญเสียเพื่อให้ระบบเกิดความสมดุลของกำลังไฟฟ้า โดยขนาดของแรงดันบัส ( $|V|$ ) และมุมเฟสแรงดัน ( $\delta$ ) ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ ดังนั้นกำลังไฟฟ้แอกทีฟ ( $P_G$ ) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ( $Q_G$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกคำนวณ

ตาราง 4-1 ข้อมูลของตัวแปรบัสประเภทต่างๆ [19]

ประเภทบัส	ตัวแปรที่ทราบค่า	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า
บัสโหลด	$P_D$ และ $Q_D$	$ V $ และ $\delta$
บัสควบคุมขนาดแรงดัน	$P_G$ และ $ V $	$Q_G$ และ $\delta$
บัสอ้างอิง	$ V $ และ $\delta$	$P_G$ และ $Q_G$

#### 4.1.2 การศึกษาผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า

##### 4.1.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า

การประเมินผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อบริเวณผลิตไฟฟ้าด้วยท่งกั้นล้มตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะเป็นการตรวจสอบปริมาณภาระโหลดที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงแรงดันของจุดเชื่อมต่อ ดังรายละเอียดในตาราง 4-2 (การเปลี่ยนแปลงแรงดันจะอธิบายในหัวข้อ 4.2)



นอกจากนี้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ายังสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายหลังการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กั้งหันลมนอกชายฝั่ง

ตาราง 4-2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ผลกระทบ	รายละเอียด	เกณฑ์การพิจารณา
การไหลของกำลังไฟฟ้า	1 ภาระโหลดของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า	ไม่เกิน 80 %
	2 กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเมื่อวัดที่สถานีต้นทาง	ไม่มี

#### 4.1.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องทราบข้อมูลเริ่มต้นของระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ ข้อมูลของบัส (Bus Data) ข้อมูลของสายไฟฟ้าและหม้อแปลง (Branch Data) และข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Data) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 1. ข้อมูลจุดเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กั้งหันลมนอกชายฝั่ง

จากผลการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่กั้งหันลมนอกชายฝั่งที่ได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 3.1 ประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อทั้งหมด 3 จุด ได้แก่ บัส KMA, KMB และ KCD โดยแต่ละจุดจะถูกเชื่อมกับบัส KN 3, KN 1 และ KN 2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand, EGAT) สำหรับข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่งของแต่ละจุดเชื่อมต่อ ข้อมูลของระบบไฟฟ้าในสถานะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดแสดงดัง ตาราง 4-3 ตาราง 4-4 และตาราง 4-5 ตามลำดับ

ตาราง 4-3 ข้อมูลกำลังไฟฟ้า แรงดันบัส และมุมเฟสของจุดเชื่อมต่อในสถานะโหลดสูงสุด

บัส	ชนิด	V  (p.u.)	$\delta$ (degree)	โหลด		กำลังผลิต	
				(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)
KN 1	Slack	1.040	0.000	0.000	0.000	65.280	25.620
KN 2	Slack	1.014	0.000	0.000	0.000	49.980	27.140
KN 3	Slack	1.023	0.000	0.000	0.000	45.760	15.560
KMA	PQ	1.008	-0.532	45.200	14.900	0.000	0.000
KMB	PQ	1.010	-1.501	64.000	23.200	0.000	0.000
KCD	PQ	0.955	-3.970	48.800	24.500	0.000	0.000

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคใต้ เขต 2

ตาราง 4-4 ข้อมูลกำลังไฟฟ้า แรงดันบัส และมุมเฟสของจุดเชื่อมต่อในสภาวะโหลดต่ำสุด

บัส	ชนิด	V  (p.u.)	$\delta$ (degree)	โหลด		กำลังผลิต	
				(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)
KN 1	Slack	1.040	0.000	0.000	0.000	38.850	14.770
KN 2	Slack	1.014	0.000	0.000	0.000	29.680	13.980
KN 3	Slack	1.023	0.000	0.000	0.000	27.320	9.170
KMA	PQ	1.014	-0.317	27.120	8.940	0.000	0.000
KMB	PQ	1.022	-0.889	38.400	13.920	0.000	0.000
KCD	PQ	0.981	-2.328	29.280	14.700	0.000	0.000

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคใต้ เขต 2

ตาราง 4-5 พารามิเตอร์สายส่งของจุดเชื่อมต่อ

จาก	ถึง	ระยะทาง (km)	R (Ohm/km)	X(Ohm/km)	B(uS/km)
KN 3	KMA	25.000	0.120	0.140	0.0197
KN 1	KMB	52.290	0.070	0.130	0.0704
KN 2	KCD	56.600	0.080	0.360	3.220

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคใต้ เขต 2

## 2. ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้จำลองการทำงานได้อย่างอิงแบบจำลองของกังหันลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบยี่ห้อ Vestas รุ่น V112 มีกำลังผลิตติดตั้งเท่ากับ 3 MW แต่เนื่องจากกำลังผลิตไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จริงจะต้องถูกคำนวณด้วยค่าตัวประกอบกำลังผลิต ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นกำลังผลิต (กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ) ในแบบจำลองกังหันลมจะอ้างอิงจากค่าตัวประกอบกำลังผลิตเป็นหลัก [4] นั่นคือ กังหันลม SPP 1 มีจำนวนกังหันลมเท่ากับ 60 ตัว มีค่าตัวประกอบกำลังการผลิต 17.60% กำลังผลิตของกังหันลมแต่ละตัวจะมีค่าประมาณ 0.54 MW ส่วนกังหันลม SPP 2 และ SPP 3 มีกังหันลมของแต่ละกังหันลมเท่ากับ 90 ตัว มีค่าตัวประกอบกำลังการผลิต 14.13% กำลังผลิตของกังหันลมแต่ละตัวจะมีค่าประมาณ 0.45 MW นอกจากนี้ได้กำหนดค่าตัวประกอบกำลัง โหมดควบคุมการทำงาน และรูปแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงกังหันลมดังตาราง 4-6 สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ ได้อ้างอิงตามแบบจำลองของกังหันลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory เป็นหลัก ในส่วนข้อมูล

สายส่งที่ใช้เชื่อมระหว่างจุดเชื่อมต่อและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเป็นการเลือกใช้สายส่งชนิดเดียวกับสายส่งเคเบิลใต้น้ำที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้เชื่อมต่อบัส KN 1 ไปยังบัส KMB ซึ่งมีฟารามิเตอร์ของสายส่งตามตาราง 4-5 และระยะทางของจุดเชื่อมต่อกับกังหันลมดังตาราง 4-7

ตาราง 4-6 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

กังหันลมนอกชายฝั่ง	กำลังผลิต (MW)	ตัวประกอบกำลัง	โหมคควบคุมการทำงาน	ระดับแรงดันหม้อแปลง (kV)	รูปแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลง
SPP 1	$60 \times 0.54 = 32.40$	1	PV	33/0.69	เดลต้า-วาย
SPP 2	$90 \times 0.45 = 40.50$	1	PV	33/0.69	เดลต้า-วาย
SPP 3	$90 \times 0.45 = 40.50$	1	PV	33/0.69	เดลต้า-วาย

ตาราง 4-7 ระยะทางระหว่างจุดเชื่อมต่อและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

รูปแบบการเชื่อมต่อ	ระยะทาง (km)		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
KMA	87.93	62.26	46.14
KMB	72.43	46.38	31.25
KCD	-	92.75	79.58

#### 4.1.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม

##### DIgSILENT PowerFactory

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ามีหลากหลายวิธีอย่างที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งวิธีที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory จะอาศัยวิธีการหาผลเฉลยของระบบสมการด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยมีแนวคิดเริ่มต้นจากพิจารณาสมการที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้น [19] ดังสมการ (4-18)

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_1 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_2 \\
 &\vdots \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_n
 \end{aligned}
 \tag{4-18}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 x_1, x_2, \dots, x_n &\text{ คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า} \\
 c_1, c_2, \dots, c_n &\text{ คือ ตัวแปรที่ทราบค่า}
 \end{aligned}$$

ให้  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  คือ ค่าประมาณเริ่มต้นตัวแปรไม่ทราบค่าของการแก้สมการ  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$  คือ ค่าปรับแต่ง (Correction) เพื่อใช้สำหรับปรับค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ให้ผลเฉลยคู่เข้าสู่คำตอบ ดังนั้นเมื่อแทนค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในสมการ (4-18) จะได้

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= c_1 \\
 f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= c_2 \\
 &\vdots \\
 f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= c_n
 \end{aligned}
 \tag{4-19}$$

เมื่อประมาณฟังก์ชันที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นในสมการ (4-19) ให้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นด้วยการกระจายสมการทางด้ายซ้ำด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series Expansion) รอบจุด  $x^{(0)}$  จะได้สมการ (4-20)

$$\begin{aligned}
 &f_i(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) \\
 &= f_i(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_1} + \Delta x_2^{(0)} \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_2} \\
 &\quad + \dots + \Delta x_n^{(0)} \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_n} + \varphi \\
 &= c_i
 \end{aligned}
 \tag{4-20}$$

เมื่อ  $\varphi$  คือฟังก์ชันกำลังสูงของ  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$  และอนุพันธ์อันดับสอง, อันดับสาม, ... ของฟังก์ชัน  $f_i$  โดยปกติเทอมอันดับสูงของการประมาณด้วยอนุกรมเทเลอร์มีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ ดังนั้นจึงเหลือเฉพาะการประมาณสมการเฉพาะอันดับหนึ่ง เมื่อจัดสมการใหม่จะได้สมการ (4-21)

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_1} + \Delta x_2^{(0)} \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n^{(0)} \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_n} &= c_1 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_1} + \Delta x_2^{(0)} \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n^{(0)} \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_n} &= c_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \frac{\partial f_n^{(0)}}{\partial x_1} + \Delta x_2^{(0)} \frac{\partial f_n^{(0)}}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n^{(0)} \frac{\partial f_n^{(0)}}{\partial x_n} &= c_n \end{aligned} \quad (4-21)$$

เมื่อจัดรูปของสมการ (4-21) ให้อยู่ในรูปของระบบเมทริกซ์จะได้ดังสมการ (4-22)

$$\begin{bmatrix} c_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ c_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ c_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}^{(0)} \quad (4-22)$$

สามารถลดรูปให้อยู่ในรูปย่อดังสมการ (4-23)

$$\Delta f = J \Delta x \quad (4-23)$$

โดยที่

$J$  คือ เมทริกซ์ของอนุพันธ์ย่อยหรือจาโคเบียนเมทริกซ์ (Jacobian Matrix)

การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันเป็นวิธีการหาคำตอบโดยการทำซ้ำ มีการกำหนดคำตอบในตอนเริ่มต้นแล้วคำนวณหาค่าปรับแต่ง เพื่อนำไปปรับหาคำตอบในรอบถัดไปจนกว่าค่าปรับแต่ง  $\Delta x_k^{(i)}$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้และจะได้ว่าค่า  $x_k^{(i+1)}$  เป็นคำตอบของสมการดังสมการ (4-24)

$$x_k^{(i+1)} = x_k^{(i)} + \Delta x_k^{(i)} \quad (4-24)$$

ดังนั้นการนำวิธีนิวตัน-ราฟสันข้างต้นมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาจากกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส  $k$  ดังสมการ (4-9) สมการ (4-16) และสมการ (4-17) เมื่อทำการกระจายสมการข้างต้นโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์รอบจุดเริ่มต้นและไม่สนใจเทอมอันดับสูง จะได้ระบบสมการที่เป็นเชิงเส้นดังสมการ (4-25)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(i)} \\ \hline \Delta Q_2^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(i)} \\ \hline \Delta |V_2^{(i)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(i)}| \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

เขียนในรูปย่อได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

Mismatch Jacobian Correction

สำหรับเทอมของ  $\Delta P_k^{(i)}$  และ  $\Delta Q_k^{(i)}$  คือ ผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ระบุค่ากับกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้ เป็นที่รู้จักกันในเทอมของผลต่างกำลังไฟฟ้างสมการ (4-27) และสมการ (4-28)

$$\Delta P_k^{(i)} = P_{k,sch}^{(i)} - P_{k,cal}^{(i)} = (P_{Gk}^{(i)} - P_{Lk}^{(i)}) - P_{k,cal}^{(i)} \quad (4-27)$$

$$\Delta Q_k^{(i)} = Q_{k,sch}^{(i)} - Q_{k,cal}^{(i)} = (Q_{Gk}^{(i)} - Q_{Lk}^{(i)}) - Q_{k,cal}^{(i)} \quad (4-28)$$

โดยที่

$\Delta P_k^{(i)}$  คือ ความเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส  $k$  (p.u.)

$\Delta Q_k^{(i)}$  คือ ความเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส  $k$  (p.u.)

$P_{k,sch}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ได้รับการจัดสรรของบัส  $k$  (p.u.)

$Q_{k,sch}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ได้รับการจัดสรรของบัส  $k$  (p.u.)

$P_{Gk}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้บัส  $k$  (p.u.)

$Q_{Gk}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้บัส  $k$  (p.u.)

$P_{Lk}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลดที่บัส  $k$  (p.u.)

$Q_{Lk}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส  $k$  (p.u.)

$P_{k,cal}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่คำนวณได้จากสมการ (4-16) ที่บัส  $k$  (p.u.)

$Q_{k,cal}^{(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณได้จากสมการ (4-17) ที่บัส  $k$  (p.u.)

สำหรับองค์ประกอบต่างๆ ในจาโคเบียนเมทริกซ์ประกอบด้วย  $(n-1) \times (n-1)$  องค์ประกอบ โดยละเลยองค์ประกอบของบัสอ้างอิงเนื่องจากเป็นบัสที่ขนาดแรงดันและมุมเฟสคงที่ ส่วนกรณีบัสควบคุมขนาดแรงดันจะรู้ค่าขนาดแรงดัน ดังนั้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีบัสควบคุมขนาดแรงดันจำนวน  $m$  บัส จะมีสมการ  $m$  สมการที่เกี่ยวข้องกับ  $\Delta Q$  และ  $\Delta V$  คอลัมน์ที่เกี่ยวข้องของจาโคเบียนเมทริกซ์จะถูกตัดออก

จากความสัมพันธ์ในสมการ (4-26) พบว่าจาโคเบียนเมทริกซ์แบ่งเป็น 4 องค์ประกอบ ซึ่งสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

องค์ประกอบ  $J_1$

สมาชิกในแนวทแยงมุม: 
$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{m \neq k} |V_k| |V_m| |Y_{km}| \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (4-29)$$

สมาชิกนอกแนวทแยงมุม: 
$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_m} = -|V_k| |V_m| |Y_{km}| \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (m \neq k) \quad (4-30)$$

องค์ประกอบ  $J_2$

สมาชิกในแนว  
ทแยงมุม: 
$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|V_k||Y_{kk}|\cos\theta_{kk} + \sum_{m \neq k} |V_m||Y_{km}|\cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (4-31)$$

สมาชิกนอกแนว  
ทแยงมุม: 
$$\frac{\partial P_k}{\partial |V_m|} = |V_k||Y_{km}|\cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (m \neq k) \quad (4-32)$$

องค์ประกอบ  $J_3$

สมาชิกในแนว  
ทแยงมุม: 
$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{m \neq k} |V_k||V_m||Y_{km}|\cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (4-33)$$

สมาชิกนอกแนว  
ทแยงมุม: 
$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_m} = -|V_k||V_m||Y_{km}|\sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (m \neq k) \quad (4-34)$$

องค์ประกอบ  $J_4$

สมาชิกในแนว  
ทแยงมุม: 
$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|V_k||Y_{kk}|\sin\theta_{kk} - \sum_{m \neq k} |V_m||Y_{km}|\sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (4-35)$$

สมาชิกนอกแนว  
ทแยงมุม: 
$$\frac{\partial Q_k}{\partial |V_m|} = -|V_k||Y_{km}|\sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (m \neq k) \quad (4-36)$$

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาด  $n$  บัส ได้ดังนี้

1. บัสโหลด กำหนดให้แรงดันและมุมเฟสมีค่าเป็น  $1.0 \angle 0^\circ$  และบัสควบคุมขนาดแรงดันกำหนดให้มุมเฟสมีค่าเป็น  $0^\circ$
2. สร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์  $Y_{bus}$
3. บัสโหลดคำนวณค่า  $P_k^{(i)}$  และ  $Q_k^{(i)}$  และบัสควบคุมขนาดแรงดันคำนวณเฉพาะค่า  $P_k^{(i)}$  ดังนี้

$$P_k = \sum_{m=1}^n |V_k||V_m||Y_{km}|\cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m)$$

$$Q_k = -\sum_{m=1}^n |V_k||V_m||Y_{km}|\sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m)$$



## 4. คำนวณค่าผลต่างกำลังไฟฟ้า

$$\Delta P_k^{(i)} = P_{k,sch}^{(i)} - P_{k,cal}^{(i)}$$

$$\Delta Q_k^{(i)} = Q_{k,sch}^{(i)} - Q_{k,cal}^{(i)}$$

## 5. คำนวณจาโคเบียนเมทริกซ์

## 6. แก้สมการเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

## 7. คำนวณค่าขนาดแรงดันและมุมเฟสใหม่

$$|V_k^{(i+1)}| = |V_k^{(i)}| + \Delta |V_k^{(i)}|$$

$$\delta_k^{(i+1)} = \delta_k^{(i)} + \Delta \delta_k^{(i)}$$

8. เริ่มทำซ้ำใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งค่าผลต่างกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าค่าความถูกต้อง ( $\epsilon$ ) ที่กำหนดไว้

$$|\Delta P_k^{(i)}| \leq \epsilon$$

$$|\Delta Q_k^{(i)}| \leq \epsilon$$

ถึงแม้ว่าสมการผลต่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ  $\Delta Q_k$  ของบัสควบคุมขนาดแรงดันไม่จำเป็นในการคำนวณของสมการ(4-26) แต่ผลเฉลยของสมการ (4-17) สำหรับบัสควบคุมขนาดแรงดันยังคงดำเนินการต่อไปหรืออาจใช้การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันที่ควบคุมให้มีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงเพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันบัสให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด และต้องเป็นตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$Q_{Gk,\min} < Q_{Gk} < Q_{Gk,\max}$$

และหากเงื่อนไขใดๆ ต่อไปนี้เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการซ้ำ

$$Q_{Gk} > Q_{Gk,\max}$$

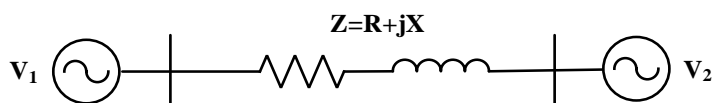
$$Q_{Gk} < Q_{Gk,\min}$$

บัสควบคุมขนาดแรงดันดังกล่าวจะกลายเป็นบัสโหลด และสมการผลต่างกำลังไฟฟ้าจะเป็นดังนี้

$$\Delta Q_k = Q_{Gk,\max} - Q_{Lk} - Q_k$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk,\min} - Q_{Lk} - Q_k$$

สำหรับความสัมพันธ์การไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถพิจารณาจากแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ 2 บัสที่ถูกเชื่อมต่อกันผ่านสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์  $Z = R + jX$  ดังภาพประกอบ 4-5



ภาพประกอบ 4-5 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส

กำหนดให้  $V_1 = |V_1| \angle \delta_1$ ,  $V_2 = |V_2| \angle \delta_2$  และ  $Z = |Z| \angle \theta$

สมมติให้ทิศทางการไหลของกระแสไหลจากบัส 1 ไปบัส 2 ดังสมการ (4-37)

$$I_{12} = \frac{|V_1| \angle \delta_1 - |V_2| \angle \delta_2}{|Z| \angle \theta} = \left( \frac{|V_1|}{|Z|} \angle \delta_1 - \theta \right) - \left( \frac{|V_2|}{|Z|} \angle \delta_2 - \theta \right) \quad (4-37)$$

จะได้กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนดังสมการ (4-38)

$$\begin{aligned} S_{12} &= V_1 I_{12}^* = |V_1| \angle \delta_1 \left( \frac{|V_1|}{|Z|} \angle \delta_1 - \theta \right) - \left( \frac{|V_2|}{|Z|} \angle \delta_2 - \theta \right) \\ &= \frac{|V_1|^2}{|Z|} \angle \theta - \frac{|V_1| |V_2|}{|Z|} \angle \theta + \delta_1 - \delta_2 \end{aligned} \quad (4-38)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

$$P_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|} \cos \theta - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \cos(\theta + \delta_1 - \delta_2) \quad (4-39)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|} \sin \theta - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \sin(\theta + \delta_1 - \delta_2) \quad (4-40)$$

เนื่องจากสายส่งของระบบไฟฟ้าจะมีค่ารีซิสแตนซ์น้อยมากเมื่อเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ เพราะฉะนั้นจึงสมมติให้  $R=0$  ( $Z = X \angle 90^\circ$ ) จะได้สมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟดังสมการ (4-41) และสมการ (4-42)

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{|X|} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (4-41)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|} \sin \theta - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \sin(\theta + \delta_1 - \delta_2) \quad (4-42)$$

เพราะฉะนั้นจากผลเฉลยของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะได้ความสัมพันธ์การไหลของกำลังไฟฟ้าดังนี้

1. สมการ (4-41) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของ  $\delta_1$  หรือ  $\delta_2$  จะส่งผลกระทบต่อทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงแรงดันจะไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนต่อทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ดังนั้นทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในสายส่งจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของมุมแรงดันบัสเป็นหลัก ( $P_{12} \propto \sin \delta$ ) โดยที่  $\delta = \delta_1 - \delta_2$  เพราะฉะนั้น

ถ้า  $V_1$  นำ  $V_2$  จะได้  $\delta$  เป็นบวก กำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะไหลจากบัส 1 ไปบัส 2

แต่ถ้า  $V_1$  ตาม  $V_2$  จะได้  $\delta$  เป็นลบ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะไหลจากบัส 2 ไปบัส 1

นอกจากนี้การสมมติให้  $R=0$  ตามหลักทฤษฎีกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมุม  $\delta = 90^\circ$  ดังสมการ (4-43)

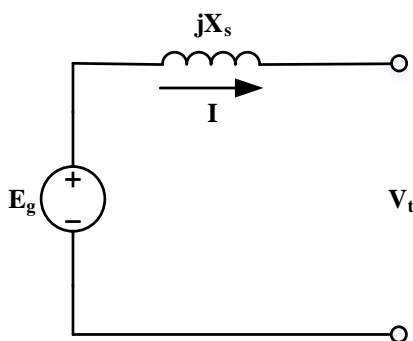
$$P_{12,\max} = \frac{|V_1||V_2|}{|X|} \quad (4-43)$$

2. จากสมการ (4-42) จะเห็นได้ว่าทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟถูกกำหนดด้วยความแตกต่างของขนาดแรงดันบัส ( $Q \propto |V_1| - |V_2|$ ) เพราะฉะนั้น

ถ้า  $|V_1|$  มากกว่า  $|V_2|$  จะได้  $(|V_1| - |V_2|)$  เป็นบวก กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะไหลจากบัส 1 ไปบัส 2

ถ้า  $|V_1|$  น้อยกว่า  $|V_2|$  จะได้  $(|V_1| - |V_2|)$  เป็นลบ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะไหลจากบัส 2 ไปบัส 1

ในส่วนของ การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นการควบคุมการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ในขณะที่แรงดันและความถี่ให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยที่การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้า ในขณะที่กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความถี่ น้อยมาก แต่จะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดัน [32] ดังนั้นกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จึงมีการควบคุมแยกกัน นั่นคือการควบคุมที่เรียกว่า Prime Mover Control จะควบคุมความถี่ของระบบและกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ในขณะที่ Exciter Control จะควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งมีหลักการทำงานที่สามารถพิจารณาจากแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าง่ายภาพประกอบ 4-6



ภาพประกอบ 4-6 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

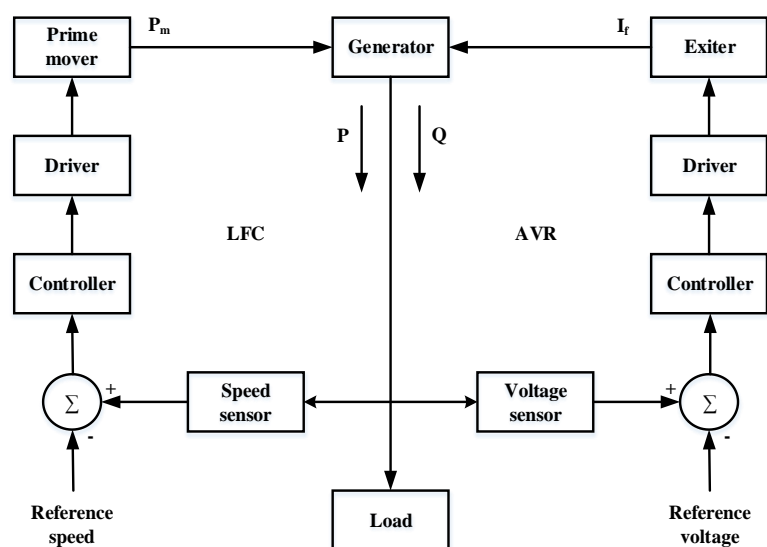
กำหนดให้  $E_g = |E_g| \angle \delta$  และ  $V_t = |V_t| \angle 0^\circ$  จะได้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าง่ายภาพประกอบ (4-44) และสมการ (4-45)

$$P = \frac{|E_g| |V_t|}{X_g} \sin \delta \quad (4-44)$$

$$Q = \frac{|V_t|}{|X_g|} (E_g \cos \delta - V_t) \quad (4-45)$$

จากสมการ (4-44) จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าแอกทิฟจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมุมกำลังไฟฟ้า ( $\delta$ ) เพิ่มขึ้น [33] เพราะฉะนั้นเมื่อ Prime Mover ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มกำลังผลิตให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่การกระตุ้นแรงดันคงที่ (Excitation Voltage) จะส่งผลให้ความเร็วของโรเตอร์มีค่าสูงขึ้น มุมกำลังไฟฟ้า ( $\delta$ ) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทิฟเข้าสู่ระบบมากขึ้น เพราะฉะนั้นหากปริมาณโหลดของระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วอ้างอิง ( $\omega < \omega_{ref}$ ) นั่นคือความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลง ( $\omega = 2\pi f$ ) Prime Mover จะเพิ่มกำลังกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการหมุนเพลลาให้เร็วขึ้น ส่งผลให้ความเร็วและกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น การควบคุมในลักษณะนี้เรียกว่า Load Frequency Control (LFC)

นอกจากนี้จากสมการ (4-45) กำลังไฟฟ้รีแอกทิฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันกระตุ้น ( $E_g$ ) เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นเมื่อทำการ Over Excitation เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่การควบคุม Prime Mover ให้มีค่าคงที่ จะส่งผลให้เกิดการป้อนแรงดันกระแสตรงให้แก่ขดลวดสนามในโรเตอร์ แรงดันกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทิฟเข้าสู่ระบบมากขึ้น เพราะฉะนั้นหากปริมาณโหลดของระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง ( $E_g < E_{g,ref}$ ) จะกระตุ้นให้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงป้อนกระแสสนามเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้รีแอกทิฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น การควบคุมในลักษณะนี้เรียกว่า Automatic Voltage Control (AVR) ซึ่งสามารถสรุปหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าดังภาพประกอบ 4-7



ภาพประกอบ 4-7 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า



- รูปแบบการทำงานแบบควบคุมแรงดัน คือการควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อให้มีค่าคงที่ โหมคการทำงานนี้ขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมอาจมีค่าไม่คงที่ในแต่ละช่วงเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อควบคุมแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ ดังนั้นจึงไม่มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อกำลังสูญเสียของระบบมากนัก

#### 4.1.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า

การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเริ่มจากการพิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง ตาราง 4–8 แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะกำลังผลิตสูงสุด ผลการจำลองการทำงานชี้ให้เห็นว่าสภาวะโหลดของระบบไฟฟ้าในปัจจุบันทั้งโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดมีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างจากกรณีไม่มีการเชื่อมต่อดังกรณี 0 นั้นหมายถึงระบบไฟฟ้าไม่สามารถรองรับกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งทั้ง 3 ได้ เนื่องจากรูปแบบการเชื่อมต่อทั้ง 18 กรณี จะมีกำลังไฟฟ้าไหลเข้าสู่บัสสถานีต้นทางของจุดเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นข้อห้ามที่ไม่อนุญาตให้มีเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดปริมาณกำลังผลิตให้มีความเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าดังกล่าว ผลการจำลองโดยการลดปริมาณกำลังผลิตลงครึ่งร้อยละ 10 ของกำลังผลิตสูงสุดพบว่าที่กำลังผลิตร้อยละ 60 หรือประมาณ 432 MW จะมีรูปแบบการเชื่อมต่อทั้งหมด 4 กรณีที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยไม่มีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับได้แก่ กรณีที่ 6, 8, 12 และ 16 ดังแสดงในตาราง 4–9 ผลการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้ง 4 กรณีแสดงในภาคผนวก ข

ตาราง 4–8 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะกำลังผลิตสูงสุด

กรณีศึกษา	สภาวะโหลดสูงสุด	สภาวะโหลดต่ำสุด
0	✓	✓
1	✗	✗
2	✗	✗
3	✗	✗
4	✗	✗
5	✗	✗
6	✗	✗
7	✗	✗

8	x	x
9	x	x
10	x	x
11	x	x
12	x	x
13	x	x
14	x	x
15	x	x
16	x	x
17	x	x
18	x	x

✓ หมายถึง กำลังไฟฟ้าไม่ไหลย้อนกลับสถานีต้นทาง

x หมายถึง กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับสถานีต้นทาง

ตาราง 4-9 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะร้อยละ 60 ของกำลังผลิตสูงสุด

กรณีศึกษา	สภาวะโหลดสูงสุด	สภาวะโหลดต่ำสุด
0	✓	✓
1	x	x
2	x	x
3	x	x
4	x	x
5	x	x
6	✓	✓
7	x	x
8	✓	✓
9	x	x
10	x	x
11	x	x
12	✓	✓



13	×	×
14	×	×
15	×	×
16	✓	✓
17	×	×
18	×	×

✓ หมายถึง กำลังไฟฟ้าไม่ไหลย้อนกลับสถานีต้นทาง

× หมายถึง กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับสถานีต้นทาง

จากตาราง 4-9 จะเห็นได้ว่าจากรูปแบบที่เป็นไปได้ในการเชื่อมต่อทั้ง 18 กรณี จะมีเพียง 4 กรณีเท่านั้นที่ระบบไฟฟ้าสามารถรองรับท่งกั้นล้มทั้ง 3 ระบบได้ ซึ่งรูปแบบการเชื่อมต่อทั้ง 4 กรณีจะมีลักษณะการเชื่อมต่อในรูปแบบของจุดเชื่อมต่อ 1 จุด เชื่อมกับท่งกั้นล้มเพียง 1 ท่งกั้นล้มเท่านั้น สำหรับกรณีอื่นๆ ที่เหลือจะไม่สามารถเชื่อมต่อท่งกั้นล้มเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ เนื่องจากปริมาณกำลังผลิตของท่งกั้นล้มมีมากกว่าที่โหลดของระบบไฟฟ้าต้องการ กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจึงไหลย้อนกลับไปยังสถานีต้นทาง อย่างไรก็ตามการพิจารณาหาจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุดจะต้องทำการวิเคราะห์เชิงเทคนิคแบบอื่นๆ ร่วมด้วย ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา ต่อไปจะเรียงลำดับการเชื่อมต่อใหม่จากเดิมที่เป็นกรณีที่ 6, 8, 12 และ 16 เป็นกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งมีรูปแบบการเชื่อมต่อดังตาราง 4-10

ตาราง 4-10 รูปแบบการเชื่อมต่อที่สามารถรองรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่งกั้นล้มนอกชายฝั่ง

กรณีศึกษา	รูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่งกั้นล้มนอกชายฝั่ง		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
1	KMA	KMB	KCD
2	KMA	KCD	KMB
3	KMB	KMA	KCD
4	KMB	KCD	KMA

เมื่อได้รูปแบบการเชื่อมต่อและปริมาณกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่งกั้นล้มนอกชายฝั่งที่เหมาะสมแล้ว ส่วนต่อไปที่ต้องพิจารณาคือปริมาณภาระโหลดในสายส่งของระบบไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงหลังการเชื่อมต่อท่งกั้นล้ม ผลการจำลองทั้ง 4 กรณีเทียบกับกรณีไม่มี

การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งปรากฏว่าปริมาณโหลดหรือภาระในสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณกระแสจากแหล่งพลังงานเดิมของการไฟฟ้า เนื่องจากก่อนการเชื่อมต่อปริมาณกระแสที่โหลดได้รับจะมาจากแหล่งพลังงานเดิมของระบบไฟฟ้าเพียงทิศทางเดียว แต่เมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่โหลดได้รับจะมาจาก 2 ส่วน คือจากแหล่งพลังงานเดิมและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่ง หมายความว่า การมีทุ้งกังหันลมเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าจะช่วยจ่ายกระแสบางส่วนให้โหลดทำให้ปริมาณกระแสจากแหล่งพลังงานเดิมมีปริมาณเปลี่ยนแปลงไป ปริมาณภาระโหลดในสายส่งจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงดังตาราง 4-11 และตาราง 4-12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากความแตกต่างระหว่างปริมาณกระแสของทุ้งกังหันลมและกระแสที่โหลดมีค่าน้อย กระแสจากแหล่งพลังงานเดิมจะมีค่าลดลงในทางตรงกันข้ามหากความแตกต่างของกระแสดังกล่าวมีค่ามาก กระแสจากแหล่งพลังงานเดิมจะมีโอกาสเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ผลของการใช้โหมคควบคุมแรงดันของกังหันลมซึ่งจะรักษาระดับแรงดันให้คงที่ด้วยการดึงกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้า โดยจะส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสของทุ้งกังหันลมแตกต่างกันเนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่เกิดขึ้นในสายส่งระหว่างจุดเชื่อมต่อและทุ้งกังหันลม ผลของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟดังกล่าวจะส่งผลให้มุมของแรงดันบัสของกังหันลมมีค่าต่างกัน ขนาดกระแสไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับโหมคการทำงานดังกล่าวด้วยเช่นกัน สำหรับผลการจำลองการทำงานทั้ง 4 รูปแบบพบว่ายังคงมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดการไฟฟ้าที่กำหนดให้ปริมาณโหลดของสายส่งต้องมีค่าไม่เกิน 80% นอกจากนี้ปริมาณภาระโหลดเมื่อมีการเชื่อมต่อทุ้งกังหันลมจะมีค่าลดลงกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ ยกเว้นกรณีที่ 3 และ 4 ในสภาวะโหลดต่ำสุดของจุดเชื่อมต่อ KMA เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าของทุ้งกังหันลมและกระแสโหลดมีค่าต่างกันมาก กระแสจากแหล่งพลังงานเดิมจึงไหลในสายส่งมากขึ้น ปริมาณภาระโหลดจึงเพิ่มขึ้น

ตาราง 4-11 ปริมาณภาระโหลดของสายส่งภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	ปริมาณภาระโหลด (%)			การเปลี่ยนแปลงปริมาณภาระโหลด (%)		
	KN 3-KMA	KN 1-KMB	KN 2-KCD	KN 3-KMA	KN 1-KMB	KN 2-KCD
0	46.490	55.040	33.580	-	-	-
1	39.900	46.610	23.960	-14.175	-15.316	-28.648
2	39.900	46.620	24.090	-14.175	-15.300	-28.261
3	38.570	48.510	23.960	-17.036	-11.864	-28.648
4	38.610	48.510	24.090	-16.950	-11.864	-28.261

ตาราง 4-12 ปริมาณภาระโหลดของสายส่งภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	ปริมาณภาระโหลด (%)			การเปลี่ยนแปลงปริมาณภาระโหลด (%)		
	KN 3-KMA	KN 1-KMB	KN 2-KCD	KN 3-KMA	KN 1-KMB	KN 2-KCD
0	27.720	32.620	19.620	-	-	-
1	27.260	30.400	15.120	-1.659	-6.806	-22.936
2	27.260	30.520	15.200	-1.659	-6.438	-22.528
3	28.230	30.700	15.120	+1.840	-5.886	-22.936
4	28.370	30.700	15.200	+2.345	-5.886	-22.528

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อมีการเชื่อมต่อทุ้งกั้นหั้นลมนอกชายฝั่งทั้ง 4 กรณีแสดงดังตาราง 4-13 ผลการเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อแสดงให้เห็นว่า ในสภาวะโหลดสูงสุดของระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณ โหลดของระบบไฟฟ้าและกำลังผลิตของทุ้งกั้นหั้นลมมีค่าน้อย ซึ่งหมายถึงปริมาณกำลังผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความเพียงพอกับปริมาณโหลดนั่นเอง ในส่วนสภาวะ โหลดต่ำสุดกำลัง ไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อ เนื่องจากสภาวะนี้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของทุ้งกั้นหั้นลมมีมากเกินไปที่ปริมาณ โหลดต้องการ เมื่อความแตกต่างของกำลังไฟฟ้างกล่าวมากขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียจะยิ่งเพิ่มขึ้นตาม นอกจากนี้ ผลกระทบจากระยะสายส่งก็มีผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นเช่นกัน นั่นคือทุ้งกั้นหั้นลมที่อยู่ใกล้กับจุดเชื่อมต่อ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

ตาราง 4-13 ผลกระทบกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า

กรณีศึกษา	สภาวะโหลดสูงสุด		สภาวะโหลดต่ำสุด	
	กำลังสูญเสีย (MW)	เปรียบเทียบกับ กรณีที่ 0 (%)	กำลังสูญเสีย (MW)	เปรียบเทียบกับ กรณีที่ 0 (%)
0	3.020	-	1.050	-
1	3.020	0.000	1.980	+88.571
2	3.000	-0.662	1.960	+86.667
3	3.090	+2.318	2.040	+94.286
4	3.070	+1.656	2.010	+91.429

#### 4.1.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบการไหลของกำลังไฟฟ้า

การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งก้งหั้นลมนอกชายฝั่งกำลังผลิตติดตั้ง 720 MW เข้ากับระบบไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าในปัจจุบันไม่สามารถรองรับกำลังผลิตดังกล่าวได้ เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับสถานีต้นทาง จึงจำเป็นต้องลดขนาดกำลังผลิตให้มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า โดยพบว่าทุ้งก้งหั้นลมนที่มีกำลังผลิตประมาณร้อยละ 60 หรือ 432 MW จะสามารถเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งก้งหั้นลมนอกชายฝั่งได้ทั้งหมด 4 กรณี

ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณภาระโหลดในสายส่งพบว่าปริมาณภาระโหลดส่วนใหญ่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อ เนื่องจากการช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดของทุ้งก้งหั้นลม ส่งผลให้แหล่งพลังงานเดิมของระบบไฟฟ้าจ่ายกระแสโหลดน้อยลง ยกเว้นกรณีที่มีความแตกต่างของกระแสทุ้งก้งหั้นลมและกระแสโหลดมีความแตกต่างกันมาก อย่างเช่นการเชื่อมต่อทุ้งก้งหั้นลมนที่มีกำลังผลิตสูงเข้ากับระบบไฟฟ้าในสภาวะโหลดต่ำ กระแสจากแหล่งพลังงานเดิมจะมีโอกาสเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ นอกจากนี้ขนาดกระแสของทุ้งก้งหั้นลมยังขึ้นกับการโหลดควบคุมการทำงาน ซึ่งได้เลือกใช้โหลดควบคุมแรงดันที่สามารถดึงกำลังไฟรีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันของทุ้งก้งหั้นลมให้มีค่าคงที่ กำลังไฟฟารีแอกทีฟดังกล่าวจะไหลผ่านสายส่งที่มีความยาวแตกต่างกัน ส่งผลให้มุมแรงดันบัสของทุ้งก้งหั้นลมนมีค่าต่างกัน กระแสจากทุ้งก้งหั้นลมนที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามโหลดการทำงานดังกล่าว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณภาระโหลดของสายส่งจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปริมาณกระแสระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งก้งหั้นลมและปริมาณกระแสโหลดของจุดเชื่อมต่อ โดยกระแสของทุ้งก้งหั้นลมจะขึ้นกับโหลดควบคุมการทำงานของทุ้งก้งหั้นลม และหากเปรียบเทียบปริมาณภาระโหลดทั้ง 4 รูปแบบของแต่ละจุดเชื่อมต่อพบว่ายังคงผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและยังมีปริมาณที่ลดลง ยกเว้นกรณีที่ 3 และ 4 ในสภาวะโหลดต่ำสุดของจุดเชื่อมต่อ KMA โดยกรณีที่ 1 จะมีปริมาณภาระโหลดในสายส่งน้อยที่สุด

นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลกระทบกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งก้งหั้นลมนอกชายฝั่งในสภาวะโหลดสูงสุดพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ทุ้งก้งหั้นลมจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้ามีปริมาณเพียงพอกับปริมาณความต้องการโหลด ในส่วนของสภาวะโหลดต่ำสุด กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มสูงกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ เนื่องจากปริมาณความต้องการโหลดที่น้อยลง แต่ปริมาณกำลังผลิตของทุ้งก้งหั้นลมยังคงมีค่าเท่ากับในสภาวะโหลดสูงสุด กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจากที่โหลดต้องการจึงกลายเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า

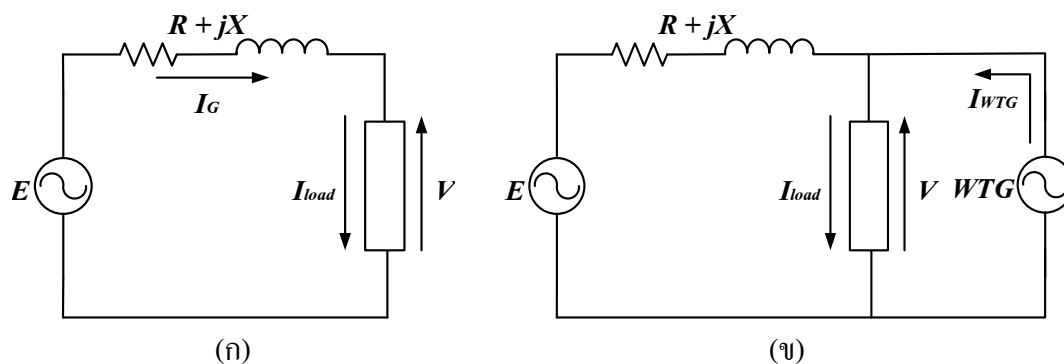
## 4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Variation Analysis)

### 4.2.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน

เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งหั้นลมเข้ากับระบบไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงดันค่าหนึ่งเข้ามา ทำให้แรงดันโดยรวมของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันของจุดเชื่อมต่อจะทำให้ทราบสถานะการทำงานของแรงดันใหม่ โดยวิธีการคำนวณจะใช้วิธีการเดียวกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 4.1 สำหรับผลกระทบของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งหั้นลมต่อระดับแรงดันแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัยดังนี้ [19]

#### 1. ผลกระทบจากขนาดกำลังผลิต

พิจารณาวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลักแหล่งเดียวจ่ายแรงดัน  $E$  โวลต์ผ่านสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์  $R + jX$  โอห์มมายังโหลด และทำให้แรงดันที่ขั้วโหลดมีค่าเท่ากับ  $V$  โวลต์ดังภาพประกอบ 4-8 (ก) และเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งหั้นลมที่ปลายอีกด้านหนึ่งของระบบไฟฟ้าโดยไม่พิจารณาอิมพีแดนซ์สายส่งของทู่ก้งหั้นลมดังภาพประกอบ 4-8 (ข)



ภาพประกอบ 4-8 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า

(ก) ไม่เชื่อมต่อทู่ก้งหั้นลมเข้ากับระบบไฟฟ้า, (ข) เชื่อมต่อทู่ก้งหั้นลมเข้ากับระบบไฟฟ้า

จากวงจรสมมูลของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งหั้นลมเข้ากับระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงดันตก (Voltage Drop,  $\Delta VD$ ) ณ จุดโหลดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของผลรวมกระแสจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งหั้นลมกับกระแสจากแหล่งผลิตไฟฟ้าเดิมของระบบไฟฟ้าดังสมการ (4-47) ทั้งนี้แรงดันตกที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาการรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulation) ในระบบไฟฟ้า

$$\Delta VD = (I_G + I_{WTG})(R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (4-47)$$

โดยที่

$\Delta VD$  คือ แรงดันตกบนสายไฟฟ้า ณ จุดโหลด (V)

$\theta$  คือ มุมของโหลดเมื่อเทียบกับแรงดันต้นทาง (rad)

$R + jX$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า ( $\Omega$ )

## 2. ผลกระทบจากตำแหน่งของการติดตั้ง

ในทางปฏิบัติระบบไฟฟ้าไม่ได้มีโหลดเพียงแค่จุดโหลดเดียวดังภาพประกอบ 4-8 และลักษณะโหลดในระบบมีความไม่แน่นอนทั้งการกระจายตัวในตำแหน่งต่างๆ ของระบบไฟฟ้า และช่วงเวลาการใช้งานของโหลด ส่งผลให้ระดับแรงดันของระบบไฟฟ้ามีความไม่คงที่ด้วยเช่นกัน

## 3. ผลกระทบจากโหมดการทำงานจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม

อย่างที่กล่าวมาแล้ว โหมดการทำงานจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม ประกอบด้วย 2 โหมดคือ โหมดควบคุมแรงดันและโหมดควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง ในสถานะโหมดควบคุมแรงดันจะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของโหมดควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง เนื่องจากสามารถควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อได้ แต่หากเป็นสถานะการทำงานแบบโหมดควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง ผลกระทบสามารถแยกออกเป็น 2 กรณีคือ ผลกระทบของโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่สำหรับโหมดรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าต่ำลง

นอกจากผลกระทบที่กล่าวมาแล้ว การเชื่อมต่อบริเวณผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของโหมดควบคุมแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมจะต้องถูกปลดจากระบบไฟฟ้าตามข้อกำหนดหรือระเบียบของการไฟฟ้าซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ นั่นคือ ก่อนการลัดวงจรแรงดันยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมจะต้องถูกปลดจากระบบและอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าจะทำการตัดวงจร หลังจากทำการกำจัดลัดวงจรออกจากระบบแล้วอุปกรณ์ป้องกันจะทำการปิดวงจรกลับมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าอีกครั้ง ซึ่งก็มีโอกาสที่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมอาจยังไม่ถูกเชื่อมต่อกลับเข้ามาในระบบไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าแรงดัน ณ ปลายสายไฟฟ้ามีค่าลดลงและอาจต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

#### 4.2.2 การศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

##### 4.2.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

การประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดันเมื่อมีการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสภาวะการทำงานปกติและสภาวะฉุกเฉินที่จุดเชื่อมต่อ [28] ซึ่งมีรายละเอียดดังตาราง 4-14

ตาราง 4-14 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ผลกระทบ	รายละเอียด	เกณฑ์การพิจารณา
การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน	1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่สภาวะปกติ	ไม่เกิน 109.2-120.7 kV
	2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่สภาวะฉุกเฉิน	ไม่เกิน 103.5-126.5 kV

##### 4.2.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน

การเปลี่ยนแปลงแรงดันเมื่อมีการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มสามารถวิเคราะห์ได้จากภาระโหลดของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้จึงเป็นแบบเดียวกันกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งได้มีการอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2.2

##### 4.2.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้วยโปรแกรม

###### DIgSILENT PowerFactory

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันเมื่อมีการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มจะเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ของโปรแกรมจึงเป็นวิธีเดียวกันกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นคือการคำนวณด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันที่ได้มีการอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2.3

#### 4.2.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

การจำลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันในหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแรงดันในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้าภายหลังการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มนอกชายฝั่ง (การศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันในสภาวะฉุกเฉินจะแสดงผลในบทที่ 5) ผลการจำลองการทำงานโดยใช้โหมคควบคุมแรงดันกัณฑ์ล้มพบว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันของจุดเชื่อมต่อมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มทั้งในสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุด โดยระดับแรงดันยังคงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

( $\pm 5\%$ ) ทุกกรณีดังตาราง 4-15 และตาราง 4-16 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแรงดันเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต้อมีสาเหตุเนื่องจากการโหมควบคุมแรงดันของกังหันลมจะคุมค่าแรงดันกังหันลมให้คงที่ด้วยการดึงกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้า แต่เนื่องจากการดึงกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟดังกล่าวจะไหลผ่านสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกัน ส่งผลให้มุมของแรงดันบัสและระดับกระแสในสายส่งมีค่าต่างจากกรณีไม่มีการเชื่อมต่อนั้นคือหากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งที่มีปริมาณกำลังผลิตสูงเชื่อมผ่านสายส่งที่มีระยะทางไกล โอกาสเกิดแรงดันตกจะมีค่าสูงกว่า แต่ทั้งนี้ยังต้องพิจารณาผลของมุมแรงดันบัส ซึ่งได้รับผลกระทบโดยตรงจากโหมคการทำงานของกังหันลม เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงแรงดันของจุดเชื่อมต่อจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับระดับความแตกต่างของกระแสจากกังหันลม ปริมาณ โหลดในระบบไฟฟ้า ผลของโหมควบคุมการทำงานของกังหันลม และระยะทางของสายส่ง

ตาราง 4-15 ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันของการเชื่อมต้อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	ระดับแรงดัน (kV)			การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน (%)		
	KMA	KMB	KCD	KMA	KMB	KCD
0	115.889	116.102	109.794	-	-	-
1	115.889	115.818	110.088	+0.009	-0.245	+0.268
2	115.899	115.816	110.041	+0.009	-0.246	+0.225
3	115.975	115.764	110.088	+0.074	-0.291	+0.268
4	115.974	115.764	110.041	+0.073	-0.291	+0.225

