สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ข้อกำหนดสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

INTERCONNECTION REQUIREMENT FOR INTEGRATION OF WIND GENERATOR AND DISTRIBUTION SYSTEM

โดย

นายวรพล พัวรัตนอรุณกร

นายวัชพล จันทร์เจริญพร

นายสรวิศ เจียรพิสิฐพงศ์

วศ.
ว228ข
2549
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 72734
วัน,เดือน,ปี 22 มิ.ย. 2550

b 11172062
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

ข้อกำหนดสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

INTERCONNECTION REQUIREMENT FOR INTEGRATION OF WIND GENERATOR AND DISTRIBUTION SYSTEM

โดย

นายวรพล พัวรัดนอรุณกร

นายวัชพล จันทร์เจริญพร

นายสรวิศ เจียรพิสิฐพงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ดร.ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ข้อกำหนดสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

นายวรพล พัวรัดนอรุณกร
นายวัชพล จันทร์เจริญพร
นายสรวิศ เจียรพิสิฐพงศ์

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

นายวรพล พัวรัตนอรุณกร
นายวัชพล จันทร์เจริญพร
นายสรวิศ เจียรพิสิฐพงศ์
รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาถึงหลักการทำงานของกังหันลม และข้อกำหนดสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า รวมถึงการควบคุมคุณภาพทางไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้าพลังงานลม หรือทุ่งกังหันลมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งยึดหลักมาตรฐานทั้งภายในและภายนอกประเทศโดยเริ่มต้นศึกษาจากทฤษฎีพื้นฐานของพลังงานลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมทั้งส่วนประกอบและหลักการทำงานต่างๆ ของกังหันลม เมื่อพิจารณาตามลำดับแล้วจึงนำมาเลือกกังหันลมที่มีการผลิตในปัจจุบันให้เหมาะสมกับการนำมาใช้งานจริง รวมทั้งออกแบบโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าภายในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERCONNECTION REQUIREMENT FOR INTEGRATION OF WIND GENERATOR AND DISTRIBUTION SYSTEM

Worapol Puarattana-aroonkorn
Watchapol Janjareonporn
Sorawit Chiarapisitphong
Assoc.Prof.Monthon Leelachindakaileak Advisor
Dr.Chai Chompoo-inwai Advisor
2006

ABSTRACT

This thesis studies at the mechanisms theory of wind turbine and the interconnection requirement. The thesis also contains a power quality controlling of the connection between wind farm and distribution system which following both domestic and international standards. The first stage of studying pursues the basis theory of wind energy and induction generator including with the component and mechanism of wind turbine. As a result of all considerations, the wind turbine is selected as an appropriated mechanism for the current production line with the right specifications for their uses. We also conduct the designing of an evaluation program to assess investment feasibility of installing wind turbine for domestic power production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลย หากไม่ได้รับความกรุณาจาก รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และดร.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางตลอดจนวิธีการแก้ปัญหา

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆทุกคนที่มีส่วนร่วมในการทำให้งานทั้งหมดสำเร็จ

นายวรพล พัวรัดนอรุณกร
นายวัชพล จันทร์เจริญพร
นายสรวิศ เจียรพิสิฐพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II
สารบัญ.....III
สารบัญรูปภาพ.....VI
สารบัญตาราง.....IX
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....4
2.1 ลม (Wind).....4
2.2 เครื่องมือวัดความเร็วลม.....7
2.3 กังหันลม (Wind turbine).....9

บทที่ 3 เกณฑ์การจำแนกประเภทกังหันลม.....25
3.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....25
3.2 วงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....31
3.3 ประเภทของกังหันลม.....35

บทที่ 4 คุณภาพกำลังไฟฟ้า.....42
4.1 ข้อมูลที่กำหนด.....42
4.2 กำลังการผลิตสูงสุดที่ยอมรับได้.....42
4.3 กำลังการผลิตสูงสุดที่วัดได้.....42
4.4 กำลังจินตภาพ.....43
4.5 สัมประสิทธิ์ฟลิคเกอร์.....43
4.6 จำนวนครั้งสูงสุดของการสับเปลี่ยนการทำงานของกังหันลม.....43
4.7 ตัวกระกอบกำลังฟลิคเกอร์.....44
4.8 ตัวกระกอบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน.....44
4.9 กระแสฮาร์มอนิก.....45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 สรุปลักษณะเฉพาะทางคุณภาพกำลังสำหรับกังหันลมหลายรูปแบบ.....45
4.11 การเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้าๆ.....46
4.12 ฟลิคเกอร์.....46
4.13 การสับเปลี่ยนระหว่างการทำงาน.....47
4.14 การทำงานที่สภาวะต่อเนื่อง.....48
4.15 แรงดันดกชั่วขณะ.....48
4.16 แรงดันฮาร์มอนิก.....49