ตาราง 4-16 ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันของการเชื่อมต้อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	ระดับแรงดัน (kV)			การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน (%)		
	KMA	KMB	KCD	KMA	KMB	KCD
0	116.622	117.537	112.782	-	-	-
1	116.578	117.051	112.127	-0.038	-0.413	-0.581
2	116.578	117.043	112.099	-0.038	-0.420	-0.606
3	116.648	117.018	112.127	+0.022	-0.442	-0.581
4	116.645	117.018	112.099	+0.020	-0.442	-0.606



#### 4.2.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

การเปลี่ยนแปลงแรงดันภายหลังการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลม นอกชายฝั่งกำลังผลิตติดตั้ง 432 MW ทั้ง 4 รูปแบบเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อชี้ให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากผลกระทบของปริมาณกำลังผลิตของทุ้งกังหันลม โหมดควบคุมการทำงานของกังหันลม ปริมาณ โหลดของระบบไฟฟ้า และระยะทางของสายส่ง นั่นคือเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลม นอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้าซึ่งเลือกใช้โหมดการทำงานแบบควบคุมแรงดัน โหมดการทำงานนี้จะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันของกังหันลมให้มีค่าคงที่โดยการดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้า การทำงานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณโหลดในระบบไฟฟ้า ระยะของสายส่งที่เชื่อมทุ้งกังหันลมกับจุดเชื่อมต่อ และปริมาณกำลังผลิตของทุ้งกังหันลมซึ่งส่งผลให้ปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีความแตกต่างกัน ผลกระทบดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อประมาณกระแสที่ไหลในระบบไฟฟ้ารวมถึงมุมของแรงดันบัสต่างๆ ผลที่ตามมาคือแรงดันของจุดเชื่อมต่อจะมีการเปลี่ยนแปลง แต่ด้วยความสามารถในรักษาระดับแรงดันของกังหันลมให้มีค่าคงที่จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าน้อยมากและยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทุกๆ กรณี โดยการเชื่อมต่อในกรณีที่ 1 จะมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้อยกว่ากรณีอื่นๆ ทั้งสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุด

### 4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน (Voltage Stability Analysis)

#### 4.3.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดัน

อย่างที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้การเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยฟังก์ชันลมนเข้ากับระบบไฟฟ้าจะทำให้สถานะการทำงานของระบบเปลี่ยนไปทั้งขนาดและมุมของแรงดันรวมถึงกำลังไฟฟ้าที่ไหลภายในสายส่งไฟฟ้า นอกจากนี้ผลกระทบดังกล่าวยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า นั่นคือความสามารถของระบบไฟฟ้าที่จะรักษาระดับแรงดันให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด โดยเสถียรภาพแรงดันมักจะบอด้วยสถานะแรงดันพังทลาย (Voltage Collapse) ของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ตลอดเวลาทำให้แรงดันของระบบค่อยๆ เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดจนถึงจุดวิกฤติ ซึ่ง ณ ขณะนั้นหากมีการเพิ่มขึ้นของโหลดเพียงเล็กน้อยจะทำให้แรงดันของระบบตกลงอย่างมาก เนื่องจากความสามารถของระบบไฟฟ้าในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดไม่เพียงพอ [29] การเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เกิดขึ้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ทำให้ผู้ที่ดูแลระบบไฟฟ้าอาจจะสังเกตเห็นได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงมาก การแก้ไขให้แรงดันของระบบกลับมาสู่ระดับเดิมอาจจะสายเกินไป ผลที่ตามมาคือเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ดังตัวอย่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของโหลดในระบบไฟฟ้าสูงขึ้นประมาณ 400 MW/min ทำให้แรงดันของระบบลดลงเรื่อยๆ ถึงแม้จะมีความพยายามชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟด้วยการเพิ่มตัวเก็บประจุ แต่ก็ไม่สามารถชดเชยปริมาณการเพิ่มขึ้นของโหลดได้ ในที่สุดจึงเกิดแรงดันพังทลายของระบบไฟฟ้า เนื่องจากการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟไม่เพียงพอ เป็นผลให้ไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง หรืออีกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในประเทศสวีเดน ซึ่งเกิดจากเหตุขัดข้องที่เกิดในสถานีไฟฟ้าย่อยไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้า ทำให้สายส่งขนาดแรงดัน 220 kV จ่ายพลังงานเกินพิกัด ในที่สุดอุปกรณ์ป้องกันจึงตัดสายส่งดังกล่าวออกจากระบบไฟฟ้า เป็นผลให้แรงดันทางตอนใต้ของประเทศลดต่ำลง หม้อแปลงชนิดปรับแปรอัตโนมัติจึงพยายามรักษาระดับแรงดันไว้ แต่กลับทำให้สายส่งทางภาคเหนือจ่ายพลังงานไฟฟ้าเกินพิกัด ในที่สุดอุปกรณ์ป้องกันจึงตัดสายส่งดังกล่าวออกจากระบบไฟฟ้าเช่นกัน ผลที่ตามมาคือ แรงดันทั้งระบบลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในกรณีนี้ทางศูนย์ควบคุมสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ทัน โดยการตัดโหลดก่อนที่จะเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ซึ่งการตัดโหลดครั้งนี้ประมาณ 11,400 MW เพราะฉะนั้นจากเหตุการณ์ตัวอย่างจึงสามารถสรุปสาเหตุของการเกิดสถานะแรงดันพังทลายได้ดังนี้

1. การที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหรือสายส่งชุดใดชุดหนึ่งถูกตัดออกจากระบบไฟฟ้าทันทีทันใด ทำให้สายส่งหรือแหล่งจ่ายพลังงานอื่นต้องจ่ายโหลดเกินพิกัด ซึ่งการเกิดพังทลายของแรงดันเนื่องจากสาเหตุนี้มักจะขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์ที่หลุดออกจากระบบไฟฟ้าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน และวิธีการชดเชยแรงดันของระบบ

2. การเพิ่มขึ้นของโหลดและไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันได้อย่างเพียงพอ เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟส่วนมากมักจะสูญเสียไปกับสายส่งระหว่างตำแหน่งของแหล่งจ่ายพลังงานกับตำแหน่งโหลด

สำหรับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันหรือแรงดันพังทลายสามารถคำนวณได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปจะแสดงด้วยเส้นโค้งความสัมพันธ์ 3 แบบคือ เส้นโค้ง P-V (P-V Curve) เส้นโค้ง V-Q (V-Q Curve) และเส้นโค้ง P-Q (P-Q Curve) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 1. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันด้วยเส้นโค้ง P-V

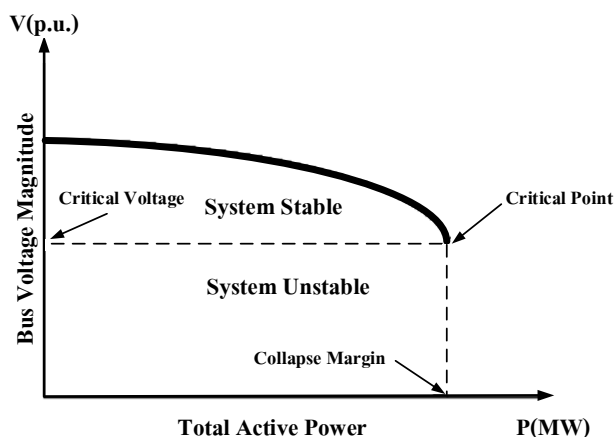
เส้นโค้ง P-V เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดสูงสุดที่ระบบไฟฟ้ายังคงจ่ายโหลดได้อย่างมีเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า [29] เส้นโค้ง P-V มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันและการศึกษาระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial Distribution) อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้กับระบบไฟฟ้าที่ถูกตัดยกขึ้นมาจากระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ โดยกำหนดให้ P คือโหลดรวมของบริเวณที่พิจารณาและ V คือแรงดัน ณ บัสวิกฤติหรือบัสที่ต้องการพิจารณาในขณะนั้น บางครั้ง P อาจใช้แทนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ถ่ายโอนกันระหว่างระบบ ข้อเสียของการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V มีดังนี้

1. การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจะถู้ออกเมื่อกำหนดโมดูลัสของจุดหรือจุดวิกฤติของเส้นโค้ง

2. การคำนวณทุกครั้งจะต้องจัดสรรกำลังไฟฟ้าใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้น

3. การวิเคราะห์เส้นโค้ง P-V ทางด้านทฤษฎีจะมีความสะดวกก็ต่อเมื่อพฤติกรรมของโหลดสามารถเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันของแรงดัน

ภาพประกอบ 4-9 แสดงคุณลักษณะของเส้นโค้ง P-V ส่วนด้านบนเหนือจุดวิกฤติเป็นบริเวณที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ แต่ส่วนที่อยู่ต่ำกว่าจุดวิกฤติเป็นบริเวณที่เกิดสภาวะแรงดันพังทลายขึ้นในระบบไฟฟ้า

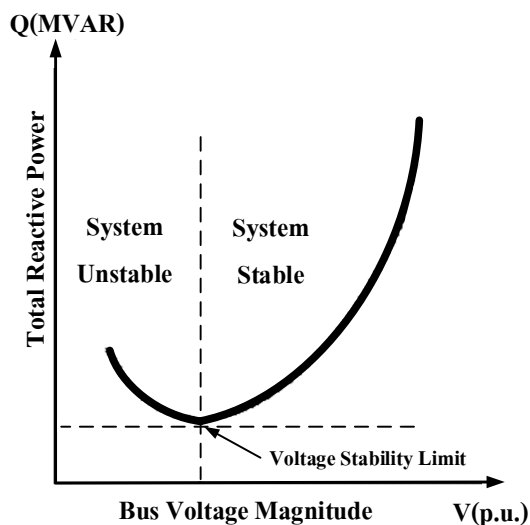


ภาพประกอบ 4-9 คุณลักษณะเส้นโค้ง P-V [15]

## 2. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันด้วยเส้นโค้ง V-Q

เส้นโค้ง V-Q เป็นอีกหนึ่งในวิธีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดสูงสุดที่ระบบไฟฟ้ายังคงจ่ายโหลดได้อย่างมีเสถียรภาพแรงดัน ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าหรือหาจากเส้นโค้ง P-V [29] โดยกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟคงที่และเก็บค่าคู่ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากเส้นโค้ง P-V นำมาวาดเส้นโค้ง V-Q ส่วนข้อดีและข้อเสียก็มีเหมือนกับวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันจากเส้นโค้ง P-V

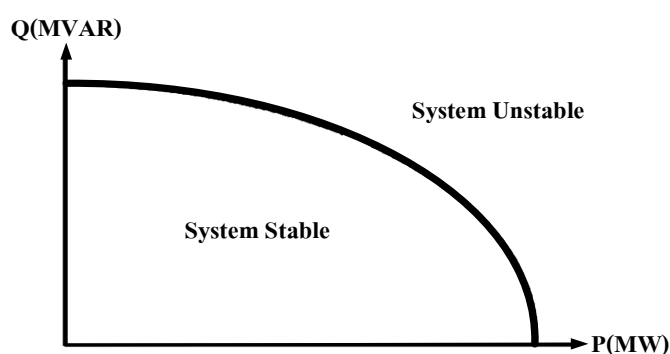
ภาพประกอบ 4-10 แสดงคุณลักษณะของเส้นโค้ง V-Q ส่วนด้านขวามือจากจุดวิกฤติเป็นบริเวณที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ แต่ส่วนที่อยู่ด้านซ้ายของจุดวิกฤติเป็นบริเวณที่เกิดสภาวะแรงดันพังทลายขึ้นในระบบไฟฟ้า



ภาพประกอบ 4-10 คุณลักษณะเส้นโค้ง V-Q [15]

### 3. การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันด้วยเส้นโค้ง P-Q

เส้นโค้ง P-Q เป็นวิธีที่ใช้กำหนดขอบเขตเสถียรภาพแรงดันในระนาบของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ค่าบนเส้นโค้ง P-Q ทั้งหมดเป็นจุดวิกฤติหรือจุดยอดของแต่ละเส้นโค้ง P-V หรือ V-Q ที่ถูกนำมาเรียงต่อกันบนระนาบ P-Q [29] การวาดเส้นโค้ง P-Q ไม่ต้องกำหนดค่าใดค่าหนึ่งให้คงที่ ซึ่งแตกต่างจากเส้นโค้ง P-V และ V-Q ที่ต้องกำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังหรือกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมีค่าคงที่



ภาพประกอบ 4-11 คุณลักษณะเส้นโค้ง P-Q [15]

ภาพประกอบ 4-11 แสดงคุณลักษณะของเส้นโค้ง P-Q บริเวณที่อยู่ภายใต้เส้นโค้ง P-Q ทั้งหมดแรงดันจะมีเสถียรภาพ ส่วนบริเวณที่อยู่ภายนอกเส้นโค้งจะเกิดสถานะแรงดันพังทลาย ดังนั้นระบบปฏิบัติงานจริงจะอยู่ภายใต้เส้นโค้ง P-Q เท่านั้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันนอกจากจะสามารถบอกจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้าได้แล้ว ยังสามารถพิจารณาบัสอ่อนแอของระบบไฟฟ้า [29] แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

#### 1. การพิจารณาบัสอ่อนแอในกรณีที่ เป็นบัสควบคุมขนาดแรงดันหรือบัสอ้างอิง

การพิจารณาในกรณีบัสทั้ง 2 ประเภทจะมีหลักการที่คล้ายกัน โดยพิจารณาจากจุดทำงานที่เกิดแรงดันพังทลาย สำหรับบัสควบคุมขนาดแรงดันจะดูจากค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่มีค่าและค่าขีดจำกัดหรือไม่ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวไหนจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟและค่าขีดจำกัด บัสนั้นจะถูกจัดเป็นบัสอ่อนแอ แต่หากกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงอยู่ในขอบเขต บัสนั้นก็จะถูกจัดให้เป็นบัสแข็งแรงหรือบัสที่ไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันพังทลาย ในส่วนของบัสอ้างอิงจะพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้ากำลังไฟฟ้าอินไดอันหนึ่งและค่าขีดจำกัดจะจัดให้บัสนั้นเป็นบัสอ่อนแอ แต่หากค่ากำลังไฟฟ้าทั้งคู่ยังอยู่ในขอบเขต บัสนั้นจะถูกจัดให้เป็นบัสแข็งแรง

## 2. การพิจารณาบัสอ่อนแอในกรณีที่เป็นบัสโหลด

การพิจารณาบัสอ่อนแอของบัสโหลดนั้นจะดูจากค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัสดังสมการ (4-48) ซึ่งเป็นค่าที่สื่อถึงค่าเผื่อโหลด (Load Margin) ของบัสที่มีต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นถ้าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัสมีค่าน้อยหรือเท่ากับ 0.2 ให้ถือว่าบัสนั้นเป็นบัสอ่อนแอ เนื่องจากบัสนั้นมีค่าเผื่อโหลดเหลืออยู่น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 20 ของค่าโหลดทั้งหมดของบัส ส่วนกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลายของบัสมีค่ามากกว่า 0.2 ให้ถือว่าบัสนั้นเป็นบัสแข็งแรง ในส่วนของบัสที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อบัสต่างๆ โดยไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโหลดต่ออยู่ด้วยให้พิจารณาเป็นบัสแข็งแรงเสมอ

$$k_{k,cr} = \frac{\sqrt{(P_{k,cr} - P_{k,0})^2 + (Q_{k,cr} - Q_{k,0})^2}}{\sqrt{(P_{k,cr})^2 + (Q_{k,cr})^2}} \quad (4-48)$$

โดยที่

$P_{k,cr}, Q_{k,cr}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ณ จุดทำงานซึ่งเกิดแรงดันพังทลายของโหลดที่บัส  $k$

$P_{k,0}, Q_{k,0}$  คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ณ จุดทำงานเริ่มต้นของโหลดที่บัส  $k$

### 4.3.2 การศึกษาผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน

#### 4.3.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไม่ได้มีการระบุในข้อกำหนดการเชื่อมต่อ เหมือนกับการวิเคราะห์เชิงเทคนิคอื่นๆ แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันก็มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าเช่นกัน เนื่องจากการสามารถบอกหรือทำนายระดับแรงดันก่อนเกิดการพังทลายของแรงดัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้ไป ออกแบบอุปกรณ์ชดเชยเพื่อป้องกันความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้า

#### 4.3.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่วงก้งหันลม สามารถวิเคราะห์ได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้จึงเป็นแบบเดียวกันกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งได้มีการอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2.2

#### 4.3.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบเสถียรภาพแรงดันด้วยโปรแกรม

##### DIgSILENT PowerFactory

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันเมื่อเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกั้นหันทมจะเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ของโปรแกรมจึงมีลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้มีการอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.1.2.3 แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันสามารถแสดงด้วยเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ โดยในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory สามารถวิเคราะห์ด้วยเส้นโค้งความสัมพันธ์ P-V และเส้นโค้งความสัมพันธ์ V-Q สำหรับวิธีการสร้างเส้นโค้งกำลังไฟฟ้างกล่าว โปรแกรมจะกำหนดเงื่อนไขการสร้างเส้นโค้งที่แตกต่างกันคือ การสร้างเส้นโค้ง P-V จะกำหนดค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าคงที่และดึงค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าแรงดันของบัสที่พิจารณาสร้างเป็นเส้นโค้ง P-V โดยอัตโนมัติ ในส่วนของการสร้างเส้นโค้ง V-Q โปรแกรมจะควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ และดึงข้อมูลคู่ของค่าแรงดันและกำลังไฟฟารีแอกทีฟมาสร้างเป็นเมทริกซ์ [34] สำหรับจุดวิกฤติของทั้งสองเส้นโค้งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเกิดการลู่ออก นั่นคือจาโคเบียนเมทริกซ์อยู่ในสถานะที่เรียกว่าเมทริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix) หรือจาโคเบียนเมทริกซ์มีค่าดีเทอร์มิแนนต์ (Determinant) เป็นศูนย์นั่นเอง [35] ค่าสุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์ก่อนการลู่ออกคือค่าวิกฤติของเสถียรภาพแรงดันหรือจุดแรงดันพังทลายของระบบไฟฟ้า

#### 4.3.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน

การจำลองการทำงานเสถียรภาพแรงดันเป็นการตรวจสอบสถานะแรงดันพังทลายของระบบไฟฟ้า จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ กำลังไฟฟารีแอกทีฟ และแรงดันวิกฤติของจุดเชื่อมต่อ ซึ่งสามารถพิจารณาบัสอ่อนแอหรือบัสที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดแรงดันพังทลายและบัสแข็งแรงหรือบัสที่มีความเสี่ยงต่ำต่อการเกิดแรงดันพังทลายโดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพังทลาย ซึ่งต้องพิจารณาทั้งในสถานะเริ่มต้นและสถานะแรงดันพังทลายของระบบไฟฟ้า สำหรับผลการจำลองสถานะเริ่มต้นของระบบไฟฟ้าทั้งในสถานะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดแสดงดังตาราง 4-3 และตาราง 4-4 ในส่วนผลการจำลองเสถียรภาพแรงดันในช่วงแรงดันพังทลายหรือจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้าทั้งสถานะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดแสดงดังตาราง 4-17 และตาราง 4-18 ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันพังทลายหรือแรงดันวิกฤติของจุดเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ นั่นคือระบบไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อทุ้งกั้นหันทมหากเกิดสถานะฉุกเฉินขึ้นจะมีโอกาสสูงที่จะเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง

เนื่องจากระบบไฟฟ้าไม่สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เพราะฉะนั้นเมื่อแรงดันบัสมีค่าลดลงจากการเพิ่มขึ้นของโหลดและระบบไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้อย่างเพียงพอส่งผลให้ออกาสเกิดแรงดันพังทลายมีมากขึ้น แต่หลังจากเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์ลมนเข้ากัณฑ์ระบบไฟฟ้าการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเมื่อเกิดสภาวะฉุกเฉินจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นระดับแรงดันพังทลายหรือแรงดันวิกฤติของจุดเชื่อมต่อจึงมีค่าลดลงกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ นั้นหมายถึงโอกาสที่จะเกิดการเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างในระบบไฟฟ้ามีโอกาสเกิดขึ้นน้อยลง ดังนั้นหากเกิดเหตุการณ์ที่แหล่งจ่ายไฟหรือสายส่งหลักถูกตัดการเชื่อมต่อจากระบบไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ลมนอกชายฝั่งจะสามารถช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าไม่ให้เกิดการพังทลายของแรงดัน สำหรับผลการจำลองการทำงานของเสถียรภาพแรงดันเมื่อเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์ลมนทั้ง 3 ระบบเข้ากัณฑ์ระบบไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่สามารถจ่ายให้กับจุดเชื่อมต่อได้มากขึ้น ในขณะที่ระดับแรงดันมีค่าลดลงกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ นั่นคือเสถียรภาพแรงดันของจุดเชื่อมต่อมีค่าเพิ่มมากขึ้น โอกาสการเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างในระบบไฟฟ้าจึงลดลง

ตาราง 4-17 ผลการจำลองเสถียรภาพแรงดันในช่วงแรงดันพังทลายภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	บัส KMA			บัส KMB			บัส KCD		
	$V_{cr}$ (p.u.)	$P_{cr}$ (MW)	$Q_{cr}$ (MVAR)	$V_{cr}$ (p.u.)	$P_{cr}$ (MW)	$Q_{cr}$ (MVAR)	$V_{cr}$ (p.u.)	$P_{cr}$ (MW)	$Q_{cr}$ (MVAR)
0	0.695	635.286	222.072	0.712	440.704	136.400	0.648	170.507	41.674
1	0.677	670.000	237.939	0.665	514.496	155.746	0.579	224.236	59.701
2	0.677	670.000	237.939	0.669	514.496	156.598	0.578	222.870	59.125
3	0.684	670.000	236.375	0.668	505.306	153.645	0.579	224.236	59.710
4	0.686	670.000	237.155	0.668	505.306	153.645	0.578	222.870	59.125



ตาราง 4-18 ผลการจำลองเสถียรภาพแรงดันในช่วงแรงดันพียงทลายภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	บัส KMA			บัส KMB			บัส KCD		
	$V_{cr}$ (p.u.)	$P_{cr}$ (MW)	$Q_{cr}$ (MVAR)	$V_{cr}$ (p.u.)	$P_{cr}$ (MW)	$Q_{cr}$ (MVAR)	$V_{cr}$ (p.u.)	$P_{cr}$ (MW)	$Q_{cr}$ (MVAR)
0	0.697	638.053	225.197	0.711	441.408	142.199	0.646	170.732	46.684
1	0.682	672.766	240.975	0.663	515.136	159.841	0.577	224.256	63.192
2	0.682	672.766	240.975	0.668	515.136	160.687	0.579	222.89	62.622
3	0.681	672.766	242.858	0.670	506.304	157.782	0.577	224.256	63.192
4	0.691	672.766	243.649	0.670	506.304	157.782	0.579	222.89	62.622

นอกจากนี้ผลการตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายของจุดเชื่อมต่อทั้งสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อบนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ่งกั้นหมอนอกชายฝั่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายที่สูงกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อดังแสดงในตาราง 4-19 และตาราง 4-20 โดยทุ่ทุ่รูปแบบการเชื่อมต่อจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายสูงกว่า 0.2 นั่นคือจุดเชื่อมต่อทั้งหมดถูกจัดในกลุ่มบัสแข็งแรงและมีโอกาสเกิดแรงดันพียงทลายต่ำ โดยทุ่ทุ่กั้นหมอนที่มีระยะห่างของจุดเชื่อมต่อจะมีเสถียรภาพแรงดันสูง เนื่องจากการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันมีการสูญเสียในสายส่งน้อยกว่า ในส่วนของปริมาณกำลังผลิตของทุ่ทุ่กั้นหมอนที่มีกำลังผลิตสูงจะส่งผลให้เสถียรภาพแรงดันของระบบสูงขึ้นเนื่องจากสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้จุดเชื่อมต่อได้มากขึ้น ยิ่งกว่านั้นในสภาวะโหลดต่ำสุดเสถียรภาพแรงดันของระบบจะมีค่าสูงกว่าในสภาวะโหลดสูงสุด เนื่องจากปริมาณความต้องการโหลดน้อยลง กระแสที่ไหลในสายส่งน้อย กำลังสูญเสียลดลง ระบบไฟฟ้าจึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันได้มากขึ้น เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น

ตาราง 4-19 สัมประสิทธิ์แรงดันพียงทลายภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	บัส KMA	บัส KMB	บัส KCD
0	0.9293	0.8526	0.7003
1	0.9302	0.8736	0.7711
2	0.9302	0.8736	0.7697
3	0.9305	0.8715	0.7711
4	0.9308	0.8715	0.7697

ตาราง 4-20 สัมประสิทธิ์แรงดันพ่วงหลายภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	บัส KMA	บัส KMB	บัส KCD
0	0.9578	0.9120	0.8193
1	0.9600	0.9244	0.8623
2	0.9600	0.9244	0.8615
3	0.9601	0.9229	0.8623
4	0.9602	0.9229	0.8615

#### 4.3.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบเสถียรภาพแรงดัน

การตรวจสอบเสถียรภาพแรงดันด้วยการวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง P-V และ V-Q เมื่อมีการเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกั้นหมอนอกชายฝั่งจำนวน 4 รูปแบบ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมต่อทุ้งกั้นหมอนจะช่วยทำให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันของจุดเชื่อมต่อได้เพิ่มขึ้น ระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อจึงมีค่าลดลงกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อโดยไม่เกิดแรงดันพ่วงหลายหรือไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง นั่นหมายถึงระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแรงดันเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำผลการจำลองที่ได้มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพ่วงหลายของจุดเชื่อมต่อพบว่า ทุกๆ รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกั้นหมอนจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่สูงขึ้นกว่าเดิม และไม่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน 0.2 ดังนั้นจุดเชื่อมต่อทั้งหมดจึงถูกจัดเป็นบัสแข็งแรง โดยผลการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพแรงดันจะขึ้นอยู่กับปริมาณกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกั้นหมอน ปริมาณโหลดและระยะสายส่งของระบบไฟฟ้าเป็นหลัก โดยจุดเชื่อมต่อที่อยู่กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกั้นหมอนที่มีกำลังผลิตสูงและมีปริมาณโหลดของระบบไฟฟ้าต่ำจะมีสัมประสิทธิ์การพ่วงหลายแรงดันหรือเสถียรภาพแรงดันที่สูงกว่าเนื่องจากการมีชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้สูงกว่า ระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อจึงมีค่าลดลงโดยไม่เกิดแรงดันพ่วงหลาย นอกจากนี้ระยะสายส่งที่น้อยจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการสูญเสียที่น้อยกว่าเช่นกัน เสถียรภาพแรงดันจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นสำหรับผลการเปรียบเทียบการเสถียรภาพแรงดันทั้ง 4 รูปแบบของแต่ละจุดเชื่อมต่อพบว่า การเชื่อมต่อในกรณีที่ 1 จะมีการเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพแรงดันที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ ทั้งสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุด จะมีเพียงแคบัส KMA เท่านั้นที่การเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพแรงดันมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากมีปริมาณกำลังผลิตน้อยกว่าและระยะสายส่งที่มากกว่า

#### 4.4 การวิเคราะห์กระแสลัดวงจร (Fault Current Analysis)

##### 4.4.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์กระแสลัดวงจร

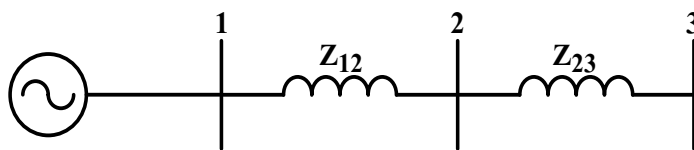
การเลือกใช้บริภัณฑ์ภายในระบบไฟฟ้านอกจากจะต้องคำนึงถึงกระแสใช้งานขณะปกติแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงกระแสขณะลัดวงจรด้วย การลัดวงจรหมายถึงการที่วงจรไฟฟ้าเกิดความผิดพลาดหรือความผิดปกติโดยอุปกรณ์หรือความไม่ตั้งใจทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลง กระแสในระบบไฟฟ้าจึงไหลมากกว่ากระแสปกติหลายเท่า กระแสลัดวงจรจะทำให้เกิดความเครียดทางกล (Mechanical Stress) และความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) ส่งผลให้อุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้คน ด้วยเหตุดังกล่าวจึงต้องคำนึงถึงผลของกระแสลัดวงจรเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น นอกจากนี้การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรยังเป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบไฟฟ้า เนื่องจากการทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้าจะทำให้สามารถเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม โดยหากเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันที่ทนกระแสลัดวงจรไม่เพียงพอก็อาจจะเกิดความเสียหายแก่ทรัพย์สินและชีวิตเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ในทางกลับกันถ้าเลือกใช้ขนาดอุปกรณ์ป้องกันใหญ่เกินไปราคาค่าติดตั้งระบบไฟฟ้าก็จะแพงเกินไปโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าที่ดี [36]

การเชื่อมต่อบรรยากาศไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์หั่นลมเป็นการเพิ่มแหล่งผลิตพลังงานเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าเดิมที่มีการไหลของกระแสลัดวงจรในทิศทางเดียวแน่นอน เมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์หั่นลมเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าจะทำให้กระแสลัดวงจรไหลได้จากหลายทิศทาง ขึ้นกับตำแหน่งที่ตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์หั่นลม เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรกระแสลัดวงจรรวมที่เกิดขึ้นจะมาจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์หั่นลมไหลเข้ามาสมทบ ผลกระทบที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันกระแสเกิน (Over Current) ซึ่งสามารถจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

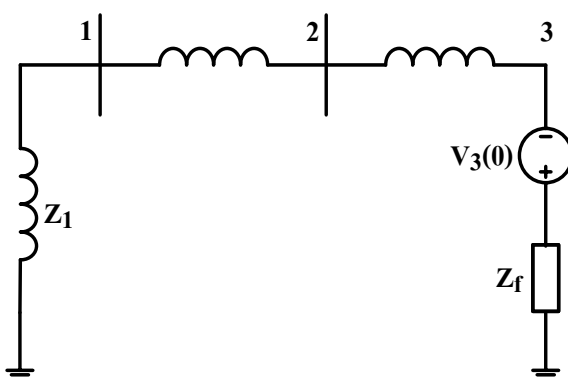
##### 1. การลดขอบเขตอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า

การเพิ่มขึ้นของกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าที่มีกระแสลัดวงจรจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์หั่นลมไหลเข้ามาสมทบ ณ ตำแหน่งการลัดวงจรจะทำให้กระแสลัดวงจรที่ไหลจากแหล่งผลิตไฟฟ้าเดิมในระบบมีปริมาณลดลง [19] ดังตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้

สมมติระบบไฟฟ้าจำลองอย่างง่ายขนาด 3 บัสดังภาพประกอบ 4-12 เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นระบบไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยวงจรสมมูลตามภาพประกอบ 4-13



ภาพประกอบ 4-12 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย 3 บัส

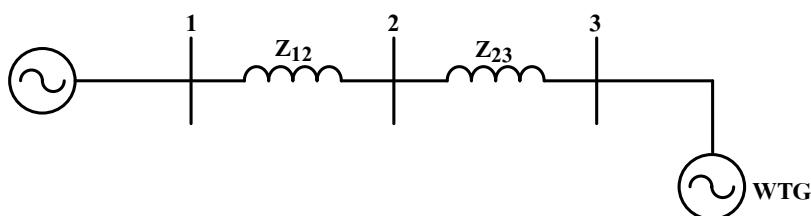


ภาพประกอบ 4-13 ระบบไฟฟ้ากำลังสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจร

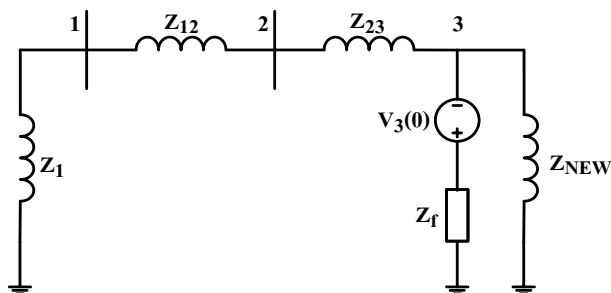
จากวงจรสมมูลสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมจ่าย กระแสที่ไหลระหว่างบัส 1 และบัส 2 ก่อนการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งั้นล้มได้ดังสมการ (4-49)

$$I_{12} = \frac{V_3(0)}{Z_1 + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (4-49)$$

เมื่อต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งั้นล้มเข้ากับบัสที่ 3 ดังภาพประกอบ 4-14 จะได้วงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรดังภาพประกอบ 4-15



ภาพประกอบ 4-14 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย 3 บัสเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทู่ก้งั้นล้ม

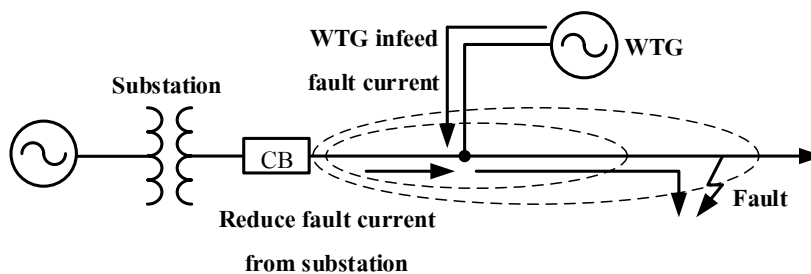


ภาพประกอบ 4-15 ระบบไฟฟ้ากำลังสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจรหลังเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วย  
 ทุ้งกึ่งหันลม

จากรูปวงจรสมมูลสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมจ่าย  
 กระแสที่ไหลระหว่างบัส 1 และบัส 2 หลังการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกึ่งหันลมได้ดัง  
 สมการ (4-50)

$$I_{12}'' = \frac{V_3''(0)}{Z_1 + Z_{12} + Z_{23} + Z_f + Z_f (Z_1 + Z_{12} + Z_{23}) / Z_{NEW}} \quad (4-50)$$

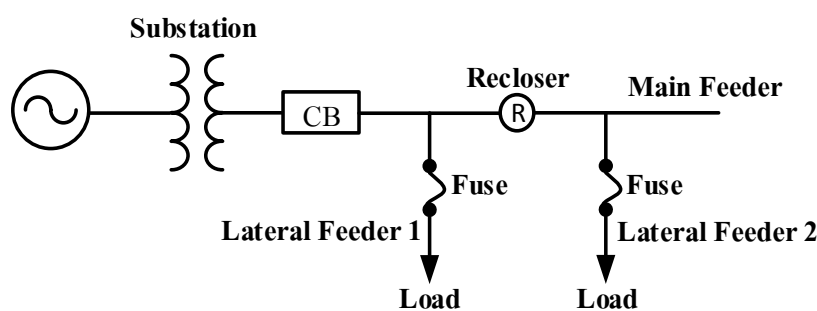
จะเห็นได้ว่าเมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกึ่งหันลม ค่าอิมพีแดนซ์ของ  
 ระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมจ่ายจึงมีค่าน้อยลงดังสมการ  
 ข้างต้น ส่งผลให้ขอบเขตการตรวจจับการลัดวงจรของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าลดลง ซึ่งอาจทำให้  
 อุปกรณ์ป้องกันไม่สามารถตรวจจับการลัดวงจรได้ เพราะกระแสลัดวงจรที่ตรวจพบต่ำกว่า  
 ค่ากระแสปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (Pickup Current) ดังภาพประกอบ 4-16 ตัวอย่างขอบเขตการ  
 ตรวจจับการลัดวงจรของอุปกรณ์ที่ลดลงเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกึ่งหันลม  
 เหตุการณ์ลักษณะนี้มักเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ต้นทางของสายส่ง



ภาพประกอบ 4-16 การลดขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

## 2. การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกัน

โดยปกติการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมมักเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งมักจะมีแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียว การออกแบบและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันจึงอาจจะไม่รองรับในกรณีที่มีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลม [19] โดยทั่วไปอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายจะประกอบด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) รีโคลสเซอร์ (Recloser) และฟิวส์ (Fuse) ดังภาพประกอบ 4-17 โดยรีโคลสเซอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถเปิดวงจรและสามารถปิดวงจรกลับแบบอัตโนมัติเมื่อการลัดวงจรนั้นเป็นการลัดวงจรชั่วคราว (Temporary Fault) และฟิวส์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันสายป้อนย่อยและโหลด



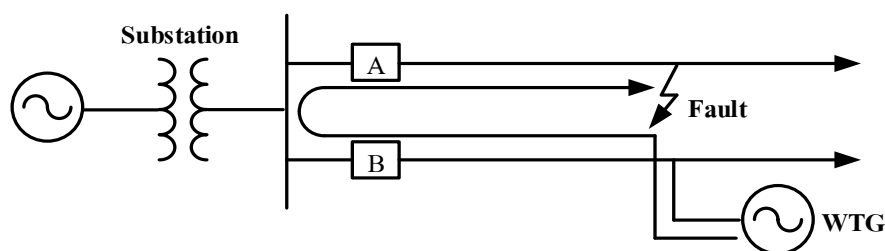
ภาพประกอบ 4-17 ตัวอย่างระบบจำหน่ายไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกัน

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ณ ตำแหน่งใดของสายป้อนย่อย อุปกรณ์ป้องกันที่ควรทำงานเป็นลำดับแรกคือ รีโคลสเซอร์ ซึ่งจะทำการเปิดวงจรชั่วคราวและหากการลัดวงจรถูกกล่าวเป็นการลัดวงจรแบบถาวร (Permanent Fault) ฟิวส์จึงทำงานเป็นอุปกรณ์ถัดมาเพื่อตัดการเชื่อมต่อของสายป้อนย่อยออกจากระบบไฟฟ้าหลัก เพราะฉะนั้นหากกระแสลัดวงจรที่รีโคลสเซอร์และฟิวส์ตรวจพบยังอยู่ระหว่างกระแสลัดวงจรต่ำสุดและกระแสลัดวงจรสูงสุด ลำดับการทำงานของทั้งคู่ยังเป็นปกติ แต่กรณีที่ระบบไฟฟ้ามีการเชื่อมต่อทุ้งกังหันลมอาจทำให้กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านฟิวส์เพิ่มขึ้นจนเกินกระแสลัดวงจรสูงสุด ทำให้ฟิวส์ทำงานก่อนรีโคลสเซอร์ หากกรณีเป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นแบบชั่วคราว การที่ฟิวส์ทำงานก่อนนี้เป็นสิ่งที่ไม่จำเป็นและทำให้การเกิดไฟฟ้าดับชั่วคราวเป็นการเกิดไฟฟ้าดับแบบถาวร เกิดการสูญเสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนฟิวส์

## 3. การทำงานนอกขอบเขตของอุปกรณ์ป้องกัน

การทำงานนอกขอบเขตของอุปกรณ์ป้องกันคือ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินสามารถตรวจจับการลัดวงจรในสายป้อนข้างเคียงที่ไม่ได้เกิดการลัดวงจรได้ ส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานโดยไม่จำเป็นดังภาพประกอบ 4-18 ในสภาวะปกติการเกิดลัดวงจรที่จุด A อุปกรณ์

ป้องกันที่ควรทำงานคือเซอร์กิตเบรกเกอร์ A เท่านั้น แต่เมื่อเชื่อมต่อทุ้งกันล้มเข้ากับระบบไฟฟ้า กระแสลัดวงจรของทุ้งกันล้มจะไหลไปยังทิศทางที่เกิดการลัดวงจร อาจทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ B ซึ่งไม่จำเป็นต้องทำงานสำหรับการเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่งนี้ทำงานก่อนเซอร์กิตเบรกเกอร์ A เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันส่วนใหญ่ไม่สามารถตรวจจับทิศทางการไหลของกระแสได้ เหตุการณ์แบบนี้จะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟอย่างมากเนื่องจากทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างโดยที่ผู้ใช้ไฟเหล่านี้ อยู่คนละสายป้อน [19]



ภาพประกอบ 4-18 การทำงานนอกขอบเขตของอุปกรณ์ป้องกัน

การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ามีหลากหลายรูปแบบได้แก่ การลัดวงจรสามเฟส หนึ่งเฟสลงดิน สองเฟส และสองเฟสลงดิน โดยการลัดวงจรแบบสามเฟสมีโอกาสน้อยที่สุดแต่มีความรุนแรงมาก ในทางกลับกันการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินมีโอกาสดังกล่าวมากที่สุดแต่มีความรุนแรงน้อย ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นในขณะลัดวงจรจะถูกนำไปตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าต่อไป ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกันล้มเข้ากับระบบไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นต้องการตรวจสอบความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ายังคงสามารถทนกระแสลัดวงจรที่เปลี่ยนแปลงไปได้หรือไม่ และหากอุปกรณ์ตัวใดไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็สามารถวางแผนเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวให้สามารถทนกระแสลัดวงจรได้ เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์การลัดวงจรจึงเลือกวิเคราะห์การลัดวงจรไฟฟ้าแบบ 3 เฟส เพื่อวิเคราะห์การลัดวงจรที่มีความรุนแรงและให้กระแสลัดวงจรสูงสุด

#### 4.4.2 การศึกษาผลกระทบกระแสลัดวงจร

##### 4.4.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบกระแสลัดวงจร

การประเมินผลกระทบกระแสลัดวงจรเมื่อมีการเชื่อมต่อบนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นลจะเป็นการเปรียบเทียบระดับกระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อกัณฑ์นลที่จุดเชื่อมต่อนตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคประกอบด้วย [28] การเปรียบเทียบขนาดกระแสลัดวงจรกับค่าพิกัดตัดกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและขนาดกระแสลัดวงจรก่อนการเชื่อมต่อ ซึ่งมีข้อกำหนดดังตาราง 4-21

ตาราง 4-21 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อกระแสลัดวงจรของจุดเชื่อมต่อ

ผลกระทบ	รายละเอียด	เกณฑ์การพิจารณา
กระแสลัดวงจร	1 ร้อยละขนาดกระแสลัดวงจรเปรียบเทียบกับค่าพิกัดตัดกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน	ไม่เกิน 85%
	2 ร้อยละขนาดกระแสลัดวงจรเปรียบเทียบกับขนาดกระแสลัดวงจรก่อนการเชื่อมต่อ	ไม่เกิน 25%

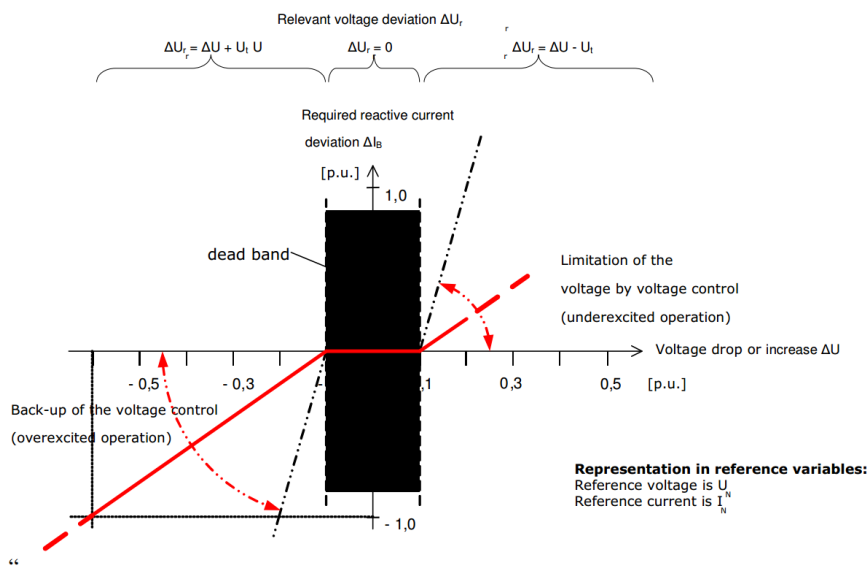
##### 4.4.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบกระแสลัดวงจร

การสร้างแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่ได้มาตรฐานเป็นสิ่งที่ยากสำหรับกัณฑ์นลชนิดที่ใช้คอนเวอร์ชันเคลื่อน เนื่องจากเพียงช่วง 2-3 วินาทีเท่านั้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยวงจรควบคุม ส่งผลให้พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ด้วยข้อกำหนดของมาตรฐานต่างๆ ได้ระบุให้มีการจ่ายกระแสแอกทีฟในสถานะแรงดันต่ำ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกัณฑ์นลเหล่านี้มีความสามารถในการจ่ายกระแสแอกทีฟในสถานะดังกล่าว [37]

โดยทั่วไปแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยคอนเวอร์เตอร์ เช่น กัณฑ์นลหรือ โซล่าเซลล์มักใช้แบบจำลองสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Machine) ซึ่งถูกแทนด้วยวงจรสมมูลของรีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Subtransient Reactance) และรีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient Reactance) ที่สามารถแสดงค่าความถูกต้องสำหรับการลัดวงจรที่เกิดขึ้นใกล้กับตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่มีค่าความถูกต้องมากสำหรับการคำนวณระยะไกล [38] เพราะฉะนั้นจึงได้มีแนวคิดการวิเคราะห์การลัดวงจรโดยใช้การจำลองในโดเมนเวลา ซึ่งต้องกำหนดค่าโมเดลที่ซับซ้อน ใช้เวลาในการคำนวณแต่ละครั้งนาน อีกทั้งความแม่นยำของการทำนายในสถานะชั่วคราวบางครั้งยิ่งแย่มาจากปัญหาความยากลำบากของ



การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การลัดวงจรของอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมา จึงได้มีการนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองใหม่ที่เรียกว่าแบบจำลอง Voltage Support Model โดยเป็นแบบจำลองที่เกิดจากการรวมองค์ประกอบของมาตรฐาน IEC 60909 และ G74 กับวิธีการทำซ้ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการคำนวณการลัดวงจรระยะไกล โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจากวิธีการเดิมคือ ตัวประกอบ K (K-Factor) คือค่าความชันของกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ช่วยจ่ายให้ระบบในช่วงแรงดันต่ำและค่ากระแสรีแอกทีฟสูงสุด (Max. Current,  $I_{max}$ ) คือระดับกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงดังภาพประกอบ 4-19 (อ้างอิงจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อพลังงานลมของประเทศเยอรมนี, System Service Ordinance, SDLWindV/Germany) ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ สำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจร ได้แก่ ระดับกระแสลัดวงจรในสภาวะชั่วคราว (Subtransient Short-Circuit Current) และอัตราส่วนอิมพีแดนซ์การลัดวงจร (Short Circuit Impedance Ratio,  $R / X''$ ) [39] แสดงดังตาราง 4-22



ภาพประกอบ 4-19 หลักการแรงดันไฟฟ้าสำรองของกังหันลมในกรณีที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า [40]

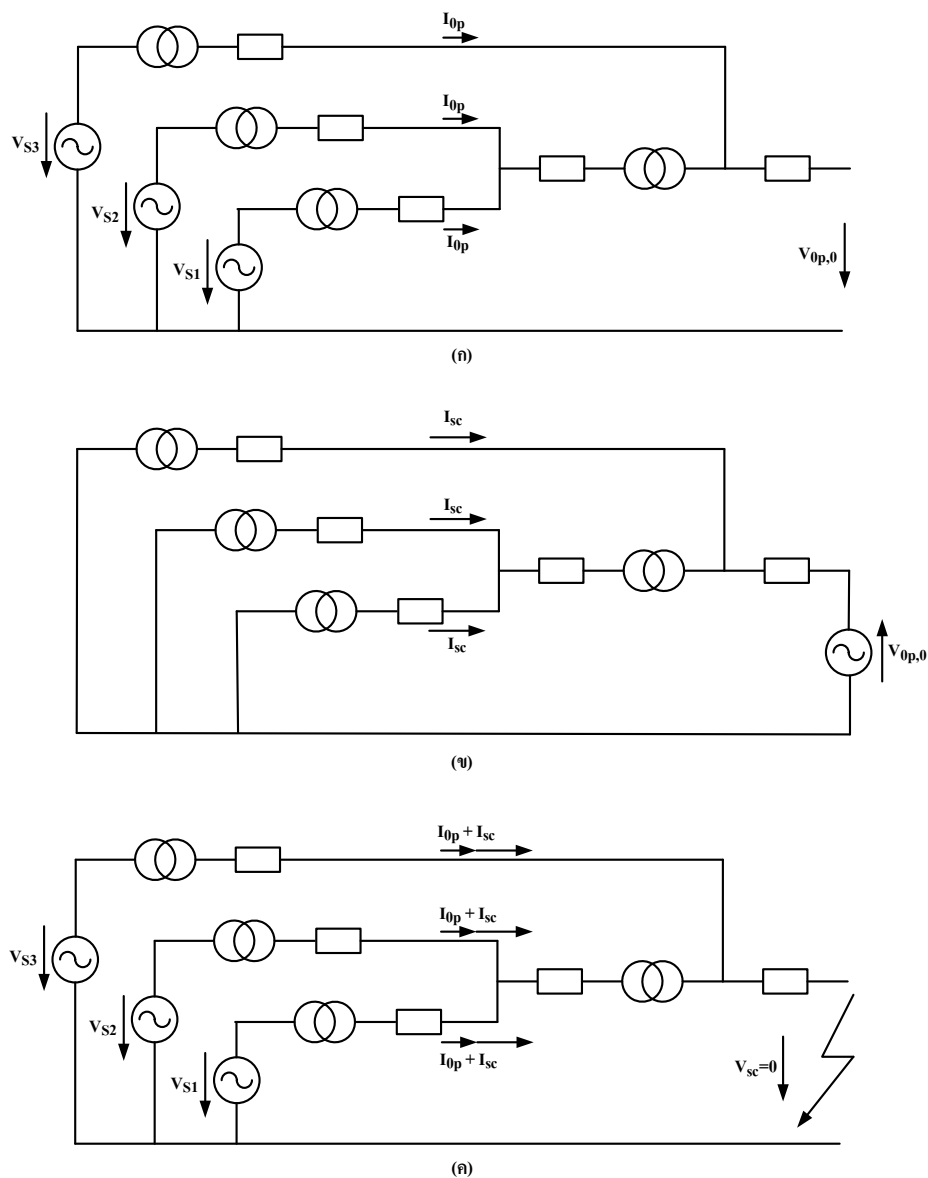
ตาราง 4-22 พารามิเตอร์ของแบบจำลองกึ่งหั่นลมสำหรับการวิเคราะห์กระแสลัดวงจร

พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดกระแสลัดวงจร	$I_{sc} = P_n / \sqrt{3}U_n$ kA
อัตราส่วนอิมพีแดนซ์การลัดวงจร	0.1
ตัวประกอบ K	2.0
กระแสลัดวงจรสูงสุด	1.0 p.u.

#### 4.4.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบกระแสลัดวงจรด้วยโปรแกรม DIGSILENT PowerFactory

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรของของระบบไฟฟ้ากำลังมีรูปแบบการคำนวณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีของแต่ละมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์อินพุตพื้นฐานในการวิเคราะห์จะเหมือนกันทุกวิธีนั่นคือ ชนิดการลัดวงจร อิมพีแดนซ์การลัดวงจร และตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร วิธีทั่วไปที่ใช้คำนวณกระแสลัดวงจรประกอบด้วย IEC 60909, VDE 0102/0103, ANSI, IEEE C37 และ 141, Complete และ IEC 61363 เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกวิธีการคำนวณที่มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่มีการเชื่อมต่อบริเวณผลิตไฟฟ้าด้วยทุ่งกึ่งหั่นลมเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยวิธี Complete หรือที่รู้จักกันในชื่อของวิธีการวางซ้อน (Superposition) เป็นวิธีที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ เช่น IEC 60909 ที่ละเลยสถานะของระบบไฟฟ้าก่อนเกิดลัดวงจร โดยแรงดันแต่ละบัสถูกพิจารณาจากค่ากำหนด (Nominal Value) และไม่พิจารณาถึงการดำเนินงานหรือการไหลของกำลังไฟฟ้า แต่จะใช้เพียงตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor,  $c$ ) สำหรับอธิบายการเบี่ยงเบนแรงดันจากแรงดันจริงของระบบไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากสถานที่และเวลา การเปลี่ยนแปลงแท่งของหม้อแปลง การละลายโหลดและคาปาซิแตนซ์ในการคำนวณ รวมถึงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงในสถานะชั่วคราว เพราะฉะนั้นวิธี Complete ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานเดียวกับวิธีที่อธิบายในมาตรฐาน IEC 60909 แต่ปรับปรุงความแม่นยำของการคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยการพิจารณาพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าหรือการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนการลัดวงรดังภาพประกอบ 4-20 ในสภาวะก่อนการลัดวงจรแรงดันก่อนเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่งการลัดวงจรถูกคำนวณจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้างภาพประกอบ 4-20 (ก) จากนั้นจะคำนวณระบบไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแรงดันที่มีขนาดเท่ากับแรงดันก่อนเกิดลัดวงจรแต่เครื่องหมายเป็นลบ (Negative Voltage) ที่ตำแหน่งลัดวงจรและแหล่งจ่ายอื่นๆ ทั้งหมดในระบบไฟฟ้าถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ดังภาพประกอบ 4-20 (ข) และเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของระบบถูกกำหนดให้เป็น

เชิงเส้น สภาวะของระบบไฟฟ้าหลังการลัดวงจรจึงสามารถคำนวณโดยการวางซ้อนสภาวะก่อนลัดวงจรและสภาวะลัดวงจรเข้าด้วยกันดังภาพประกอบ 4-20 (ค) [41]



ภาพประกอบ 4-20 วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยวิธี Complete (ก) สถานะก่อนลัดวงจร, (ข) สถานะลัดวงจร, (ค) สถานะหลังลัดวงจร

#### 4.4.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบกระแสลัดวงจร

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรหลังการเชื่อมต่อบรรยากาศไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์นลมนอกชายฝั่งในหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบระดับกระแสลัดวงจรเทียบกับพิกัดกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าคือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีพิกัดกระแสลัดวงจรของจุดเชื่อมต่อเท่ากับ 40 kA ซึ่งเป็นการเตรียมแผนล่วงหน้าในกรณีที่กระแสลัดวงจรมีค่าสูงเกินกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ของระบบไฟฟ้าจะได้มีการเปลี่ยนเพื่อรองรับการเชื่อมต่ออย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังตรวจสอบกระแสลัดวงจรใหม่เทียบกับกระแสลัดวงจรก่อนการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์นลมน เพื่อป้องกันการดำเนินงานที่ไม่ประสานสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันภายในระบบไฟฟ้า

ผลการจำลองการทำงานการลัดวงจร 3 เฟสของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นการตรวจสอบระดับกระแสลัดวงจรสูงสุดภายใต้สภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดของระบบไฟฟ้าแสดงดังตาราง 4-23 และตาราง 4-24 ผลการจำลองการทำงานชี้ให้เห็นว่าระดับกระแสลัดวงจรของทุกรูปแบบการเชื่อมต่อยังคงอยู่ภายใต้ระดับกระแสลัดวงจรที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงรับได้ โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าใดๆ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระดับกระแสลัดวงจรสูงสุดก่อนและหลังการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์นลมน ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าระดับกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นยังคงมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 25 นั้นหมายถึงอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้ายังคงทำงานประสานสัมพันธ์ได้อย่างถูกต้อง

ตาราง 4-23 กระแสลัดวงจรสูงสุดภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	กระแสลัดวงจรสูงสุด (kA)			การเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจร (%)		
	KMA	KMB	KCD	KMA	KMB	KCD
0	17.447	13.346	6.431	-	-	-
1	17.720	13.680	6.746	+1.565	+2.503	+4.898
2	17.720	13.681	6.745	+1.565	+2.510	+4.883
3	17.783	13.617	6.746	+1.926	+2.031	+4.898
4	17.784	13.617	6.745	+1.932	+2.031	+4.883

ตาราง 4-24 กระแสลัดวงจรสูงสุดภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	กระแสลัดวงจรสูงสุด (kA)			การเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจร (%)		
	KMA	KMB	KCD	KMA	KMB	KCD
0	17.432	13.328	6.420	-	-	-
1	17.708	13.665	6.735	+1.583	+2.529	+4.907
2	17.708	13.667	6.734	+1.583	+2.544	+4.891
3	17.771	13.602	6.735	+1.945	+2.056	+4.907
4	17.772	1.602	6.734	+1.950	+2.056	+4.891

สำหรับกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์ล้มจะมีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังผลิตของทุ้งกัณฑ์ล้ม อย่างเช่นการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อของทุ้งกัณฑ์ล้ม SPP 1 และ SPP 2 เข้ากับจุดเชื่อมต่อ KMA ในกรณีที่ 2 และ 3 พบว่าการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์ล้ม SPP 2 ซึ่งมีกำลังผลิตสูงกว่าจะส่งผลให้กระแสลัดวงจรเพิ่มมากกว่าการเชื่อมต่อด้วยทุ้งกัณฑ์ล้ม SPP 1 ตามสมการ ( $I_{sc} = P_n / \sqrt{3}V_n$ ) นอกจากนี้ผลของระยะของสายส่งระหว่างจุดเชื่อมต่อและทุ้งกัณฑ์ล้มยังส่งผลต่อระดับกระแสลัดวงจรเช่นกัน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่าแปรตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังเช่นการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้ม SPP 2 และ SPP 3 ที่มีกำลังผลิตเท่ากันถูกเชื่อมเข้ากับบัส KMB ในกรณีที่ 1 และ 2 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระยะสายส่งระหว่างทุ้งกัณฑ์ล้มในกรณีที่ 1 ซึ่งมากกว่ากรณีที่ 2 จะส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีค่าน้อยกว่า ในส่วนของความแตกต่างระดับกระแสลัดวงจรในสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดของระบบไฟฟ้า ผลปรากฏว่าที่สภาวะโหลดต่ำสุดจะมีค่ากระแสลัดวงจรที่ต่ำกว่าสภาวะโหลดสูงสุด เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีการ Complete จะพิจารณาอิมพีแดนซ์ของโหลดซึ่งคำนวณได้จากสมการ ( $Z_L = V_n^2 / S_L$ ) เพราะฉะนั้นปริมาณโหลดที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสลัดวงจรจึงมีค่าลดลง

#### 4.4.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบกระแสลัดวงจร

การตรวจสอบระดับกระแสลัดวงจรสูงสุดโดยใช้แบบจำลอง Voltage Support Model และวิธีการ Complete เมื่อเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งทั้ง 4 กรณี ผลการจำลองการทำงานชี้ให้เห็นว่าระดับกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อ โดยมีสาเหตุจากปริมาณกำลังผลิตของทุ้งกังหันลมและระยะสายส่งของจุดเชื่อมต่อเป็นหลัก โดยจุดเชื่อมต่อที่อยู่ใกล้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งที่มีกำลังผลิตสูงจะมีปริมาณกระแสลัดวงจรที่สูงกว่า เนื่องจากปริมาณกระแสลัดวงจรจะมีค่าแปรตามปริมาณกำลังผลิตของทุ้งกังหันลมแต่แปรผกผันกับระยะทางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามระยะทางของสายส่ง ในส่วนปริมาณโหลดของระบบไฟฟ้าพบว่ากระแสลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณโหลด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ สำหรับผลกระทบกระแสลัดวงจรทั้ง 4 กรณีพบว่ายังคงผ่านข้อกำหนดของการไฟฟ้าและไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ป้องกันเดิมและยังคงมีการประสานสัมพันธ์การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันได้เป็นอย่างดี โดยการเชื่อมต่อในกรณีที่ 4 จะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสลัดวงจรที่น้อยกว่ากรณีอื่นๆ ทั้งสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุด

## บทที่ 5

### การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต

การตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากการตรวจสอบในสถานะอยู่ตัวแล้ว ในทางปฏิบัติอาจมีความผิดปกติ (Fault) หรือสิ่งรบกวนการทำงานของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีความไม่แน่นอนอย่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า ผลกระทบจากการเกิดความผิดปกติหรือสิ่งรบกวนภายในระบบไฟฟ้าหรือกังหันลมจะส่งผลให้สถานะการทำงานเปลี่ยนแปลงแบบพลวัต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบสถานะการทำงานในสถานะดังกล่าว นั่นคือ การจำลองการทำงานในสถานะพลวัตซึ่งเป็นการตรวจสอบปัญหาเสถียรภาพที่อาจเกิดขึ้นจากการเพิ่มกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของกังหันลมภายหลังการเกิดความผิดปกติต่างๆ เพื่อหาจุดวิกฤติที่อาจจะเกิดขึ้นได้ [12] ในบทนี้จะจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตที่มีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งซึ่งประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งหลุดการเชื่อมต่อ สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม

#### 5.1 ทฤษฎีและหลักการการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต

การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม เมื่อเกิดความผิดปกติหรือสิ่งรบกวนต่างๆ ซึ่งจะมีการตอบสนองต่อความผิดปกติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีกังหันลม ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ตำแหน่งการเกิดความผิดปกติ รวมถึงปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนเกิดความผิดปกติ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองกังหันลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบจำลองการทำงาน ซึ่งมีแบบจำลองในสถานะพลวัต (Dynamic Model) และหลักการพื้นฐานการทำงานในสถานะการเกิดความผิดปกติ ดังนี้

##### 5.1.1 องค์ประกอบทั่วไปของกังหันลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ

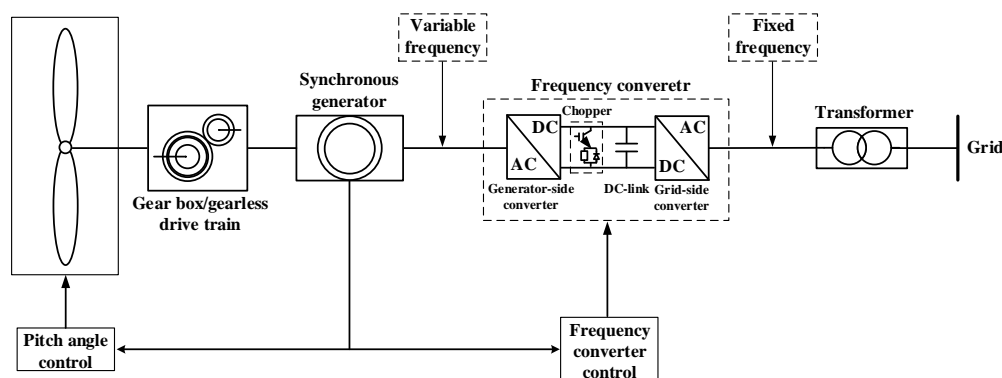
องค์ประกอบต่างๆ ไปของกังหันลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบแสดงดังภาพประกอบ 5-1 [42-43] ประกอบด้วย

##### 1. องค์ประกอบทางไฟฟ้า ได้แก่

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Synchronous Generator)
- คอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ (Full-Scale Frequency Converter)

## 2. องค์ประกอบทางกล ได้แก่

- ระบบอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics)
- ระบบขับเคลื่อน (Drive Train System)
- การควบคุมมุมองศาใบพัด (Pitch Angle Control)



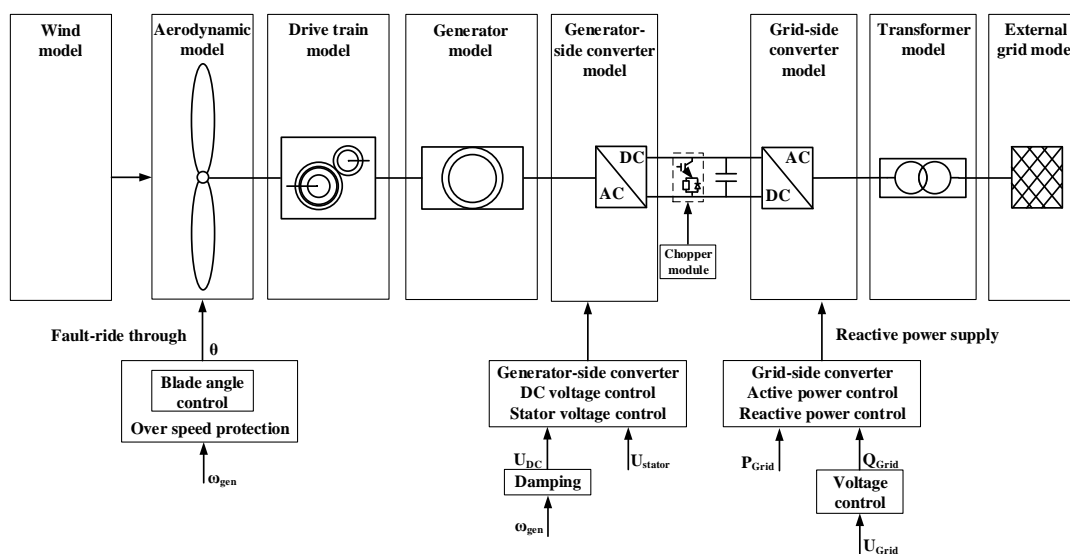
ภาพประกอบ 5-1 องค์ประกอบพื้นฐานของกังหันลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ [43]

จากภาพประกอบ 5-1 ระบบอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมชนิดนี้จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านระบบขับเคลื่อนซึ่งถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบกล่องเกียร์ (Gear Box) และแบบไร้กล่องเกียร์ (Gearless Drive Train) โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนสต็อกเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ (Full-Scale Converter) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการไหลของกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกป้อนผ่านขดลวดสเตเตอร์เข้าสู่คอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบและถูกแปลงความถี่ค่าต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า โดยลักษณะของระบบคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบดังกล่าวจะถูกเรียกว่าคอนเวอร์เตอร์แบบ Back-to-Back แบ่งเป็นคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator-Side Converter) และคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า (Grid-Side Converter) โดยถูกเชื่อมถึงกันด้วยการเชื่อมผ่าน DC-link และควบคุมการทำงานด้วยอุปกรณ์ IGBT เพราะฉะนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมที่ถูกเชื่อมต่อผ่านคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยหลักการแล้วจะมีความสามารถทนหรือผ่านช่วงการเกิดความผิดปกติ และยังช่วยระบบไฟฟ้าในสภาวะเกิดความผิดปกติให้กลับมาทำงานได้อย่างปกติ อีกทั้งการมีอยู่ของคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบจะส่งผลให้กังหันลมสามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้อย่างอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะความผิดปกติ นอกจากนี้การแยกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบไฟฟ้าด้วยคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าว จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบของกังหันลมไม่ตกอยู่ในสภาวะความผิดปกติโดยตรง



### 5.1.2 หลักการควบคุมกักหน้ลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ

หลักการควบคุมกักหน้ลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบในสภาวะเกิดความผิดปกติแสดงดังภาพประกอบ 5-2 ซึ่งเป็นแบบจำลองทั่วไปของกักหน้ลมชนิดนี้โดยไม่ได้เน้นถึงรายละเอียดการออกแบบใดๆ ของผู้ผลิต คอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะควบคุมแรงดันของ DC-link และแรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าจะถูกใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถตอบสนองต่อการควบคุมแรงดันของ DC-link โดยไม่ถูกรบกวนจากการเกิดความผิดปกติเนื่องจากไม่ได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งจะแตกต่างกับคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบโดยตรงทำให้ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟได้ตามต้องการเมื่อระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะแรงดันต่ำจากการเกิดความผิดปกติ ดังนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการลดกระแสสเตเตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดัน DC-link ให้คงที่ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกักหน้ลมจึงไม่ได้รับผลกระทบจากการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า



ภาพประกอบ 5-2 หลักการควบคุมกักหน้ลมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ  
ในสภาวะเกิดความผิดปกติ [43]

### 5.1.3 ความสามารถทนความผิดพลาดของกึ่งนำลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ

ความสามารถทนความผิดพลาดของกึ่งนำลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบเกิดจากการทำงานของตัวควบคุม Pitch Controller, Damping Controller และ Chopper Controller ดังภาพประกอบ 5-2 โดย Pitch Controller ทำหน้าที่ป้องกันความเร็วเกินพิกัด Chopper Controller จะถูกวางขนานกับคาปาซิเตอร์ของ DC-link มีหน้าที่จัดการพลังงานส่วนเกิน สำหรับ Damping Controller ทำหน้าที่คล้ายกับตัวรักษาเสถียรภาพ (Stabilizer) ของระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับเหตุผลที่ต้องใช้ Damping Controller กับกึ่งนำลมนชนิดนี้ เนื่องจากกึ่งนำลมนไม่มีภาระหน่วงโดยธรรมชาติ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเพียงเล็กน้อยโดยการกระตุ้นทางกลหรือการเปลี่ยนแปลงโหลดไฟฟ้าสามารถขยายการกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง ทำให้เกิดความเครียดทางกลของตัวขับเคลื่อนสูงรวมถึงการเกิดความไม่มีเสถียรภาพถ้าตัวควบคุมการหน่วงภายนอกไม่ทำงาน ซึ่งเป้าหมายของการควบคุมนี้คือ การควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้านการกวัดแกว่งของความเร็วและช่วยให้การทำงานของกึ่งนำลมนมีเสถียรภาพ ผลที่ได้คือ สามารถหน่วงการกวัดแกว่งการบิดของตัวขับเคลื่อนในสภาวะเกิดความผิดพลาด

### 5.1.4 แนวทางการควบคุมกึ่งนำลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ

การควบคุมกึ่งนำลมนชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบไฟฟ้า แรงดันของ DC-link ( $U_{dc}$ ) ถูกควบคุมโดยคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและไม่มีมีความเกี่ยวข้องกับใดๆ กับคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า ในขณะที่กำลังไฟฟ้าแอคทีฟ ( $P_{grid}$ ) ของระบบไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าและไม่มีมีความเกี่ยวข้องกับคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นกัน การควบคุมดังกล่าวสามารถเป็นไปได้เนื่องจากการใช้งานของอุปกรณ์ IGBT ภายในกึ่งนำลมน ส่งผลให้ความสามารถทนความผิดพลาดเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้ถูกเชื่อมต่อโดยตรงกับระบบไฟฟ้าจึงทำให้ไม่ได้รับผลกระทบใดๆ ในช่วงการเกิดความผิดพลาด แรงดันของ DC-link จึงสามารถรักษาระดับให้คงที่โดยการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่คอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเกิดความผิดพลาดภายในระบบไฟฟ้า ส่งผลให้การส่งพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบทำได้น้อยกว่าในสภาวะการทำงานปกติ ผลที่ตามมาคือ ตัวควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดการไหลของกำลังไฟฟ้าไปยัง DC-link เพื่อรักษาระดับแรงดันของ DC-link ให้คงที่ นั่นคือการลดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาการเกิดสภาวะความไม่สมดุลกำลังไฟฟ้าที่จะส่งผลกระทบ โดยตรงต่อความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถทนความผิดพลาดของ

กึ่งหันลมด้วยการเพิ่ม Chopper Controller ใน DC-link ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังวางขนานกับตัวเก็บประจุ เพราะฉะนั้นเมื่อแรงดันของ DC-link เพิ่มขึ้นกว่าค่าวิกฤติ Chopper Controller จะถูกกระตุ้นและกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจะถูกส่งไปยังตัวต้านทาน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถการทนความผิดพลาดอีกทางหนึ่ง ซึ่งจะช่วยลดการกวัดแกว่งแรงบิดของเพลลาและทำให้ความเครียดทางกลของตัวขับเคลื่อนในช่วงการเกิดความผิดพลาดลดลง

## 5.2 การศึกษาผลกระทบการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต

### 5.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต

การประเมินผลกระทบเมื่อเกิดความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวนภายในระบบไฟฟ้า หลังการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งได้แก่ การประเมินระดับแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อ โดยจะมีระยะเวลาตัดวงจรที่แตกต่างกันขึ้นกับระดับความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้น สำหรับการป้องกันแรงดันต่ำและแรงดันเกิน (Under and Over Voltage Protection) ของจุดเชื่อมต่อได้กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมจะต้องปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าหากขนาดแรงดันในระบบมีค่าออกนอกช่วงตามที่ระบุไว้ในตาราง 5-1 ส่วนการป้องกันความถี่ต่ำและความถี่เกิน (Under and Over Frequency Protection) ได้ระบุว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมจะต้องปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าภายในเวลา 0.1 วินาที เมื่อความถี่ของจุดเชื่อมต่อมีค่าไม่อยู่ในช่วง 48-51 Hz [28]

ตาราง 5-1 ระยะเวลาปลดวงจรเมื่อแรงดันไม่อยู่ในช่วงแรงดันปกติ

ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (%)	ระยะเวลาตัดวงจร (วินาที)
$V > 50$	0.30
$50 \leq V < 90$	2.00
$90 \leq V < 110$	ทำงานต่อเนื่อง
$110 \leq V < 120$	1.00
$V \geq 120$	0.16

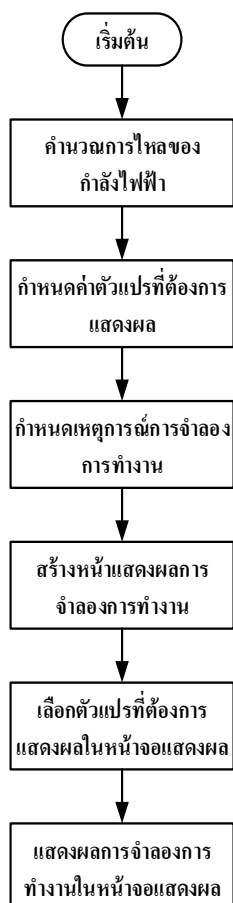
### 5.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต

การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตที่มีการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยฟังก์ชันลมนอกชายฝั่งจำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางพลวัตของชนิดกักเก็บพลังงานที่ใช้วิเคราะห์โดยปกติโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory จะประกอบด้วยแบบจำลององค์ประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรียกว่าแบบจำลอง Built-in Model ซึ่งเป็นแบบจำลองมาตรฐานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถนำมาใช้งานได้เลย แต่การวิเคราะห์ทางพลวัตของกักเก็บพลังงานจำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่เรียกว่าแบบจำลอง DSL (Dynamic Simulation Language) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของความเร็วลม ระบบอากาศพลศาสตร์ ระบบขับเคลื่อนทางกล และการควบคุมภายในกักเก็บพลังงาน [44] ซึ่งโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory ตั้งแต่รุ่น 14.1 ได้มีการสร้างแม่แบบ (Template) จากแบบจำลอง DSL ของกักเก็บพลังงานชนิดต่างๆ ที่พร้อมใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางพลวัตของกักเก็บพลังงาน ประกอบด้วย กักเก็บพลังงานชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพันขดลวด กักเก็บพลังงานชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง และกักเก็บพลังงานชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบ [37] นอกจากนี้แบบจำลองกักเก็บพลังงานดังกล่าวในโปรแกรมยังมีแม่แบบที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอื่นๆ ได้แก่ แบบจำลองของโซล่าเซลล์และแบบจำลองของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าสำรอง โดยรายละเอียดของการสร้างแบบจำลองของกักเก็บพลังงานชนิดต่างๆ ดังกล่าวได้มีการอธิบายไว้ในรายงานของ Risø เขียนโดย Hansen และคณะ มีการเผยแพร่ในปี 2007 [42] ซึ่งเป็นการสร้างแม่แบบขึ้นจากการพิจารณาโครงการงานวิจัยต่างๆ ในประเทศเดนมาร์กตั้งแต่ปี 2001-2007 ดังนั้นแบบจำลองพลวัตของกักเก็บพลังงานชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงจากแบบจำลองพลวัตที่เขียนขึ้นภายในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory โดยยังคงใช้รูปแบบการจำลองของกักเก็บพลังงานแบบรวมเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว

### 5.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตด้วยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

การจำลองการทำงานในสถานะพลวัตสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลวัตของระบบไฟฟ้า [45] ในโดเมนเวลาซึ่งมี 2 พังก์ชันการทำงาน ได้แก่ RMS (Root Mean Square) และ EMT (Electromagnetic Transient) ซึ่งจะแตกต่างกันคือ RMS เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตของตัวควบคุมและกระบวนการทางกลของระบบแหล่งจ่ายพลังงาน ส่วน EMT เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีการคำนวณแบบ EMT ในการจำลองการทำงานพลวัต เนื่องจากต้องการศึกษาผลกระทบ

การทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติ โดยมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ดังภาพประกอบ 5-3



ภาพประกอบ 5-3 ลำดับขั้นตอนการจำลองการทำงานในสถานะพลวัต

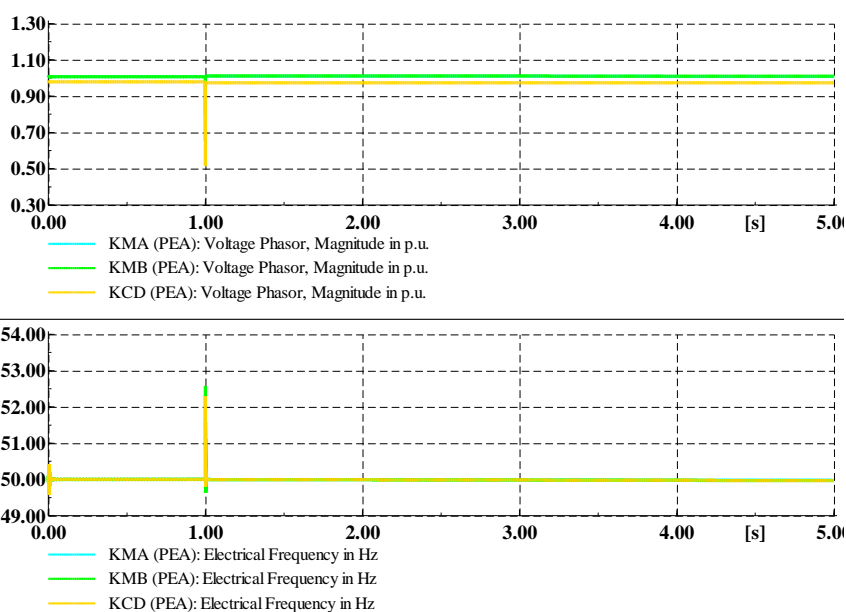
จะเห็นได้ว่าการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตจำเป็นต้องมีการกำหนดเหตุการณ์ความผิดปกติให้กับโปรแกรม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดเหตุการณ์การจำลองเป็นดังนี้

1. การเกิดระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งและสายส่งภายในระบบไฟฟ้าเหตุการณ์เชื่อมต่อจะถูกกำหนดเหตุการณ์เป็น Switch Event
2. การลัดวงจร 3 เฟสที่บัสจะถูกกำหนดเหตุการณ์เป็น Short-Circuit Event ที่สามารถกำหนดเวลาการลัดวงจรและปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้า
3. การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเป็นการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ภายในของแบบจำลองกังหันลมดังนั้นจึงถูกกำหนดเหตุการณ์เป็น Parameter Event

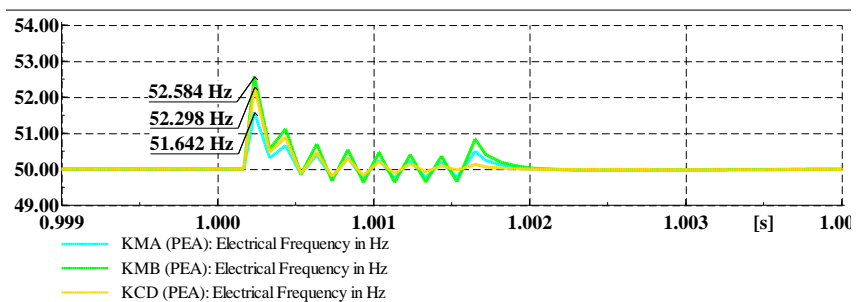
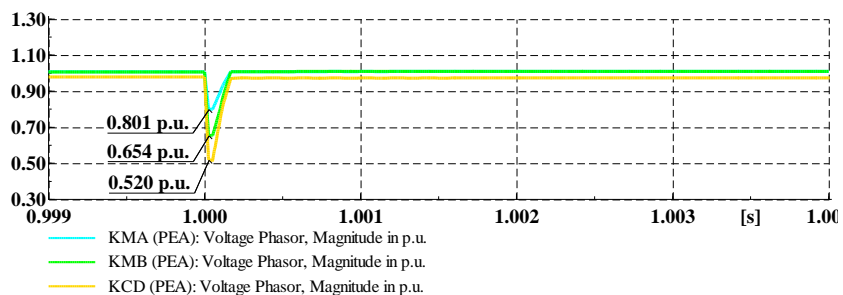
### 5.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต

#### 5.3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งหลุดการเชื่อมต่อ (Offshore Wind Farm Trip Offline)

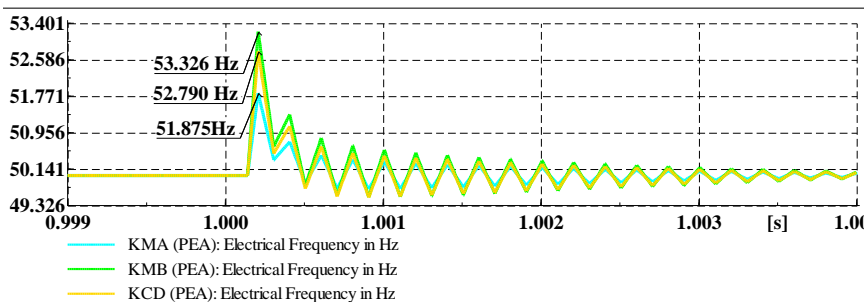
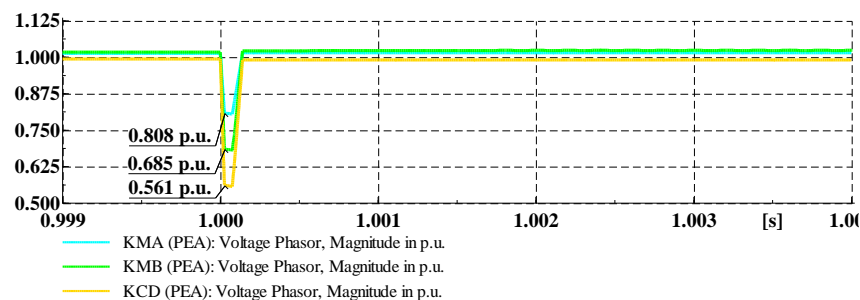
การจำลองสถานการณ์นี้เป็นการสมมุติสถานการณ์หากเกิดความผิดปกติของเมื่อกังหันลมทั้งหมดภายในกังหันลมถูกลดหรือหลุดการเชื่อมต่อจากระบบไฟฟ้าอย่างทันทีทันใดในการจำลองจะกำหนดให้กังหันลมหลุดการเชื่อมต่อจากบัสรวม ณ วินาทีที่ 1 และจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นจนถึงวินาทีที่ 5 ดังภาพประกอบ 5-4 ซึ่งแสดงลักษณะผลกระทบของกังหันลมหลุดการเชื่อมต่อจากระบบไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าทั้งแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อจะเกิดการแกว่งและกลับเข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว โดยระดับความรุนแรงของการกวัดแกว่งแรงดันและความถี่จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพของการเชื่อมต่อ และหากพิจารณาผลการจำลองการทำงานขณะเกิดความผิดปกติสามารถแสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณีในสถานะ โหลดสูงสุดและสถานะ โหลดต่ำสุดดังภาพประกอบ 5-5 ถึงภาพประกอบ 5-8 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5-4 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อกังหันลมหลุดการเชื่อมต่อ



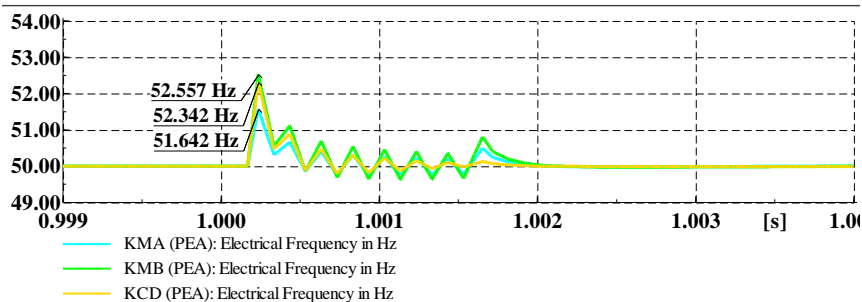
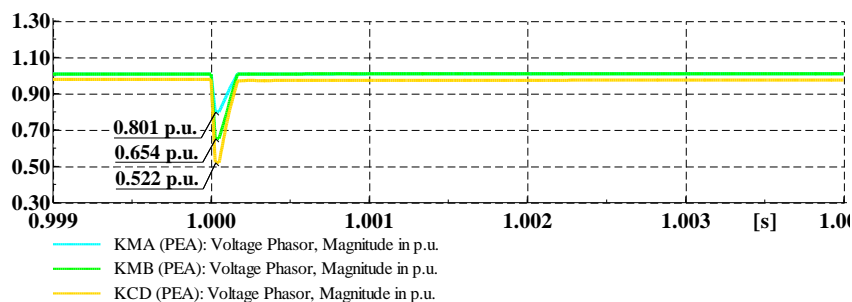
(ก)



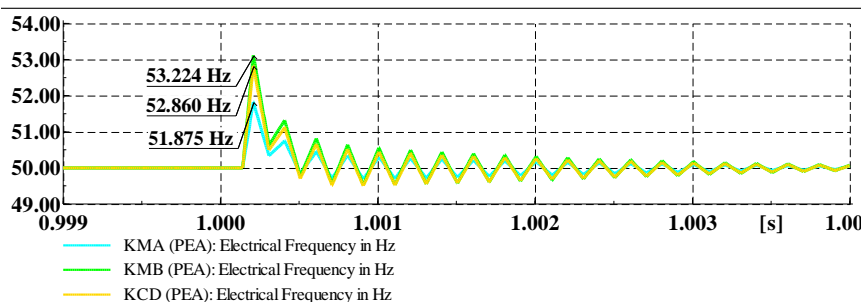
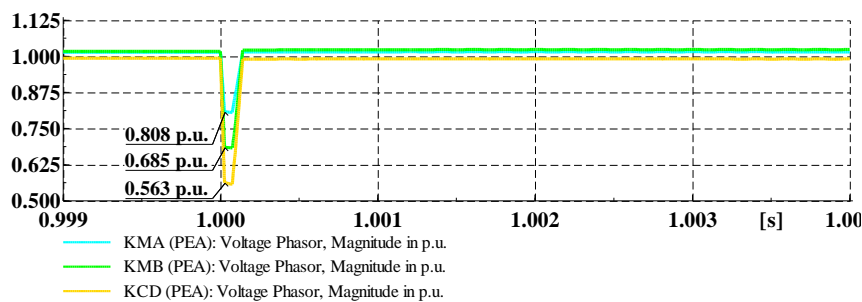
(ข)

ภาพประกอบ 5-5 ผลกระทบขณะทุ่งกั้นล้มหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 1

(ก) สภาวะโหดสูงสุด, (ข) สภาวะโหดต่ำสุด



(ก)

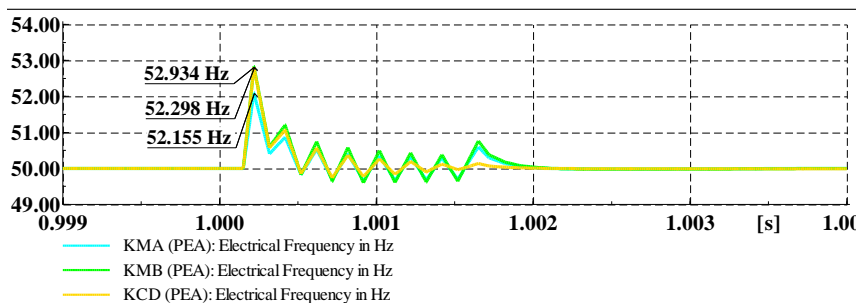
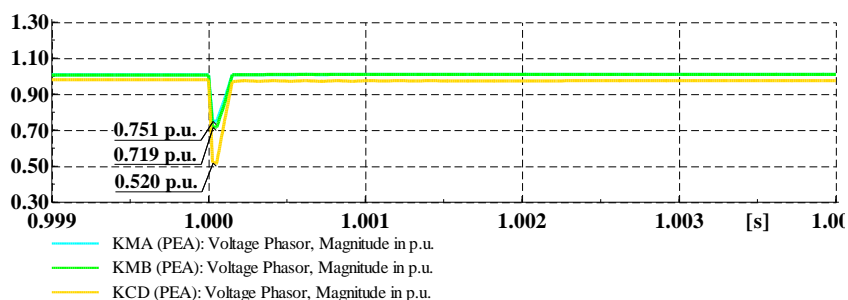


(ข)

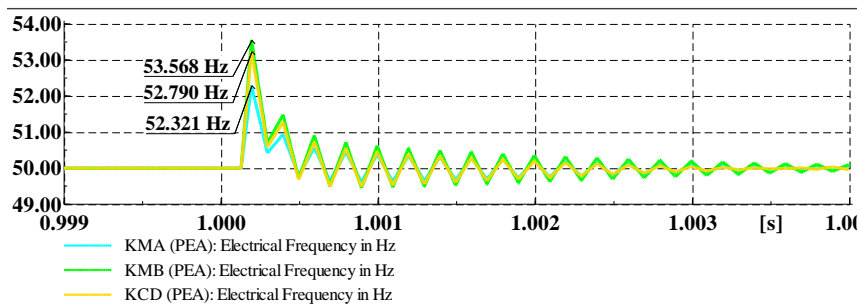
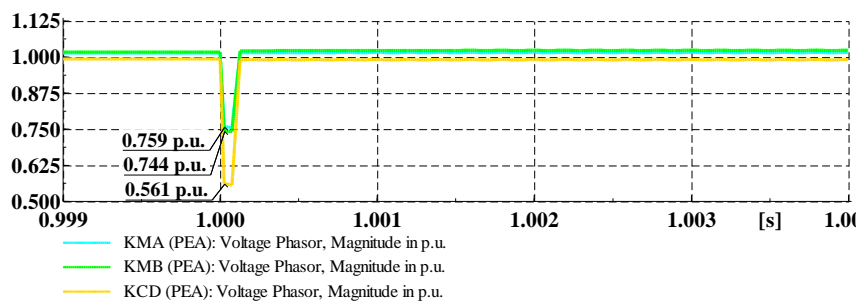
ภาพประกอบ 5-6 ผลกระทบขณะทุ้งกั้นล้มหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 2

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด





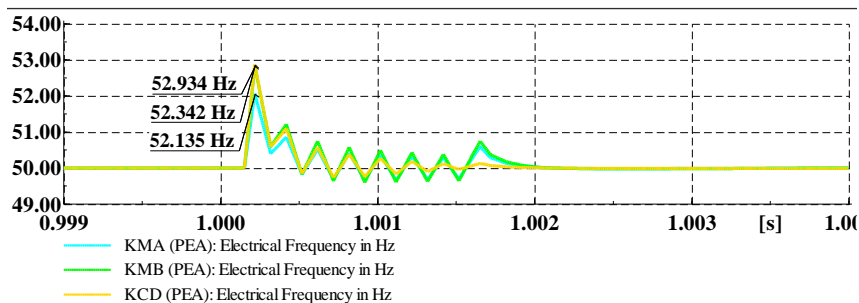
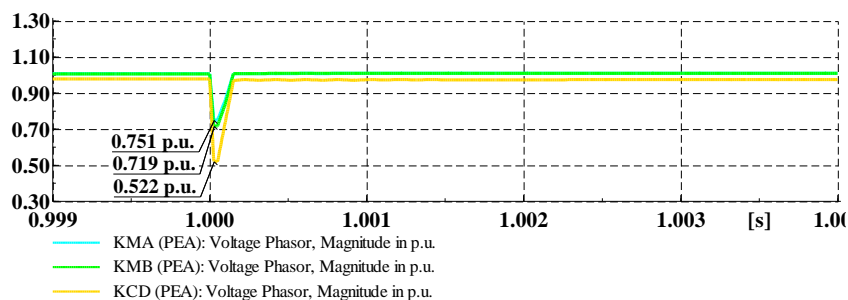
(ก)



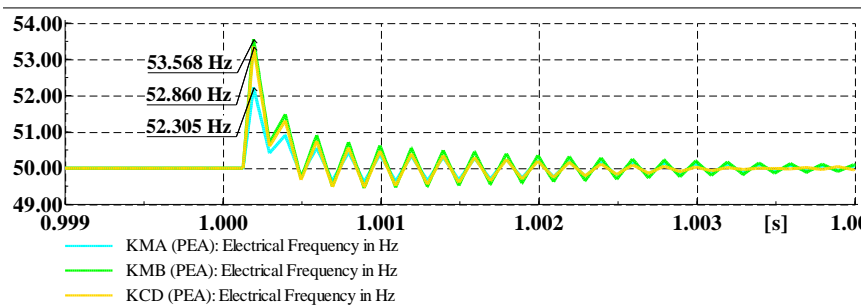
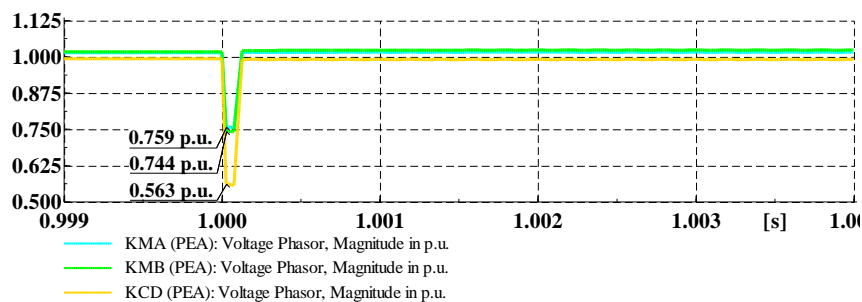
(ข)

ภาพประกอบ 5-7 ผลกระทบขณะทุ่งกั้นล้มหลุดการเชื่อมต่อกรณี 3

(ก) สภาวะโวลตสูงสุด, (ข) สภาวะโวลตต่ำสุด



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5-8 ผลกระทบขณะทุ้งกั้นล้มหลุดการเชื่อมต่อกรณีที่ 4

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด

จากผลการจำลองผลกระทบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกั้นล้มหลุดการเชื่อมต่อทั้ง 4 กรณีแสดงให้เห็นถึงระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อที่มีค่าลดลงและต่ำกว่าข้อกำหนดของการไฟฟ้า ในส่วนความถี่ของจุดเชื่อมต่อจะเกิดการแกว่งเพิ่มสูงขึ้นจากความถี่มาตรฐานของระบบไฟฟ้า (50 Hz) และจะมีค่าเกินข้อกำหนดการไฟฟ้าเช่นเดียวกับแรงดัน แต่อย่างไรก็ตามทั้ง

แรงดันและความถี่ก็สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว โดยที่ระบบไฟฟ้ายังคงจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้อย่างปกติ ตาราง 5-2 และตาราง 5-3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่สูงสุดของจุดเชื่อมต่อในสภาวะโหลดสูงสุดและสภาวะโหลดต่ำสุดทั้ง 4 กรณี ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณกำลังผลิตของทุ่งก้งหั่นลมเป็นหลัก โดยจุดเชื่อมต่อที่เชื่อมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ่งก้งหั่นลมที่มีกำลังผลิตสูง การลดลงของแรงดันหรือการแกว่งของความถี่จะได้รับผลกระทบที่รุนแรงกว่า เนื่องจากเมื่อเกิดความผิดปกติใดๆ ในระบบไฟฟ้าจนส่งผลให้ทุ่งก้งหั่นลมหยุดการเชื่อมต่อ เปรียบเสมือนกับการตัดแหล่งผลิตพลังงานออกจากระบบไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด ผลที่ตามมาคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักของระบบไฟฟ้าจะรับภาระโหลดเพิ่มขึ้นทันที ดังนั้นแหล่งพลังงานที่มีกำลังผลิตสูงถูกปลดจากระบบไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดขึ้นย่อมมีความรุนแรงกว่า เนื่องจากทุ่งก้งหั่นลมจะช่วยลดการจ่ายพลังงานจากแหล่งพลังงานไฟฟ้าหลัก แต่หากทุ่งก้งหั่นลมขนาดใหญ่หยุดการเชื่อมต่ออย่างทันทีทันใด แหล่งพลังงานหลักจะกลับมาจ่ายพลังงานให้โหลดอย่างทันทีทันใดเช่นกัน ดังนั้นความรุนแรงของการแกว่งทั้งแรงดันและความถี่จะเพิ่มตามปริมาณภาระโหลดที่แหล่งพลังงานหลักต้องจ่ายนั่นเอง ในส่วนผลกระทบจากระยะสายส่งจะไม่มีผลกระทบที่รุนแรงอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับระดับปริมาณโหลดของระบบไฟฟ้า

ตาราง 5-2 ผลกระทบสูงสุดขณะทุ่งก้งหั่นลมหยุดการเชื่อมต่อในสภาวะโหลดสูงสุด

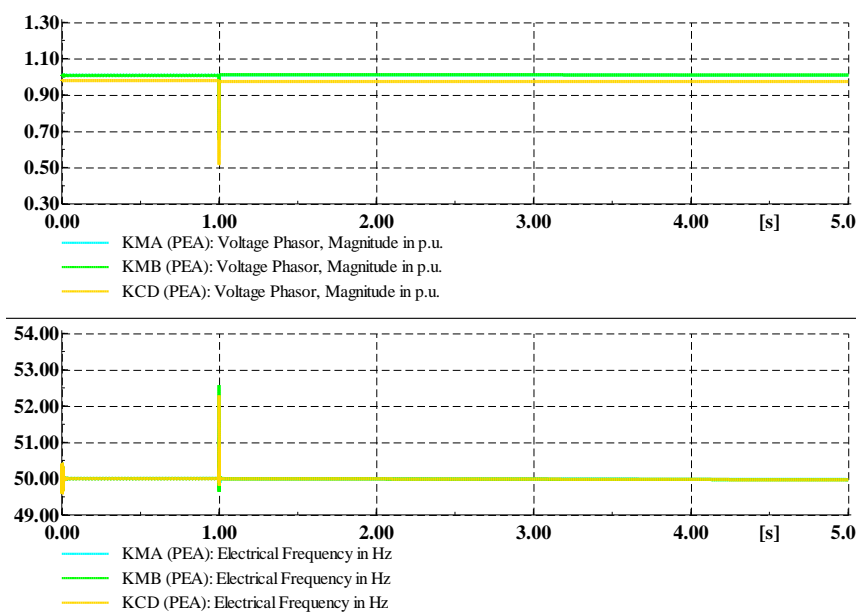
กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.801	51.642	0.654	52.584	0.520	52.298
2	0.801	51.642	0.654	52.557	0.522	52.342
3	0.751	52.155	0.719	52.934	0.520	52.298
4	0.751	52.135	0.719	52.934	0.522	52.342