บทที่ 5 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า.....50
5.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าภายในประเทศ.....50
5.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าสากลสำหรับกังหันลม.....54
5.3 สรุปและเปรียบเทียบมาตรฐานการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า.....66

บทที่ 6 การคัดเลือกแหล่งศักยภาพพลังงานลม.....68
6.1 การคัดเลือกแหล่งศักยภาพพลังงานลม.....68

บทที่ 7 โปรแกรมคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า.....74
7.1 การคำนวนต้นทุนในการติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า.....74
7.2 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปีโดยใช้หลัก.....76
การแจกแจงเรย์ลีฟ (Rayleigh Distribution)
7.3 การคำนวณค่าคาปาซิตี้แฟคเตอร์ (Capacity Factor) และความคุ้มค่าใน.....80
การลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์.....87
8.1 สรุปการคัดเลือกประเภทของกังหันลม.....87
8.2 สรุปข้อกำหนดสำหรับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม.....88
ขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า
8.3 สรุปการคัดเลือกสถานที่และโปรแกรมคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุน.....89
ติดตั้งกังหันลม

ภาคผนวก ก. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ภายในกังหันลม.....90

ภาคผนวก ข. ข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจ.....112
และอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/1998) ของ 3 การไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. ข้อกำหนดเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจ.....127
และอุตสาหกรรม (PRC-PQG-02/1998) ของ 3 การไฟฟ้า

ภาคผนวก ง. รูปแบบการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกัน.....138

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า
2.1 รูปแบบการทำงานของกังหันลม....5
2.2 ตัวบอกทิศทางลม....6
2.3 ส่วนประกอบของแอนิโมมิเตอร์ชนิดถ้วย....7
2.4 ส่วนประกอบของแอนิโมมิเตอร์ชนิดผลิตกระแสไฟฟ้า....8
2.5 แสดงภาพ ด้านบนของกังหันลม แบบ 2, 3 และ 4 ใบ....9
2.6 แบบของกังหันลมแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง....10
2.7 แบบของกังหันแกนหมุนอยู่ในแนวนอน....11
2.8 ผลกระทบของลมจากพื้นที่ต่างๆ ณ ความเร็วต่างๆ....13
2.9 อัตราการเร่งของลมผ่านเนินเขา....13
2.10 ผลของการจัดเรียงของกังหันลมในความเร็วลม ณ ความสูงต่างๆ....13
2.11 การดูแลการปฏิบัติในการเลือกทำเลที่ตั้ง....14
2.12 ข้อเสนอชนิดของภูมิประเทศที่เปลี่ยนแปลงไป....14
2.13 ส่วนประกอบของกังหันลม....16
2.14 รูปแบบการไหลของลม....19
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเพาเวอร์แฟคเตอร์....23
2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดกังหันลมกับเส้นผ่านศูนย์กลาง....24
3.1 แสดงการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในวงการอุตสาหกรรม....25
3.2 ภาพตัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก....26
3.3 โหมดการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ....27
3.4 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่าย....28
3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ตัวกระตุ้นแยกออกจากระบบโดยใช้อินเวอร์เตอร์....29
3.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ตัวกระตุ้นแยกออกจากระบบโดยใช้ตัวเก็บประจุ....30
3.7 รูปแบบวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส....31
3.8 การพัฒนาวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ....32
3.9 วงจรสมมูลแบบประมาณของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ....32
3.10 ไดอะแกรมแสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ....35
3.11 กังหันลมแบบ A....37
3.12 กังหันลมแบบ B....38
3.13 กังหันลมแบบ C....38
3.14 กังหันลมแบบ D....39
4.1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างลำดับฮาร์มอนิกส์กับแรงดันจินตภาพ....49
5.1 ข้อกำหนดการควบคุมความถี่ตามมาตรฐานต่างๆ....57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อกำหนดการควบคุมความถี่ตามมาตรฐานต่างๆ (ต่อ).....58
5.3 เกณฑ์การพิจารณากำลังไฟฟ้าจินดภาพ.....59
5.4 เกณฑ์การพิจารณากำลังไฟฟ้าจินดภาพ.....60
5.5 เกณฑ์ความทนทานต่อแรงดันต่ำเกินหลังจากเกิดความผิดพร่องภายในระบบ.....65
6.1 แหล่งพลังงานลมที่ดีจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลม.....69
6.2 อุทยานแห่งชาติวังเจ้าและอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์.....70
6.3 อุทยานแห่งชาติใต้ร่มเย็น เขาหลวง เขาปู่-เขาย่า.....71
อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง และ เขาพนมเบญจา
7.1 โปรแกรมคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า.....74
7.2 Banana Curve.....75
7.3 ผลการคำนวณต้นทุนในการติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า.....75
7.4 วิธีการป้อนค่าเพื่อใช้คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปี.....79
7.5 ตารางการแจกแจงเรย์ลีฟที่โปรแกรมคำนวณได้.....79
7.6 การคำนวณค่าคาปาซิตี้แฟคเตอร์ (Capacity Factor) และความคุ้มค่าในการลงทุน.....80
ติดตั้งกังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1 (ก) การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้า.....92
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1 (ข) การใช้ Auto-transformer.....92
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1 (ค) การใช้วิธี Step R หรือ Step L.....92
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1 (ง) วิธีเพิ่มความต้านทานของโรเตอร์ขณะสตาร์ท.....92
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดและกระแสของการสตาร์ท.....93
แบบสตาร์-เดลต้า
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.3 การควบคุมแรงดันโดยใช้ไทริสเตอร์กรณีแหล่งจ่ายเป็นไฟเฟสเดียว..94
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของโหลด R, RL และ L.....94
กรณีแหล่งจ่ายไฟเป็นไฟเฟสเดียว
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.5 แสดงการเปรียบเทียบขนาดกระแสเฉลี่ยและกระแส RMS.....95
ที่มุม α ต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีมุม α = 0 กรณีแหล่ง
จ่ายเป็นไฟเฟสเดียว
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.6 การควบคุมแรงดันโดยใช้ไทริสเตอร์กรณีแหล่งจ่ายเป็นไฟ 3 เฟส.....95
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.7 แสดงการเปรียบเทียบขนาดกระแสเฉลี่ยและกระแส RMS.....95
ที่มุม α ต่าง ๆ เมื่อเทียบกับกรณีมุม α = 0 กรณีแหล่ง
จ่ายเป็นไฟ 3 เฟส
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.8 การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันเมื่อเปลี่ยนมุมจุดชนวน α 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.9 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดของมอเตอร์ถ้าแรงดันเปลี่ยนเป็นค่าต่าง ๆ....96
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.10 ขนาดของ Is เมื่อมุม ϕ ต่างกัน.....97
รูปภาคผนวก ก. ที่ 2.1 Internally Fused และ Externally fused Fuseless.....101
รูปภาคผนวก ก. ที่ 2.2 การต่อคาปาซิตี้แบงค์แบบต่าง ๆ.....102
รูปภาคผนวก ก. ที่ 2.3 วงจรสำหรับคำนวน inrush current.....103
รูปภาคผนวก ก. ที่ 3.1 วงจรไทรีสเตอร์.....107
รูปภาคผนวก ก. ที่ 3.2 วงจรอินเวอเตอร์.....108
รูปภาคผนวก ก. ที่ 4.1 วงจร Back-to-back converter.....110
รูปภาคผนวก ข. ที่ 8.1 Flow Chart แสดงวิธีการบังคับใช้.....125
รูปภาคผนวก ค. ที่ 1.1 แสดงแรงดันเปลี่ยนแปลงแบบต่าง ๆ.....127
รูปภาคผนวก ค. ที่ 1.2 แสดงแรงดันเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์แบบต่าง ๆ.....128
รูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1 รูปกราฟขีดจำกัดขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลง.....130
รูปภาคผนวก ค. ที่ 4.1 Flow Chart แสดงวิธีการบังคับใช้.....134
รูปภาคผนวก ค. ที่ 5.1 แผนผังลำดับขั้นตอนการตรวจสอบโหลดที่ก่อให้เกิด.....137
แรงดันกระเพื่อม
รูปภาคผนวก ง. ที่ 1 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับลูกค้าระบบ 22 – 33 kV.....138
รูปภาคผนวก ง. ที่ 2 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 22 – 33 kV 139
ปริมาณไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบไม่เกิน 3 MW หรือ SPP รายเก่า
ที่ต่อสัญญาและมิได้แก้ไขขนาด หรือประเภทสัญญา Non-Firm
รูปภาคผนวก ง. ที่ 3 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 22 – 33 kV.....140
ปริมาณไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบเกิน 3 MW หรือประเภทสัญญา Firm
รูปภาคผนวก ง. ที่ 4 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับลูกค้าระบบ 69 – 115 kV.....141
รูปภาคผนวก ง. ที่ 5 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 69 – 115 kV.....142
จ่ายตรงไปที่สถานีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
รูปภาคผนวก ง. ที่ 6 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 69 – 115 kV.....143
แบบ Terminal Substation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ลักษณะของลมและผลกระทบ.....15

2.2 ส่วนประกอบของกังหันลม.....17

3.1 ประเภทของกังหัน.....39

3.2 ส่วนแบ่งการตลาดของกังหันลมแบบต่างๆ.....40

4.1 รูปแบบลักษณะเฉพาะทางคุณภาพกำลังสำหรับกังหันลมหลากหลายชนิด.....45

5.1 ข้อกำหนดแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....52

5.2 ข้อกำหนดการควบคุมกำลังจริง.....54

5.3 ข้อกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังจริงที่ผลิตได้.....55