ตาราง 5-3 ผลกระทบสูงสุดขณะทุ่งก้งหั่นลมหยุดการเชื่อมต่อในสภาวะโหลดต่ำสุด

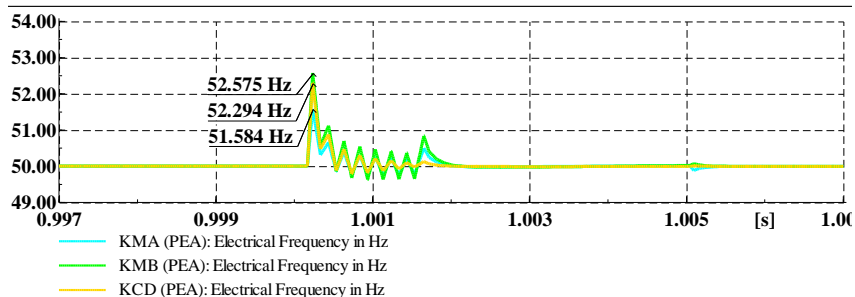
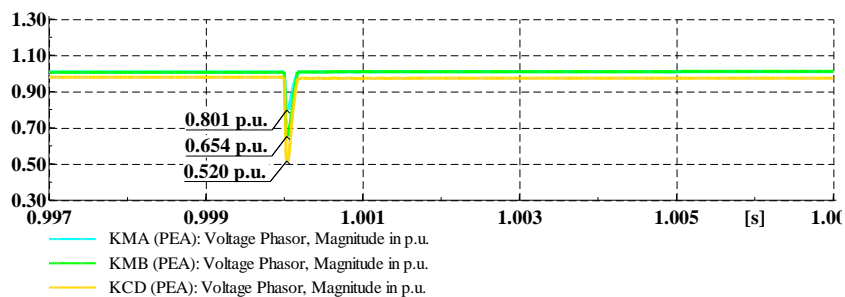
กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.808	51.875	0.685	53.326	0.561	52.790
2	0.808	51.875	0.685	53.224	0.563	52.860
3	0.759	52.321	0.744	53.568	0.561	52.790
4	0.759	52.305	0.744	53.568	0.563	52.860

### 5.3.2 สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ (N-1 Trip Offline)

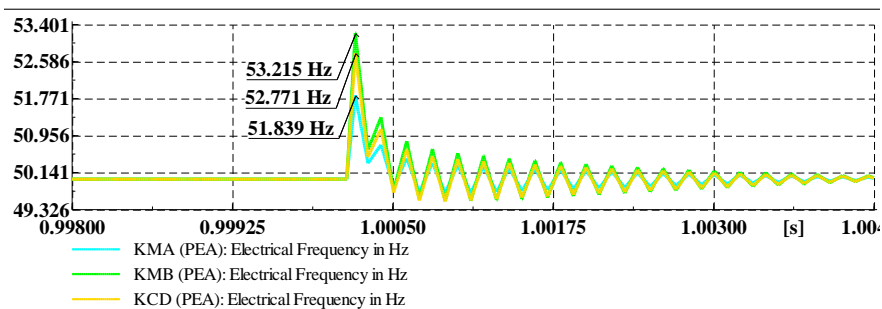
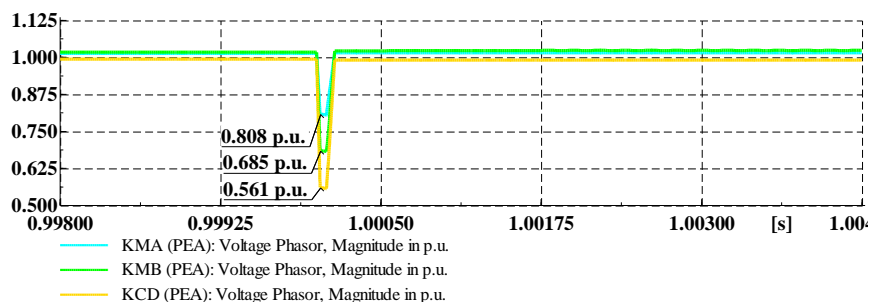
การจำลองสถานการณ์นี้เป็นการสมมุติสถานการณ์หากเกิดความผิดปกติเมื่อสายส่งเคเบิลใต้น้ำที่เชื่อมระหว่างทุ้งกั้งหันลมและจุดเชื่อมต่อถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นการคำนึงถึงความมั่นคงในระดับ N-1 คือการหลุดของอุปกรณ์ไฟฟ้า 1 อุปกรณ์ ดังนั้นในการจำลองจึงกำหนดให้สายส่งเคเบิลใต้น้ำถูกปลดจากระบบไฟฟ้า ณ วินาทีที่ 1 และจำลองผลกระทบจนถึงวินาทีที่ 5 ดังภาพประกอบ 5-9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อจะเกิดการกวัดแกว่งในลักษณะเดียวกับการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกั้งหันลมหลุดการเชื่อมต่อ โดยมีความรุนแรงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันตามปัจจัยทางกายภาพของการเชื่อมต่อ และเมื่อพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณีสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังภาพประกอบ 5-10 ถึงภาพประกอบ 5-13



ภาพประกอบ 5-9 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อสายส่งเคเบิลใต้น้ำหลุดการเชื่อมต่อ

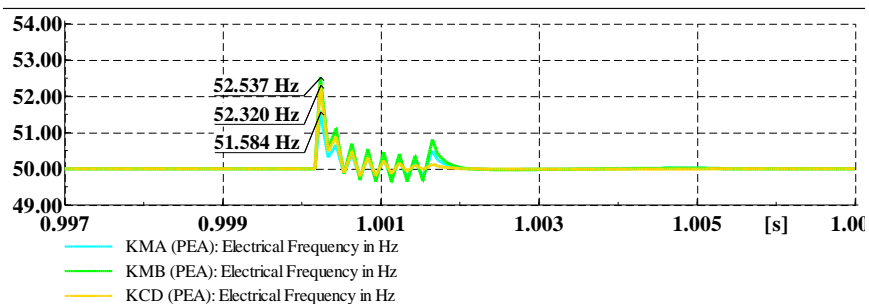
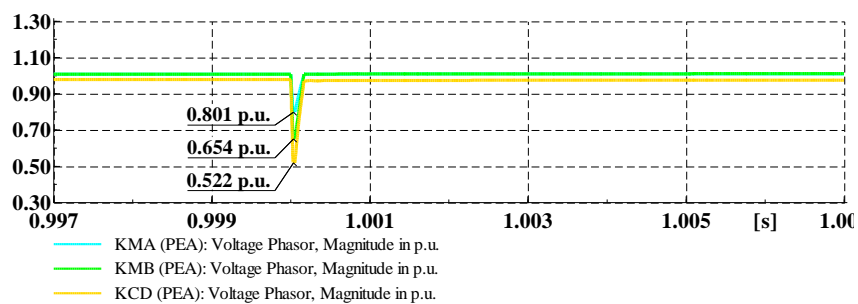


(ก)

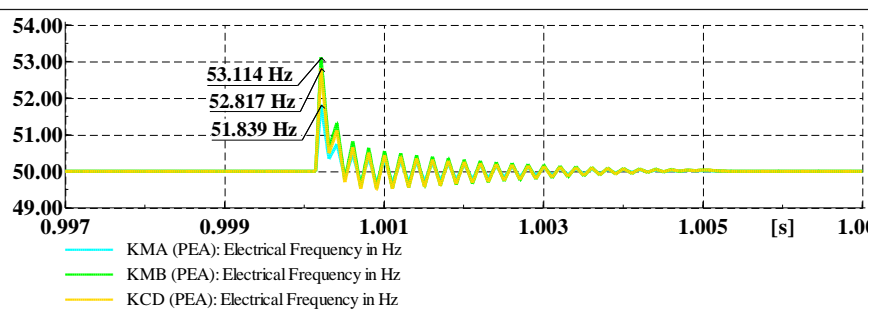
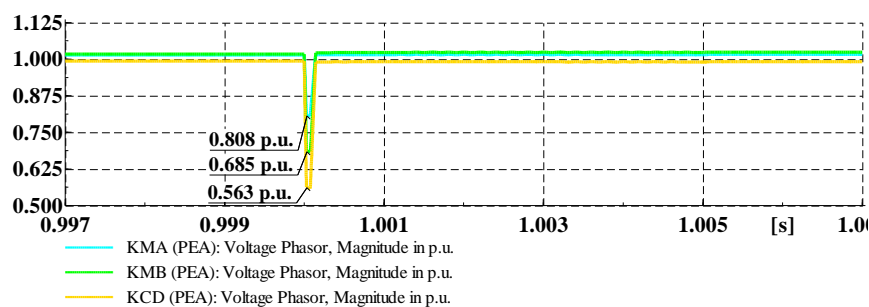


(ข)

ภาพประกอบ 5-10 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำเหตุการณ์เชื่อมต่อกกรณีที่ 1  
(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด



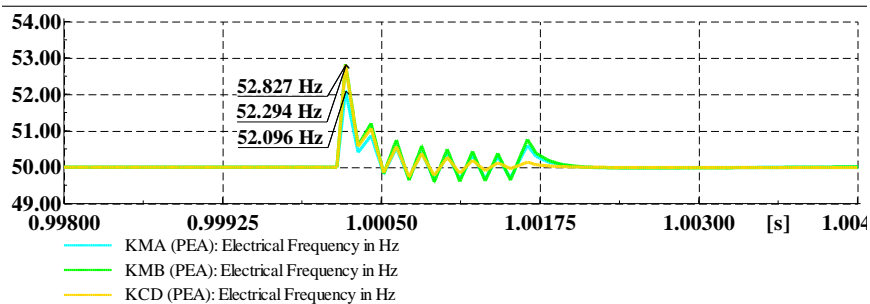
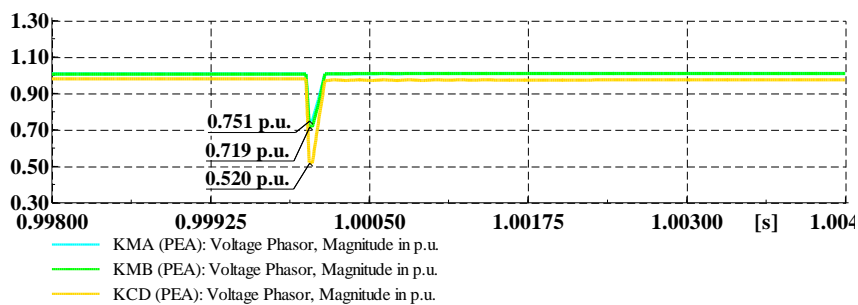
(ก)



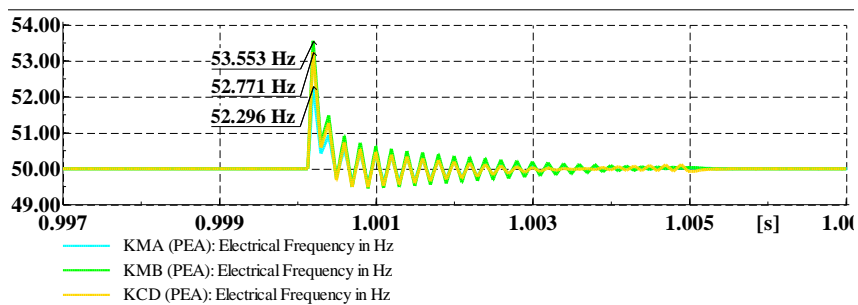
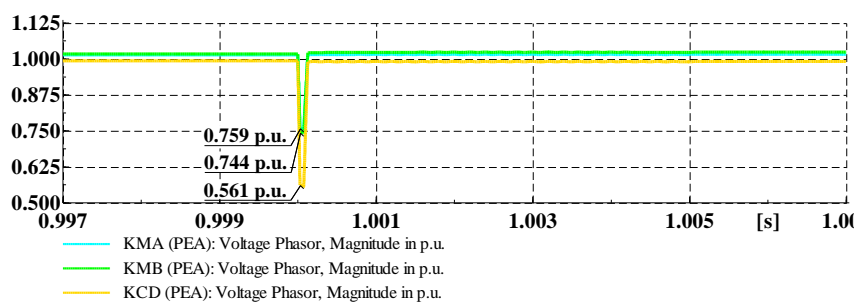
(ข)

ภาพประกอบ 5-11 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำหลอดการเชื่อมต่อกรณีที่ 2

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด



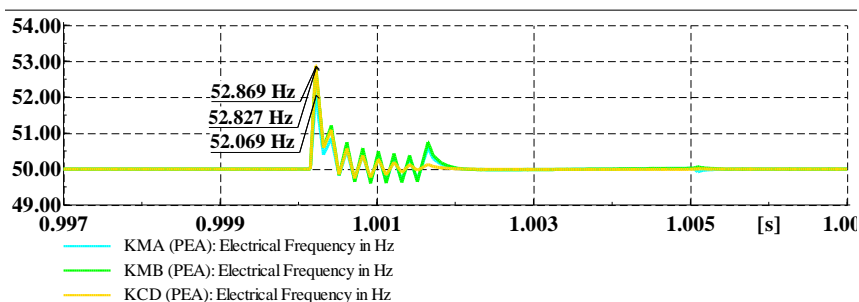
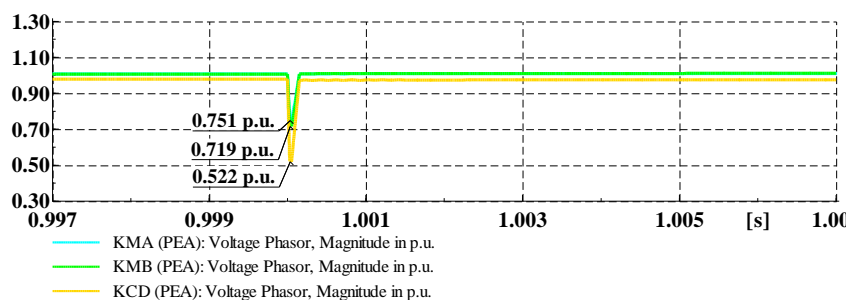
(ก)



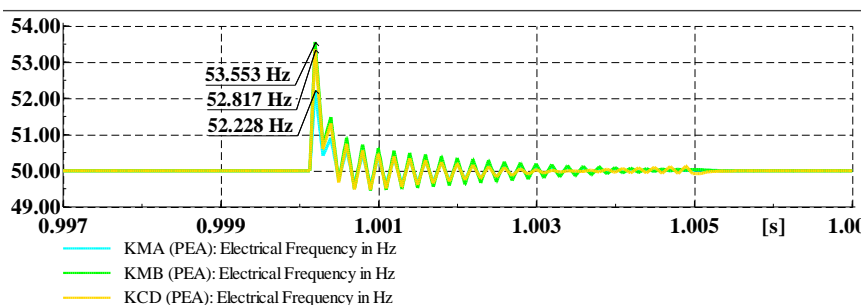
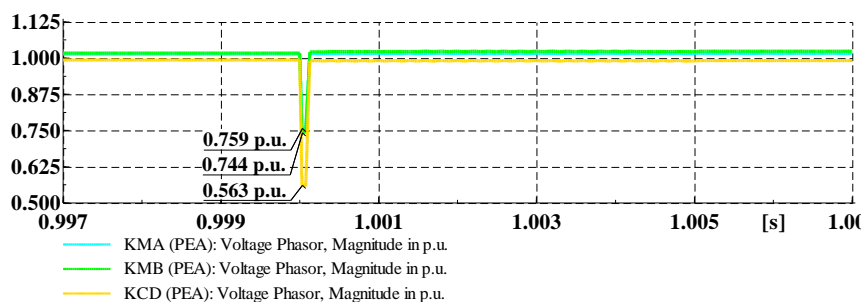
(ข)

ภาพประกอบ 5-12 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำเหตุการณ์เชื่อมต่อกรณีที่ 3

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5-13 ผลกระทบขณะสายส่งเคเบิลได้นำเหตุการณ์เชื่อมต่อกรณี 4

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด

ผลการจำลองผลกระทบสายส่งเคเบิลได้นำเหตุการณ์เชื่อมต่อทั้ง 4 กรณีแสดงให้เห็นถึงการแกว่งของแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อเกินข้อกำหนดการเชื่อมต่อดังตาราง 5-4 และตาราง 5-5 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่สูงสุดของจุดเชื่อมต่อทั้งสภาวะโหลดสูงสุดและสภาวะโหลดต่ำสุดทั้ง 4 กรณี ผลกระทบที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนกับการจำลองของระบบผลิต



ไฟฟ้าด้วยท่งกั้นล้มหลุดการเชื่อมต่อทั้งแรงดันและความถี่ เนื่องจากจุดที่เกิดความผิดปกติทั้งสองอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกันอีกทั้งประเภทของการเกิดความผิดปกติยังเป็นประเภทเดียวกัน นั่นคือการปลดแหล่งพลังงานของท่งกั้นล้มออกจากระบบไฟฟ้า ซึ่งในกรณีนี้ความถี่ของการแกว่งจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากตำแหน่งการปลดวงจรอยู่ไกลจากท่งกั้นล้ม และหากเปรียบเทียบในสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดของระบบไฟฟ้าจะพบว่าทั้ง 2 สภาวะมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นการจำลองสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อจะไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของระบบไฟฟ้า เนื่องจากทั้งแรงดันและความถี่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็ว นั่นหมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดโดยไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากการปลดสายส่งเคเบิลดังกล่าว

ตาราง 5-4 ผลกระทบสูงสุดขณะสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อสภาวะโหลดสูงสุด

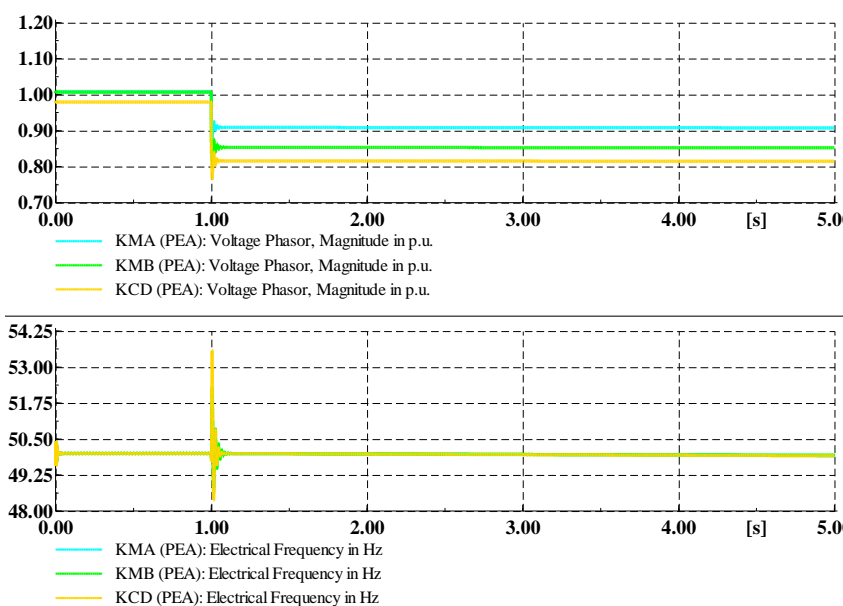
กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.801	51.584	0.654	52.575	0.520	52.294
2	0.801	51.584	0.654	52.537	0.522	52.320
3	0.751	52.096	0.719	52.827	0.520	52.294
4	0.751	52.069	0.719	52.827	0.522	52.320

ตาราง 5-5 ผลกระทบสูงสุดขณะสายส่งเคเบิลได้นำหลุดการเชื่อมต่อสภาวะโหลดต่ำสุด

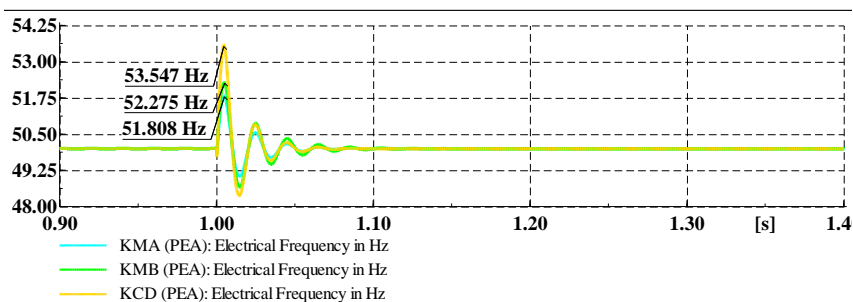
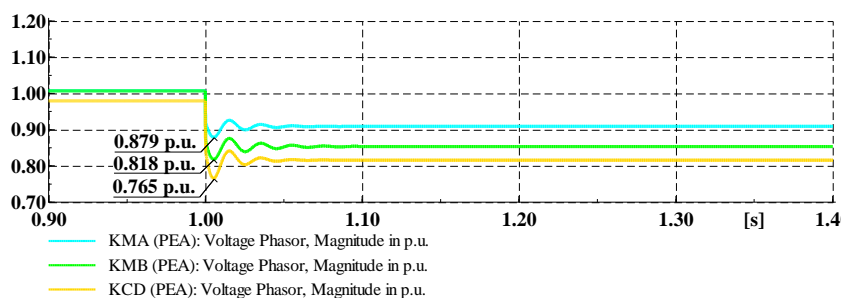
กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.808	51.839	0.685	53.215	0.561	52.771
2	0.808	51.839	0.685	53.114	0.563	52.817
3	0.759	52.296	0.744	53.553	0.561	52.771
4	0.759	52.228	0.744	53.553	0.563	52.817

### 5.3.3 การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส (Three Phase Short Circuit)

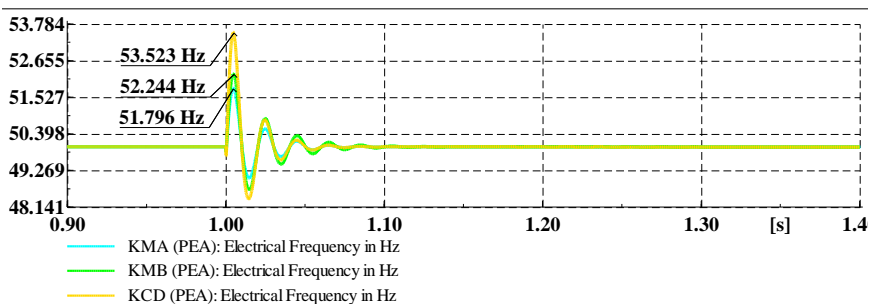
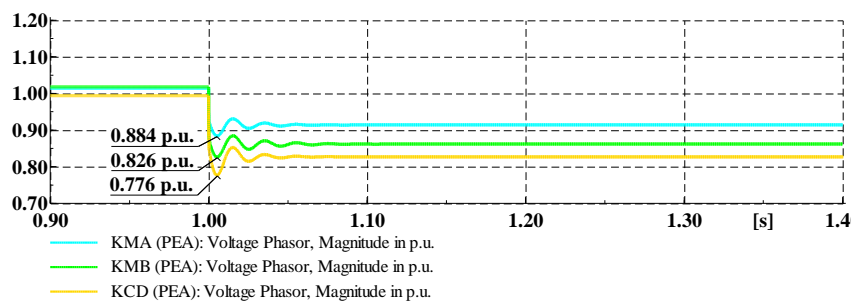
การจำลองการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสเป็นการสร้างสถานการณ์การเกิดความผิดปกติที่รุนแรงสุดในระบบไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบความสามารถการทนความผิดปกติของกั้นหมโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อเทียบกับข้อกำหนดของการไฟฟ้า ผลที่ได้ชี้ให้เห็นถึงระยะเวลาการตัดทุ้งกั้นหมออกจากระบบไฟฟ้าเมื่อแรงดันและความถี่เกินขอบเขตข้อกำหนด สำหรับเงื่อนไขของการจำลองการลัดวงจรจะจำลองเหตุการณ์ขึ้น ณ วินาทีที่ 1 และแสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นจนถึงวินาทีที่ 5 ดังภาพประกอบ 5-14 ผลการจำลองผลกระทบเมื่อเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส แสดงให้เห็นว่าทั้งแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อจะเกิดการกวัดแกว่งและพยายามกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกันตามปัจจัยของการเชื่อมต่อในแต่ละรูปแบบ ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 4 กรณีแสดงดังภาพประกอบ 5-15 ถึงภาพประกอบ 5-18 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5-14 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส



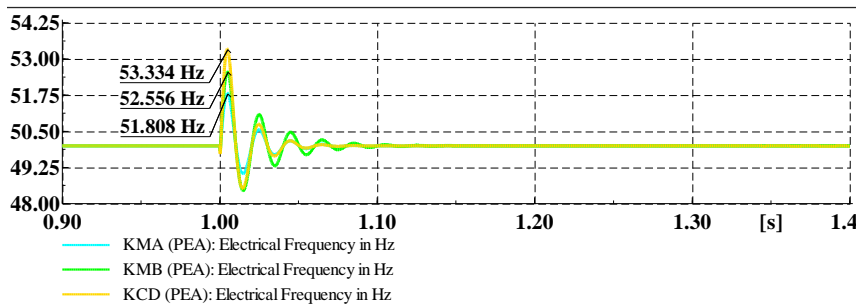
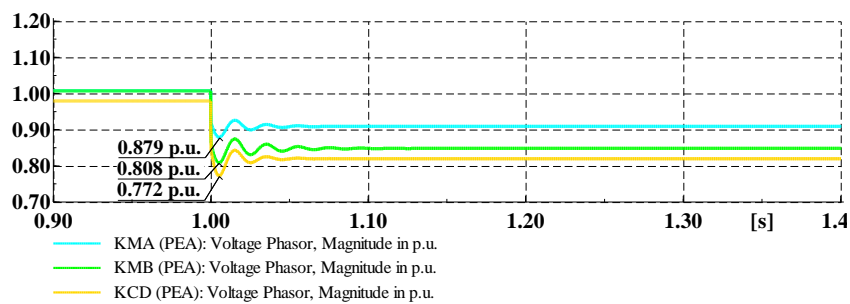
(ก)



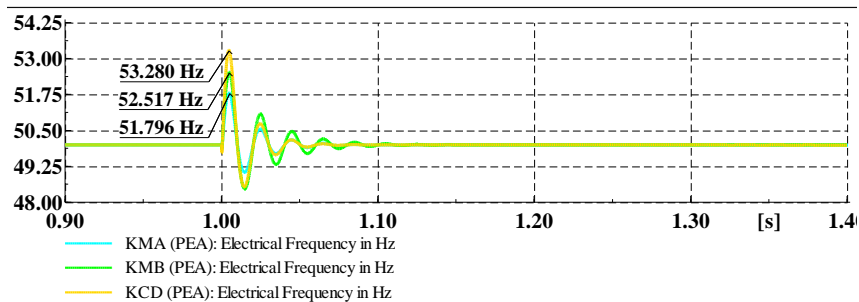
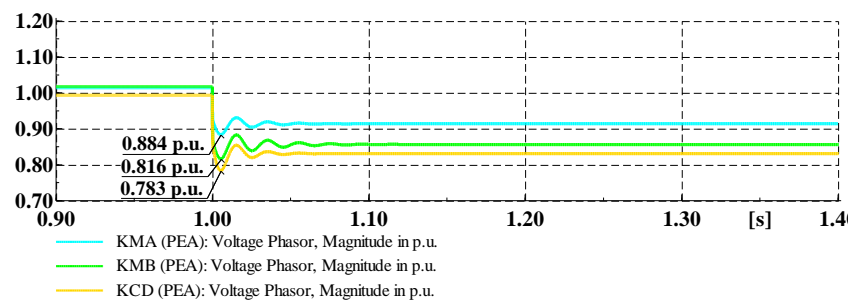
(ข)

ภาพประกอบ 5-15 ผลกระทบขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสสถานีที่ 1

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด



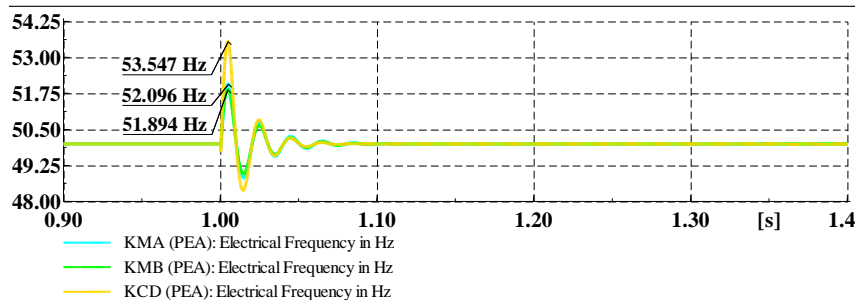
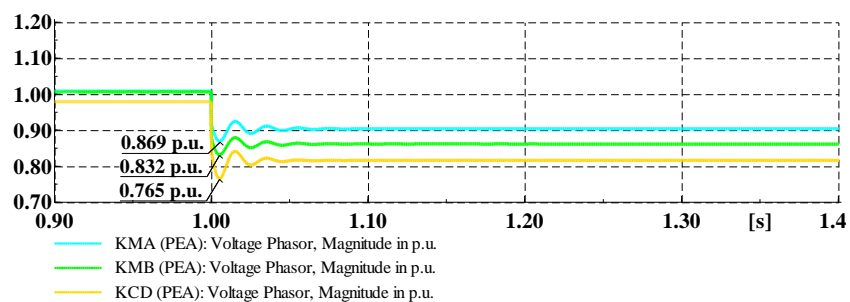
(ก)



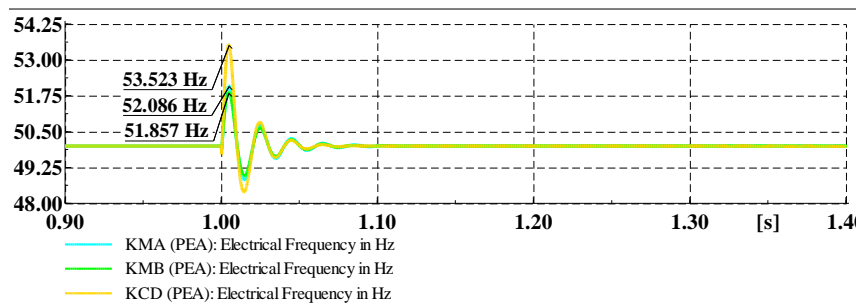
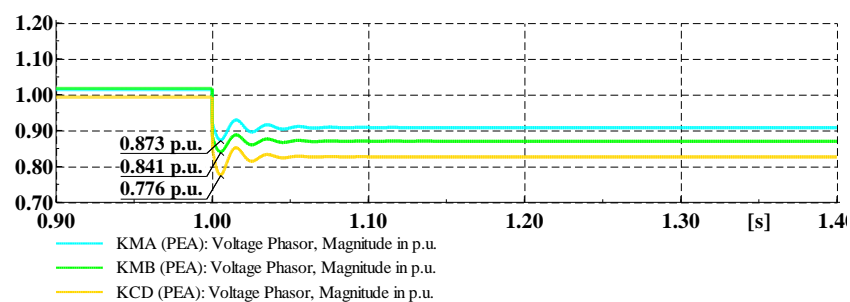
(ข)

ภาพประกอบ 5-16 ผลกระทบขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสสถานีที่ 2

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด



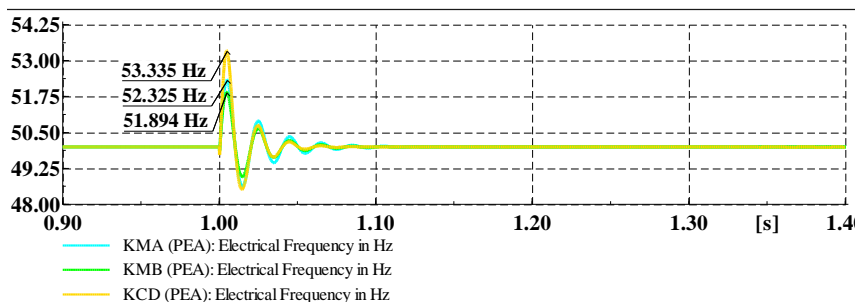
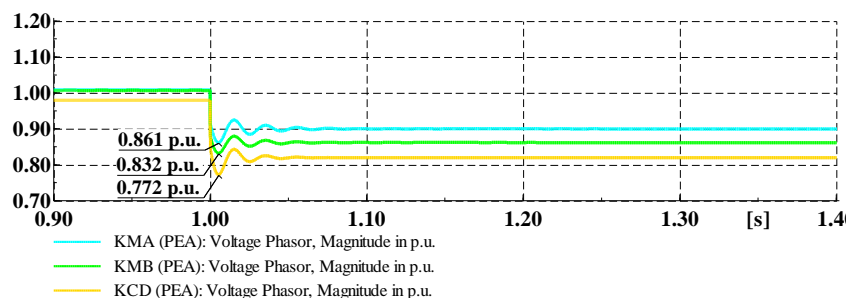
(ก)



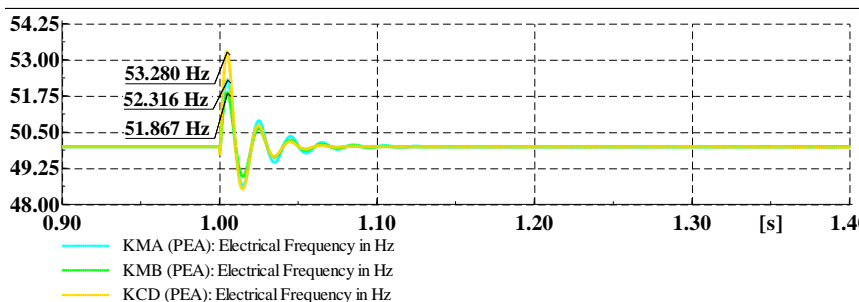
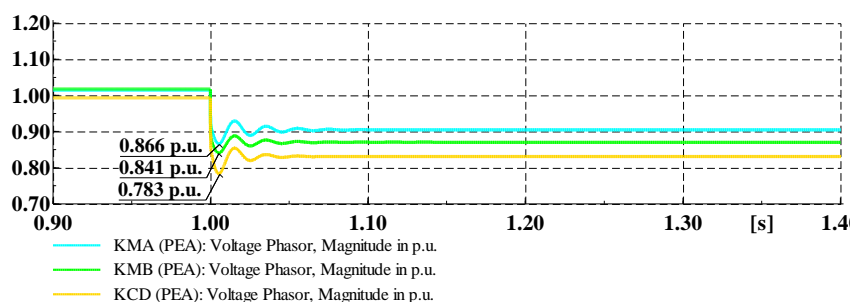
(ข)

ภาพประกอบ 5-17 ผลกระทบขณะเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสกรณที่ 3

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5-18 ผลกระทบขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสสถานีที่ 4

(ก) สภาวะโหลดสูงสุด, (ข) สภาวะโหลดต่ำสุด

ผลการจำลองผลกระทบการเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัส ณ ตำแหน่งบัสรวมแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อ โดยระดับแรงดันของตำแหน่งบัสรวมจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าของกังหันลมจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้น้อยลง ผลที่ตามมาคือคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดการไหลของ

กำลังไฟฟ้าไปยัง DC-link เพื่อรักษาระดับแรงดันของ DC-link ให้คงที่ ซึ่งเป็นการลดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้สามารถรักษาความสมดุลของกำลังไฟฟ้าภายในกังหันลม เพราะฉะนั้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบภายในกังหันลมไม่ได้รับผลกระทบจากการเกิดความผิดปกติ กังหันลมจึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันของจุดเชื่อมต่อกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้อย่างอิสระ แต่หากระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อไม่สามารถกลับเข้าสู่ค่าที่กำหนดได้ สามารถนำค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงหลังการความผิดปกติมาพิจารณาระยะเวลาการตัดท่วงกังหันลมออกจากระบบไฟฟ้า ผลการจำลองผลกระทบการลัดวงจร 3 เฟสทั้งสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดแสดงดังตาราง 5-6 และตาราง 5-7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแกว่งของความถี่จะมีค่าเกินขอบเขตข้อกำหนดการไฟฟ้าแต่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ก่อนเวลา 0.1 วินาที ดังนั้นผลกระทบการเปลี่ยนแปลงความถี่จึงไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า แต่หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะพบว่าแรงดันมีขนาดลดลงเกือบ 50% ของแรงดันปกติ ซึ่งจำเป็นต้องปลดท่วงกังหันลมออกจากระบบไฟฟ้าตามระยะเวลาการปลดท่วงกังหันลมดังตาราง 5-8 และตาราง 5-9 เพื่อรักษาเสถียรภาพของการทำงานให้เป็นไปได้เป็นอย่างดี โดยความรุนแรงที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยอย่างเช่น หากเชื่อมต่อท่วงกังหันลมที่มีปริมาณกำลังผลิตสูงและปริมาณความต้องการพลังงานของระบบไฟฟ้ามีค่าสูง ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะรุนแรงกว่า เนื่องจากระดับกระแสลัดวงจรมีค่าสูงกว่า แต่ถ้าจุดที่เกิดความผิดปกติไกลกว่าจะให้ผลกระทบที่รุนแรงน้อยกว่า สาเหตุเนื่องจากระดับกระแสลัดวงจรจะน้อยลงเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้นดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.4 ดังนั้นจุดวิกฤติที่เกิดขึ้นคือ จุดเชื่อมต่อที่เชื่อมท่วงกังหันลมที่มีกำลังผลิตสูง อยู่ใกล้กับจุดเกิดความผิดปกติและขณะนั้นปริมาณความต้องการโหลดของระบบไฟฟ้ามีค่าสูง

ตาราง 5-6 ผลกระทบสูงสุดขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.879	51.808	0.818	52.275	0.765	53.547
2	0.879	51.808	0.808	52.556	0.772	53.334
3	0.869	52.096	0.832	51.894	0.765	53.547
4	0.861	52.325	0.832	51.894	0.772	53.334

ตาราง 5-7 ผลกระทบสูงสุดขณะเกิดลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.884	51.796	0.826	52.244	0.776	53.523
2	0.884	51.796	0.816	52.517	0.783	53.280
3	0.873	52.806	0.841	51.857	0.776	53.523
4	0.866	52.316	0.841	51.857	0.783	53.280

ตาราง 5-8 เวลาการปลดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	เวลา (s)	แรงดัน (p.u.)	เวลา (s)	แรงดัน (p.u.)	เวลา (s)
1	0.909	2.0	0.854	2.0	0.816	2.0
2	0.909	2.0	0.848	2.0	0.820	2.0
3	0.904	2.0	0.862	2.0	0.816	2.0
4	0.900	2.0	0.862	2.0	0.820	2.0

ตาราง 5-9 เวลาการปลดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสในสภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	เวลา (s)	แรงดัน (p.u.)	เวลา (s)	แรงดัน (p.u.)	เวลา (s)
1	0.914	2.0	0.861	2.0	0.827	2.0
2	0.914	2.0	0.856	2.0	0.831	2.0
3	0.908	2.0	0.870	2.0	0.827	2.0
4	0.905	2.0	0.870	2.0	0.831	2.0

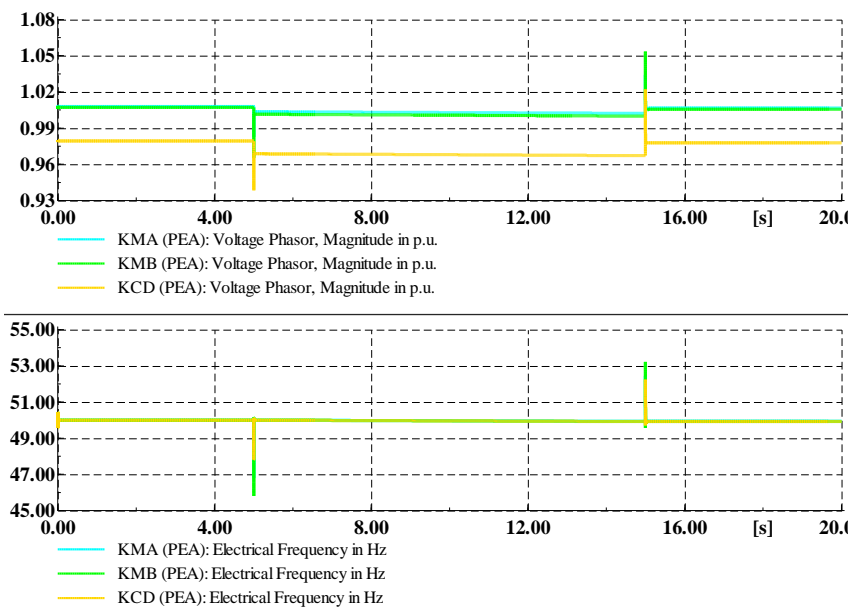


จากตาราง 5-8 และตาราง 5-9 จะเห็นได้ว่าแรงดันของจุดเชื่อมต่อที่เพิ่มขึ้นหลังเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัส จะอยู่ในระดับ 50%-90% เป็นหลัก ยกเว้นบัส KMA ในกรณีที่ 1 และ 2 แรงดันจะกลับมาอยู่ในช่วง 90%-110% ซึ่งในความเป็นจริงแล้วแรงดันระดับนี้ไม่จำเป็นต้องปลดทุ้งกัณฑ์ลมนอกจากระบบไฟฟ้า แต่ในการจำลองครั้งนี้เป็นการจำลอง ณ ตำแหน่งบัสรวมของทุ้งกัณฑ์ลมน เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องปลดความผิดปกติครั้งนี้ออกเพื่อให้ระบบไฟฟ้ายังคงจ่ายโหลดได้อย่างต่อเนื่อง โดยระยะเวลาที่สามารถตั้งเพื่อใช้ทุ้งกัณฑ์ลมนคือ 2.0 วินาทีในทุกๆ รูปแบบการเชื่อมต่อ ซึ่งสามารถนำเวลานี้ไปใช้ตั้งเวลาปลดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบไฟฟ้า เพราะฉะนั้นหากเกิดการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสหรือการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ณ ตำแหน่งอื่นๆ รอบจุดเชื่อมต่อ ทุ้งกัณฑ์ลมนที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าจะสามารถช่วยลดความรุนแรงที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้า เนื่องจากกัณฑ์ลมนดังกล่าวมีความสามารถทนการเกิดความผิดปกติ ส่งผลให้กัณฑ์ลมนสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อได้อย่างอิสระ และลดโอกาสการปลดทุ้งกัณฑ์ลมนออกจากระบบไฟฟ้า ทำให้ระบบไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

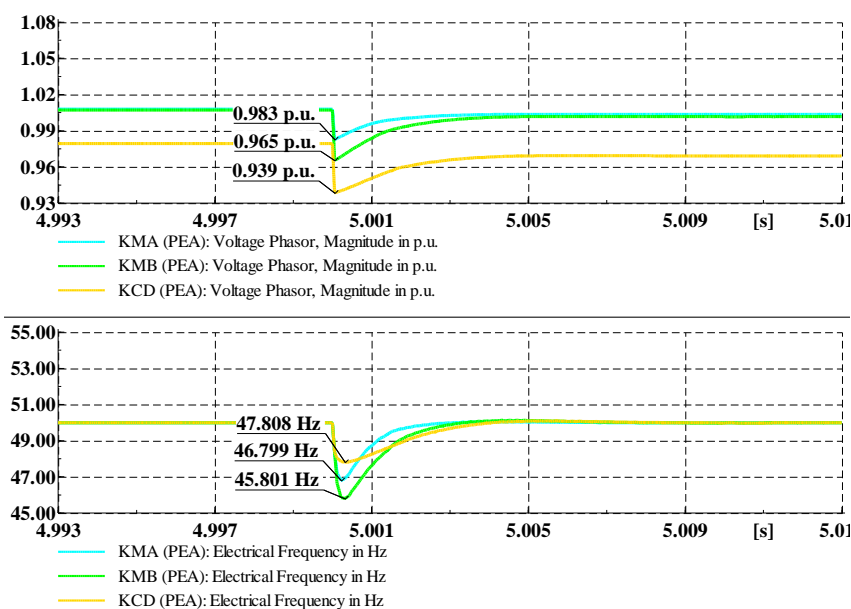
#### 5.3.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (Wind Speed Variation)

การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตลอดเวลา และเป็นสาเหตุให้การผลิตพลังงานของกัณฑ์ลมนมีความไม่แน่นอน ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าแบบพลวัต การจำลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจึงเป็นการสมมุติเหตุการณ์หากความเร็วลมมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งส่งผลให้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของกัณฑ์ลมนมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อจึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามความเร็วลม หากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกินข้อกำหนดการเชื่อมต่อก็มีความจำเป็นต้องปลดทุ้งกัณฑ์ลมนออกจากระบบไฟฟ้าเช่นเดียวกับการเกิดความผิดปกติอื่นๆ สำหรับเงื่อนไขในการจำลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ความเร็วลมของกัณฑ์ลมนแต่เนื่องจากแบบจำลองกัณฑ์ลมนในโปรแกรมนี้ไม่สามารถเปลี่ยนพารามิเตอร์ของความเร็วได้โดยตรง แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจะส่งผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ดังนั้นจึงสามารถจำลองผลกระทบด้วยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟแทนการเปลี่ยนพารามิเตอร์ความเร็วลม ซึ่งได้กำหนดให้ปรับลดกำลังผลิตของกัณฑ์ลมนจากค่าพิกัดเป็นศูนย์เมกกะวัตต์เพื่อแทนสถานการณ์ความเร็วลมลดลงทันที ณ วินาทีที่ 5 จนถึงวินาทีที่ 15 จากนั้นจะปรับเพิ่มกำลังผลิตกัณฑ์ลมนเต็มพิกัดเพื่อจำลองสถานการณ์ความเร็วเพิ่มขึ้นทันทีจนถึงวินาทีที่ 20 ดังภาพประกอบ 5-19 ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าทั้งแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อจะเกิดการกวัดแกว่งตามการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ โดยมีความรุนแรง

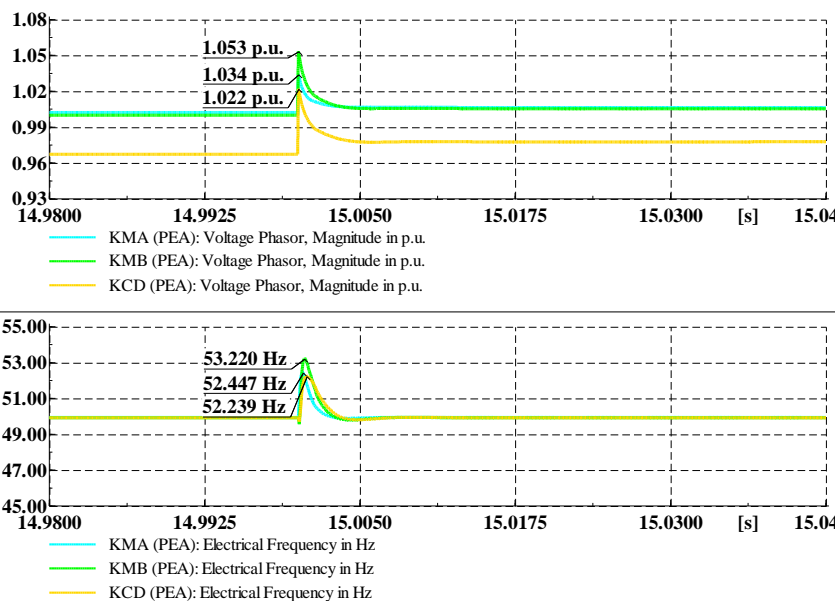
แตกต่างกันตามปัจจัยของการเชื่อมต่อ ภาพประกอบ 5-20 ถึงภาพประกอบ 5-27 แสดงผลกระทบบ  
การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะ โหลดสูงสุดและ โหลดต่ำสุดทั้ง 4 กรณี



ภาพประกอบ 5-19 ผลกระทบของแรงดันและความถี่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม



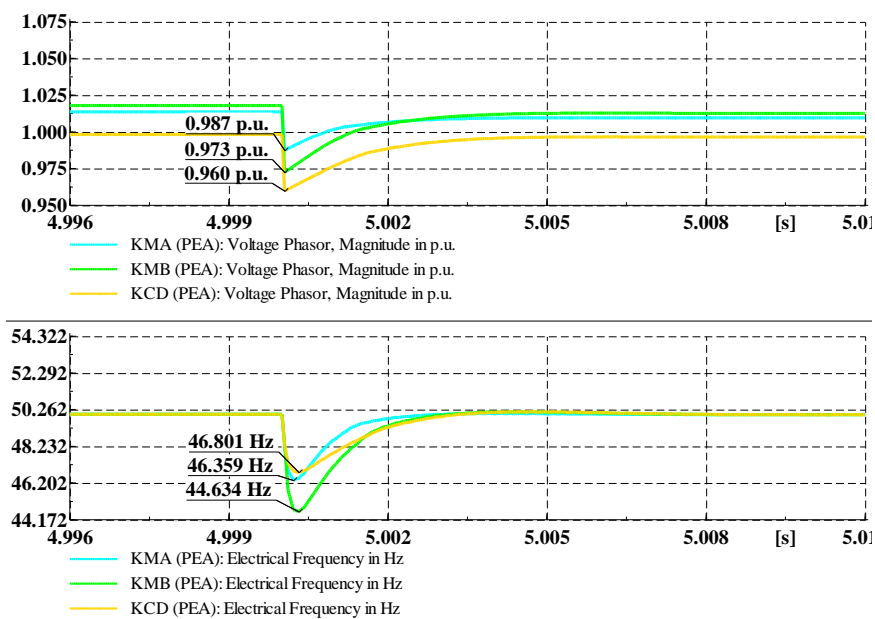
(ก)



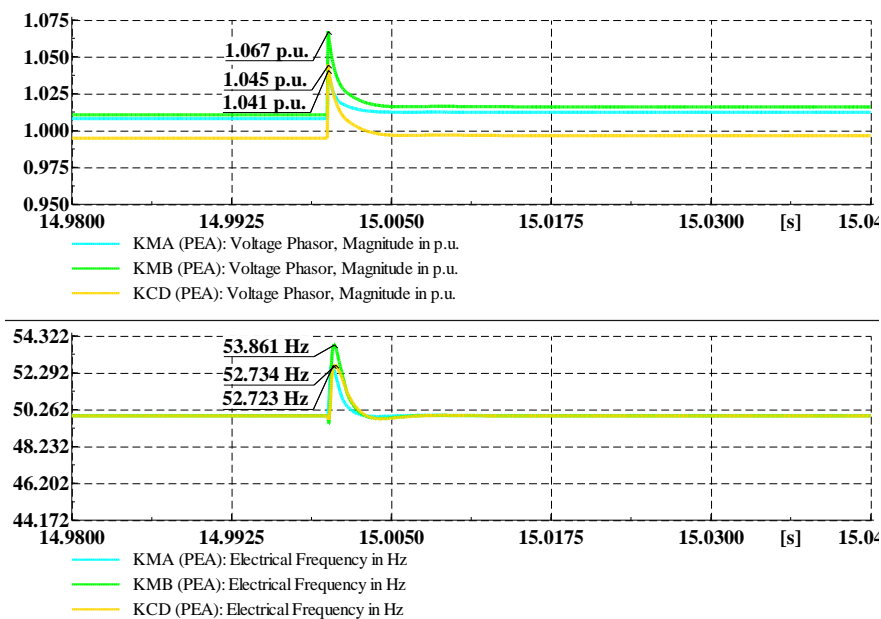
(จ)