5.4 ข้อจำกัดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังจริงที่ผลิตได้.....55

5.5 ข้อกำหนดเมื่อกังหันลมเริ่มทำงาน.....55

5.6 ข้อกำหนดเมื่อกังหันลมหยุดทำงาน.....56

5.7 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน.....60

5.8 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน (ต่อ).....61

5.9 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน (ต่อ).....61

5.10 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน (ต่อ).....62

5.11 ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม.....63

5.12 ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม (ต่อ).....64

5.13 ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม (ต่อ).....65

5.14 สรุปเรื่องการควบคุมแรงดัน.....66

5.15 สรุปเรื่องการควบคุมแรงดันกระเพื่อม.....67

5.16 สรุปเรื่องการควบคุมแรงดันฮาร์มอนิก.....67

6.1 แหล่งพลังงานลมที่ดีจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลม.....68

6.2 รายชื่อสถานที่และความเร็วลมที่สำรวจในภาคสนาม วันที่ 9 ถึง 13 มีนาคม 2544.....72

7.1 Power Curve ของ กังหันลมขนาด 750 kW (Generic)*.....76

7.2 ตาราง Histogram โดย Rayleigh Distribution ที่ความเร็วลม 7.0 m/s.....78

7.3 รายละเอียดของกังหันลมแยกตามบริษัทผู้ผลิต.....81

7.4 รายละเอียดของกังหันลมแยกตามบริษัทผู้ผลิต.....82

7.5 รายละเอียดของกังหันลมแยกตามบริษัทผู้ผลิต.....83

7.6 รายละเอียดกำลังการผลิตที่ความเร็วปกติในการทำงานของแต่ละบริษัท.....84

7.7 รายละเอียดกำลังการผลิตที่ความเร็วปกติในการทำงานของแต่ละบริษัท.....85

7.8 รายละเอียดกำลังการผลิตที่ความเร็วปกติในการทำงานของแต่ละบริษัท.....86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1 ข้อกำหนดแรงดัน.....88
8.2 ข้อกำหนดไฟกระพริบ.....88
8.3 ข้อกำหนดแรงดันฮาร์มอนิก.....89
ภาคผนวก ข. ที่ 2-1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม.....113
ภาคผนวก ข. ที่ 2-2 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ....113
ที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)
ภาคผนวก ข. ที่ 3-1 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภท Converter และ.....114
A.C. Regulator แต่ละตัว
ภาคผนวก ข. ที่ 4-1 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ Converter แต่ละตัว พิจารณาตามขีดจำกัด...116
ของกระแสฮาร์มอนิกขั้นตอนที่ 2
ภาคผนวก ข. ที่ 4-2 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ A.C. Regulator พิจารณาตามขอบเขตของ...117
กระแสฮาร์มอนิก ขั้นตอนที่ 2
ภาคผนวก ข. ที่ 5-1 ค่าตัวประกอบการคูณสำหรับใช้หาผลรวมของกระแสฮาร์มอนิก.....118

ภาคผนวก ค. ที่ 3.1 ขีดจำกัดสำหรับค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะสั้น (P_{st}).....133
และค่าความรุนแรงของไฟกะพริบระยะยาว (P_{lt}) เมื่อรวมแหล่ง
กำเนิดแรงดันกระเพื่อมทั้งหมดที่มีผลต่อระบบไฟฟ้า ณ จุดใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโลกกำลังจะประสบปัญหาทางด้านของพลังงาน โดยพลังงานที่นำมาใช้ในปัจจุบัน เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และอื่นๆ ล้วนแต่เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดสิ้นไป ต้องใช้เวลานานในการที่จะสร้างพลังงานในรูปแบบนี้ขึ้นมา เราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาพลังงานรูปแบบอื่นมาทดแทน และพลังงานที่ยั่งยืน คืออีกทางออกหนึ่งสำหรับ ปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ที่กำลังจะเกิดขึ้นในไม่ช้านี้ โดยพลังงานยั่งยืนนี้คือพลังงานธรรมชาติ ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากน้ำขึ้นน้ำลงของทะเล ซึ่งพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการใช้งานมากที่สุด เนื่องมาจากการที่พลังงานไฟฟ้านี้ สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ง่าย และยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าพลังงานรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากความสำคัญของพลังงาน จึงทำให้เรามีการสร้างโรงไฟฟ้าขึ้นเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ให้มีความเพียงพอต่อปริมาณความต้องการ ที่นับวันก็จะยิ่งต้องการใช้พลังงานมากขึ้น อันเนื่องมาจากจำนวนประชากร และความต้องการทางด้านอุตสาหกรรม

ในอดีตเรามีโรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้าดีเซล โรงไฟฟ้าแก๊ส ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้นมา แต่ในขณะนี้ทรัพยากรดังกล่าวใกล้หมดไป และราคาสูงขึ้นทำให้เมื่อนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้มีราคาแพงขึ้นเราจึงมีการนำพลังงานรูปแบบอื่นๆมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย และพลังงานลมก็เป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการนำมาใช้ จึงได้เกิดโรงไฟฟ้าพลังงานลมหรือทุ่งกังหันลมขึ้นจะเห็นได้ว่ามีการพัฒนาการใช้พลังงานลม ทุกวันนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น จะเห็นได้จากประเทศสหรัฐอเมริกาปีพุทธศักราช 2544 สามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้มากถึง 4600 เมกะวัตต์ ซึ่งก็ถือได้ว่ามากและเป็นการใช้พลังงานจากธรรมชาติลักษณะของการผลิตพลังงานด้วยลม จะมีลักษณะเป็นฟาร์มหรือมีกังหันรวมกันหลายๆตัว แล้วแต่ลักษณะของพื้นที่ โดยจะมีตั้งแต่ 1 ถึง 500 ตัว โดยจะเชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้า ดังนั้นสำหรับประเทศไทยแล้ว โรงไฟฟ้าพลังลมหรือทุ่งกังหันลมนี้ ยังไม่ค่อยเหมาะสม เพราะว่าต้องลงทุนสูง และต้องอาศัยเทคโนโลยีจากต่างประเทศเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดี ยังขาดประสบการณ์ เพราะไม่ได้สนใจเกี่ยวกับการนำพลังงานลมมาใช้อย่างจริงจัง เนื่องจากประเทศไทยนั้นมีโรงไฟฟ้าในรูปแบบ อื่นๆ ที่สามารถผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการได้อย่างเพียงพออยู่แล้ว ไม่ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ในแบบต่างๆ หรือโรงไฟฟ้าพลังความร้อนเอง นอกจากนี้ประเทศไทยเองยังมี การซื้อไฟฟ้ามาจากประเทศเพื่อนบ้าน ในเวลาที่มีความต้องการใช้โหลดสูง และยังมีการเชื่อมต่อร่วมกับประเทศอื่นทำให้มีความมั่นคงเพียงพอต่อการใช้งานแต่ในอนาคตต้องหันมาสนใจพลังงานจากธรรมชาติ ที่ไม่มีวันหมดเพื่อทดแทนพลังงานจากรูปแบบอื่น เพราฉะนั้นการคิดตั้งโรงไฟฟ้าพลังลมหรือทุ่งกังหันลมในประเทศไทยในขณะนี้ จึงควรเริ่มมีการศึกษาและเริ่มใช้งานอย่างจริงจัง โครงงานนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีของกังหันลมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิต และมีการนำมาใช้จริงในต่างประเทศมาวิเคราะห์รูปแบบการทำงานให้เหมาะสมกับการใช้ภายในประเทศ และศึกษาข้อดีข้อเสียรวมทั้งศึกษาว่ามีความคุ้มค่าในการติดตั้งมากหรือน้อยเพียงใด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆของลมและกังหันลมรวมทั้งองค์ประกอบของกังหันลมว่าประกอบด้วยอะไรบ้าง

2. เพื่อศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดต่าง ๆที่จะนำมาใช้ทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานลม และสามารถเลือกชนิดของกังหันลมที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงรวมทั้งเปรียบเทียบการทำงานของกังหันลมชนิดต่าง ๆได้

3. เพื่อศึกษาข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพทางไฟฟ้า เมื่อทำการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานลมหรือทุ่งกังหันลมเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

4. เพื่อศึกษาข้อกำหนดการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) หรือข้อกำหนดของต่างประเทศ

5. เพื่อออกแบบโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าภายในประเทศ

ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

สามารถเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในประเทศให้มีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งนี้จะทำการเลือกกังหันลมที่มีการผลิตจากบริษัทที่มีการพิจารณาแล้วว่ามีความเหมาะสมที่สุดในการทำงาน

ระบุข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพทางไฟฟ้าเพื่อนำมาเปรียบเทียบให้เหมาะสมกับกังหันลมที่ได้เลือกมา รวมทั้งข้อกำหนดการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อจริงจะต้องมีกำหนดค่ามาตรฐานในการส่งจ่ายไฟฟ้าอย่างไรเพื่อให้กังหันลมทำงานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยรวมทั้งนี้จะเน้นศึกษาทางด้านฟลิกเคอร์(Flicker) เนื่องจากประเทศไทยมีความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอ

สามารถออกแบบโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าภายในประเทศได้โดยพิจารณาตามหลักของการแจกแจงเรย์ลีฟ (Rayleigh Distribution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