ภาพประกอบ 5-20 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 1

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น



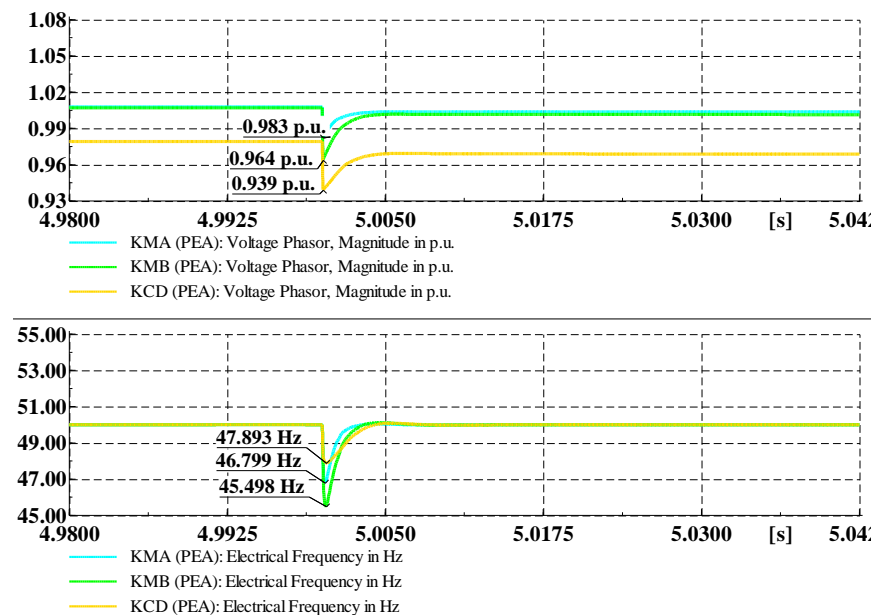
(ข)



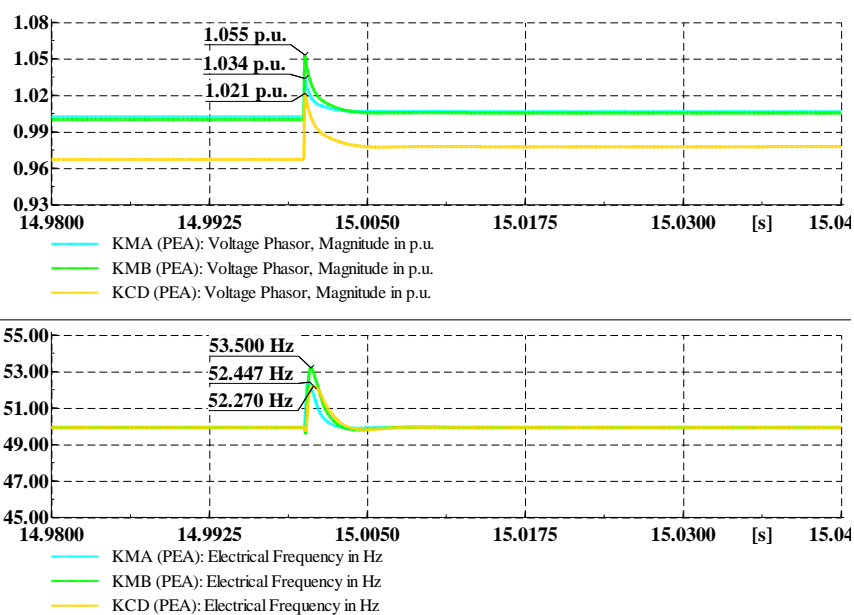
(จ)

ภาพประกอบ 5-21 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 1

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น



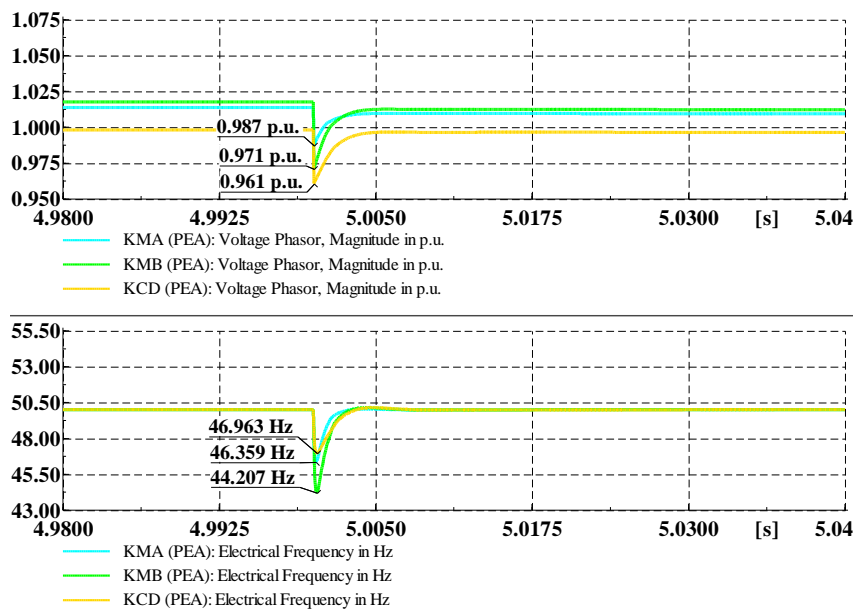
(ก)



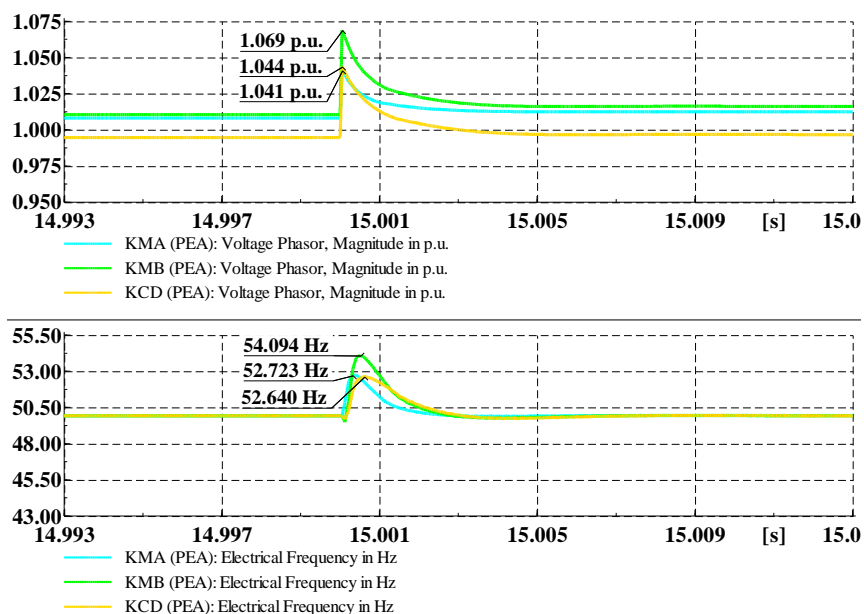
(จ)

ภาพประกอบ 5-22 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 2

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น



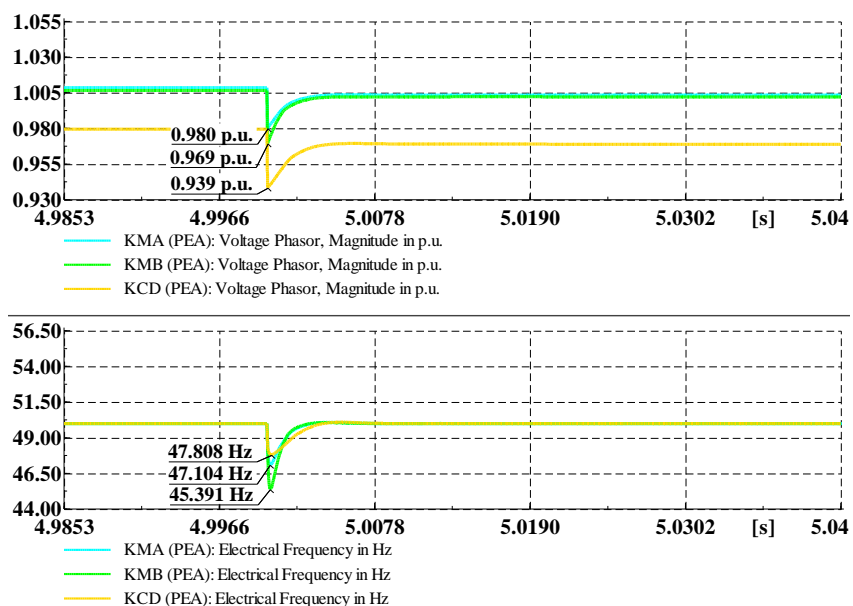
(ค)



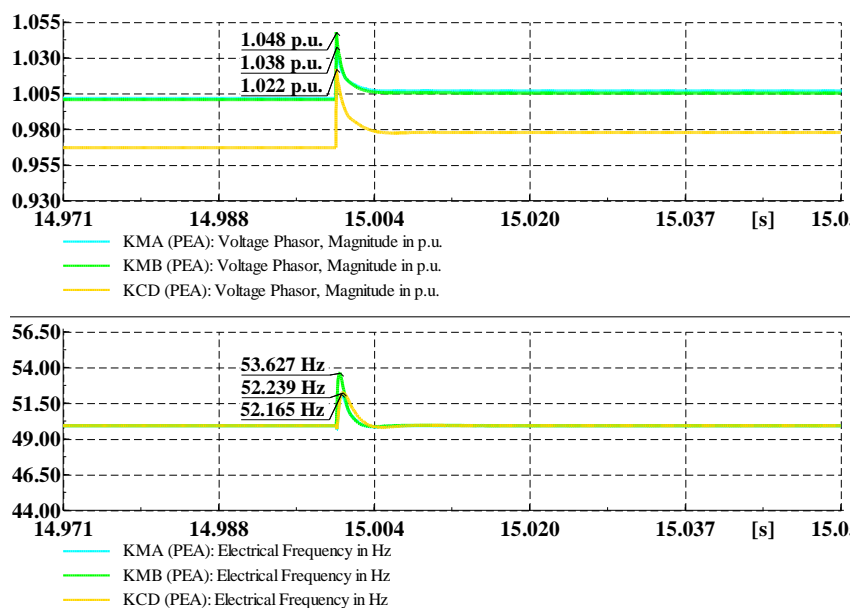
(ข)

ภาพประกอบ 5-23 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 2

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น



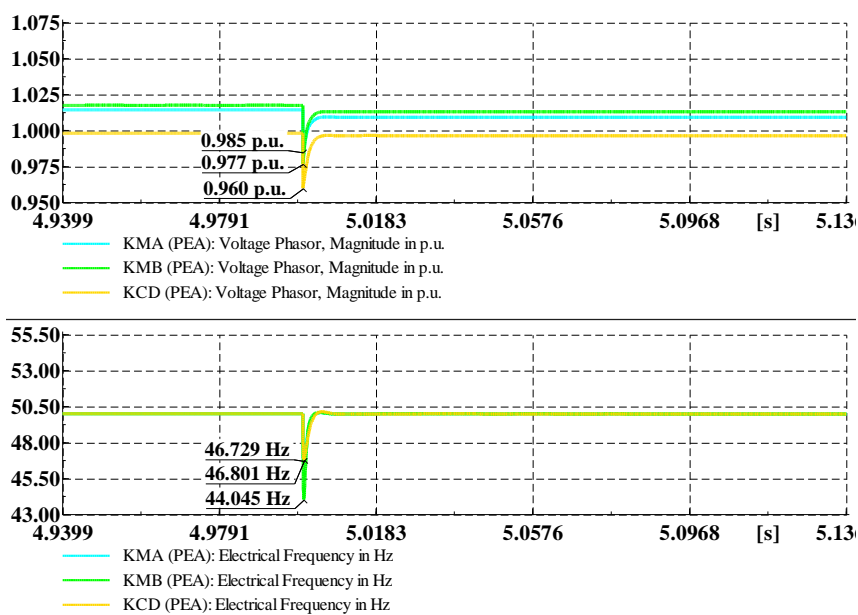
(ก)



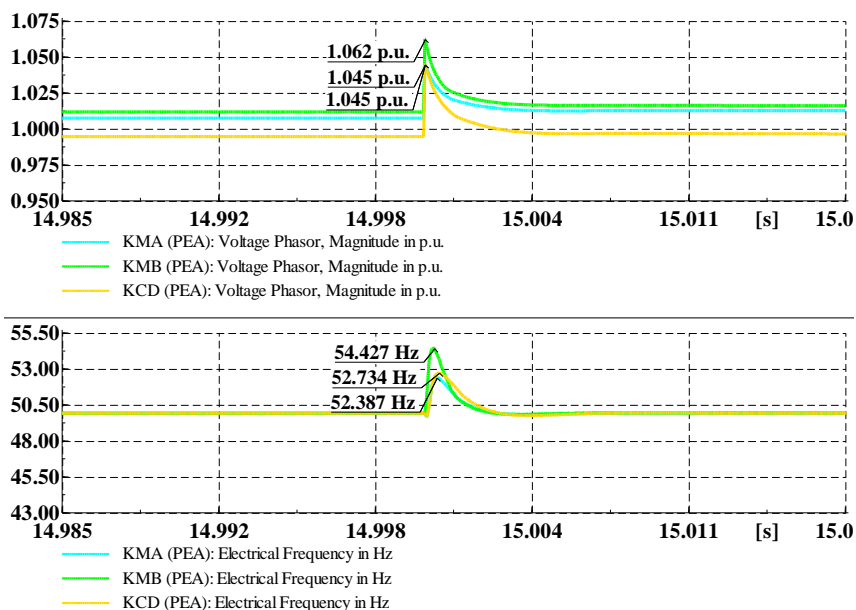
(ข)

ภาพประกอบ 5-24 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 3

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น



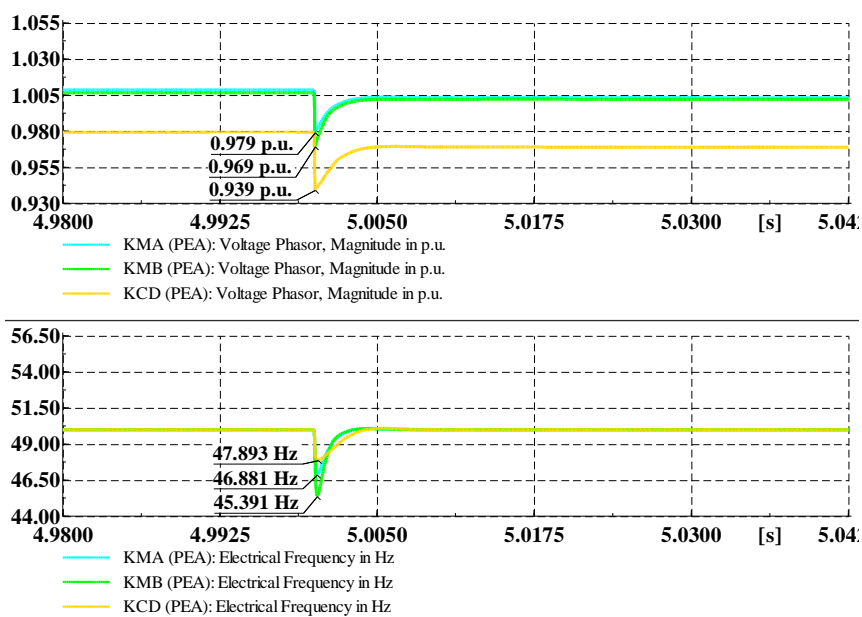
(ก)



(ข)

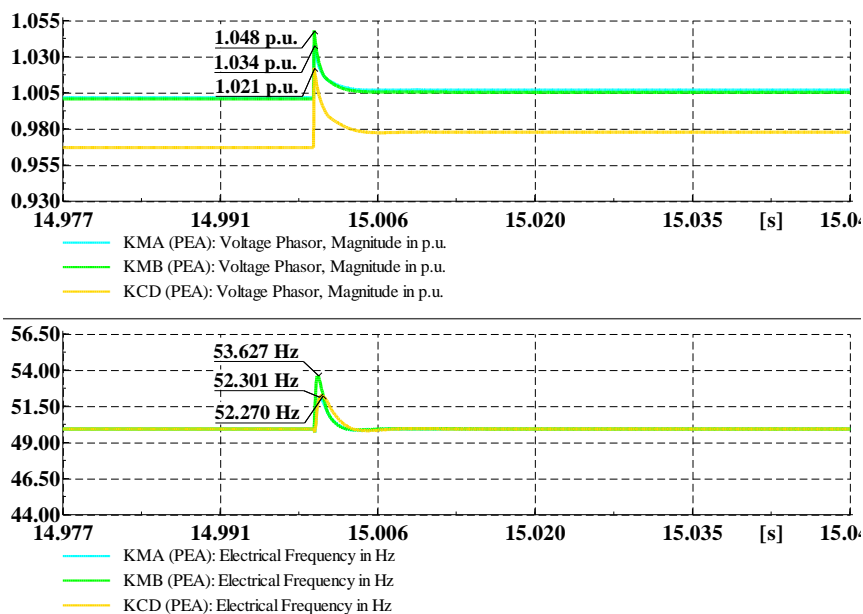
ภาพประกอบ 5-25 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 3

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น



(ก)

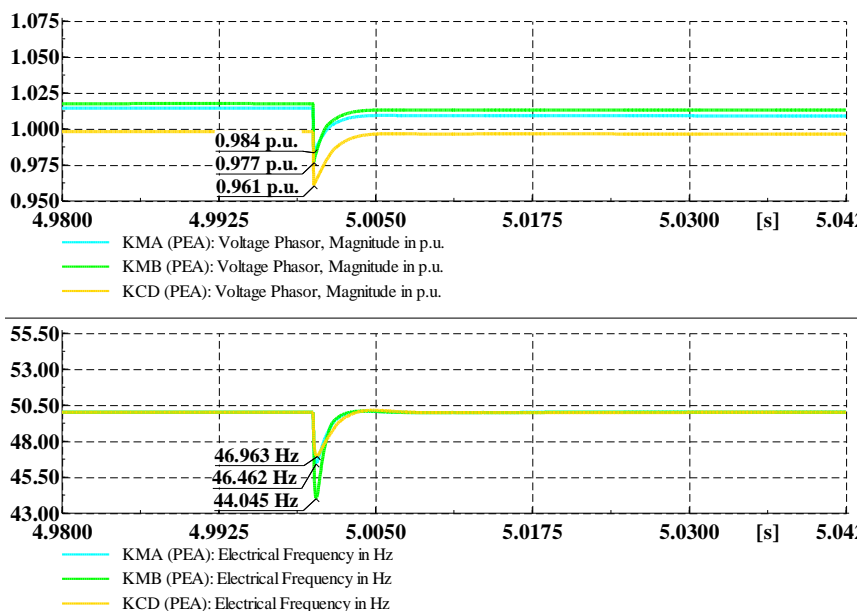




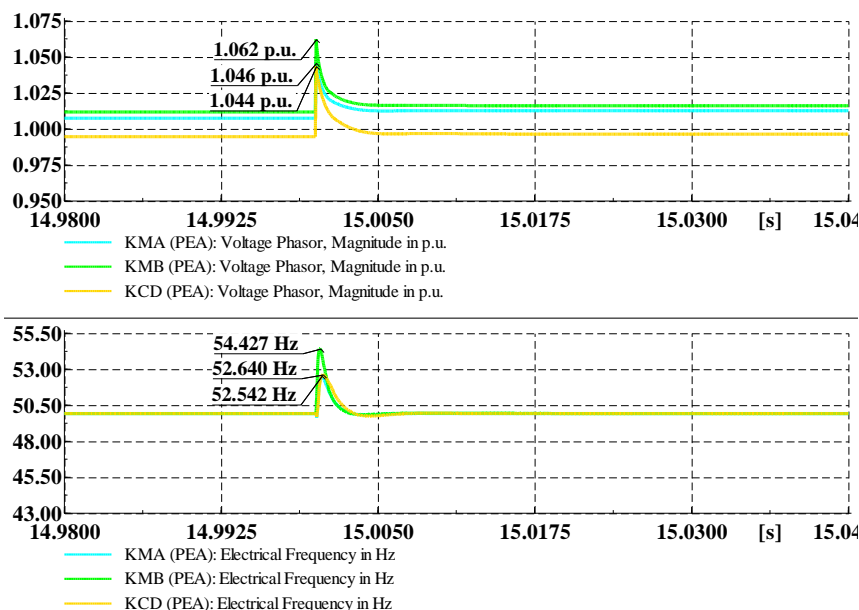
(ข)

ภาพประกอบ 5-26 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 4

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5-27 ผลกระทบขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 4

(ก) เมื่อความเร็วลมลดลง, (ข) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น

การจำลองผลกระทบการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในสถานการณ์ที่ลมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงทันทีทันใดหรือลมพัดแรงเป็นช่วงๆ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกที่กำหนดให้ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างทันทีทันใด ผลการจำลองทั้ง 4 กรณี แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและความถี่จะลดลงตามความเร็วลม เนื่องจากเมื่อความเร็วลมลดลงกำลังไฟฟ้าแอกทิฟจะลดลงตาม และเนื่องจากการแกว่งของความถี่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าแอกทิฟ ดังนั้นเมื่อกำลังผลิตของกังหันลมมีค่าลดลง ความถี่ของจุดเชื่อมต่อจึงลดลง ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน เมื่อกำลังแอกทิฟของกังหันลมลดลงอย่างทันทีทันใดตามความเร็วลมที่ลดลง กังหันลมจะดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟจากระบบไฟฟ้าเพื่อรักษา ระดับแรงดันให้กลับเข้าสู่ค่าที่กำหนด แรงดันของจุดเชื่อมต่อจึงมีค่าลดลง หลังจากกังหันลมสามารถ รักษา ระดับแรงดันให้กลับเข้าสู่ค่าปกติ กังหันลมจึงลดปริมาณการดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟจากระบบไฟฟ้า แรงดันของจุดเชื่อมต่อจึงกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ในส่วนของสถานการณ์ความเร็วลมเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าแอกทิฟของกังหันลมเพิ่มขึ้นจนถึงค่าพิค (กำลังไฟฟ้าแอกทิฟที่กังหันลมจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าพิคเล็กน้อย เนื่องจากค่าความเฉื่อยทางกลที่เกิดขึ้นในกังหันลม) กังหันลมจะรักษา ระดับแรงดันให้มีค่าคงที่ด้วยการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้า แรงดันของจุดเชื่อมต่อจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หลังจากแรงดันของกังหันลมกลับเข้าสู่

ค่าปกติ กังหันลมจึงลดปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟลง แรงดันของจุดเชื่อมต่อจึงกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ในส่วนการแกว่งความถี่จะมีค่าแปรตามการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ คือมีค่าเพิ่มขึ้นจากควมถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้า

สำหรับการพิจารณาผลที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีทั้งสภาวะโหลดสูงสุดและสภาวะโหลดต่ำสุดแสดงดังตาราง 5-10 ถึงตาราง 5-13 ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันยังคงอยู่ในระดับ 90%-110% เมื่อเทียบกับค่าปกติของแต่ละจุดเชื่อมต่อ ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความถี่จะแกว่งเกินช่วง 48-51 Hz แต่ก็สามารถกลับเข้าสู่ขอบเขตที่กำหนดได้อย่างรวดเร็วทั้งเหตุการณ์ความเร็วลมเพิ่มขึ้นและลดลง สำหรับผลกระทบจากปัจจัยทางกายภาพของการเชื่อมต่อจะเกิดจากปริมาณกำลังผลิตของกังหันลม โดยกังหันลมที่มีกำลังผลิตสูง เมื่อลมมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วไม่ว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟของกังหันลมจะสูงกว่ากรณีที่มีกำลังผลิตต่ำ ดังนั้นแรงดันและความถี่จึงมีการแกว่งสูงกว่าเช่นกัน ในส่วนของระยะของสายส่งพบว่า สายส่งที่มีความยาวมากกว่า ผลกระทบทั้งแรงดันและความถี่จะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากการดึงหรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของกังหันลมจะเกิดการสูญเสียในสายส่งมากกว่า การชดเชยเพื่อให้แรงดันกลับเข้าสู่สภาวะปกติจึงทำได้ยากกว่า นอกจากนี้ปริมาณโหลดของระบบไฟฟ้าก็ส่งผลกระทบด้วยเช่นกัน โดยปริมาณความต้องการโหลดที่มากจะส่งผลให้การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้น้อยกว่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงมีความรุนแรง เพราะฉะนั้นจุดที่วิกฤติที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจะเกิดขึ้นกับกังหันลมที่มีกำลังผลิตสูง มีระยะสายส่งจากจุดเชื่อมต่อไกล และอยู่ในสภาวะโหลดของระบบไฟฟ้ามีค่าสูง และหากพิจารณาผลของรูปแบบการเชื่อมต่อทั้ง 4 กรณีพบว่า การเชื่อมต่อทั้งหมดสามารถรองรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม โดยไม่ส่งผลกระทบต่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมดังกล่าวจึงไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ตาราง 5-10 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลดลงในสภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.983	46.799	0.965	45.801	0.939	47.808
2	0.983	46.799	0.964	46.498	0.939	47.893
3	0.980	47.104	0.969	45.391	0.939	47.808
4	0.979	46.881	0.969	45.391	0.939	47.893

ตาราง 5-11 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วลดลงในสภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	0.987	46.359	0.973	44.634	0.960	46.801
2	0.987	46.359	0.971	44.207	0.961	46.963
3	0.985	44.045	0.977	44.045	0.960	46.801
4	0.984	44.462	0.977	44.045	0.961	46.963

ตาราง 5-12 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วเพิ่มขึ้นในสภาวะโหลดสูงสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	1.034	52.447	1.053	53.220	1.022	52.239
2	1.034	52.447	1.055	53.500	1.021	52.271
3	1.038	52.165	1.048	53.627	1.022	52.239
4	1.039	52.301	1.048	53.627	1.021	52.271

ตาราง 5-13 ผลกระทบสูงสุดขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วเพิ่มขึ้นในสภาวะโหลดต่ำสุด

กรณีศึกษา	KMA		KMB		KCD	
	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (p.u.)	ความถี่ (Hz)
1	1.041	52.723	1.067	53.861	1.045	52.734
2	1.041	52.723	1.069	54.094	1.044	52.640
3	1.045	54.427	1.062	54.427	1.045	52.734
4	1.046	52.542	0.977	54.427	1.044	52.640

#### 5.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต

ผลการจำลองผลกระทบระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งขนาด 432 MW เป็นการตรวจสอบผลกระทบหากเกิดความผิดปกติจากกังหันลมหลุดการเชื่อมต่อ สายส่งเคเบิลใต้น้ำหลุดการเชื่อมต่อ การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมภายใต้ปริมาณโหลดของระบบไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด โดยกังหันลมอยู่ในสภาวะจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเข้าสู่ระบบไฟฟ้า เพื่อหาจุดวิกฤติที่จะเกิดขึ้นเมื่อ

เชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์ล้มเข้ากับระบบ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าหากเกิดความผิดปกติ ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในระบบไฟฟ้า และส่งผลกระทบต่อจนจำเป็นต้องปลดทุ้งกัณฑ์ล้มออกจากระบบ ไม่ว่าจะปลด ณ ตำแหน่งบัสรวมของทุ้งกัณฑ์ล้ม โดยตรงหรือปลดสายส่งเคเบิลได้น้ำที่เชื่อมระหว่างทุ้งกัณฑ์ล้มและจุดเชื่อมต่อ แรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อจะแกว่งเกินข้อกำหนดของการไฟฟ้าแต่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็วและใช้เวลาต่ำกว่า 0.1 วินาที โดยตำแหน่งที่เกิดใกล้กับทุ้งกัณฑ์ล้มจะเกิดการแกว่งของความถี่สูงกว่าเล็กน้อย แต่ระดับแรงดันจะไม่มี ความแตกต่าง ในส่วนของการลัดวงจร 3 เฟสที่บัสซึ่งสามารถใช้ตั้งค่าการปลดทุ้งกัณฑ์ล้มออกจากระบบไฟฟ้าเมื่อความผิดปกติ ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าความสามารถของกัณฑ์ล้มชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบที่มีความสามารถทนการผิดปกติและช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้า ทำให้ไม่จำเป็นต้องตั้งเวลาการปลดทุ้งกัณฑ์ล้มที่เร็วมากเกินไป โดยผลการวิเคราะห์ได้ระบุเวลาที่เหมาะสมในการปลดทุ้งกัณฑ์ล้มคือ 2.0 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่นานสุดตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพราะฉะนั้นการเกิดการลัดวงจร 3 เฟส ณ ตำแหน่งอื่นๆ รอบจุดเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์ล้มจะสามารถช่วยลดความรุนแรงที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้า เนื่องจากความสามารถทนการเกิดความผิดปกติ ซึ่งทำให้กัณฑ์ล้มสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อได้อย่างอิสระ โอกาสการปลดทุ้งกัณฑ์ล้มออกจากระบบไฟฟ้าจึงลดลง และส่วนสุดท้ายของการจำลองผลกระทบของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตคือ การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมซึ่งเป็นสถานการณ์ที่เกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากกัณฑ์ล้มต้องใช้พลังงานลมเพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ผลการจำลองทั้งการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใด ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ของจุดเชื่อมต่อ โดยระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้นและลดลงยังคงอยู่ในช่วง 90%-110% ซึ่งไม่จำเป็นต้องสั่งปลดทุ้งกัณฑ์ล้มออกจากระบบไฟฟ้า ในส่วนความถี่จุดของเชื่อมต่อจะแกว่งเกินช่วง 48-51 Hz แต่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติโดยใช้เวลาน้อยกว่า 0.1 วินาที เพราะฉะนั้นจากการตรวจสอบระดับแรงดันและความถี่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอย่างทันทีทันใดหรือลมกระโชกก็ไม่จำเป็นต้องปลดทุ้งกัณฑ์ล้มออกจากระบบไฟฟ้า เนื่องจากระบบไฟฟ้ายังคงรักษาเสถียรภาพและสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้อย่างปกติ และหากเปรียบเทียบผลกระทบของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตทั้ง 4 กรณีพบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงในระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งยังไม่เพียงพอที่จะระบุได้อย่างชัดเจนว่ารูปแบบการเชื่อมต่อใดมีความเหมาะสมในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มเข้ากับระบบมากกว่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เชิงเทคนิคเพิ่มเติม โดยในบทถัดไปจะแสดงผลการจำลองผลกระทบคุณภาพกำลังไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ผลกระทบฮาร์มอนิก เพื่อใช้คัดเลือกรูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมของทุ้งกัณฑ์ล้มต่อไป

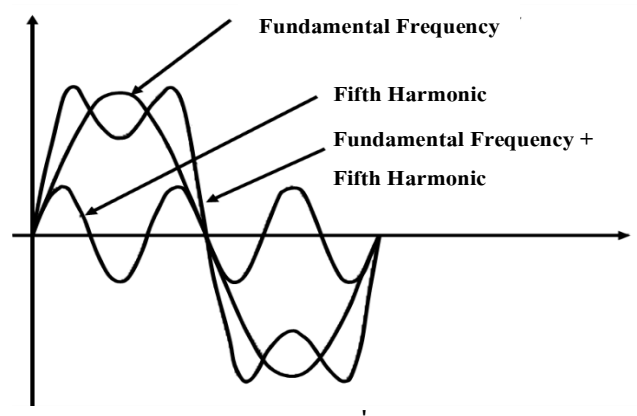
## บทที่ 6

### การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า คือคุณลักษณะของกระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้าที่มีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด คุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ดีจะไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดการทำงานผิดพลาดหรือความเสียหาย ดังนั้นผู้ดูแลระบบไฟฟ้าจึงให้ความสำคัญกับการควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้า [19] ผลกระทบที่สำคัญต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าคือ ฮาร์มอนิก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสฮาร์มอนิกและค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า การเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยคอนเวอร์เตอร์จะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้การจัดวางสายเคเบิลได้นำและการเปลี่ยนแปลงปริมาณลมจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อฮาร์มอนิก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าเพื่อประเมินผลกระทบของฮาร์มอนิกเมื่อมีการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลจริงที่คอนเวอร์เตอร์จ่ายกระแสฮาร์มอนิก จึงไม่สามารถประเมินความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดการไฟฟ้าได้โดยตรง อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์มอนิกยังขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของระบบ เพราะฉะนั้นในบทนี้จึงได้ทำการศึกษาวิเคราะห์โอกาสการขยายกระแสฮาร์มอนิกจากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เมื่อมีการเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลได้นำภายในกังหันลมและบัสรวม โดยให้กังหันลมทำงานที่ความเร็วพิกัด เพื่อประเมินความรุนแรงของฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ถ้าความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ของกังหันลมตรงกับความถี่ที่มีอิมพีแดนซ์สูง ผลกระทบต่อแรงดันฮาร์มอนิกหรือความรุนแรงของฮาร์มอนิกจะมีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์โอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจึงสามารถใช่วางแผนออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกหากมีความจำเป็นต้องติดตั้งใช้งาน

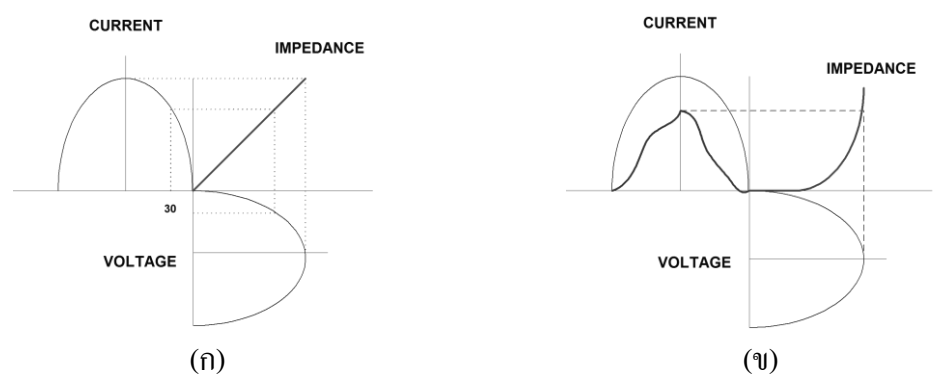
#### 6.1 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก คือส่วนประกอบสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกับสัญญาณความถี่หลักมูลทั้งขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase Angle) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดและรูปสัญญาณเปลี่ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ดังภาพประกอบ 6-1 คลื่นสัญญาณไซน์ความถี่หลักมูลรวมกับสัญญาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ส่งผลให้รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเกิดความผิดเพี้ยน



ภาพประกอบ 6-1 การรวมของสัญญาณความถี่หลักมูลและสัญญาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกโดยส่วนใหญ่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) เช่น คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier) และชุดขับเคลื่อนปรับความเร็ว (Adjustable Speed Drive) เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้จะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟและระบบไฟฟ้าข้างเคียง ส่งผลให้แรงดันในระบบไฟฟ้าเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ค่าความเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ ภาพประกอบ 6-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการทำงานระหว่างอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด เนื่องจากผลของค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดและรูปคลื่นสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนไป นอกจากนี้ยังทำให้อุปกรณ์ในระบบมีอายุการใช้งานน้อยลงหรือเกิดการชำรุดเสียหาย เนื่องจากมีค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของแรงดันหรือกระแสสูงขึ้นจากการเกิดฮาร์มอนิกหรือมีการขยายแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก



ภาพประกอบ 6-2 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และอิมพีแดนซ์  
 (ก) อุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น, (ข) อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์ผลกระทบฮาร์มอนิกแสดงด้วยค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก จากการอ้างอิงโดยมาตรฐาน IEC (International Electrotechnical Commission) และมาตรฐาน IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) [46] ใช้ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion,  $THD$ ) เป็นค่าบอกระดับความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก โดยเทียบจากอัตราส่วนรากที่สองของผลบวกกำลังสองของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่าส่วนประกอบของความถี่หลักมูลเป็นร้อยละ แบ่งเป็นค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Current Distortion,  $THD_i$ ) และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion,  $THD_v$ ) ดังสมการ (6-1) และสมการ (6-2) ตามลำดับ

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \times 100\% \quad (6-1)$$

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,rms}^2}}{V_{1,rms}} \times 100\% \quad (6-2)$$

โดยที่

$I_{n,rms}$  คือ ค่า rms กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$

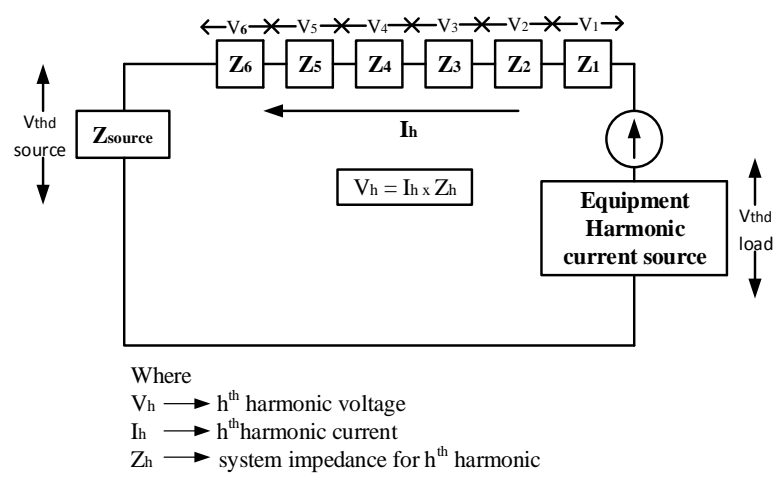
$V_{n,rms}$  คือ ค่า rms แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$

$I_{1,rms}$  คือ ค่า rms กระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่หลักมูล

$V_{1,rms}$  คือ ค่า rms แรงดันฮาร์มอนิกที่ความถี่หลักมูล

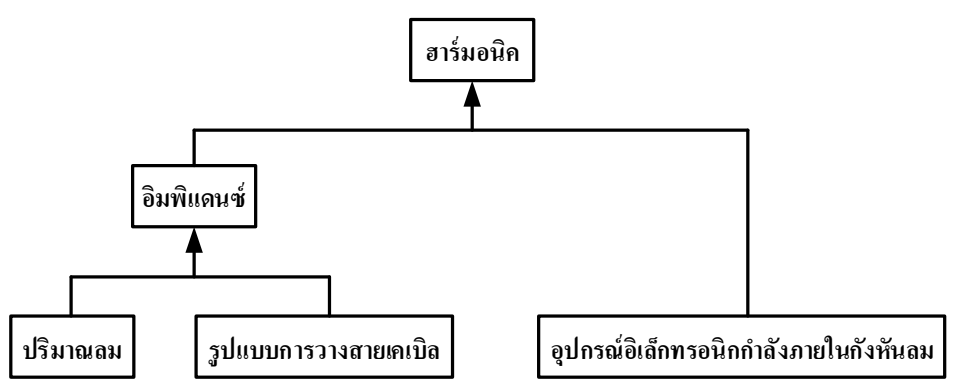
ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกจะบอกชนิดของอุปกรณ์ฮาร์มอนิกแต่ละประเภท ส่วนค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกจะบอกความรุนแรงจากผลกระทบของฮาร์มอนิกซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสฮาร์มอนิกและค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าดังภาพประกอบ 6-3 แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของผู้ใช้ไฟ เมื่อโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำงานจะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ( $I_h$ ) เข้าสู่ระบบไฟฟ้าและผ่านค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่างๆ ตามสมการ ( $V_h = Z_h \times I_h$ ) นั่นคือ ถ้าความถี่ที่มีกระแสฮาร์มอนิกสูงถูกจ่ายเข้ากับค่าอิมพีแดนซ์สูง จะทำให้ได้แรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงขึ้น





ภาพประกอบ 6-3 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกที่เกิดจากการเชื่อมต่อบรรยากาศไฟฟ้าด้วยท่งกั้นหุ้ม นอกจากจะขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของท่งกั้นหุ้มยังขึ้นอยู่กับปริมาณและการจัดวางรูปแบบสายเคเบิลภายในท่งกั้นหุ้ม [20] ดังภาพประกอบ 6-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบการวางสายเคเบิลที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของระบบ นั่นคืออิมพีแดนซ์และกำลังผลิตของท่งกั้นหุ้มจะแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณที่ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันฮาร์มอนิก ในส่วนการเปลี่ยนรูปแบบการวางสายเคเบิลจะส่งผลต่อความยาวของสายป้อน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าแปรตามความยาวของสายส่ง แรงดันฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความยาวของสายส่งเช่นกัน ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่งกั้นหุ้มที่อยู่ใกล้กับจุดเชื่อมต่อจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่ำ แต่ถ้าอยู่ไกลกับจุดเชื่อมต่อจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสูง เพราะฉะนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่งกั้นหุ้มที่อยู่ใกล้จุดเชื่อมต่อจะได้รับผลกระทบฮาร์มอนิกน้อยกว่ากรณีที่อยู่ไกลจากจุดเชื่อมต่อ



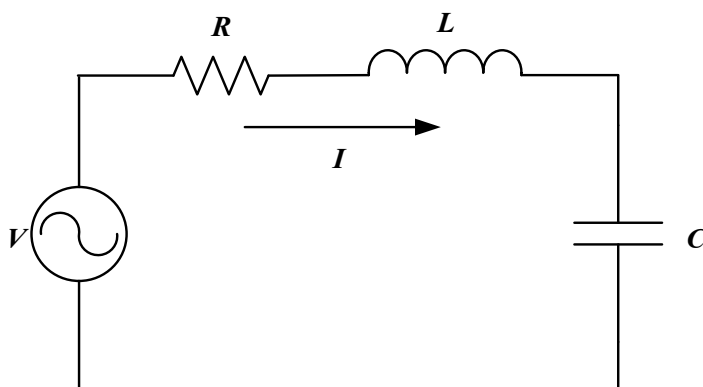
ภาพประกอบ 6-4 ปัจจัยการเกิดผลกระทบฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยท่งกั้นหุ้ม

นอกจากนี้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) โดยพิจารณาจากค่ารีแอกแตนซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้าดังสมการ (6-3) และสมการ (6-4)

$$X_L = \omega L \quad (6-3)$$

$$X_C = \frac{-1}{\omega C} \quad (6-4)$$

เมื่อ  $\omega = 2\pi f$  และ  $f$  คือความถี่ จะเห็นได้ว่าขนาดของรีแอกแตนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของระบบจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ดังกล่าว ซึ่งจะมีบางความถี่ที่จะเกิดเป็นความถี่เรโซแนนซ์ขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาจากภาพประกอบ 6-5 และภาพประกอบ 6-6



ภาพประกอบ 6-5 วงจรอนุกรม RLC [46]

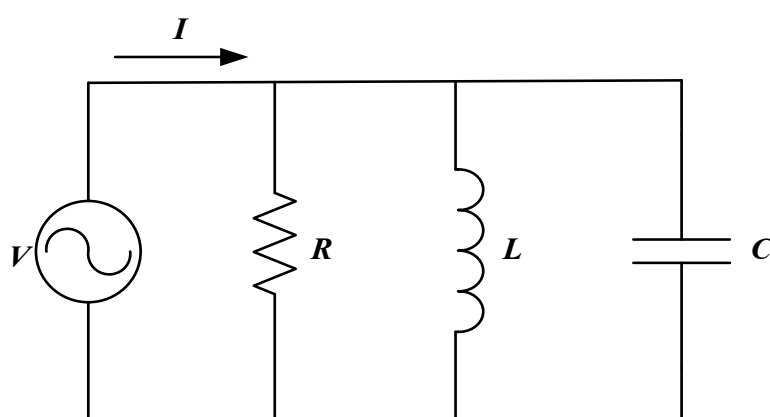
วงจร RLC อย่างง่ายต่อแบบอนุกรม ค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์แสดงดังสมการ (6-3) และสมการ (6-4) จะได้ค่ารีแอกแตนซ์รวมของวงจрдังสมการ (6-5)

$$X_T = X_L + X_C \quad (6-5)$$

ณ ความถี่ใดความถี่หนึ่งค่ารีแอกแตนซ์รวมของวงจรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ จะเรียกค่าความถี่นี้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ามีค่าลดลงเหลือเฉพาะส่วนของค่ารีซิสแตนซ์เท่านั้น ( $Z = R$ ) เพราะฉะนั้น จะได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ดังสมการ (6-6)

$$f_{resonance} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6-6)$$

สำหรับวงจร RLC แบบขนานแสดงดังภาพประกอบ 6-6 ณ ความถี่เรโซแนนซ์ ส่วนจินตภาพหรือค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ อิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 6-6 วงจรขนาน RLC [46]

## 6.2 การศึกษาผลกระทบฮาร์มอนิก

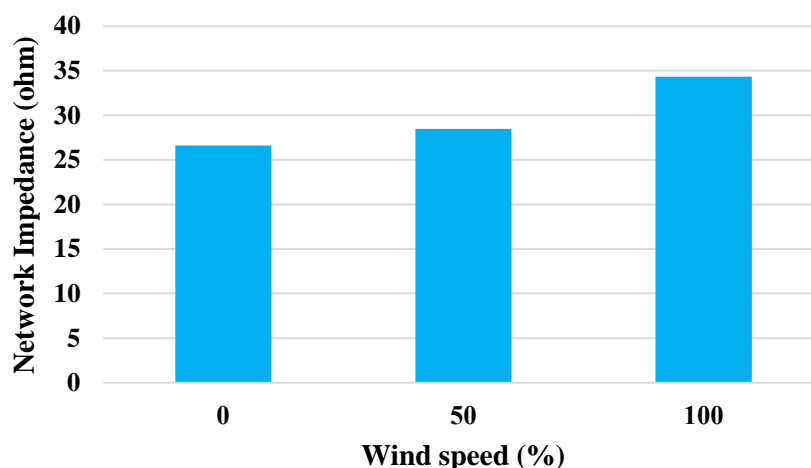
### 6.2.1 ข้อกำหนดผลกระทบฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะไม่มีข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่จ่ายออกมาจากคอนเวอร์เตอร์ของกังหันลม ทำให้ไม่สามารถศึกษาผลกระทบจากกระแสในแต่ละอันดับจริงได้ เพราะฉะนั้นจึงทำการศึกษาผลกระทบอิมพีแดนซ์ของจุดเชื่อมต่อทุ้งกังหันลม เพื่อประเมินโอกาสการขยายกระแสฮาร์มอนิก ที่จะส่งผลโดยตรงต่อการขยายแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งการประเมินดังกล่าวไม่ได้มีข้อระบุในข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แต่การวิเคราะห์การขยายกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้สามารถประเมิน โอกาสที่จะเกิดผลกระทบของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถวางแผนเพื่อป้องกันผลกระทบของฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นก่อนการติดตั้งทุ้งกังหันลม

### 6.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบฮาร์มอนิก

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีความไม่แน่นอน ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิกแบบพลวัต โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง นอกจากขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากกังหันลม (Harmonic Current Source) ยังขึ้นอยู่กับการจัดวางระบบสายเคเบิลใต้น้ำของกังหันลม (Wind Farm Layout) และการเปลี่ยนแปลง

ปริมาณลม (Wind Speed Change) [20] อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่สามารถรู้ค่าแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากกังหันลมจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์โอกาสขยายกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมและผลของระยะสายส่งภายในทุ่งกังหันลม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์จึงได้กำหนดให้กังหันลมแต่ละตัวทำงานที่ความเร็วพิกัด เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์จะเพิ่มสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ดังตัวอย่างภาพประกอบ 6-7 เป็นการปรับความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 0%, 50% และ 100% ของความเร็วลมพิกัดที่กังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.1

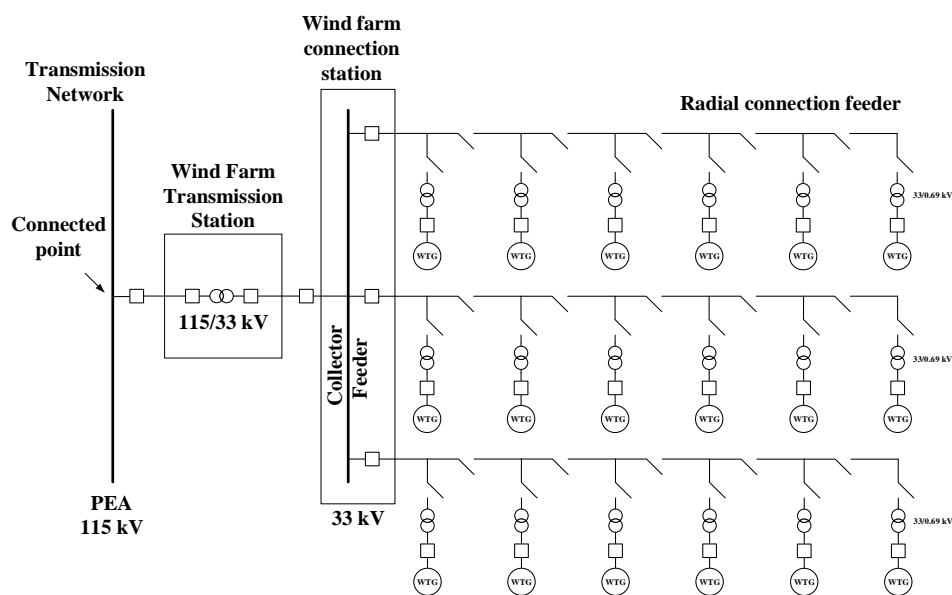


ภาพประกอบ 6-7 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมต่ออิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้า