การทำโครงงานนี้ เริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆเป็นลำดับดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับพลังงานลม

2. ศึกษาทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำว่ามีกี่ชนิดอะไรบ้างและชนิดใดสามารถนำไปใช้งานตามความเหมาะสมได้อย่างไร

3. ศึกษารูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมว่ามีกี่ชนิดรวมถึงส่วนประกอบอื่น ๆ ที่นอกเหนือจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอินดักชั่นเช่น แกนคอหมุนรับทิศทางลม (Yaw Drive), เพลาแกนหมุน (Low Speed Shaft), ห้องส่งกำลัง (Gear Box) และส่วนประกอบภายในอื่น ๆว่ามีอะไรบ้างและทำงานอย่างไร

4. ศึกษาทฤษฎีทางด้านคุณภาพทางไฟฟ้าว่าควรจะมีการกำหนดค่าอย่างไรไม่ให้มีผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยรวม

5. ศึกษาข้อกำหนดการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าตามมาตรฐานต่าง ๆแล้วสามารถนำมาเลือกใช้ให้เหมาะสมได้

6. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจและพื้นที่ในการติ้งตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมหรือทุ่งกังหันลมภายในประเทศไทยรวมทั้งออกแบบโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับพลังงานทดแทนในรูปแบบของพลังงานลม ซึ่งประเทศไทยในอนาคตมีโอกาสที่จะนำพลังงานในรูปแบบดังกล่าวมาใช้จริง

2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในพื้นที่ ๆกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการหรือช่วยผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงได้

3. สามารถนำความรู้จากการศึกษาเครื่องทำเนิดไฟฟ้าอินดักชั่นไปวิเคราะห์และเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบโรงไฟฟ้าพลังงานลมหรือทุ่งกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. สามารถระบุข้อกำหนดการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้โดยมีคุณภาพทางไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่มีมาตรฐานและไม่ส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายนอก

5. สามารถออกแบบโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าภายในประเทศได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลม (Wind)

ลม หมายถึง มวลของอากาศที่มีการเคลื่อนที่ จัดว่าลมเป็นพลังงานแบบหนึ่งโดยการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเกิดขึ้นได้เนื่องจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า บริเวณที่อุณหภูมิสูงกว่าจะลอยตัวสูงขึ้น ความกดอากาศต่ำ ทำให้ความหนาแน่นลดลง อากาศบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และความกดอากาศสูง จะไหลเข้าไปชดเชยให้ความหนาแน่นเท่ากัน การที่ดวงอาทิตย์ส่องแสงถูกโลกเพียงด้านเดียวเสมอนั้น เป็นผลให้อุณหภูมิของผิวโลกในแต่ละแห่งของภูมิประเทศไม่เท่ากัน จึงทำให้มีลมเกิดขึ้นตลอดเวลาหรือกล่าวได้ว่าลมคือการเคลื่อนที่ของอากาศนั่นเอง ซึ่งความเร็วลมแตกต่างกันไปแล้วแต่ลักษณะภูมิประเทศและ ณ ระดับความสูงต่างๆก็จะมีความเร็วลมต่างกัน ซึ่งสูตรการคำนวณความเร็วลม ณ ระดับต่างๆสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_x = V_f\left(\frac{h}{30}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (2.1)$$

เมื่อ

V_x = ความเร็วลมที่ระดับความสูง ณ ระดับที่ต้องการทราบ
V_f = ความเร็วลมที่ระดับอ้างอิง
h = ความสูงเหนือพื้นดิน
$\frac{1}{n}$ = เป็นค่าประมาณของการเพิ่มกำลัง

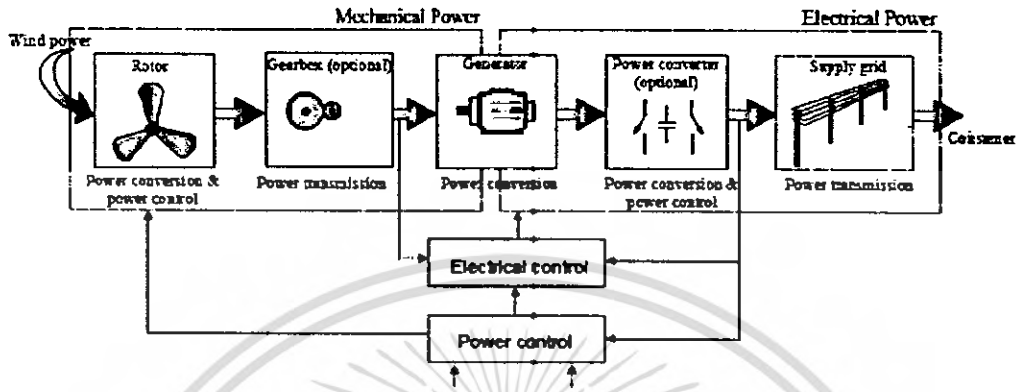
ปริมาณที่แทนค่าสำหรับค่า n ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ
n = 7 ในกรณีที่พื้นที่เป็นที่โล่งแจ้งในชนบทในทุ่งนาหรือที่ภูมิประเทศเป็นคลื่นเล็กน้อย
n = 5 ในกรณีที่พื้นที่เป็นคลื่นอย่างมากและมีสิ่งกีดขวาง
n = 3 ในกรณีที่พื้นที่รอบเมืองและใกล้รอบเมือง และพื้นที่เต็มไปด้วยสิ่งกีดขวาง

การนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์นั้นจะต้องเปลี่ยนรูปพลังงานให้เป็นพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าเสียก่อน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวแปรพลังงาน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการแปลงรูปพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีหลักการดังนี้

ลมจะทำให้กังหันหมุน (กังหันลม คือ เครื่องมือที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ได้และทำให้ความเร็วของอากาศลดลง) ซึ่งแกนของกังหันลมจะหมุนตามไปด้วย จากนั้นทำการเพิ่มความเร็วการหมุนของแกนกังหันด้วยการทดรอบให้ความเร็วเหมาะสมกับเครื่องกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อนำมาเรคดิฟายด์ (Rectify) ให้เป็นกระแสตรง แล้วเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่เพื่อนำไปใช้งานต่อไป (ดังรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 รูปแบบการทำงานของกังหันลม

เนื่องจากความเร็วลมจะมีค่าไม่คงที่ องค์ประกอบที่มีส่วนในการกำหนดความเร็วและทิศทางนั้นมีหลายอย่าง แต่ก็จะสามารถทำนายหรือกำหนดลงไปได้ในช่วงเวลาหนึ่งที่บริเวณๆ หนึ่งโดยกำหนดจากสถิติข้อมูลที่มีการบันทึกไว้เป็นเวลาต่อเนื่องกัน

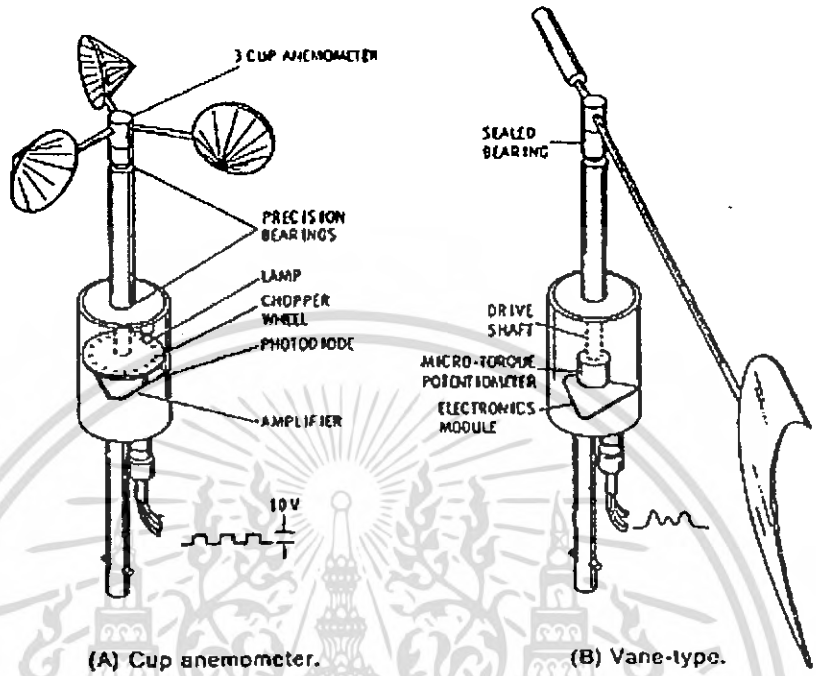
2.1.1 ความเร็วลมเฉลี่ย

การที่เราจะกำหนดพลังงานลมให้แน่นอนลงไปนั้นไม่ได้ เพราะว่าลมมีความเร็วไม่คงที่จึงต้องมีการตรวจสอบความเร็วลมตลอดเวลา และในขณะที่มีการใช้งานจริงๆการที่จะหาความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งก็เพียงพอต่อการตรวจสอบแล้ว ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของลม(Wind Characteristic) ส่วนมากนั้นกำหนดรูปแบบได้ในกรณีที่ลมมีลักษณะ การเคลื่อนที่แบบเดียว เรียกว่า "Prevalent winds" ถ้ามีลักษณะการเคลื่อนที่มากกว่าหนึ่งแบบเรียกว่า "Energy winds" แบบแรกจะเกิดขึ้นในช่วงเวลานานกว่าแบบที่สอง ส่วนแบบที่สองนั้นให้พลังงานออกมามากที่สุดในช่วงเวลาต่างๆกัน