สำหรับการจัดวางตำแหน่งของกังหันลมได้คำนึงถึงผลกระทบของอิทธิพลเวก (Wake Effect) เป็นสำคัญ ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนทางด้านหลังกังหันลมที่อาจจะเป็นด้านหน้าของกังหันลมตัวอื่นๆ [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการวางกังหันลมอย่างง่ายโดยกำหนดเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. มีพื้นที่ว่างอิสระในการวางกังหันลม
2. คำนึงถึงผลกระทบของเวก
3. รูปแบบการเชื่อมต่อภายในกังหันลมเป็นแบบเรเดียล
4. รูปแบบการส่งพลังงานไฟฟ้าเป็นแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง

ในส่วนแบบจำลองกังหันลมที่ใช้จะเป็นแบบจำลองของกังหันลมชนิด Vestas รุ่น V112 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเท่ากับ 112 m ดังนั้นระยะห่างเริ่มต้นระหว่างกังหันลมจึงเท่ากับ 0.56 km ซึ่งเป็นไปตามอิทธิพลเวลาที่ระยะห่างระหว่างกังหันลมต้องห่างกันอย่างน้อย 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด นอกจากนี้การวางกังหันลมภายในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมทั้ง 3 จำเป็นต้องมีการจัดกลุ่ม แบ่งเป็นกลุ่มละ 6 ตัว ก่อนจะเชื่อมต่อเข้ากับบัสรวม โดยการจัดวางกังหันลมแบบเรเดียล ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีความซับซ้อนน้อยและมีค่าใช้จ่ายต่ำแสดงดังภาพประกอบ 6-8 โดยพลังงานจากกังหันลมจะถูกส่งเข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง เนื่องจากระยะห่างของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมและจุดเชื่อมต่อมีระยะห่างน้อยกว่า 100 km รูปแบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมที่สุด ดังนั้นเมื่อใช้เงื่อนไขในการจัดวางระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมดังที่ได้กล่าวไว้ จะได้ค่าพารามิเตอร์ของการวางระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมดังตาราง 6-1 [47]



ภาพประกอบ 6-8 รูปแบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบเรเดียลของกังหันลมนอกชายฝั่ง

ตาราง 6-1 พารามิเตอร์การวางกังหันลมของทุ้งกังหันลม

พารามิเตอร์	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่ง		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
รุ่นกังหันลม	Vestas V112	Vestas V112	Vestas V112
กำลังผลิตกังหันลม	3 MW	3 MW	3 MW
กำลังผลิตทุ้งกังหันลม	32.40 MW	40.50 MW	40.50 MW
เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	112 m	112 m	112 m
จำนวนของกังหันลม	36	54	54
จำนวนของกังหันลมต่อแถว	6	6	6
จำนวนของแถว	6	9	9
ระยะห่างระหว่างบัสรวมและกังหันลม	1 km	1 km	1 km
ระยะห่างเริ่มต้นระหว่างกังหันลม	0.56 km	0.56 km	0.56 km

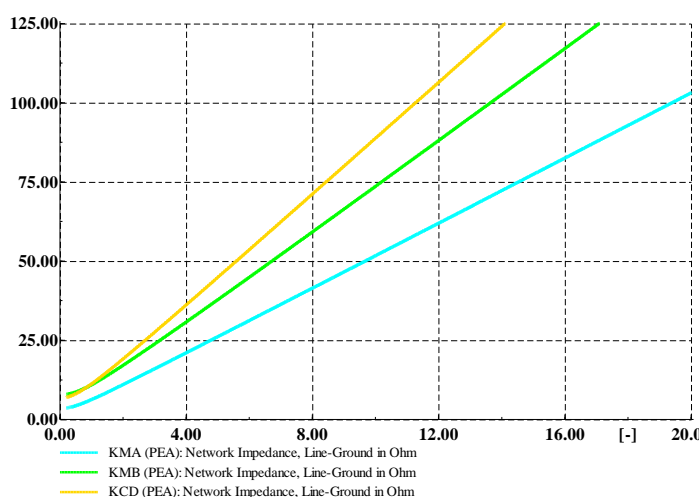
### 6.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

การวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในโดเมนความถี่และในโดเมนเวลา [48] โดยโปรแกรมมีฟังก์ชันการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งระบบสมดุลและไม่สมดุล สำหรับการวิเคราะห์อัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อจะใช้การสแกนความถี่ (Frequency Sweep) [49-50] ค่าที่ได้จะแสดงถึงอัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ส่งผลโดยตรงต่อการขยายแรงดันฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ได้ยังใช้สำหรับการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิก สำหรับวิธีการคำนวณจะกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสเป็นศูนย์โดยการเปิดแหล่งจ่ายกระแส (Open Circuit) และแหล่งจ่ายแรงดันจะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน (Short Circuit) [46] จากนั้นระบบจะทำการสแกนความถี่เพื่อคำนวณอิมพีแดนซ์บัสของระบบไฟฟ้า

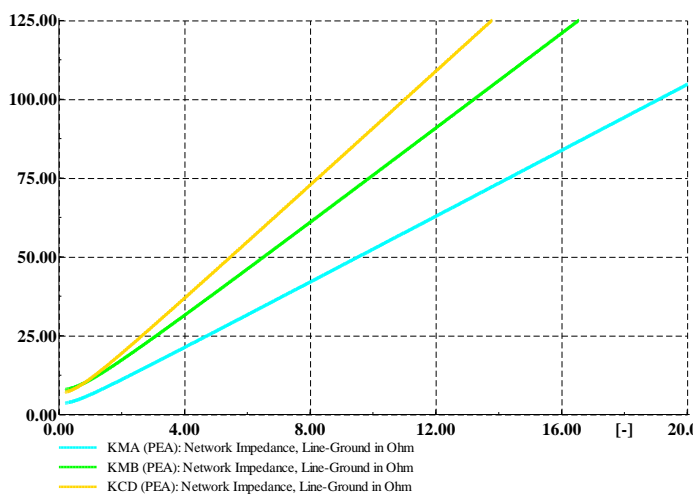
### 6.3 ผลการจำลองการทำงานและอภิปรายผลกระทบฮาร์มอนิก

การจำลองผลกระทบฮาร์มอนิกเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่จุดเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าที่แสดงถึงอัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกจากการเชื่อมทุ้งกัณฑ์ล้มเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถประเมินผลกระทบของฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกในกรณีที่มีความจำเป็นติดตั้งใช้งาน ในการจำลองการทำงานจะพิจารณาผลกระทบฮาร์มอนิกในสภาวะพิกัดของกัณฑ์ล้มซึ่งเป็นสภาวะที่ส่งผลกระทบต่อความรุนแรงของฮาร์มอนิกสูงสุดดังภาพประกอบ 6-7 นอกจากนี้รูปแบบการวางกัณฑ์ล้มจะเลือกการวางแบบเรเดียลและยึดหลักอิทธิพลเวกเป็นหลักในการจัดระยะห่างของกัณฑ์ล้ม ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงได้แบ่งการจัดวางระยะห่างสายเคเบิลของทุ้งกัณฑ์ล้มเป็น 3 ช่วงได้แก่ ระยะ 0.56 km, 0.76 km และ 0.96 km ตามลำดับ และกำหนดให้ระยะห่างจากบัสรวมถึงกัณฑ์ล้มตัวแรกมีค่าเท่ากับ 1 km ผลการจำลองการทำงานที่ได้แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

กรณีที่ 0 การจำลองคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าเมื่อไม่มีการเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มนอกชายฝั่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นกรณีตั้งต้นสำหรับการเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าเดิมมีคุณลักษณะการเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์เป็นเชิงเส้นตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดรีแอกแตนซ์ที่ความถี่ต่างๆ [50] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้านี้ยังไม่ได้รับผลกระทบจากฮาร์มอนิก ภาพประกอบ 6-9 และภาพประกอบ 6-10 แสดงคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดของทุกจุดเชื่อมต่อ



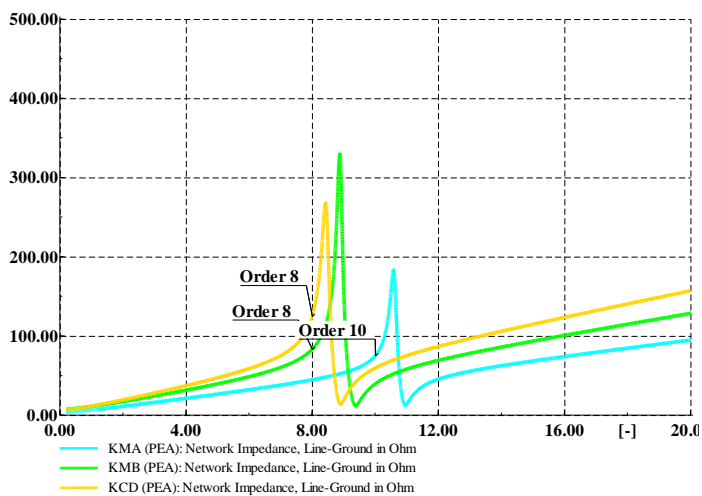
ภาพประกอบ 6-9 คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าในสภาวะโหลดสูงสุดก่อนเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์ล้มนอกชายฝั่ง



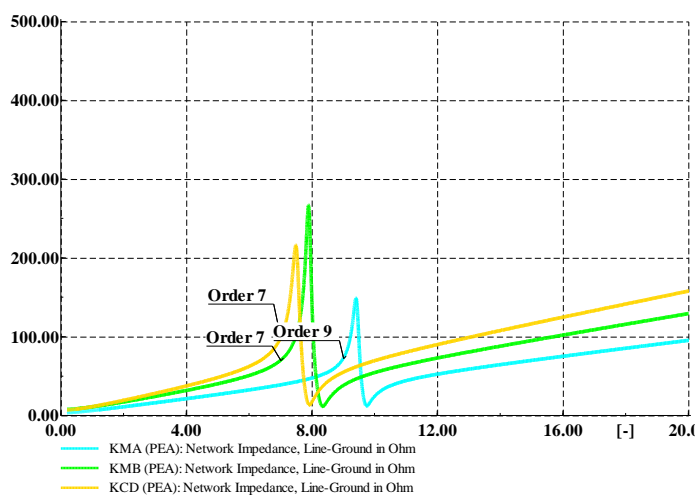
ภาพประกอบ 6–10 คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าในสถานะโหลดต่ำสุดก่อนเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

ในส่วนการจำลองผลกระทบเมื่อมีการเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าจะเริ่มพิจารณาจากกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นการจำลองคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของระบบเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งในรูปแบบกังหันลม SPP 1 เชื่อมกับบัส KMA กังหันลม SPP 2 เชื่อมกับบัส KMB และกังหันลม SPP 3 เชื่อมกับบัส KCD ผลการจำลองในสถานะโหลดสูงสุดแสดงดังภาพประกอบ 6–11 พบว่าที่ความสายส่งระหว่างกังหันลม 0.56 km มีโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 8 สำหรับจุดเชื่อมต่อ KMB และ KCD และอันดับที่ 10 สำหรับจุดเชื่อมต่อ KMA ในส่วนของระยะสายส่งระหว่างกังหันลม 0.76 km และ 0.96 km มีโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกดังภาพประกอบ 6–11 (ข) และภาพประกอบ 6–11 (ค) ซึ่งจะเห็นว่าอันดับของฮาร์มอนิกที่มีโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกมีอันดับต่ำลงเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางของสายส่งเคเบิลใต้น้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานของอิมพีแดนซ์มีลักษณะเป็นวงจร RLC แบบขนาน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเกิดจากการขนานระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลใต้น้ำและค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลง และเนื่องจากการวิเคราะห์เป็นการปรับค่าความยาวของสายเคเบิลใต้น้ำของกังหันลม ส่งผลให้ค่าคาปาซิแตนซ์ของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นตามความยาวของสายส่ง ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้ค่าอินดักแตนซ์ที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนของหม้อแปลงกังหันลมจะส่งผลให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ลดลง ดังนั้นจุดเชื่อมต่อกังหันลม SPP 1 จึงมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่ากังหันลม SPP 2 และ SPP 3

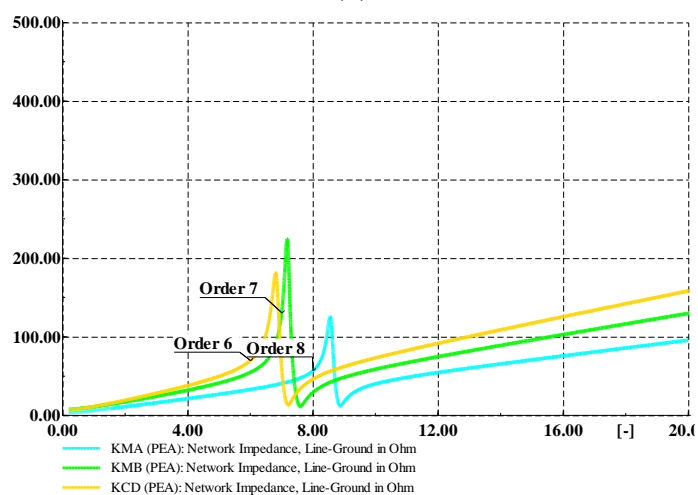




(ก)



(ข)

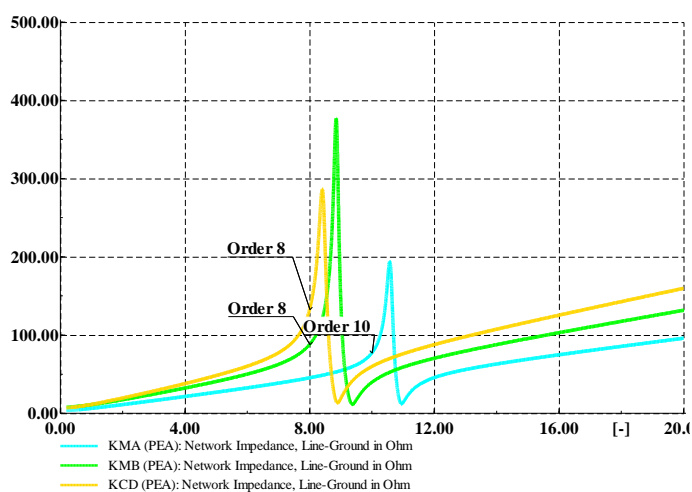


(ค)

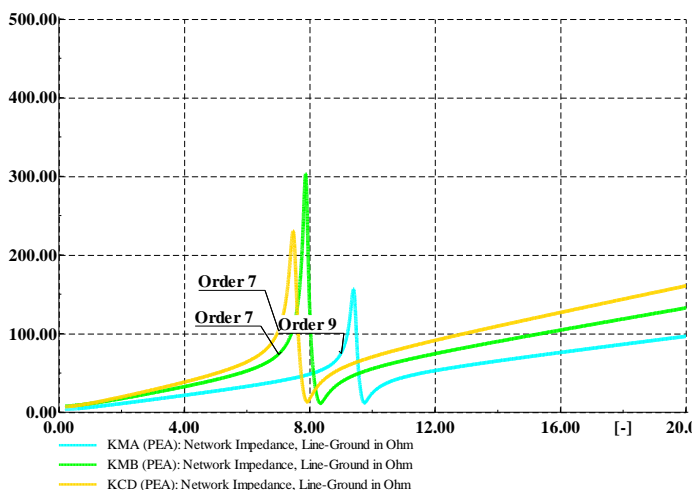
ภาพประกอบ 6–11 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดสูงสุดกรณีที 1

(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km

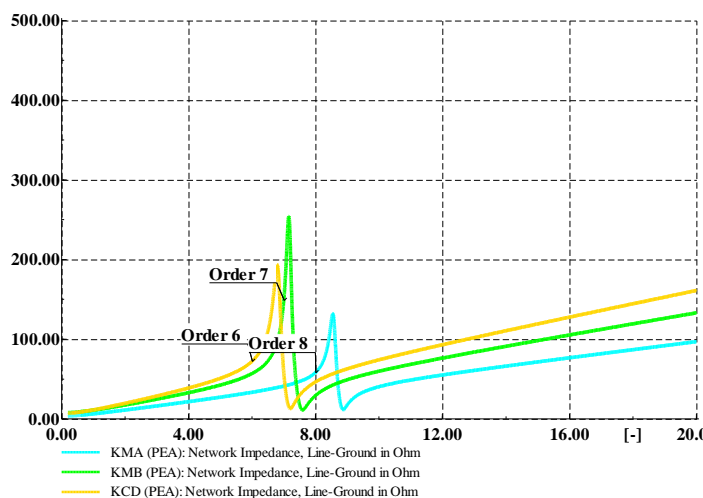
สำหรับผลกระทบฮาร์มอนิกในสภาวะโหลดต่ำสุดแสดงดังภาพประกอบ 6-12 พบว่ามีโอกาสขยายกระแสฮาร์มอนิกเหมือนกับในสภาวะโหลดสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าการขยายกระแสฮาร์มอนิกมีอันดับต่ำลงเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากอิมพีแดนซ์โหลดของระบบต่อขนานกับอิมพีแดนซ์รวมของระบบไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อเกิดความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจึงเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอิมพีแดนซ์โหลดลดลง



(ก)



(ข)

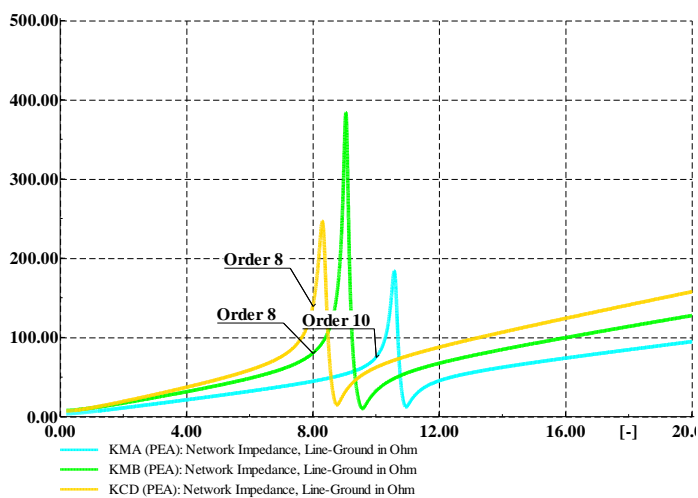


(ค)

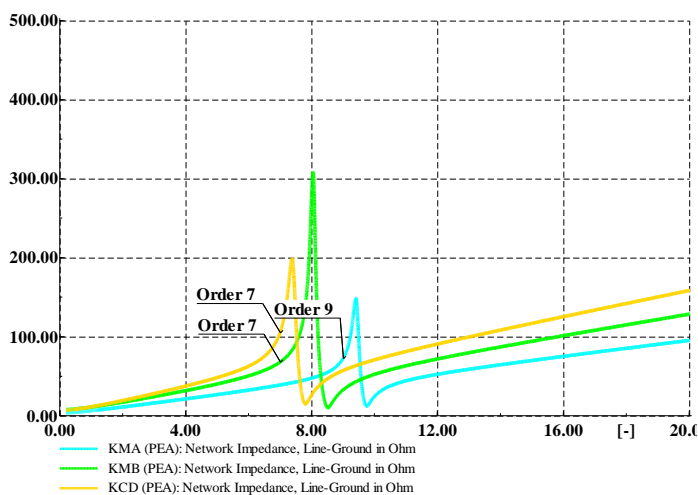
ภาพประกอบ 6–12 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 1

(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km

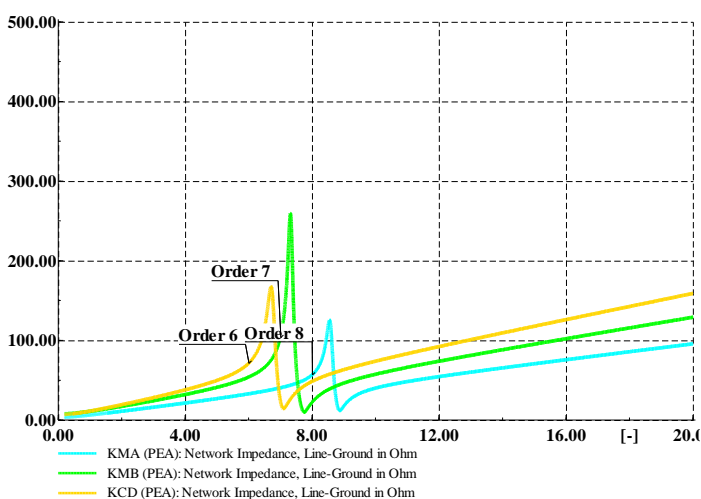
นอกจากนี้ผลการจำลองการขยายกระแสฮาร์มอนิกทั้งในสภาวะโหลดสูงสุดและโหลดต่ำสุดของกรณีที่ 2 ถึงกรณีที่ 4 แสดงดังภาพประกอบ 6–13 ถึงภาพประกอบ 6–18 ผลการจำลองที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 นั่นคือหากระยะสายส่งระหว่างตู้กั้นลมและจำนวนของกั้นลมเพิ่มขึ้น ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบก็จะมีค่าลดลง ดังนั้นการเชื่อมต่อตู้กั้นลมที่มีกำลังผลิตสูงและมีการจัดวางระยะห่างระหว่างกั้นลมไกล ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลง ดังนั้นอันดับฮาร์มอนิกที่มีการขยายกระแสฮาร์มอนิกจะลดลง ตาราง 6–2 ถึงตาราง 6–4 เป็นการสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อตู้กั้นลมทั้ง 4 กรณี



(ก)



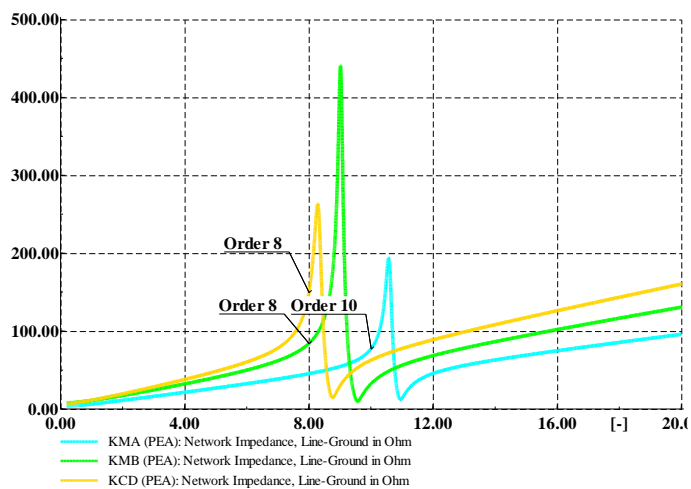
(ข)



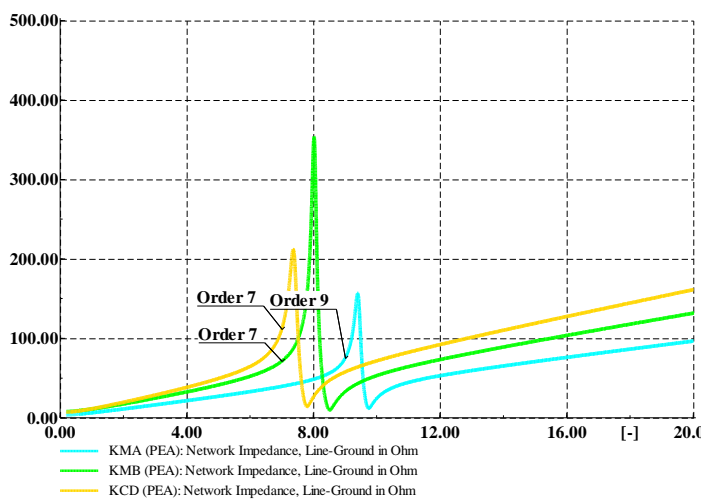
(ค)

ภาพประกอบ 6–13 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดสูงสุดกรณีที่ 2

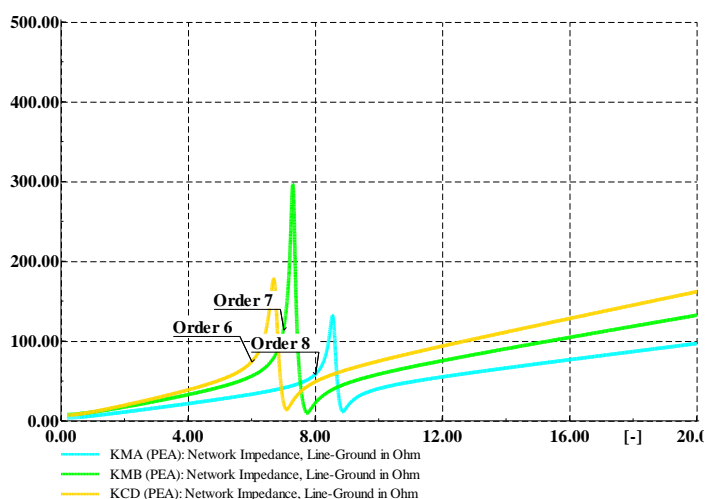
(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km



(ก)



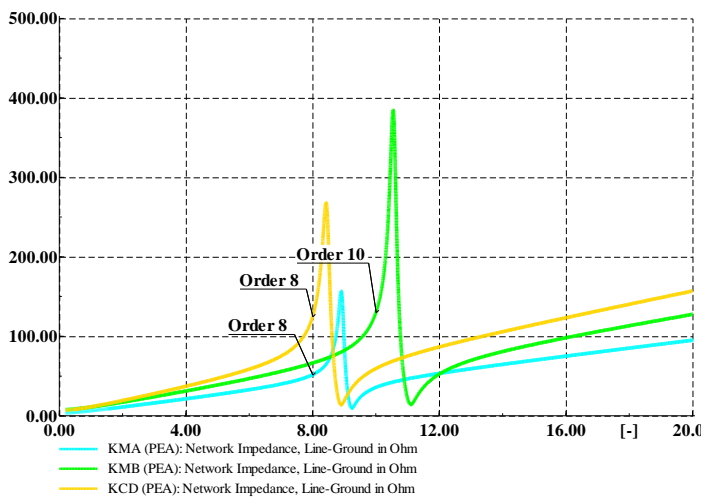
(ข)



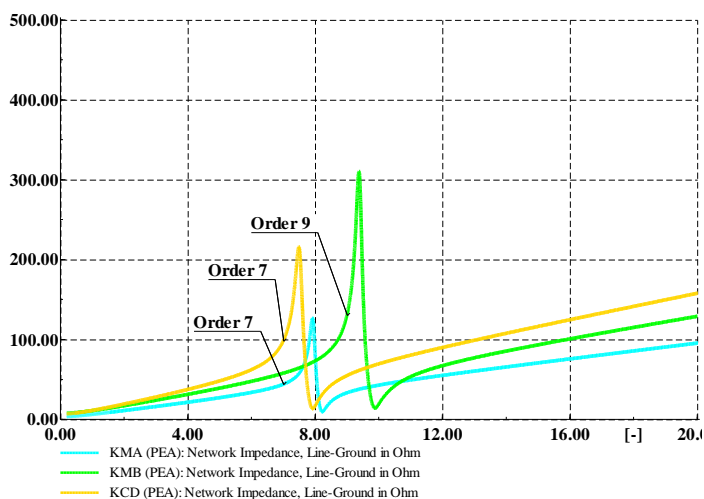
(ค)

ภาพประกอบ 6–14 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 2

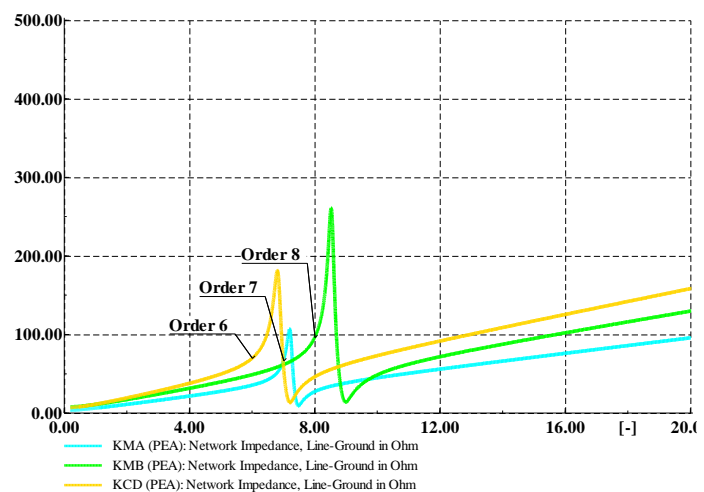
(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km



(ก)



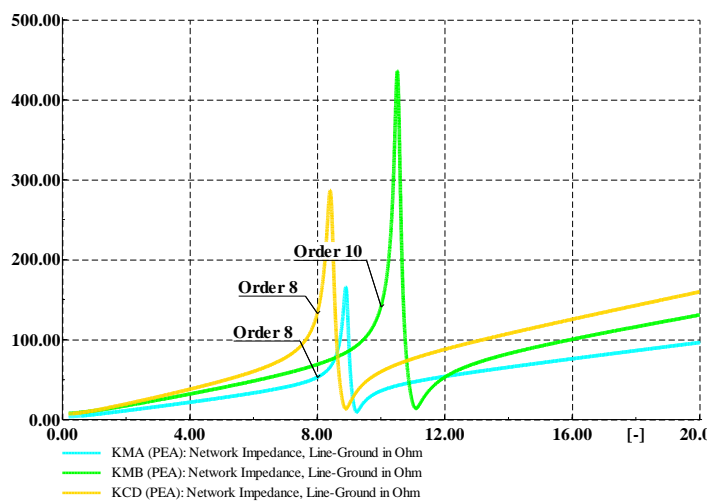
(ข)



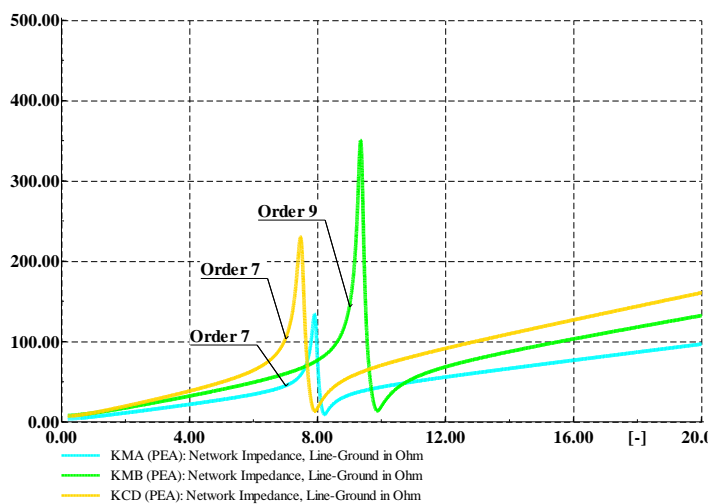
(ค)

ภาพประกอบ 6–15 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดสูงสุดกรณี 3

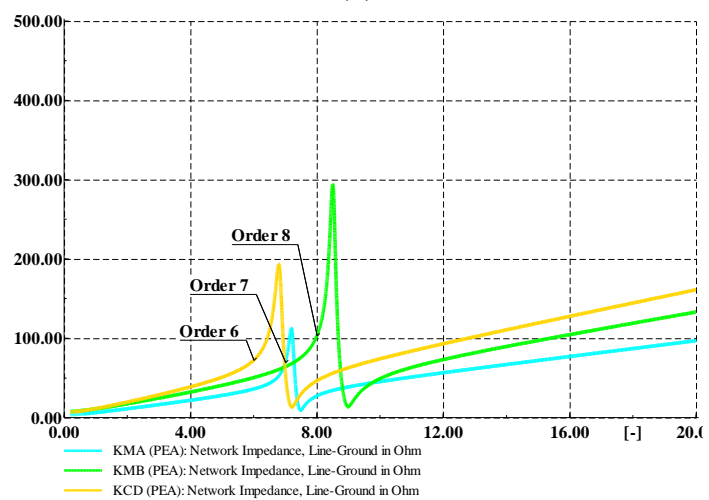
(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km



(ก)



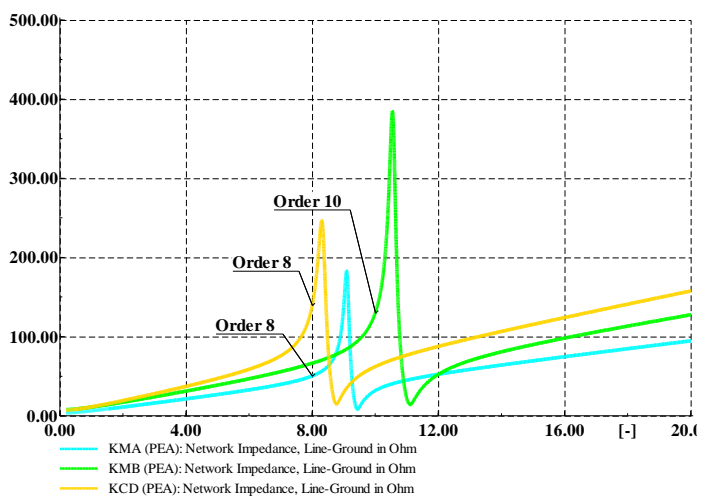
(ข)



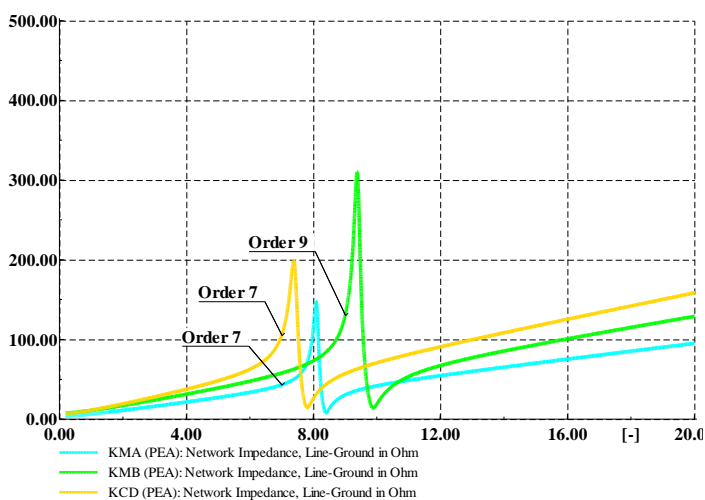
(ค)

ภาพประกอบ 6–16 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุดกรณีที่ 3

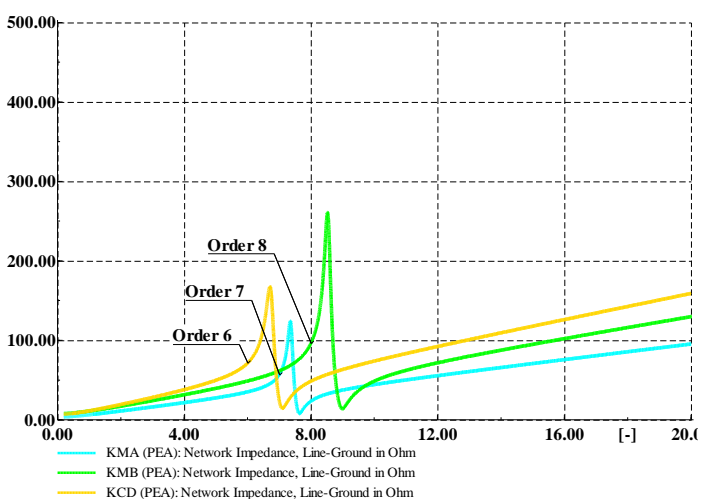
(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km



(ก)



(ข)

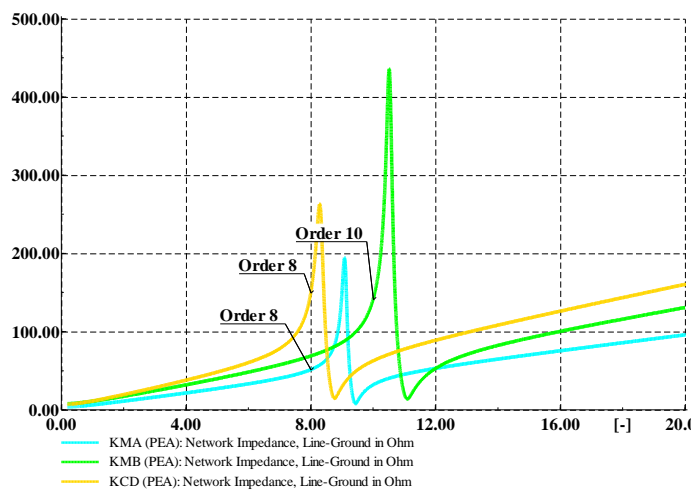


(ค)

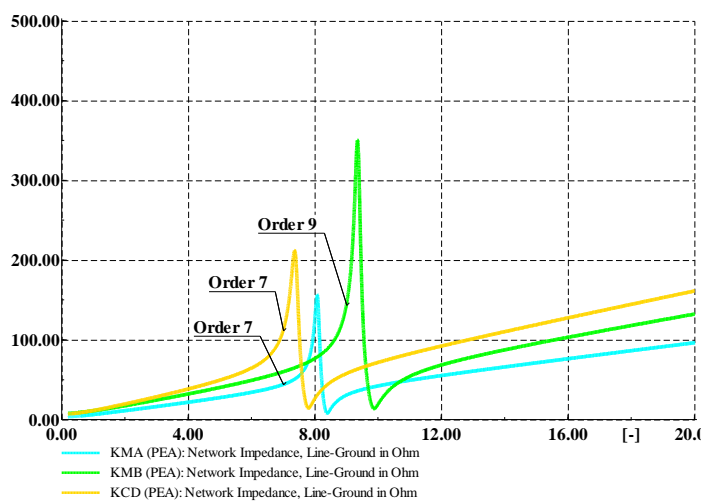
ภาพประกอบ 6-17 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดสูงสุดกรณีี่ 4

(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km

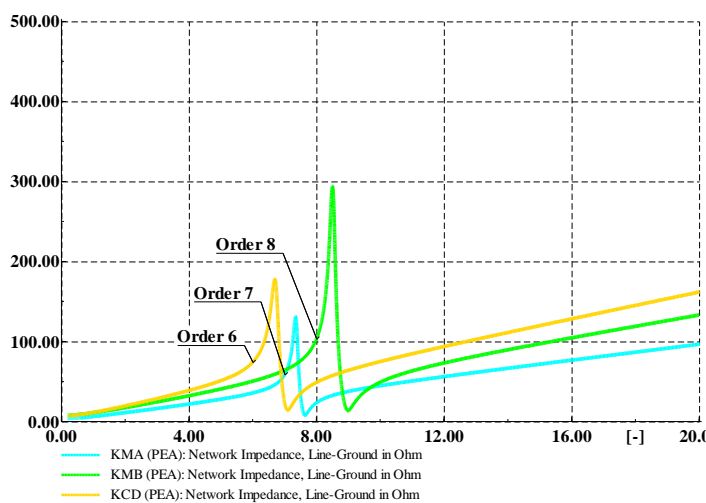




(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 6–18 อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะโหลดต่ำสุดกรณี ที่ 4

(ก) ระยะสายส่ง 0.56 km, (ข) ระยะสายส่ง 0.76 km, (ค) ระยะสายส่ง 0.96 km

ตาราง 6-2 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสน้ำมอนิคที่ความยาวสายส่งกึ่งหันลม 0.56 km

กรณีศึกษา	สถานะโหลดสูงสุด			สถานะโหลดต่ำสุด		
	KMA	KMB	KCD	KMA	KMB	KCD
1	อันดับ 10	อันดับ 8	อันดับ 8	อันดับ 10	อันดับ 8	อันดับ 8
2	อันดับ 10	อันดับ 8	อันดับ 8	อันดับ 10	อันดับ 8	อันดับ 8
3	อันดับ 8	อันดับ 10	อันดับ 8	อันดับ 8	อันดับ 10	อันดับ 8
4	อันดับ 8	อันดับ 10	อันดับ 8	อันดับ 8	อันดับ 10	อันดับ 8

ตาราง 6-3 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสน้ำมอนิคที่ความยาวสายส่งกึ่งหันลม 0.76 km

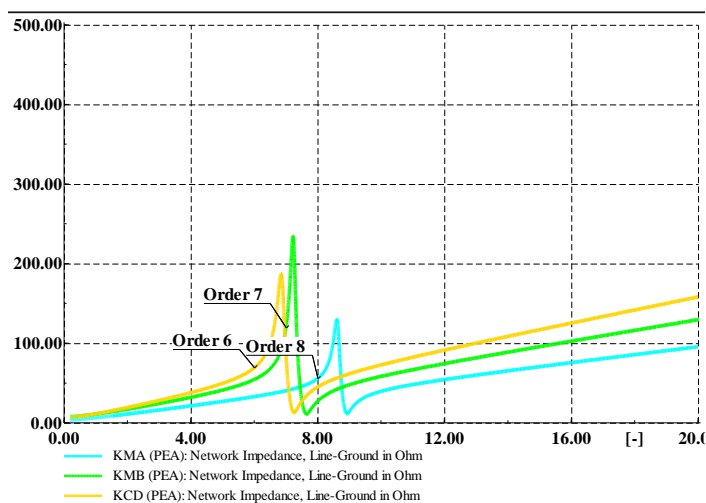
กรณีศึกษา	สถานะโหลดสูงสุด			สถานะโหลดต่ำสุด		
	KMA	KMB	KCD	KMA	KMB	KCD
1	อันดับ 9	อันดับ 7	อันดับ 7	อันดับ 9	อันดับ 7	อันดับ 7
2	อันดับ 9	อันดับ 7	อันดับ 7	อันดับ 9	อันดับ 7	อันดับ 7
3	อันดับ 7	อันดับ 9	อันดับ 7	อันดับ 7	อันดับ 9	อันดับ 7
4	อันดับ 7	อันดับ 9	อันดับ 7	อันดับ 7	อันดับ 9	อันดับ 7

ตาราง 6-4 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสน้ำมอนิคที่ความยาวสายส่งกึ่งหันลม 0.96 km

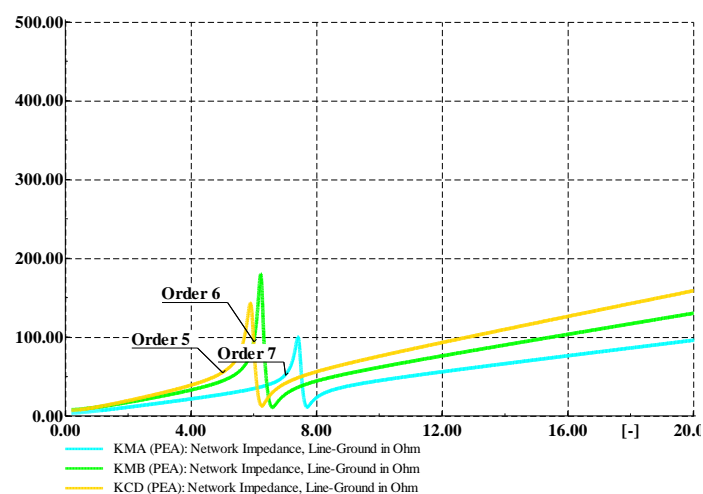
กรณีศึกษา	สถานะโหลดสูงสุด			สถานะโหลดต่ำสุด		
	KMA	KMB	KCD	KMA	KMB	KCD
1	อันดับ 8	อันดับ 7	อันดับ 6	อันดับ 8	อันดับ 7	อันดับ 6
2	อันดับ 8	อันดับ 7	อันดับ 6	อันดับ 8	อันดับ 7	อันดับ 6
3	อันดับ 7	อันดับ 8	อันดับ 6	อันดับ 7	อันดับ 8	อันดับ 6
4	อันดับ 7	อันดับ 8	อันดับ 6	อันดับ 7	อันดับ 8	อันดับ 6

นอกจากนี้หากปรับระยะสายส่งระหว่างตำแหน่งบัสรวมและกึ่งหันลมจาก 1 km เป็น 3 km และ 5 km โดยให้ระยะสายส่งภายในกึ่งหันลมมีค่าคงที่เท่ากับ 0.56 km พบว่าความถี่เรโซแนนซ์หรืออัตราการขยายกระแสน้ำมอนิคจะมีค่าต่ำลงเช่นเดียวกับการปรับความยาวสายส่งระหว่างกึ่งหันลมภายในทุ่งกึ่งหันลมดังภาพประกอบ 6-19 เนื่องจากค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ในสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามการปรับระยะสายส่ง เพราะฉะนั้นความยาวของสายส่ง

ระหว่างบัสรวมและกั้นล้มจะส่งผลกระทบต่ออัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกเช่นเดียวกับการปรับระยะสายส่งภายในทุ่งกั้นลมหดงข้อสรุปในตาราง 6-5



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 6-19 ตัวอย่างอัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อปรับความยาวสายส่งระหว่างตำแหน่งบัสรวมและกั้นลมหดงที่ 1 ภายใต้สภาวะโหลดสูงสุด

(ก) ระยะสายส่ง 3km, (ข) ระยะสายส่ง 5 km

ตาราง 6-5 ข้อสรุปโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อปรับระยะสายส่งระหว่างบัสรวมและกึ่งหันลม

ระยะสายส่งระหว่างบัสรวมและกึ่งหันลม (km)	จุดเชื่อมต่อ		
	KMA	KMB	KCD
1	อันดับ 10	อันดับ 8	อันดับ 8
3	อันดับ 8	อันดับ 7	อันดับ 6
5	อันดับ 7	อันดับ 6	อันดับ 5

#### 6.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบฮาร์มอนิก

ผลการจำลองผลกระทบฮาร์มอนิกเมื่อมีการเชื่อมต่อทุ่งกึ่งหันลมนอกชายฝั่งขนาด 432 MW เข้ากับระบบไฟฟ้า เพื่อศึกษาโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกโดยพิจารณาจากการขยายอิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้า พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะสายส่งที่เชื่อมระหว่างกึ่งหันลมแต่ละตัวหรือจำนวนของกึ่งหันลมที่แตกต่างกันจะส่งผลให้อันดับฮาร์มอนิกหรือความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ของสายส่งและหม้อแปลงกึ่งหันลม นั่นคือหากเชื่อมต่อทุ่งกึ่งหันลมที่มีการวางระยะห่างของกึ่งหันลมไกลและในทุ่งกึ่งหันลมมีจำนวนของหม้อแปลงจำนวนมาก ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะมีค่าลดลง นั่นหมายถึงอันดับฮาร์มอนิกที่มีโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจะมีอันดับต่ำลง นอกจากนี้ระยะสายส่งระหว่างตำแหน่งบัสรวมและกึ่งหันลมก็ส่งผลกระทบต่อการศึกษาโอกาสเกิดผลกระทบฮาร์มอนิกเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงระยะสายส่งระหว่างกึ่งหันลม การศึกษาโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกสามารถใช้ประเมินหรือวางแผนการเชื่อมต่อทุ่งกึ่งหันลม เนื่องจากผลการจำลองการทำงานที่ได้แสดงถึงโอกาสเกิดผลกระทบฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า นั่นคือหากความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ของกึ่งหันลมมีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ ผลกระทบแรงดันฮาร์มอนิกหรือความรุนแรงของฮาร์มอนิกจะมีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจากการขยายอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าเนื่องจากผลของระยะสายส่งเคเบิลได้นำของทุ่งกึ่งหันลม โดยที่กึ่งหันลมแต่ละตัวผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วพิกัด จะได้อันดับความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบไฟฟ้าซึ่งสามารถใช้ทำนายอันดับฮาร์มอนิกที่จะเกิดความรุนแรงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วางแผนหากมีความจำเป็นต้องติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกก่อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

## บทที่ 7

### การวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมและแนวทางการแก้ไข

#### 7.1 หลักเกณฑ์การวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

การวิเคราะห์หรือคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งจะพิจารณาจาก 3 ปัจจัยหลัก ตามคำแนะนำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประกอบด้วย 1) ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ 2) การปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า 3) กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ อ้างอิงจากข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551 สำหรับการวิเคราะห์เชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้า ได้แก่ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต และการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดข้อกำหนดของแต่ละเทคนิคในบทที่ 4 บทที่ 5 และบทที่ 6 ตามลำดับ การจะเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลการจำลองเชิงเทคนิคจะต้องผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อทั้งหมดจึงจะสามารถดำเนินการเพื่อขอเชื่อมต่อกับการไฟฟ้า

2. การปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า เป็นการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่จะเพิ่มขึ้นจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง นั่นคือภายหลังการประเมินผลการจำลองเชิงเทคนิคเทียบกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อจะทราบรูปแบบการเชื่อมต่อที่ผ่านและไม่ผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อ ในกรณีที่ผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อทั้งหมดก็ไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์หรือติดตั้งอุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเข้ากับระบบไฟฟ้า ทำให้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง แต่หากมีรูปแบบการเชื่อมต่อที่ไม่ผ่านข้อกำหนดนั้นหมายถึงการเชื่อมต่อดังกล่าวจำเป็นต้องปรับขนาดอุปกรณ์บางชนิดภายในระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับการเชื่อมต่อ เช่น สายส่ง อุปกรณ์ป้องกัน เป็นต้น หรือติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพระบบไฟฟ้าหรือการทำงานของระบบไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้อย่างปกติ เช่นการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก ซึ่งล้วนแต่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่จะเพิ่มขึ้นตาม

3. กำลังไฟฟ้าสูญเสีย การเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าสามารถส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าในแง่ของกำลังสูญเสียการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่ถูกเชื่อมต่อและจ่ายไฟอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับโหลดจะทำให้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่ากรณีที่อยู่ไกลจากโหลด เนื่องจากกำลังไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องไหลผ่านสายตัวนำเป็นระยะ

ทางไกล ดังนั้นหากพิจารณาในภาพรวมแล้วกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม ซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดเล็กกว่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากแหล่งผลิตหลักของระบบไฟฟ้าและติดตั้งอยู่บริเวณใกล้เคียงศูนย์กลางโหลดหรือความต้องการใช้ไฟฟ้ามากกว่า จึงส่งผลดีให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของระบบลดลง

เพราะฉะนั้นจากหลักเกณฑ์การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมสำหรับรองรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง ทางผู้วิจัยจึงได้วางเกณฑ์การคัดเลือกโดยพิจารณาจากการวิเคราะห์เชิงเทคนิคเพื่อประเมินตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และประเมินการปรับปรุงอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยทั้ง 2 เกณฑ์การคัดเลือกจะไม่พิจารณาผลกระทบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเนื่องจากการวิเคราะห์เชิงเทคนิคดังกล่าวเป็นการประเมินโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจากการเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นการประเมินความถี่ที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยไม่ได้พิจารณาค่าความผิดเพี้ยนกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดการไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายออกมาจากคอนเวอร์เตอร์กังหันลม ในส่วนของกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะแบ่งเป็น กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง กำลังไฟฟ้าสูญเสียไม่เปลี่ยนแปลง และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีการให้คะแนนดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 1. ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคคิดเป็นร้อยละ 40 ประกอบด้วย

การไหลของกำลังไฟฟ้า	คะแนน 5
การเปลี่ยนแปลงแรงดัน	คะแนน 5
เสถียรภาพแรงดัน	คะแนน 5
กระแสลัดวงจร	คะแนน 5
กังหันลมหลุดการเชื่อมต่อ	คะแนน 5
สายเคเบิลใต้น้ำหลุดการเชื่อมต่อ	คะแนน 5
การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส	คะแนน 5
การเปลี่ยนแปลงความเร็วลม	คะแนน 5

#### 2. การปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 40 ประกอบด้วย

การไหลของกำลังไฟฟ้า	คะแนน 5
การเปลี่ยนแปลงแรงดัน	คะแนน 5
เสถียรภาพแรงดัน	คะแนน 5
กระแสลัดวงจร	คะแนน 5
กังหันลมหลุดการเชื่อมต่อ	คะแนน 5

สายเคเบิลใต้น้ำหลุดการเชื่อมต่อ	คะแนน 5
การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส	คะแนน 5
การเปลี่ยนแปลงความเร็วลม	คะแนน 5

### 3. กำลังไฟฟ้าสูญเสียคิดเป็นร้อยละ 20 ประกอบด้วย

กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง	คะแนน 7
กำลังไฟฟ้าสูญเสียไม่เปลี่ยนแปลง	คะแนน 3
กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น	คะแนน 0

จากนั้นเมื่อพิจารณาหลักเกณฑ์การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมกับทุกรูปแบบการเชื่อมต่อ ขั้นตอนต่อไปจะต้องนำผลที่ได้มาจัดลำดับความเหมาะสม ซึ่งได้มีการแบ่งช่วงคะแนนเป็น 3 ช่วง สำหรับการคัดเลือก โดยมีการกำหนดช่วงคะแนนความเหมาะสม ดังนี้

- |  |              |
|--|--------------|
| 1. จุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมสูง     | คะแนน 71-100 |
| 2. จุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมปานกลาง | คะแนน 31-70  |
| 3. จุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมต่ำ     | คะแนน 0-30   |

## 7.2 ผลการวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

จากหลักเกณฑ์การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 7.1 และผลการจำลองผลกระทบเชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้า เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถสรุปรายละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

1. การจำลองผลกระทบเชิงเทคนิคไฟฟ้าชี้ให้เห็นว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 1, SPP 2 และ SPP 3 ในรูปแบบการเชื่อมต่อต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อพบว่า ผลกระทบจากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ประกอบด้วย การไหลของกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงแรงดัน เสถียรภาพแรงดัน และกระแสลัดวงจร ซึ่งเป็นการตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้า รวมถึงการตรวจสอบความสามารถของอุปกรณ์ไฟฟ้าเดิมภายในระบบไฟฟ้าทั้งสายส่ง หม้อแปลง รวมถึงอุปกรณ์ป้องกันยังคงสามารถรองรับการเชื่อมต่อแหล่งพลังงานจากกังหันลมโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนหรือปรับปรุงอุปกรณ์ใดๆ ในระบบไฟฟ้า ผลสรุปที่ได้แสดงดังตาราง 7-1 จะเห็นได้ว่าผลการจำลองระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวทั้งหมดสามารถผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อ นั้นหมายถึงระบบไฟฟ้าเดิมสามารถรองรับการเชื่อมต่อกังหันลมทั้ง 3 ระบบได้ทั้ง 4 กรณี โดยที่ปริมาณภาระโหลดของสายส่งยังคงต่ำกว่า 80% และมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อกังหันลม

ในส่วนทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าพบว่าไม่มีการไหลเข้าสู่สถานีต้นทางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต อีกทั้งระดับแรงดันของจุดเชื่อมต่อยังคงอยู่ในช่วง ( $\pm 5\%$ ) รวมถึงระดับกระแสลัดวงจรเปรียบเทียบกับค่าพิกัดกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันยังต่ำกว่า 85% โดยที่ระดับกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นยังคงต่ำกว่า 25% เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อนั้นหมายถึง อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ายังคงทำงานประสานกันดีเป็นอย่างดี ดังนั้นการจำลองระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวเพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์หมอนอกชายฝั่งเข้ากับระบบไฟฟ้า

ตาราง 7-1 ข้อสรุปผลกระทบการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว

กรณีศึกษา	การไหลของกำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงแรงดัน	เสถียรภาพแรงดัน	กระแสลัดวงจร
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓

✓ หมายถึง ผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

✗ หมายถึง ไม่ผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

สำหรับการจำลองผลกระทบของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัตประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกัณฑ์หมอนอกชายฝั่ง การเชื่อมต่อ สายส่งผลการเชื่อมต่อ การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ผลสรุปที่ได้แสดงดังตาราง 7-2 ผลกระทบเชิงเทคนิคทั้งหมดยังคงผ่านข้อกำหนดของการไฟฟ้า การเกิดความผิดปกติใดๆ ในระบบไฟฟ้าและจำเป็นต้องปลดทุ้งกัณฑ์หมอนอกชายฝั่งไม่ว่าจะปลดทุ้งกัณฑ์หมอนอกชายฝั่งโดยตรงหรือปลดจากสายเคเบิลใต้น้ำ ระบบไฟฟ้าจะยังคงสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้โหลดได้อย่างปกติ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของเวลาการตัดทุ้งกัณฑ์หมอนอกชายฝั่งหากเกิดความผิดปกติที่รุนแรงพบว่า เวลาที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2.0 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสูงสุดตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ นั้นหมายถึงระบบไฟฟ้ามีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันซึ่งเป็นผลจากความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและทนความผิดปกติของทุ้งกัณฑ์หมอนอกชายฝั่งและในส่วนการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมก็แสดงให้เห็นว่าไม่จำเป็นต้องปลดทุ้งกัณฑ์หมอนอกชายฝั่งจากระบบไฟฟ้าไม่ว่าความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงลงอย่างทันทีทันใด ดังนั้นระบบยังคงสามารถทำงานได้ถึงแม้จะเกิดการรบกวนขึ้นภายในระบบ



ตาราง 7-2 ข้อสรุปผลกระทบการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต

กรณีศึกษา	ทุ่งกั้งห้ันลมหลุดการ เชื่อมต้อ		สายส่งเคเบิลใต้น้้า หลุดการเชื่อมต้อ		การล้ดวงจร 3 เฟส ที่บ้ัส		การเปลี่ยนเปลง ความเร็วลม	
	แรงดัน	ความถี่	แรงดัน	ความถี่	แรงดัน	ความถี่	แรงดัน	ความถี่
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ หมายถึง ผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

✗ หมายถึง ไม่ผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อ

ส่วนสุดท้ายของการวิเคราะห์เชิงเทคนิคคือ การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นการตรวจสอบโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวางกั้งห้ันลมหลุดการที่ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนเปลงค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า ซึ่งไม่ได้มีการกำหนดในข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถนำผลจากการจำลองการทำงานเทียบกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบ ที่จะส่งผลให้เกิดผลกระทบฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า หากความถี่ที่มีกระแสฮาร์มอนิกสูงถูกจ่ายเข้ากับค่าอิมพีแดนซ์สูง ทำให้ได้แรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูง ความรุนแรงของฮาร์มอนิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น

2. การประเมินผลกระทบเชิงเทคนิคที่เกิดขึ้นกับการปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัวและการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้าทั้ง สายส่ง หม้อแปลง และเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของพลังงานจากทุ่งกั้งห้ันลมนอกชายฝั่งทุกรูปแบบการเชื่อมต้อดั่งข้อสรุปในตาราง 7-3 ในส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกยังไม่สามารถประเมินการปรับปรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบได้ เนื่องจากผลที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงความถี่ที่โอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งต้องนำผลของกระแสฮาร์มอนิกมาพิจารณาเพื่อประเมินค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์การขยายกระแสฮาร์มอนิกสามารถนำมาพิจารณาวงจรกรองฮาร์มอนิกหากมีความจำเป็น

ตาราง 7-3 ข้อสรุปผลกระทบการปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า

กรณีศึกษา	การวิเคราะห์เชิงเทคนิคระบบไฟฟ้า	
	การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว	การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต
1	✗	✗
2	✗	✗
3	✗	✗
4	✗	✗

✓ หมายถึง ปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า

✗ หมายถึง ไม่ปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า

3. การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อมีการเชื่อมต่อทุ้งกั้นลมนอกชายฝั่งทั้ง 4 กรณี ได้มีการอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.3 ซึ่งสามารถสรุปผลกระทบกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ดังตาราง 7-4

ตาราง 7-4 ข้อสรุปผลกระทบกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า

กรณีศึกษา	สถานะโหลดสูงสุด		สถานะโหลดต่ำสุด	
	กำลังสูญเสีย (MW)	เปรียบเทียบกับกรณีที่ 0 (%)	กำลังสูญเสีย (MW)	เปรียบเทียบกับกรณีที่ 0 (%)
0	3.020	-	1.050	-
1	3.020	ไม่เปลี่ยนแปลง	1.980	+88.571
2	3.000	-0.662	1.960	+86.667
3	3.090	+2.318	2.040	+94.286
4	3.070	+1.656	2.010	+91.429

เพราะฉะนั้นเมื่อนำผลการประเมินเชิงเทคนิคต่างๆ เข้าสู่การประเมินด้วยหลักเกณฑ์การคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสม ผลที่ได้แสดงดังตาราง 7-5 ถึงตาราง 7-7 โดยผลการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 7-8



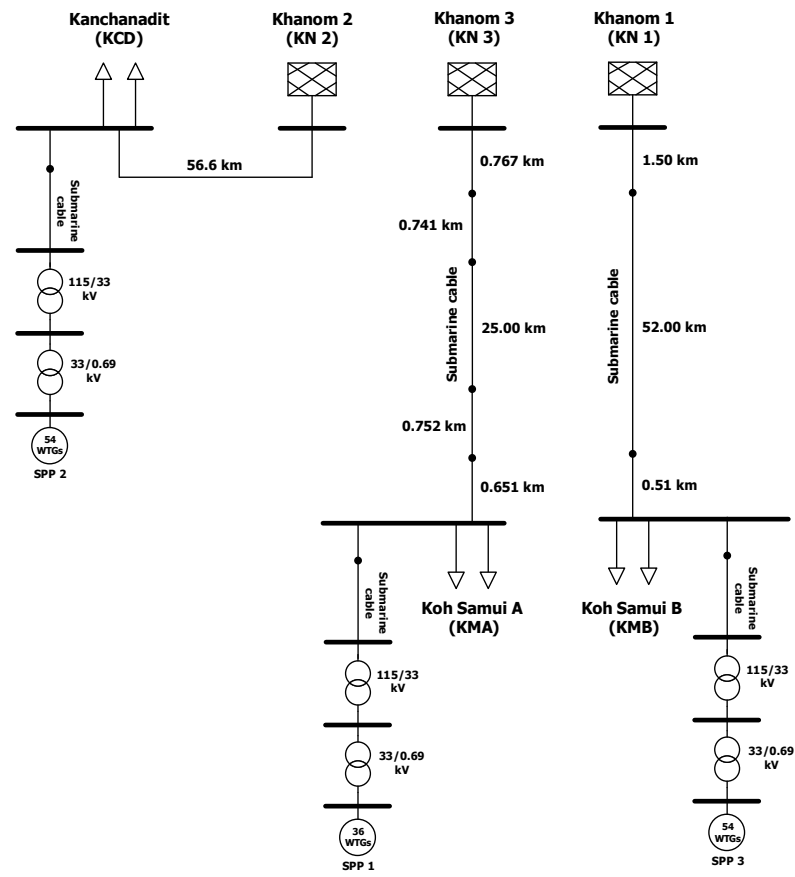
ตาราง 7-7 ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า

กรณีศึกษา	คะแนนการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสีย		รวม
	สถานะโหลดสูงสุด	สถานะโหลดต่ำสุด	
1	3	0	3
2	7	0	7
3	0	0	0
4	0	0	0

ตาราง 7-8 ผลการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง

กรณีศึกษา	ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ	การปรับปรุงอุปกรณ์	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	รวม
1	40	40	3	83
2	40	40	7	87
3	40	40	0	80
4	40	40	0	80

จากผลการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 1, SPP 2 และ SPP 3 เข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคคือรูปแบบการเชื่อมต่อกรณีที่ 2 โดยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 1 เชื่อมเข้ากับจุดเชื่อมต่อ KMA ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 2 เชื่อมเข้ากับจุดเชื่อมต่อ KCD และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 3 เชื่อมเข้ากับจุดเชื่อมต่อ KMB ดังภาพประกอบ 7-1 เนื่องจากรูปแบบการเชื่อมต่อดังกล่าวผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อ ไม่จำเป็นต้องปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายหลังการเชื่อมต่อน้อยกว่ากรณีอื่นๆ ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าไปโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์เชิงเทคนิคได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบบางอย่างที่ต้องปรับปรุงแก้ไขหากต้องการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป



ภาพประกอบ 7-1 แผนภาพเส้นเดียวจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย  
ทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่ง

### 7.3 การแก้ไขผลกระทบของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่ง

ผลการจำลองเชิงเทคนิคของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัต และการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า ได้แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งกังหันลมนอกชายฝั่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยปัญหาที่เกิดขึ้นจากการประเมินผลกระทบของงานวิจัยจะมีเพียงการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสภาวะโหลดต่ำสุดที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อ ซึ่งวิธีการที่ง่ายที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การลดปริมาณกำลังผลิตของทุ้งกังหันลมลงให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันกำลังไฟฟ้าโดยรวมในระบบไฟฟ้าไม่ให้มากเกินไปจนทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า แต่หากพิจารณาในมุมมองของการเพิ่มการใช้พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิล การป้องกันผลกระทบด้วยการจำกัดขนาดกำลังผลิตทุ้งกังหันลมจึงควรจะเป็นวิธีการสุดท้ายที่ควรจะต้องเลือกปฏิบัติ แต่ควรจะเริ่มพิจารณาแก้ปัญหาด้วยหลักการเชิงเทคนิคที่ทางการไฟฟ้าหรือผู้ผลิตแหล่งพลังงานสามารถทำได้

เพราะฉะนั้นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจำลองการทำงานในงานวิจัย นั่นคือ การแก้ปัญหาผลกระทบกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ซึ่งจะมีค่าสูงเมื่อระบบไฟฟ้ามีความต้องการปริมาณ โหลดต่ำ ปัญหานี้เกิดขึ้นมาจากสาเหตุความไม่สมดุลระหว่างปริมาณความต้องการ โหลดกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าแตกต่างกัน นั่นคือความต้องการ โหลดน้อยแต่ความสามารถจ่ายพลังงานสูง วิธีการแก้ที่ง่ายที่สุดคือการลดปริมาณกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งก้งหันลมให้เหมาะสมกับปริมาณ โหลดในช่วงความต้องการต่ำ ซึ่งวิธีการนี้สามารถทำได้ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้า ส่วนวิธีการอื่นๆ ที่สามารถทำได้ เช่นการเลือกโหมดการทำงานแบบควบคุมแรงดันหรือเลือกตำแหน่งทุ้งก้งหันลมที่ใกล้กับจุดศูนย์กลาง โหลด เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถจ่าย โหลดได้ทันที ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โหมดควบคุมแรงดันและเลือกจุดเชื่อมต่อในการวิเคราะห์ที่ใกล้จุดศูนย์กลาง โหลดมากที่สุดแล้ว ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดจึงยังคงเป็นการลดกำลังผลิตของทุ้งก้งหันลมที่ทำงานลงขณะระบบไฟฟ้ามีความต้องการ โหลดต่ำ ซึ่งผลการจำลองพบว่าสถานะ โหลดดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อทุ้งก้งหันลมเข้าสู่ระบบไฟฟ้า เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียยังคงเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ

นอกจากนี้ถึงแม้ผลการจำลองเชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะมีเพียงผลกระทบจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสถานะ โหลดต่ำเท่านั้น แต่ถ้ามีการจำลองในสถานการณ์ หรือสถานที่แตกต่างออกไปเพื่อต้องการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยทุ้งก้งหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า และเกิดปัญหาเชิงเทคนิคอื่นๆ ก็สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยวิธีการแก้ปัญหาเชิงเทคนิคที่สำคัญๆ เพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางการแก้ปัญหาต่อไปมีดังนี้

1. ปัญหากระแสลัดวงจรและการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน แบ่งเป็น 3 กรณีดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 คือ การลดขอบเขตการทำงานอุปกรณ์ป้องกัน ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ผิดพลาด และอุปกรณ์ป้องกันทำงานเกินขอบเขต ซึ่งปัญหาเหล่านี้มีวิธีการแก้ด้วยการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันตรวจสอบขนาดกระแสลัดวงจร เพื่อให้มีลำดับการทำงานที่สอดคล้องและทำงานภายใต้ขอบเขตที่เหมาะสมหรือไม่ก็ต้องตั้งค่าให้ระบบไฟฟ้าตัดทุ้งก้งหันลมออกจากระบบก่อนเพื่อไม่ให้รบกวนการทำงานของระบบไฟฟ้า

2. ปัญหาการควบคุมแรงดัน สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อทุ้งก้งหันลมทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อควบคุมแรงดันให้มีความเหมาะสม โดยแบ่งเป็น

- หม้อแปลงปรับค่าแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันที่สถานีไฟฟ้าหรือต้นสายไฟฟ้า
- อุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดันใช้ควบคุมระดับแรงดัน ณ ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์
- อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เช่นตัวเก็บประจุหรืออุปกรณ์ชดเชย เช่น

อุปกรณ์ FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้า

รีแอกทีฟในสายส่ง ทำให้มุมของกระแสและแรงดันใกล้เคียงกัน (ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียง 1) แรงดันจึงยกสูงขึ้น

3. ปัญหาภาวะโหลดเกินขีดจำกัดของสายส่งไฟฟ้า เป็นการป้องกันผลกระทบปริมาณภาวะโหลดในสายส่ง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นทั้งในสภาวะปกติและสภาวะฉุกเฉินที่เรียกว่า N-1 โดยวิธีการพื้นฐานในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การสร้างสายส่งไฟฟ้าเพิ่มเติมเพื่อเชื่อมโยงไปยังพื้นที่ที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้า หรือขยายขนาดการรองรับกำลังไฟฟ้าด้วยการสร้างระบบส่งไฟฟ้าเพิ่มเติมจากสถานีไฟฟ้าเดิม ทั้งนี้ขนาดหม้อแปลงของสถานีไฟฟ้าจะต้องมีความสามารถรองรับการเชื่อมต่อทุ่งกั้ห้ล้มด้วยเช่นกัน

4. ปัญหาฮาร์มอนิก โดยทั่วไปหากเลือกใช้งานกั้ห้ล้มที่มีอินเวอร์เตอร์เชื่อมกับระบบไฟฟ้า ควรจะเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ประเภท IGBT เนื่องจากช่วยลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกให้น้อยลงเมื่อเทียบกับการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิดอื่น นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนการวางตำแหน่งทุ่งกั้ห้ล้ม จะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิกที่แตกต่างกันดังที่ได้แสดงผลการจำลองการทำงานในบทที่ 6 อย่่างไรก็ตามหากทำวิธีการดังกล่าวแล้วยังไม่ได้ผลวิธีการแก้ปัญหาซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนคือ การติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก หากบริเวณติดตั้งทุ่งกั้ห้ล้มดังกล่าวมีความถี่สูงมากพอกับการลงทุน โดยวิธีแก้ปัญหาคือการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกในกั้ห้ล้มทุกตัว ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกที่จุดเชื่อมต่อ

เพราะฉะนั้นด้วยหลักการแก้ปัญหาเชิงเทคนิคที่กล่าวมาซึ่งเป็นวิธีการเบื้องต้นเพื่อป้องกันปัญหาเชิงเทคนิคของระบบไฟฟ้าเมื่อต้องการเชื่อมต่อทุ่งกั้ห้ล้มและให้การทำงานของระบบไฟฟ้ายังคงดำเนินอย่างต่อเนื่อง ไม่เกิดปัญหาการส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟหรือเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้ไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ซึ่งจะสร้างความเสียหายต่อทั้งทรัพย์สินและการดำเนินชีวิตประจำวัน อีกทั้งการแก้ปัญหาดังกล่าวยังเป็นการเพิ่มโอกาสและความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไปและก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน

## บทที่ 8

### บทสรุป

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเงื่อนไข ปัจจัยและวิธีการเลือกจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้แก่ กังหันลม SPP 1, SPP 2 และ SPP 3 บริเวณเกาะเต่าและเกาะพะงันที่มีกำลังผลิตติดตั้งรวม 720 MW โดยการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถรองรับกังหันลมดังกล่าวโดยใช้หลักเกณฑ์ของปริมาณโหลดหม้อแปลงและระยะห่างระหว่างกังหันลมและจุดเชื่อมต่อ ผลการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ประกอบด้วย จุดเชื่อมต่อ KMA และ KMB ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นที่ของเกาะสมุย และจุดเชื่อมต่อ KCD ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นที่อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี และเมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นของจำนวนกังหันลมและจุดเชื่อมต่อจะได้รูปแบบการเชื่อมต่อที่เป็นไปได้ทั้งหมด 18 กรณี โดยขั้นตอนสำคัญก่อนจะเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้า คือการตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์เชิงเทคนิค แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ประกอบด้วย การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงแรงดัน เสถียรภาพแรงดัน และกระแสลัดวงจร 2) การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต ประกอบด้วย กังหันลมหลุดการเชื่อมต่อ สายส่งหลุดการเชื่อมต่อ การลัดวงจร 3 เฟสที่บัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม 3) การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าไม่สามารถรองรับปริมาณกำลังผลิตทั้ง 720 MW ได้ เนื่องจากเกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าย้อนกลับเข้าสู่สถานีต้นทางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นข้อกำหนดของการไฟฟ้าที่ไม่สามารถให้เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดกำลังผลิตติดตั้งลงเพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า พบว่ากำลังผลิตร้อยละ 60 หรือ 432 MW มีความเหมาะสมกับการเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้า แต่มีเพียง 4 กรณีเท่านั้นที่เป็นได้ ดังนั้นจึงนำทั้ง 4 กรณีที่ได้มาวิเคราะห์ผลกระทบการเชื่อมต่อด้วยเทคนิคอื่นๆ จากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเทคนิคทั้งหมดมาคัดเลือกรูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุดโดยการพิจารณาจากหลักเกณฑ์ของข้อกำหนดการเชื่อมต่อ การปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมทั้ง 4 กรณีพบว่าสามารถผ่านข้อกำหนดของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว คือ ปริมาณภาระโหลดเกินในสายส่งไม่เกิน 80% การเปลี่ยนแปลงแรงดันของจุดเชื่อมต่อยังคงอยู่ภายในได้ ( $\pm 5\%$ ) อีกทั้งจุดเชื่อมต่อยังมี



เสถียรภาพแรงดันที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นการลดโอกาสเกิดการพังทลายของแรงดันที่จะส่งผลต่อการเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ยิ่งไปกว่านั้นระดับกระแสลัดวงจรยังคงมีค่าต่ำกว่า 85% ของพิกัดตัดกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์และมีค่าต่ำกว่า 25% เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์หมนั้นหมายถึงอุปกรณ์ป้องกันยังคงทำงานประสานสัมพันธ์กันได้อย่างถูกต้อง

ในส่วนการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะพลวัตทั้ง 4 กรณีพบว่าการปลดทุ้งกัณฑ์หมไม่ว่าจะปลดจากตำแหน่งบัสรวมของทุ้งกัณฑ์หมหรือสายเคเบิลได้น้ำก็ไม่ส่งผลกระทบใดๆ ต่อการส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ สำหรับการเกิดลัดวงจร 3 เฟส ณ ตำแหน่งบัสรวมของทุ้งกัณฑ์หม พบว่าระยะเวลาในการปลดทุ้งกัณฑ์หมต้องถูกตั้งไว้ที่ค่ามากที่สุดนั่นคือ 2.0 วินาที เนื่องจากความสามารถทนความผิดพลาดและช่วยการทำงานของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพลาด ซึ่งเป็นการลดโอกาสการเกิดความเสียหายจากความผิดพลาดของระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ทุ้งกัณฑ์หมชนิดคอนเวอร์เตอร์เต็มรูปแบบยังมีความสามารถทนการลดลงของแรงดันเป็นศูนย์ได้ถึง 0.5 ถึง 5.0 วินาที ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดการไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถลดความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเพิ่มขึ้นหรือลดอย่างทันทีทันใดยังแสดงให้เห็นว่าไม่ส่งผลกระทบใดๆ ต่อการทำงานของระบบไฟฟ้า นั่นคือระบบไฟฟ้ายังคงทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ถึงแม้จะเกิดการเปลี่ยนความเร็วลมอย่างฉับพลันทันทีทันใด

สุดท้ายผลการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า โดยการศึกษาโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจากการเปลี่ยนแปลงการจัดวางตำแหน่งภายในทุ้งกัณฑ์หม เพื่อประเมินความถี่เรโซแนนซ์ที่จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า พบว่าความยาวของสายส่งที่เพิ่มขึ้นและปริมาณหม้อแปลงของทุ้งกัณฑ์หมที่เพิ่มตามจำนวนการติดตั้งทุ้งกัณฑ์หมจะส่งผลให้ค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์หรือจุดที่เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจะมีค่าต่ำลง หมายถึงโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกจะเกิดที่อันดับหรือความถี่ที่ต่ำลง

เพราะฉะนั้นผลการประเมินด้วยข้อกำหนดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า พบว่าทั้ง 4 กรณีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือสามารถผ่านข้อกำหนดการเชื่อมต่อและไม่จำเป็นต้องปรับปรุงหรือติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มเติม ดังนั้นเกณฑ์การพิจารณาสุดท้ายที่จะใช้เลือกรูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมคือการพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ผลปรากฏว่ารูปแบบการเชื่อมต่อกรณีที่ 2 มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดถึงแม้ในสภาวะโหลดต่ำสุดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากหากเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเชื่อมต่อ แต่ก็เพิ่มน้อยที่สุดหากเทียบกับกรณีอื่นๆ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยการปลดการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์หมทั้งหมดออกจากระบบไฟฟ้า เนื่องจากในสภาวะโหลดดังกล่าวกำลังไฟฟ้าสูญเสียยังคงเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่มีการเชื่อมต่อ หากมีการเชื่อมต่อทุ้งกัณฑ์หมเข้ากับระบบไฟฟ้า

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์เชิงเทคนิคทั้งหมดทำให้สามารถเลือกรูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้แก่รูปแบบการเชื่อมต่อกรณีที่ 2 ซึ่งมีรูปแบบการเชื่อมต่อดังนี้ จุดเชื่อมต่อ KMA เชื่อมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 1 จุดเชื่อมต่อ KMB เชื่อมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 3 และจุดเชื่อมต่อ KCD เชื่อมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่ง SPP 2 โดยกังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยพิจารณาจากค่าตัวประกอบกำลังผลิต SPP 1 เท่ากับ 19.44 MW SPP 2 เท่ากับ 24.30 MW และ SPP 3 เท่ากับ 24.30 MW ผลการจำลองดังกล่าวที่ได้ทางผู้วิจัยหวังว่า จะสามารถใช้เป็นแนวทางอ้างอิงในการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมนอกชายฝั่งในอนาคตต่อไป

## 8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ข้อมูลของระบบไฟฟ้าได้รวบรวมองค์ประกอบต่างๆ ที่ต่อจากจุดเชื่อมต่อเป็นโหนดทั้งหมด ดังนั้นการจำลองเชิงเทคนิคบางอย่างจึงถูกจำกัดและไม่สามารถพิจารณาได้อย่างครอบคลุม ควรจะแก้ไขด้วยการแยกส่วนประกอบต่างๆ ของระบบไฟฟ้าออกมาอย่างชัดเจน เพื่อการจำลองที่หลากหลายแง่มุมมากขึ้น

2. การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นเพียงการประเมินโอกาสเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิก โดยยังไม่ได้พิจารณาค่าความผิดเพี้ยนกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ เนื่องจากไม่มีข้อมูลจริงที่คอนเวอร์เตอร์กังหันลมจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้า เพราะฉะนั้นหากมีข้อมูลดังกล่าว ควรจะทำการวิเคราะห์ในส่วนนี้เพิ่มเติม

## 8.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

1. ถึงแม้งานวิจัยนี้จะจำลองผลกระทบเชิงเทคนิคไฟฟ้าอย่างมากมาย แต่ก็ยังมีบางเทคนิคที่ยังไม่ได้พิจารณา โดยเฉพาะการพิจารณาผลกระทบทางคุณภาพไฟฟ้าโดยการพิจารณาผลกระทบของแรงดันกระแสเฟรมหรือไฟกระพริบ ดังนั้นหากมีข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์เชิงเทคนิคดังกล่าวได้ควรจะพิจารณาส่วนนี้เพิ่มเติม

2. อย่างที่ได้กล่าวไว้ว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมจะขึ้นอยู่กับปริมาณลม เพราะฉะนั้นปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จึงมีความไม่แน่นอน ดังนั้นหากมีการศึกษาเพิ่มเติมการเพิ่มอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าอย่างเช่นแบตเตอรี่เก็บพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] T. Sutabutr, Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021, *International Journal of Renewable Energy*; January-June 2012.
- [2] Global Wind Energy Council, “Global Wind Report Annual Market Update 2015,” 2015.
- [3] “The Big Challenges Wind Energy in Thailand,” MEGA Tech Magazine, pp. 70-72, March-April 2013.
- [4] จอมภพ แววศักดิ์, กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์, พยอม รัตนมณี, ธเนศ ไชยชนะ และฉลอง แก้วประเสริฐ, “การประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลและความเป็นไปได้เบื้องต้น,” รายงานฉบับสมบูรณ์, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรกฎาคม 2556.
- [5] T. R. Ayodele, A. Jimoh, J. L. Munda, and A. J. Tehile, “Challenges of Grid Integration of Wind Power on Power System Grid Integrity: A Review,” *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol.2, no 4, pp. 618–626, 2012.
- [6] A. Sudrià, M. Chindris, A. Sumper, G. Gross, and F. Ferrer, “Wind Turbine Operation in Power Systems and Grid Connection Requirements,” in *Proceedings of the ICREPQ'05*, 2005.
- [7] R. D. Zamora, M. A. Rosado, “Stability Analysis of Wind Energy Generation in the Electrical System of Puerto Rico,” in *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ' 14)*, 2014.
- [8] K. Bhumkittipich, C. Jan-Ngurn, “Study of Voltage Stability for 22 kV Power System Connected with Lamtakhong Wind Power Plant, Thailand,” *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 951-963, 2013.
- [9] D. Andersson, A. Petersson, E. Agneholm, and D. Karlsson, “Kriegers Flak 640 MW Off-Shore Wind Power Grid Connection-A Real Project Case Study,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 79-85, 2007.
- [10] Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, C.-J. Chou, and W.-M. Liao, “Choice of Interconnected Points for Large-Scale Offshore Wind Farms in Taiwan,” in *Proceedings of the 2013 CACS International Automatic Control Conference (CACS)*, pp. 439–444, 2013.
- [11] Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, and G.-H. Shu, “Taiwan’s First Large-Scale Offshore Wind Farm Connection-A Real Project Case Study with a Comparison of Wind Turbine,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1461–1469, 2011.

- [12] Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, H.-Y. Chao, and M.-J. Chang, "System Impact Study for the Future Large-Scale Offshore Wind Farm around Penghu Archipelago," in *Proceedings of the 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1–8, 2010.
- [13] Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, C.-R. Chen, and S.-H. Tsai, "Onshore Wind Farm Planning and System Simulation Analysis under Low-Carbon-Island Project at Penghu," in *Proceedings of the International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, pp. 1-7, 2011.
- [14] Y.-K. Wu, G.-Y. Han, C.-Y. Lee, Planning 10 Onshore Wind Farms with Corresponding Interconnection Network and Power System Analysis for Low-Carbon-Island Development on Penghu Island, Taiwan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 531-540, 2013.
- [15] N. T. Linh and T. T. Chuong, "Voltage Stability Analysis of Grids Connected wind Generators," in *Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, (ICIEA)*, pp. 2657-2660, 2009.
- [16] S. M. Said, M. M. Aly, and M. Abdek-Akher, "Capacity and Location Effects of Wind Turbine Energy Systems on Power Systems Stability," *International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE)*, vol 4, pp. 343-347, 2013.
- [17] Vestas, "V112-3.0 MW Offshore," 2011.
- [18] ไพรัช กิจวรารุช และ หรรษา. วัฒนานุกิจ, "พลังงานลม: เทคโนโลยีจากอดีตสู่ปัจจุบันและอนาคต," วิศวกรรมสาร, หน้า. 75-84, มกราคม-กุมภาพันธ์ 2553.
- [19] สุรชัย ชัยทัศนีย์, "ตำราวิศวกรรม 100 ปี พลังงานหมุนเวียนและการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว", กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [20] จอมภพ แวศักดิ์, ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล, กุศุมาลย์ เฉลิมขานนท์, ชูสิทธิ์. คงเรือง, สุรัสวดี กุลบุญ ก่อแก้ว, จตุพร แก้วอ่อน, อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์, พยอม รัตนมณี, ชเนศ ไชยชนะ, กมล ถิ่นสุราษฎร์, สวัสดิ์ สมัครพงศ์, ชนะ จันทรน้ำ และ ปราณี หนูทองแก้ว, "การศึกษาความเหมาะสมโครงการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมในพื้นที่ภาคใต้," รายงานความเหมาะสมฉบับกลาง เล่ม 1, ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ, พฤศจิกายน 2556.
- [21] H. Li and Z. Chen, "Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons", in *Proceedings of the IET Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 123-138, 2008.

- [22] จอมภพ แววศักดิ์, ชูสิทธิ์รัตน์. คงเรือง, ยุทธนา ภูริระวณิชชย์กุล, สุภวรรณ ภูริระวณิชชย์กุล, นิรันดร มาแทน, เซาวรัตน์ พรหมแพทย์ และ อภิชาติ หนูทอง, “การศึกษาความเป็นไปได้ของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย,” รายงานฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- [23] P. Bresesti, W. L. Kling, R. L. Hendriks, and R. Vailati, “HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 37–43 2007.
- [24] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. P. Guisado, M. A. M. Prats, J. I. Leon, and N. Moreno-Alfonso, “Power Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey,” *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [25] I. Erlich, F. Shewarega, C. Feltes, F. W. Koch, and J. Fortmann, “Offshore Wind Power Generation Technologies,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 4, pp. 891–905, 2013.
- [26] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, “Optimal Control of Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 787–794, Sep. 2010.
- [27] V. Y. Singarao, S. Nimmagadda, and V. Rao, “Economic Comparison of Deloaded-Wind and Wind-Battery Systems,” in *Proceedings of the 2014 Sixth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pp. 126–131, 2014.
- [28] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551,” 2551.
- [29] C.W. Taylor, *Power System Voltage Stability*. McGraw-Hill, 1994.
- [30] F. Milano, “An Open Source Power System Analysis Toolbox,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1199–1206, 2005.
- [31] บริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด, บริษัท จีไอเอส ดาต้า จำกัด และ บริษัท คอนโทรล ดาต้า (ประเทศไทย) จำกัด, “คู่มือการฝึกอบรมโปรแกรมประยุกต์ Network Analysis and Power Flow Modeling (Training Manual) โครงการพัฒนาสารสนเทศระบบไฟฟ้าทางภูมิศาสตร์ ระยะที่ 2 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค,” พฤษภาคม 2552.
- [32] H. Saadat, “Power System Analysis,” McGraw-Hill, Second Edition, 2002.

- [33] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons Inc., Second Edition, 1996.
- [34] D. Peppas, "Development and Analysis of Nordic32 Power System Model in PowerFactory," Master Thesis, Stockholm, 2008.
- [35] H. Marefatjou and I. Soltani, "Continuation Power Flow Method with Improved Voltage Stability Analysis in Two Area Power System," *International Journal of Electrical Energy*, vol.1, no.1, pp. 1158-1161, March 2013.
- [36] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, "การป้องกันระบบไฟฟ้า", กรุงเทพฯ: จี.บี.พี เซ็นเตอร์ จำกัด, 2551.
- [37] DIgSILENT GmbH, "What's New in PowerFactory Version 14.1," Germany, June 2011.
- [38] R. J. Nelson, "Short-Circuit Contributions of Full Converter Wind Turbines," in *Proceedings of the 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2012.
- [39] J. Ahnlund, "Short-Circuit Contributions from Fully-rated Converter Wind Turbines," Master Thesis, Stockholm, Sweden, 2014.
- [40] M. Pöller, "Modelling of Wind Generation for Fault Level Studies," Frankfurt, 2011.
- [41] DIgSILENT GmbH, "DIgSILENT PowerFactory Version 14.1 User's Manual," Gomarigen, Germany.
- [42] A. Hansen, F. Iov, P. Sørensen, N. Cutululis, C. Jauch, and F. Blaabjerg, "Dynamic Wind Turbine Models in Power System Simulation Tool DIgSILENT," Risø-R-1400 (ed.2)(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, pp. 1-190, 2007.
- [43] A. Hansen, N. Cutululis, H. Markou P. Sørensen, and F. Iov, "Grid Fault and Design-Basis for Wind Turbines-Final Report," Risø -R-1714(EN), Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, 2010.
- [44] S. Uski-Joutsenvuo and S. Niskanen, "Wind Turbine Models-Status Report of Model Development and Verification Measurements," Technical Research Centre of Finland, VTT.2012.
- [45] DIgSILENT GmbH, "Dynamic Simulation with PowerFactory," Germany.
- [46] A. Larsson, "The Power Quality of Wind Turbines", Ph.D. report, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2000.


- [47] M. Nandigam and S. K. Dhali, "Optimal Design of an Offshore Wind Farm Layout", in *Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 1470-1474, 2008.
- [48] M. Bradt, B. Badrzadeh, E. Camm, D. Mueller, J. Schoene, T. Siebert, T. Smith, M. Starke and R. Walling, "Harmonics and Resonance Issues in Wind Power Plants", in *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, pp. 1-8, 2011.
- [49] F. K. ARIYO and M. O. Omoigui, "Investigation of Nigerian 330 kV Electrical Network with Distributed Generation Penetration-Part I: Basic Analyses", in *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2013.
- [50] S. Ranade and W. Xu, "An Overview of Harmonics Modeling and Simulation", in *Proceedings of the Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation, IEEE Power and Energy Society*, pp. 1-7, 1998.

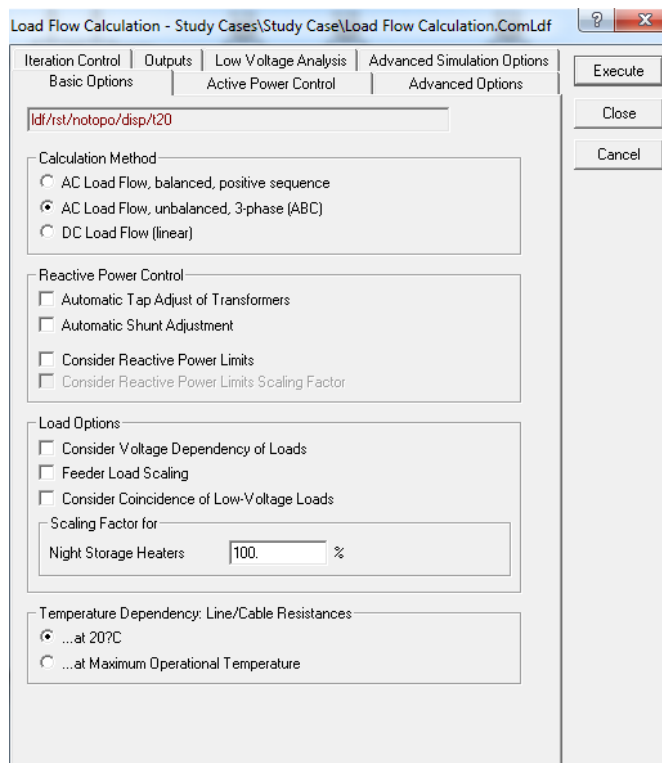
**ภาคผนวก**



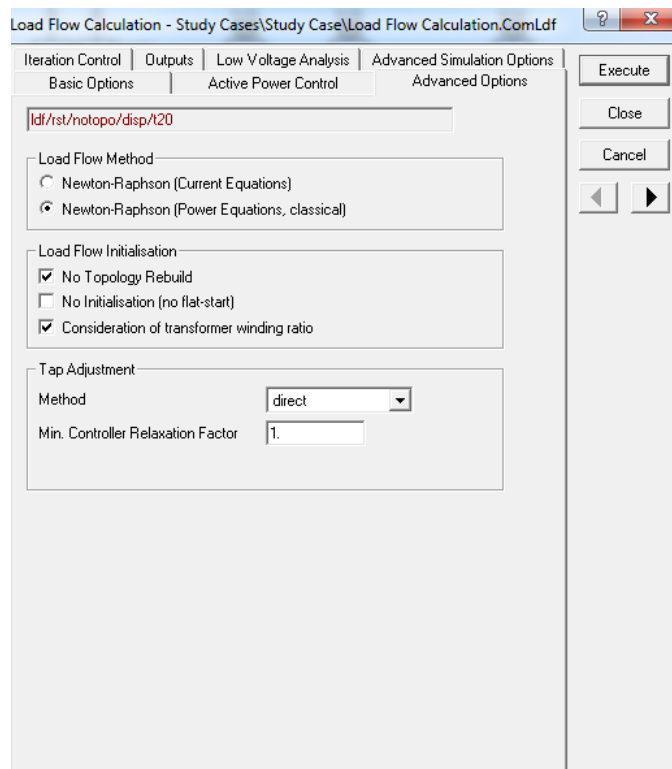
ภาคผนวก ก  
การตั้งค่าการจำลองการทำงาน

## การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

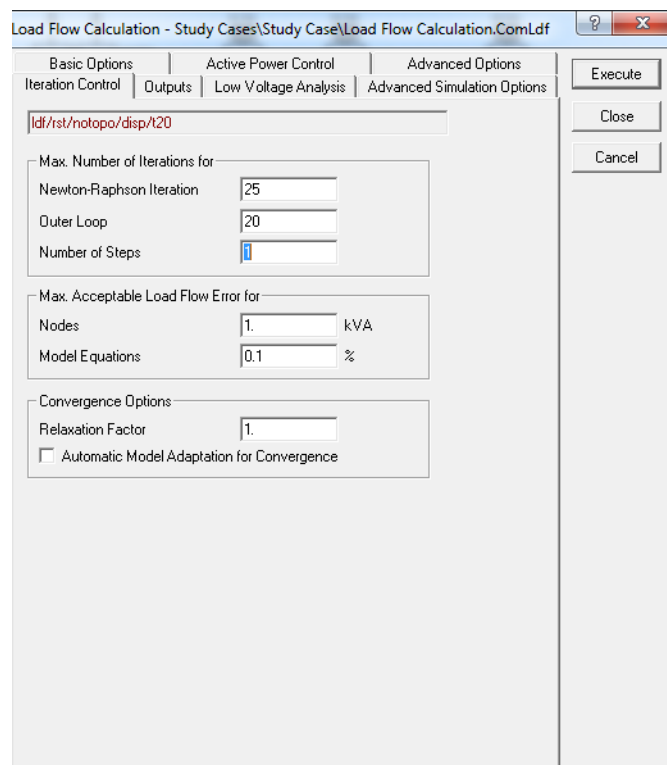
คลิกปุ่ม Calculate Load Flow  ปรากฏ Dialog Box ให้เลือกตั้งค่าพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าง่ายภาพประกอบ ก-1 ถึงภาพประกอบ ก-3 จากนั้นจึงคลิกปุ่ม Execute เพื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณตามที่ได้กำหนด



ภาพประกอบ ก-1 Dialog Box การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า หน้า Tab Basic Options




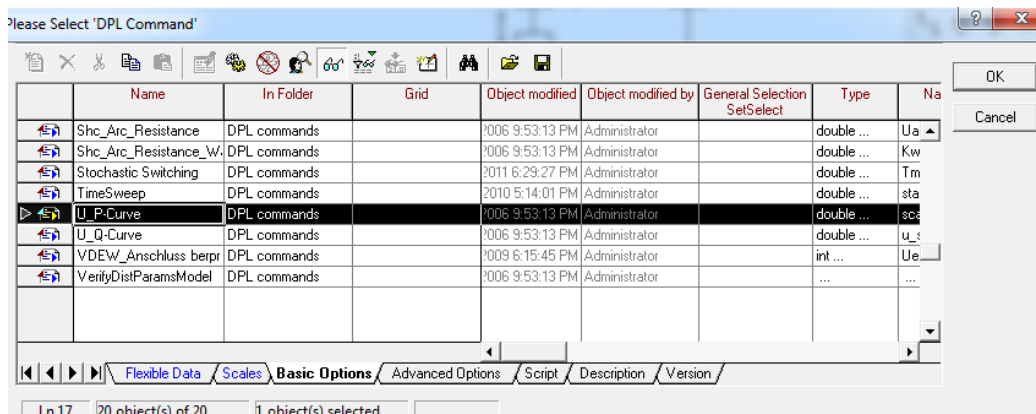
ภาพประกอบ ก-2 Dialog Box การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า หน้า Tab Advanced Options



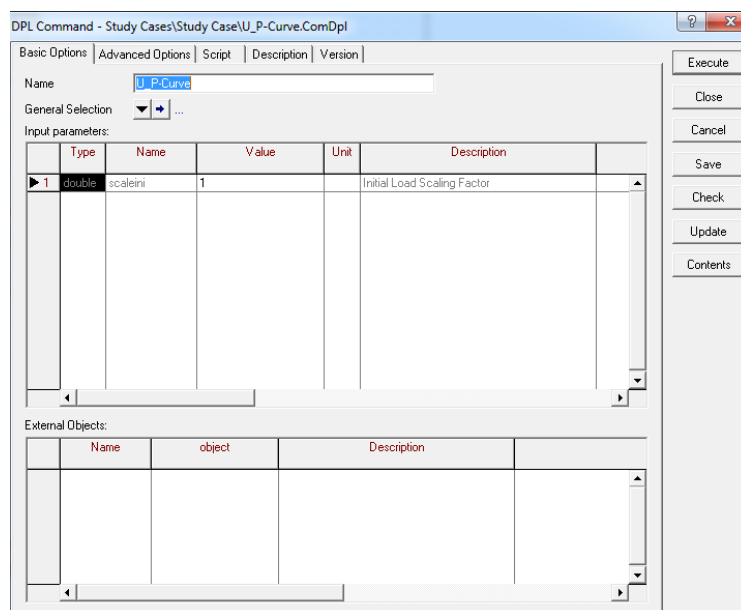
ภาพประกอบ ก-3 Dialog Box การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า หน้า Tab Iteration Control

### การคำนวณเสถียรภาพแรงดัน

คลิกปุ่ม Execute DPL Script Scripts  ปรากฏ Dialog Box การคำนวณเสถียรภาพแรงดันดังภาพประกอบ ก-4 จากนั้นจึงคลิกปุ่ม Execute เพื่อตั้งให้โปรแกรมทำงาน ดังภาพประกอบ ก-5




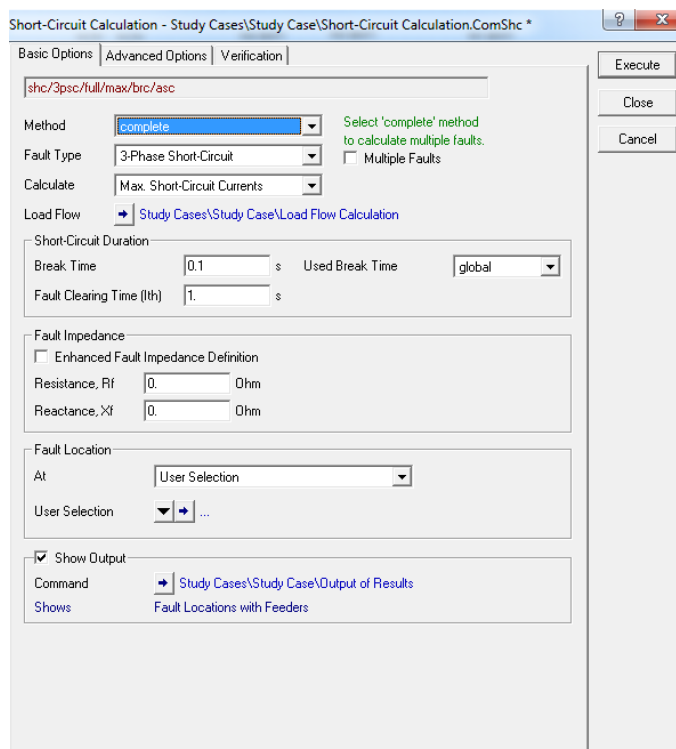
ภาพประกอบ ก-4 Dialog Box การคำนวณเสถียรภาพแรงดัน



ภาพประกอบ ก-5 Dialog Box การคำนวณเสถียรภาพแรงดัน หน้า Tab Basic Options





### การคำนวณกระแสลัดวงจร

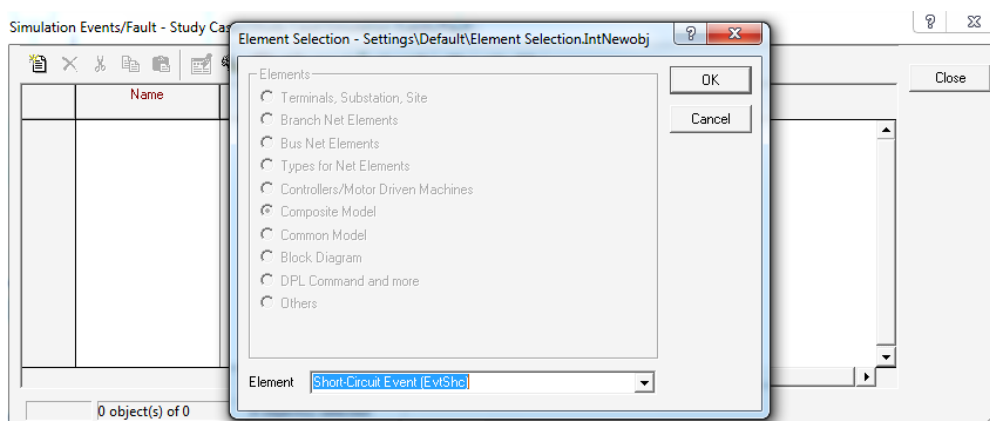
คลิกปุ่ม Calculate Short-Circuit  ปรากฏ Dialog box ให้เลือกตั้งค่าพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรดังภาพประกอบ ก-6 จากนั้นคลิกปุ่ม Execute เพื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณตามที่ได้กำหนด



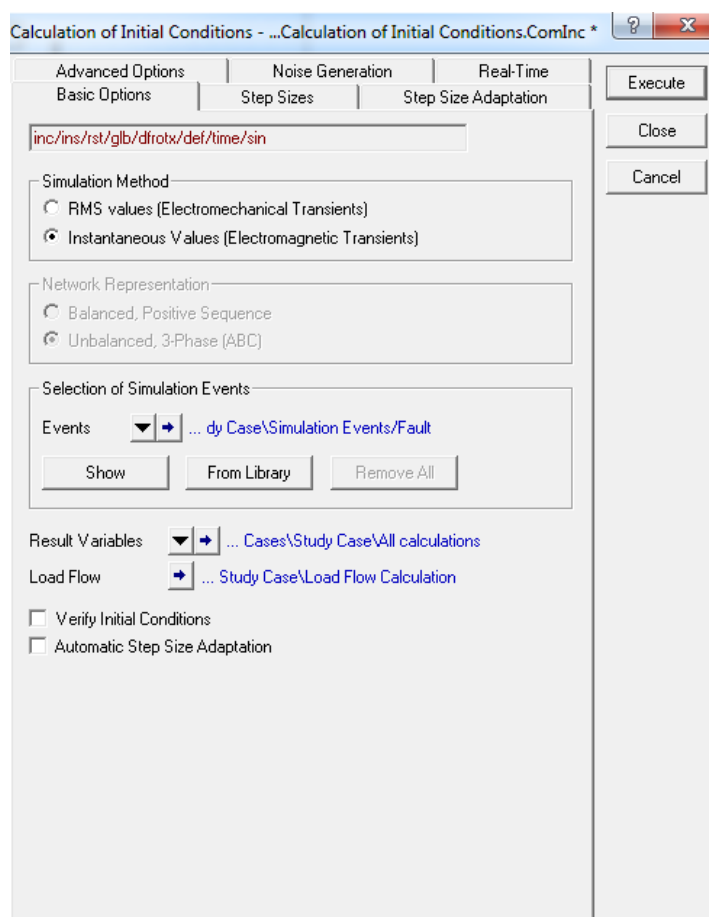
ภาพประกอบ ก-6 Dialog Box การคำนวณกระแสลัดวงจร หน้า Tab Basic Options

### การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าในสถานะพลวัต

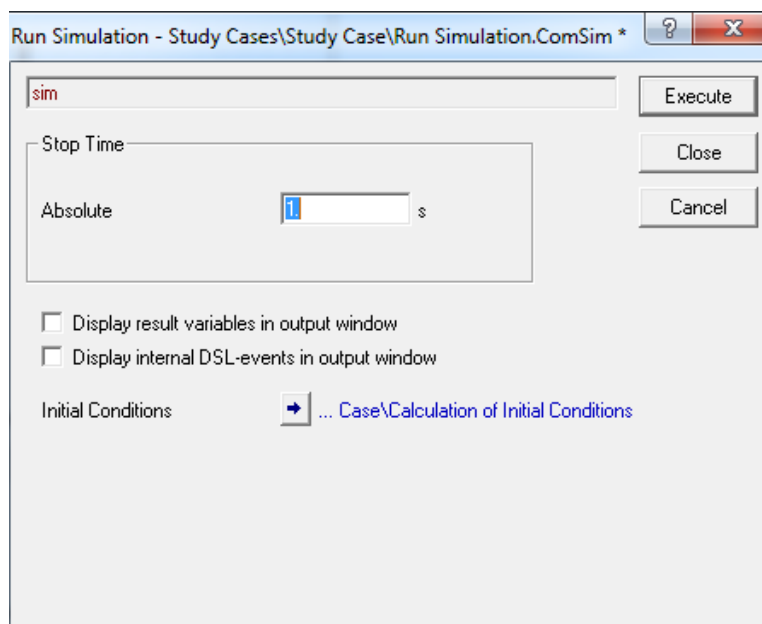
คลิกปุ่ม Select Toolbar  ปรากฏ Dialog Box สำหรับการวิเคราะห์ จากนั้นให้คลิกปุ่ม Edit Simulation Events  ปรากฏ Dialog Box ดังภาพประกอบ ก-7 ต่อด้วยการกำหนดเงื่อนไขการจำลองด้วยปุ่ม Calculate Initial Condition  ปรากฏเป็น Dialog Box ดังภาพประกอบ ก-8 สุดท้ายคลิกปุ่ม Start Simulation  จะปรากฏเป็น Dialog Box ดังภาพประกอบ ก-9 คลิกปุ่ม Execute เพื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณตามที่ได้กำหนด



ภาพประกอบ ก-7 คลิกปุ่ม Select Toolbar และเลือกสถานการณ์ที่ต้องการจำลองการทำงาน





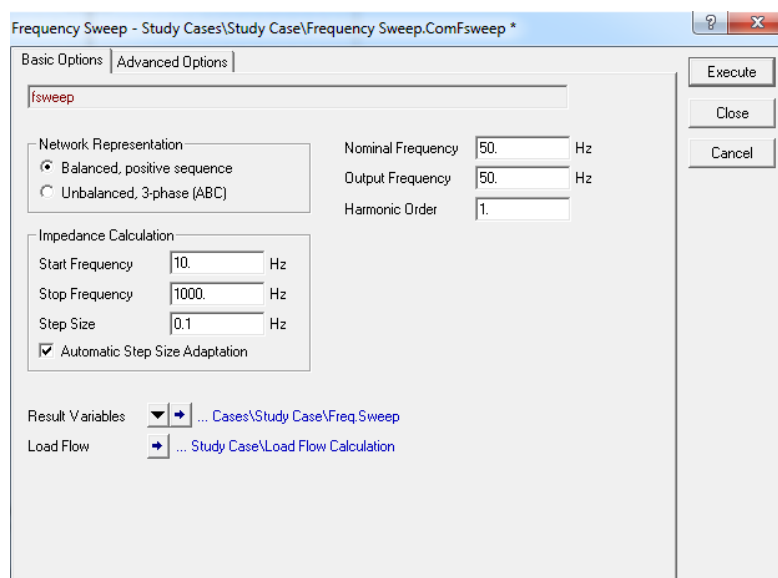
ภาพประกอบ ก-8 Dialog Box การจำลองการทำงานในสภาวะพลวัต หน้า Tab Basic Options



ภาพประกอบ ก-9 Dialog Box การจำลองการทำงานในสภาวะพลวัต หน้า Run Simulation

### การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

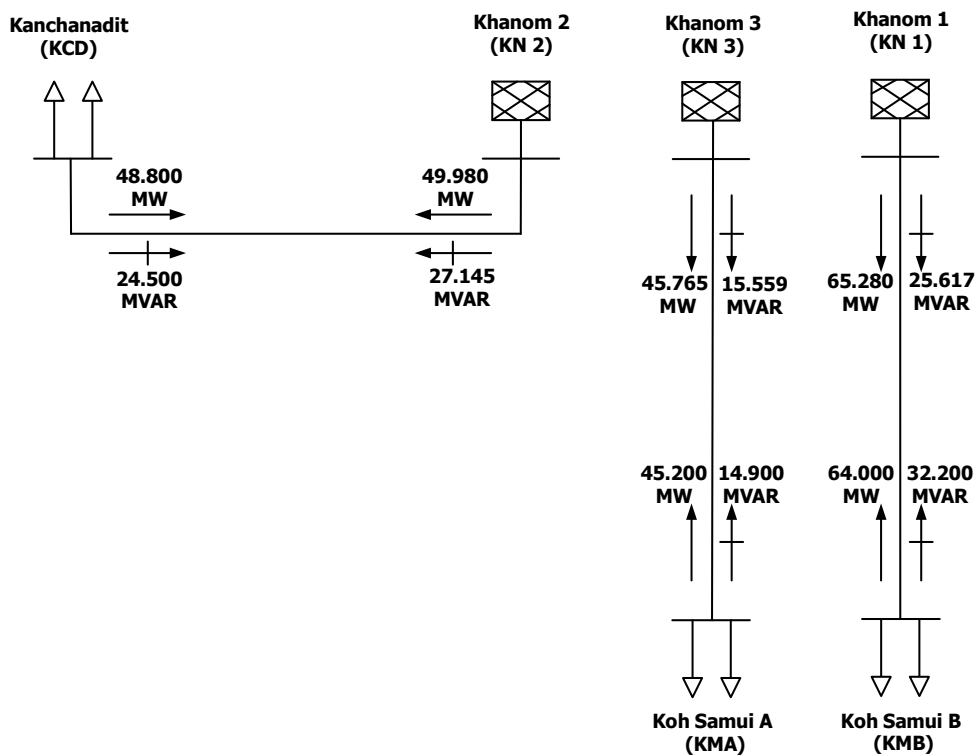
คลิกปุ่ม Select Toolbar  ปรากฏ Dialog Box สำหรับการวิเคราะห์ จากนั้นให้คลิกปุ่ม Calculate Impedance Frequency Characteristic  ปรากฏ Dialog Box ดังภาพประกอบ ก-10 คลิกปุ่ม Execute เพื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณตามที่ได้กำหนด



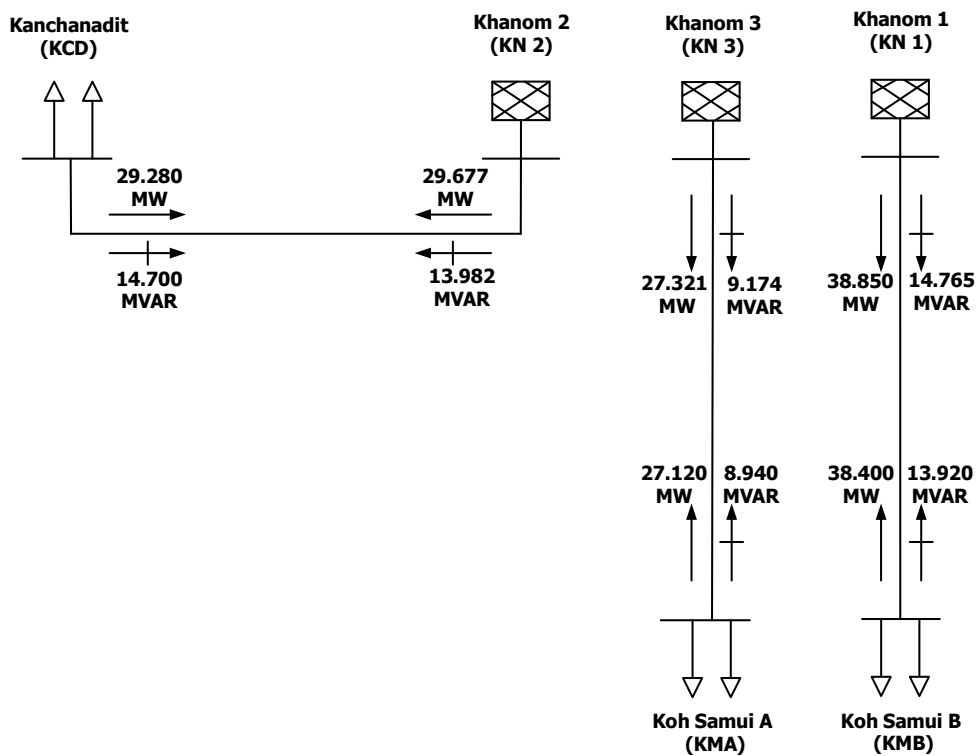
ภาพประกอบ ก-10 Dialog Box การสแกนความถี่ฮาร์มอนิก หน้า Tab Basic Options

**ภาคผนวก ข**  
**ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า**

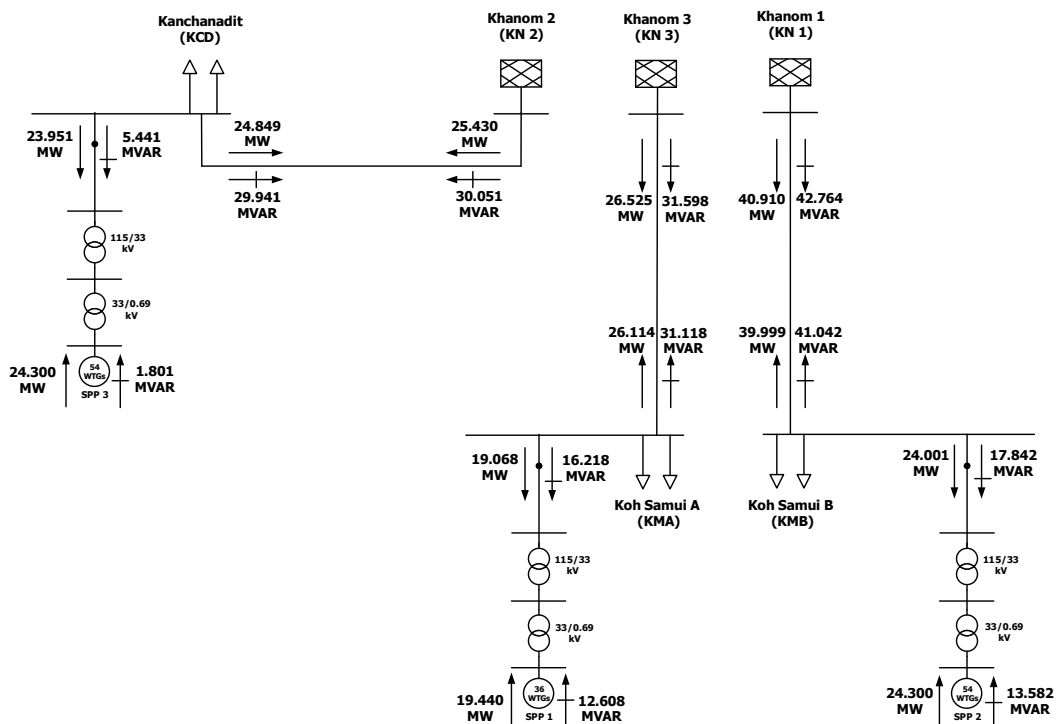




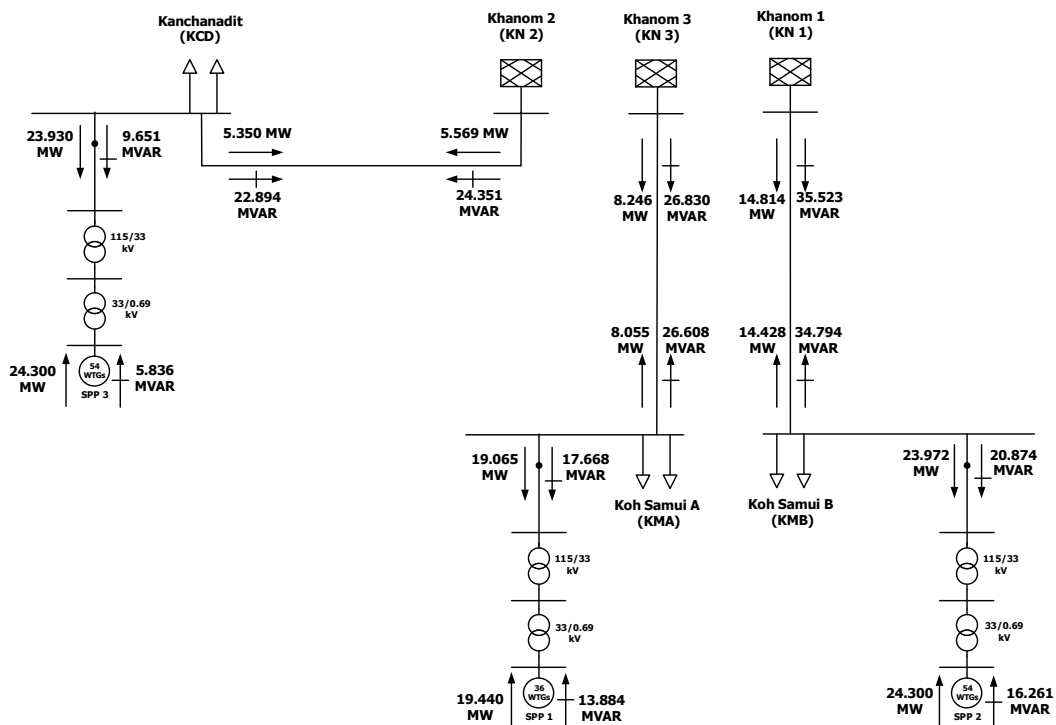
ภาพประกอบ ข-1 กรณีที่ 0 สภาวะโหลดสูงสุด



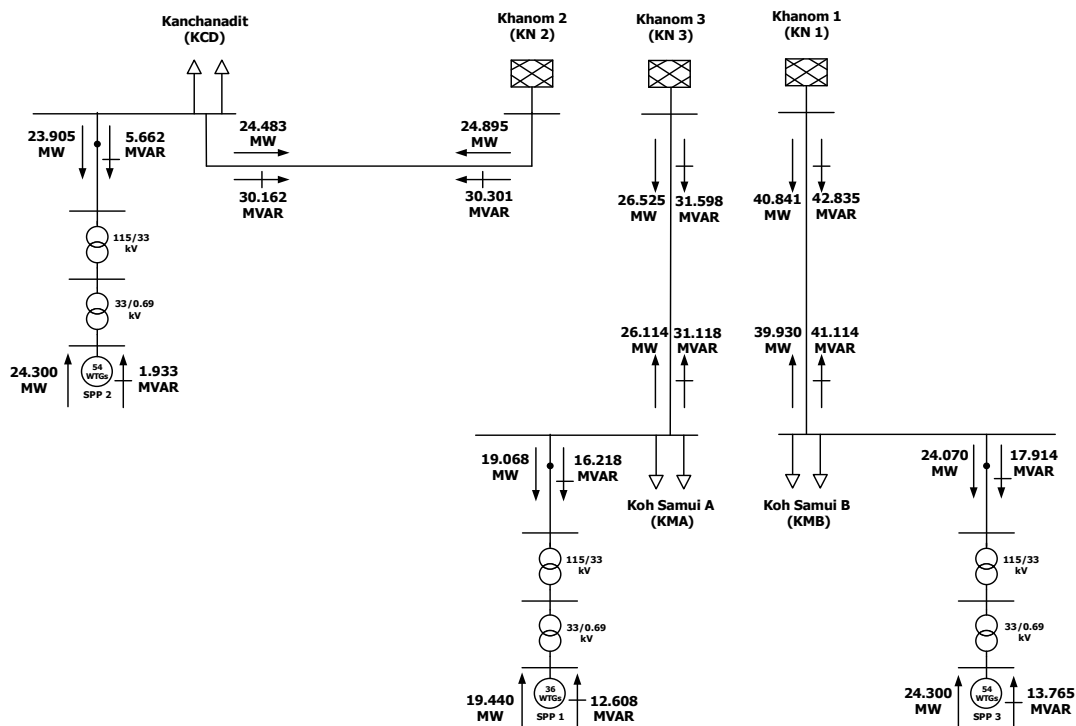
ภาพประกอบ ข-2 กรณีที่ 0 สภาวะโหลดต่ำสุด



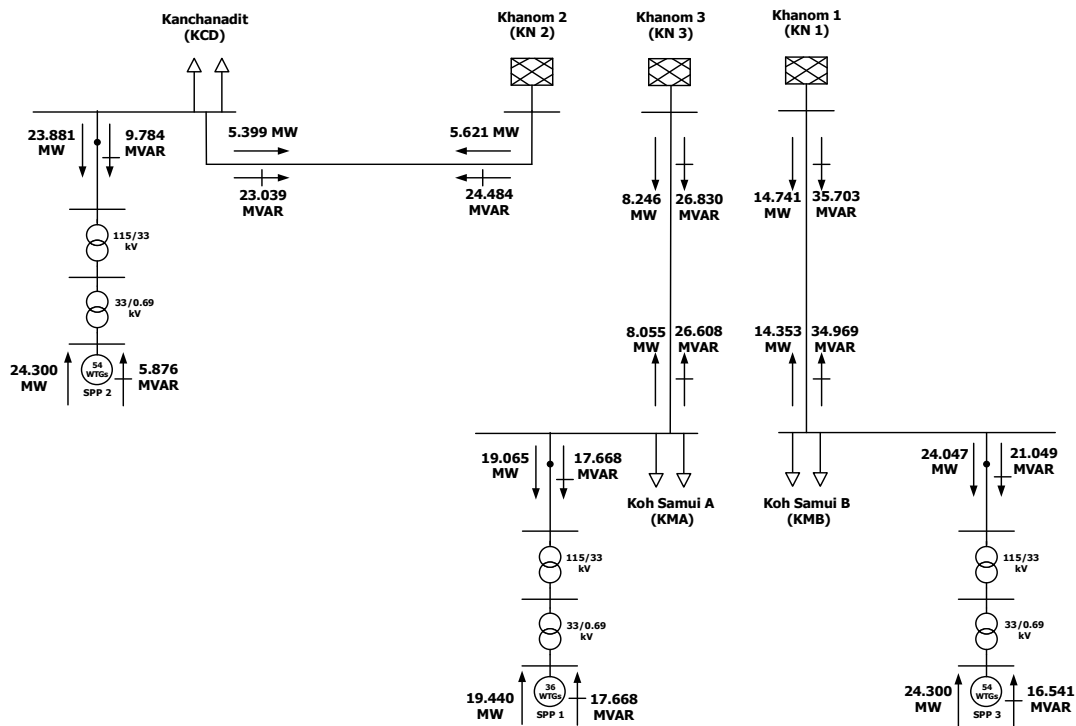
ภาพประกอบ ข-3 กรณีที่ 1 สภาวะโหลดสูงสุด



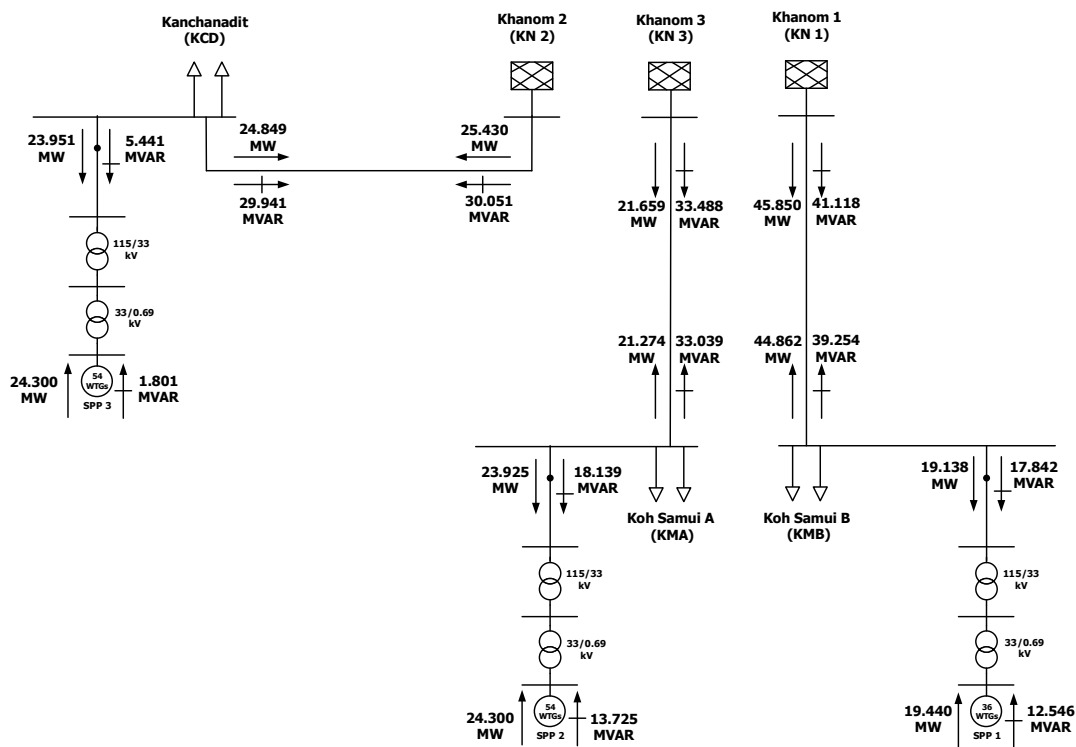
ภาพประกอบ ข-4 กรณีที่ 1 สภาวะโหลดต่ำสุด



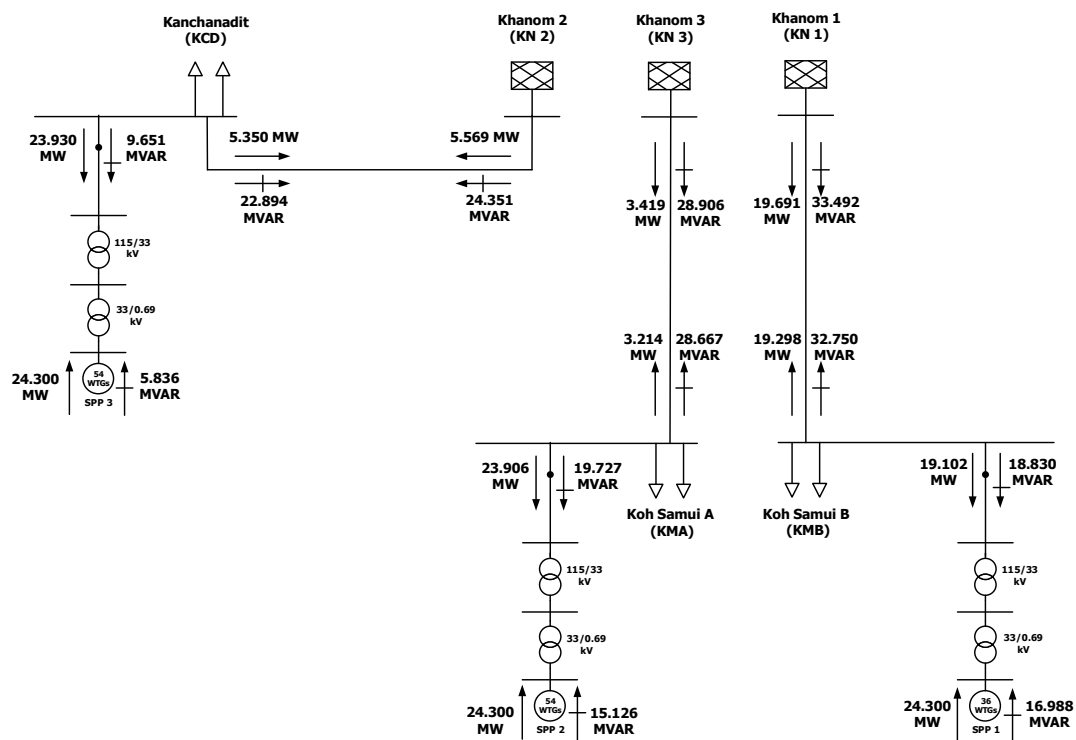
ภาพประกอบ ข-5 กรณีที่ 2 สภาวะ โหลดสูงสุด



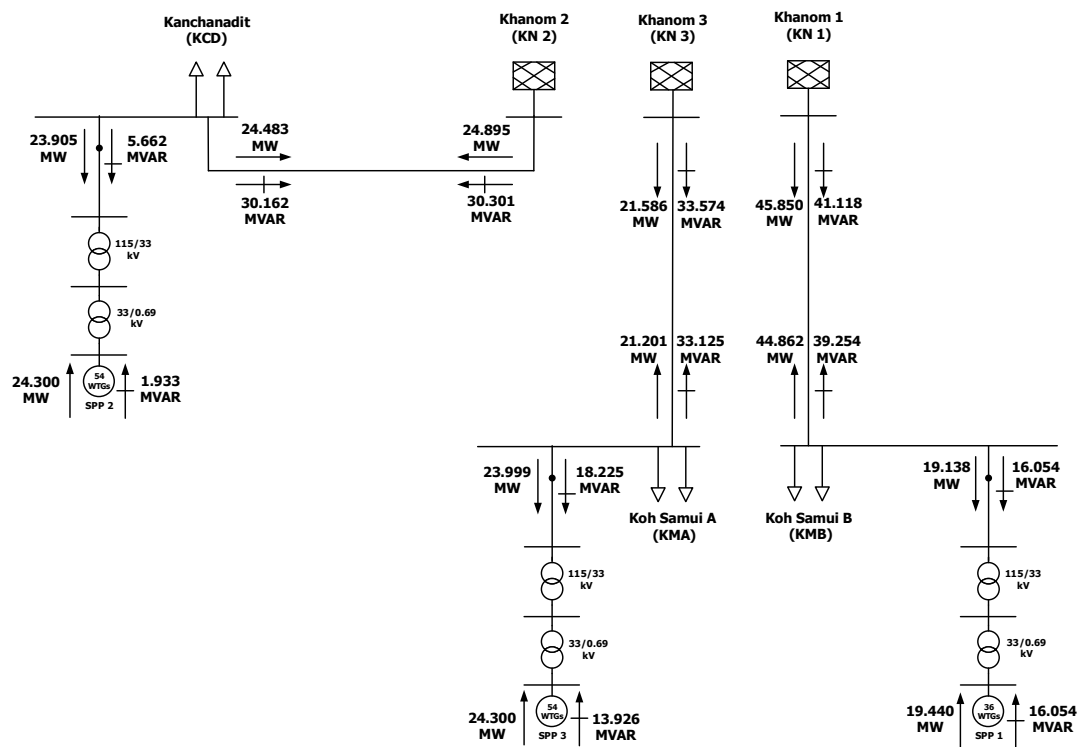
ภาพประกอบ ข-6 กรณีที่ 2 สภาวะ โหลดต่ำสุด



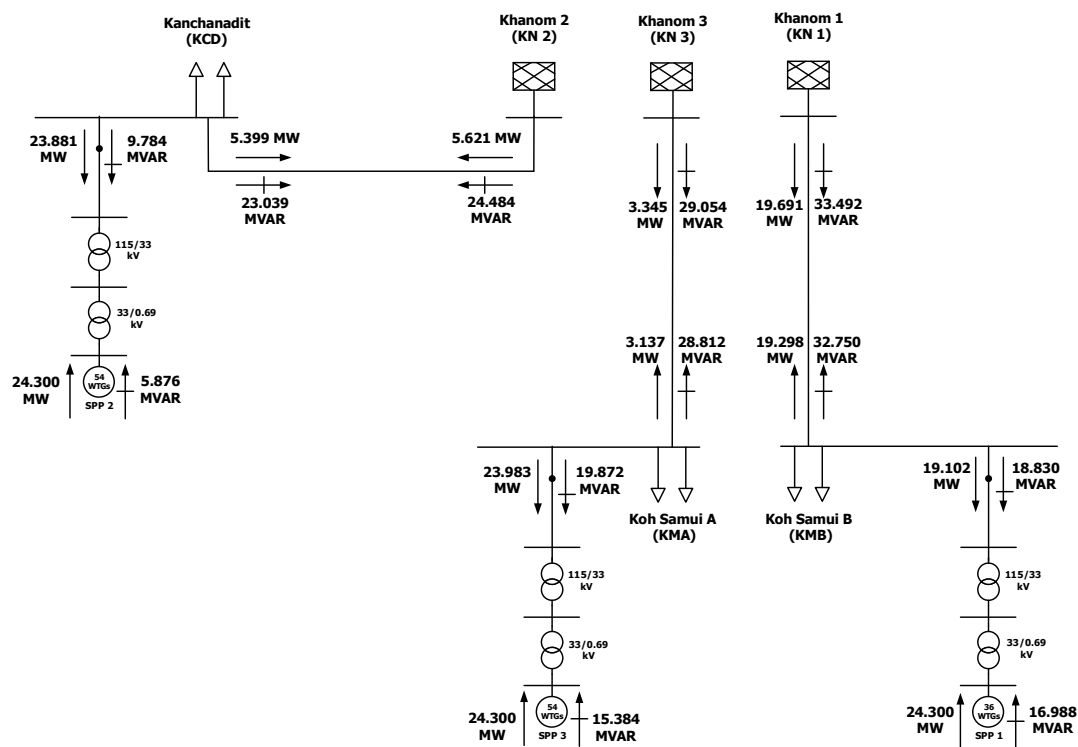
ภาพประกอบ ข-7 กรณีที่ 3 สภาวะโหลดสูงสุด



ภาพประกอบ ข-8 กรณีที่ 3 สภาวะโหลดต่ำสุด

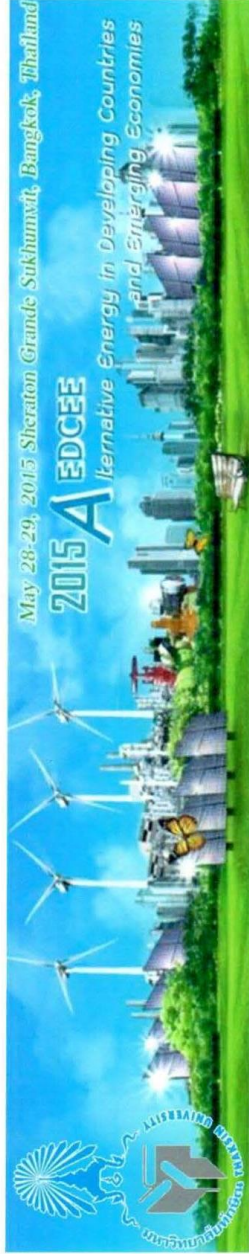


ภาพประกอบ ข-9 กรณีที่ 4 สภาวะโหลดสูงสุด



ภาพประกอบ ข-10 กรณีที่ 4 สภาวะโหลดต่ำสุด

**ภาคผนวก ค**  
**การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน**



## Certificate of Presentation

This is to certify that

**P. Ketsamee, K. Chalermyanont and A. Prasertsit**

have presented the paper

ANALYSIS OF SUITABLE INTERCONNECTION POINTS OF OFFSHORE WIND FARMS  
IN THE GULF OF THAILAND

during the 2015 International Conference on Alternative Energy  
in Developing Countries and Emerging Economies  
which was held 28-29 May 2015 in Bangkok, Thailand

Prof. Dr. Yves Gagnon  
Co-Chair  
University of Moncton, Canada

Asst. Prof. Dr. Pornpun Khemakunasai  
Co-Chair  
Thaksin University, Thailand

Asst. Prof. Dr. Sarapee Chairat  
Co-Chair  
Thaksin University, Thailand

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)**ScienceDirect**

Energy Procedia 79 (2015) 459 – 464

---



---

 Energy  
**Procedia**


---



---

2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and  
Emerging Economies

## Analysis of Suitable Interconnection Points of Offshore Wind Farms in the Gulf of Thailand

Phichet Ketsamee<sup>a\*</sup>, Kusumal Chalermmyanont<sup>a</sup>, Anuwat Prasertsit<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand*

---

### Abstract

The off coast of the Gulf of Thailand around Koh Tao and Koh Pha-Ngan has abundant wind resources, which can help for developing offshore wind farms with the maximum capacity of 720 MWs. In this paper, grid integration analysis of the offshore wind farms on the 115-kV transmission of Provincial Electricity Authority (PEA) was performed. The power system analysis of power flow and voltage stability were simulated with the full-power conversion wind turbine generators by using the DigSILENT PowerFactory program. The possible connected points were listed by the physical criteria, such as the amount of load, and a distance to an offshore wind farm. Finally, the suitable connected points were considered based on the performances of the system before and after offshore wind farm connections. The study results may be used as a reference to develop an offshore wind farm in the Gulf of Thailand in the future.

© 2015 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of 2015 AEDCEE

**Keywords:** the Gulf of Thailand, offshore wind farm, power flow, voltage stability, full-power conversion wind turbine generator

---

### 1. Introduction

Currently, electricity power consumption is increasing due to the growths of industries and households while generation system mostly depends on fossil fuels, such as oil, natural gas, and coal. According to a shortage of these fossil fuels, the fuel prices significantly rise. At the same time, the effects of the fossil fuels on the environment are seriously concerning because of the global warming. The interest on the renewable energy is highly increasing worldwide. In Thailand, the Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021 [2] focuses on electricity generation from renewable energies, such

---

\* Corresponding author. Tel.: +66-74-558831; fax: +66-744-59395.  
E-mail address: [phichet.kt@gmail.com](mailto:phichet.kt@gmail.com).



as wind, solar, water, biomass, biogas, and garbage. Especially, the wind energy was targeted to be contributing about 1200 MWs in 2021 [2]. According to the terrain of Thailand, the offshore wind energy was considered as an energy source with a high potential energy because the installation area was unlimited.

From the results of Assessment of Offshore Wind Energy Potential Pre-Feasibility of Offshore Wind Farm [1], the target area for the offshore wind farm generation was in the Gulf of Thailand around Koh Tao and Koh Pha-Ngan. The average wind speed was about 6.0 to 7.5 m/s, and it could install about 720 MWs of the maximum capacity as shown in Fig. 1. The efficiency for the production of electrical energy (capacity factor, CF) was approximately 14.13% to 17.60%. However, the feasibility study has not yet considered an appropriate choice of interconnection points for the offshore wind farms to the grid. The grid connection topology of offshore wind farms can significantly impact the security, stability and quality of the grid [3], especially the power flow and the voltage stability [4-6]. The power flow analysis can check power direction, percentage of load in the transmission lines and grid loss, whereas the voltage stability analysis can estimate critical voltage and collapse margin or total load.

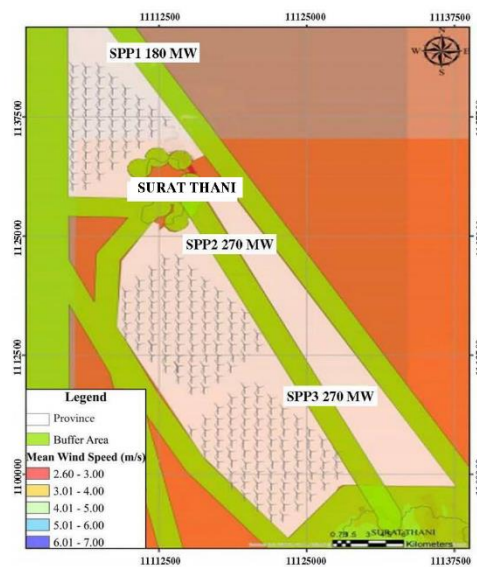


Fig. 1. Suitable area that can offer the offshore wind farms in the Gulf of Thailand [1].

This paper presents a power system analysis of the offshore wind farm grid connection around Koh Tao and Koh Pha-Ngan on the distribution system of the PEA. The four factors including the wind turbine technology and the connection topology to the grid, the technical analysis, the grid connection requirements, and the simulation tool were considered. The 720 MW offshore wind farms were modeled with a selection of the full-power conversion wind turbine generators of Vestas V112 model. The power system analysis focusing on the system power flow and voltage stability to 115-kV grid connection were performed in order to select the suitable connected points for the offshore wind farms. The system description and the offshore wind farm topology are described in Section 2. The system impact analysis

due to the power flow and the voltage stability are analyzed and discussed in Section 3. Finally, the conclusions are summarized in Section 4.

## 2. System Descriptions

According to the PEA connection requirements for the renewable energy generation, the generation above 10 MWs should be connected to the 115-kV transmission system. By consideration amount of load and a distance of offshore wind farms to the connected points, three possible connected points of KMA, KMB, and KCD were chosen as presented in Table 1. Additionally, 18 possible connection topologies were categorized in Table 2. The single line diagram of connected points was illustrated in Fig. 2 and the maximum load of each point was demonstrated in Table 3.

Table 1. The possible connected points of each offshore wind farm.

Possible connected points	Offshore wind farms		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
KMA	✓	✓	✓
KMB	✓	✓	✓
KCD	x	✓	✓

Table 2. The connection topologies of the connection offshore wind farms to the grid.

Case studies	Connection topologies		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
1	KMA	KMA	KMA
2	KMA	KMA	KMB
3	KMA	KMA	KCD
4	KMA	KMB	KMA
5	KMA	KMB	KMB
6	KMA	KMB	KCD
7	KMA	KCD	KMA
8	KMA	KCD	KMB
9	KMA	KCD	KCD
10	KMB	KMA	KMA
11	KMB	KMA	KMB
12	KMB	KMA	KCD
13	KMB	KMB	KMA
14	KMB	KMB	KMB
15	KMB	KMB	KCD
16	KMB	KCD	KMA
17	KMB	KCD	KMB
18	KMB	KCD	KCD

Table 3. The maximum load of each possible connected points.

Start and final bus	Distance (km)	Active power (MW)	Reactive power (MVAR)	Power factor
KN3 to KMA	25.00	45.73	15.52	0.95
KN1 to KMB	52.29	65.26	25.56	0.93
KN2 to KCD	56.60	49.98	27.14	0.88

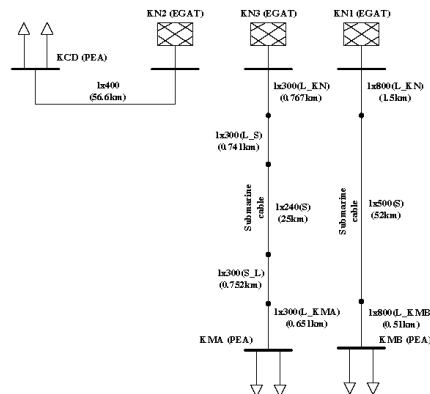


Fig. 2. The single line diagram of possible connected points.

**3. Simulation Results**

This section presents the system impact analysis of the offshore wind farm interconnections with the total capacity of 720 MWs by using the DigSILENT PowerFactory program. The steady state analysis of power flow and voltage stability were investigated in order to check the system operation when the offshore wind farms were integrated into the system. The load data of February 2015 provided by PEA were used and all case studies proposed in Table 2 would be determined under load conditions of peak load and off- peak load.

*3.1. Results of the power flow*

The power flow analysis was carried out in order to check on the direction of power, percentage of load in the transmission lines, and grid loss under the offshore wind farm integration. With the proposed capacity of 720 MWs offshore wind farms, it has been shown that the power will flow back to Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) utility grid in both load conditions. Therefore, it is necessary to reconsider the appropriate maximum capacity of the offshore wind farms for an integration with this system. By varying the offshore wind farm capacity to meet the requirement conditions, the possible maximum installation capacity of the offshore wind farms is about 60% of 720 MWs or 432 MWs. The simulation result of the new maximum capacity indicates the only four possible connection topologies as presented in Table 4.

Table 4. The connection topologies of the possible connection offshore wind farms to the grid.

Case studies	Offshore wind farms connection topologies		
	SPP 1	SPP 2	SPP 3
0	-	-	-
6	KMA	KMB	KCD
8	KMA	KCD	KMB
12	KMB	KMA	KCD
16	KMB	KCD	KMA

Case study 0 means no any offshore wind farms connected to the grid.

Table 5 and 6 show the percentage of load in the transmission lines and the grid loss before and after connecting offshore wind farms to the grid under peak load and off-peak load conditions.

Table 5. The percentage of load in the transmission lines.

Case studies	Peak load			Off-peak load		
	KN3 - KMA	KN1 - KMB	KN2 - KCD	KN3 - KMA	KN1 - KMB	KN2 - KCD
0	46.490	55.040	33.580	27.720	32.620	19.620
6	39.900	46.610	23.960	27.260	30.400	15.120
8	39.900	46.620	24.090	27.260	30.520	15.200
12	38.570	48.510	23.960	28.230	30.700	15.120
16	38.610	48.510	24.090	28.370	30.700	15.200

Table 6. The grid loss.

Case studies	Peak load		Off-peak load	
	Loss (MW)	Compare with the case study 0	Loss (MW)	Compare with the case study 0
0	3.020	-	1.050	-
6	3.020	-	1.980	increase 88.571%
8	3.000	decrease 0.662%	1.960	increase 86.667%
12	3.090	increase 2.318%	2.040	increase 94.286%
16	3.070	increase 1.656%	2.010	increase 91.429%

The simulation results indicate none of transmission lines has the percentage of load higher than 80% and it decreases when they are compared with the reference case study under peak load and off-peak load conditions. Additionally, the grid loss under off-peak load condition increases when the offshore wind farms are integrated into the grid. On the other hand, under peak load condition the grid loss slightly increases in the case study 12 and 16 but the case study 6 and 8 are not increasing because the length of the transmission line that is shorter than in another case.

### 3.2. Results of the voltage stability

In this section, the voltage stability before and after integrating three offshore wind farms to the grid was determined from a relative of voltage and power consumption or P-V curve. The simulation results of voltage stability show the critical voltage and the collapse margin of each case study under peak load and off-peak load conditions as in Table 7.

Table 7. The voltage stability at the possible connected points.

Case studies	Peak load						Off-peak load					
	KMA bus		KMB bus		KCD bus		KMA bus		KMB bus		KCD bus	
	Critical voltage (p.u.)	Collapse margin (MW)	Critical voltage (p.u.)	Collapse margin (MW)	Critical voltage (p.u.)	Collapse margin (MW)	Critical voltage (p.u.)	Collapse margin (MW)	Critical voltage (p.u.)	Collapse margin (MW)	Critical voltage (p.u.)	Collapse margin (MW)
0	0.966	552.052	0.919	552.052	0.648	552.052	0.965	552.779	0.919	552.779	0.646	552.779
6	0.950	726.010	0.889	726.010	0.579	726.010	0.950	726.073	0.889	726.073	0.577	726.073
8	0.951	721.586	0.891	721.586	0.578	721.586	0.951	721.523	0.891	721.523	0.579	721.523
12	0.951	726.010	0.886	726.010	0.579	726.010	0.951	726.073	0.886	726.073	0.577	726.073
16	0.952	721.586	0.888	721.586	0.578	721.586	0.952	721.523	0.888	721.523	0.579	721.523

The results of voltage stability increase when the offshore wind farms are integrated into the grid under peak load and off-peak load conditions because the collapse margin or total load increases. At the same time, the critical voltage still stay at the same voltage level in comparison with the case study 0 which is the base case without the offshore wind farm.

#### 4. Conclusions

The technical studies for grid integration of the 720 MW offshore wind farms around area of Koh Tao and Koh Pha-Ngan were carried out. The possible connection points for three offshore wind farms under 115-kV of PEA grid were considered. The simulation results on the power flow analysis show that the suitable maximum capacity of the offshore wind farms for integrating to this system based on the required conditions is about 432 MWs or 60% of the proposed capacity. With the reduction capacity, the four case studies of connected points were selected. For all case studies, none of transmission lines has percentage of load higher than 80%. Moreover, the grid loss of the system decreases, except in the case study 12 and 16, the grid loss increases. Additionally, the region of voltage stability increases both peak load and off-peak load after integrating offshore wind farms to the grid. Therefore, by studying the power flow and the voltage stability, the suitable interconnection points for the three offshore wind farms are the case study 6 and 8 because they have percentage of load in the transmission lines under PEA grid connection requirements, do not increase grid loss, and increase the voltage stability, but the distance of the transmission line in the case study 6 is longer than that the case study 8. Our results may be used as a reference to develop an offshore wind farm in the Gulf of Thailand in the future.

#### Acknowledgements

This work has been financial and facility supported by the Faculty of Engineering at Prince of Songkla University (PSU). Moreover, we would like to thank Provincial Electricity Authority (PEA) for providing information.

#### References

- [1] J. Waewsak, K. Chalermyanont, P. Rattanamanee, T. Chaichana, C. Keawprasert. Assessment of offshore wind energy potential pre-feasibility of offshore wind farm. Research Center in Energy and Environment, Thaksin University; July 2013.
- [2] T. Sutabutr. Alternative energy development plan: AEDP 2012-2021. International journal of renewable energy; January-June 2012.
- [3] T. R. Ayodele, A. Jimoh, J. L. Munda, A. J. Tehile. Challenges of grid integration of wind power on power system grid integrity: A review. International journal of renewable energy research (IJRER); December 2012, 2: p. 618–626.
- [4] K. Bhummkittipich, C. Jan-Ngurn. Study of voltage stability for 22 kV power system connected with Lamtakhong Wind Power Plant, Thailand. In: Energy procedia; 2013, 34: p. 951–963.
- [5] R. D. Zamora, M. A. Rosado. Stability analysis of wind energy generation in the electrical system of Puerto Rico. In: International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ'14); April 2014.
- [6] N. T. Linh. Voltage stability analysis of grids connected wind generators. In: 4<sup>th</sup> IEEE conference on industrial electronics and applications, ICIEA 2009; 2009, p. 2657–2560.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายพิเชฐ เกศมี	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5710120043	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556

## ทุนการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

P. Ketsamee, K. Chalermyanont, and A. Prasertsit, "Analysis of Suitable Interconnection Points of Offshore Wind Farms in the Gulf of Thailand," *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 459-464, November 2015.