2.1.1.1 การเคลื่อนที่แบบเดียวนั้นจะเกิดขึ้นประมาณ 5 วันต่อสัปดาห์ และมีความเร็วประมาณ 8 ถึง 24 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่วนแบบการเคลื่อนที่มากกว่าหนึ่งแบบเกิดขึ้นประมาณ 2 วันต่อสัปดาห์มีควมเร็วประมาณ 16 ถึง 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะกล่าวได้ว่าลมที่พัดในช่วงเวลา 30เปอร์เซนต์ มีกำลังงานมากกว่าลมที่พัดในช่วงเวลา 70 เปอร์เซนต์

วิธีง่ายๆในการกำหนดความเร็วลมเฉลี่ย คือนำข้อมูลจากสถานีวัดลมมาพิจารณา แต่ประเทศไทยยังมีข้อมูลอยู่น้อย ดังนั้น ถ้ามีอุปกรณ์วัดความเร็วลมแอนิโมมิเตอร์ (Anemometer) และทิศทางลม (Wind direction) ก็ทำการทดสอบเองได้ โดยทดสอบในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น หนึ่งเดือน หนึ่งปี แล้วหาความเร็วเฉลี่ยออกมา จะพบว่าความเร็วที่สามารถให้พลังงานออกมาได้เพียงพอ และไม่เป็นอันตรายแก่อุปกรณ์ที่ใช้อยู่ในช่วง 20 ถึง 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตัวบอกทิศทางลม [5]

2.1.2 ความเร็วที่ความสูงใดๆ

ความเร็วลมในระยะความสูงต่างๆกัน ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากัน เช่น ความเร็วลมที่สูงจากพื้นดินขึ้นไป 100 ฟุต จะมีความเร็วเพิ่มขึ้น 2 เท่าของความเร็วเหนือพื้นดิน

สูตรที่ใช้หาความเร็วสูงต่างๆกัน ณ บริเวณหนึ่งๆ

$$\frac{V}{V_a} = \left(\frac{Z}{Z_a}\right)^{0.2790+0.03265\ln z_a} + V_a^{0.10528\ln z_a - \{0.09831+0.05502\ln z+0.00642\ln z(\ln z_a)\}} \qquad (2.2)$$

เมื่อ

V = ความเร็วลมที่ความสูง Z

V_a = ความเร็วลม Z_a ที่หาได้จากแอนิโมมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เครื่องมือวัดความเร็วลม

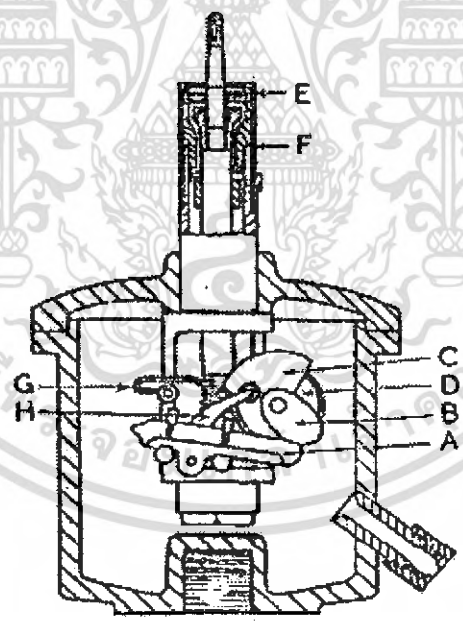
เครื่องมือวัดความเร็วลมและทิศทางลม เป็นสิ่งสำคัญในการวิจัยพลังงานลมเพื่อที่จะให้ได้สถานที่ตั้งที่เหมาะสมในการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

แอนิโมมิเตอร์ (Anemometer) คือเครื่องมือวัดความเร็วลมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบถ้วย (Cup anemometer) ซึ่งเรียกว่า Robinson cup anemometer ตามชื่อผู้ที่พัฒนาขึ้นใช้คือ T Robinson

แอนิโมมิเตอร์แบบนี้จะมีลักษณะคือ ตัวหมุนประกอบด้วยแกนตามแนวตั้งซึ่งมีแขนตามแนวนอน 4 อันติดอยู่โดยทำมุมซึ่งกันและกัน ที่ปลายแขนจะมีลูกถ้วยติดอยู่ ลูกถ้วยอยู่ในแนวตั้งผ่านแกนหมุนและด้านนูนของลูกถ้วยจะเป็นทิศทางการหมุนและการหมุนไม่ขึ้นกับทิศทางลม

แอนิโมมิเตอร์ปัจจุบันแบ่งได้ตามอุปกรณ์ที่สร้างเป็น 2 ชนิด คือ แบบ Mechanic และแบบ Electronic แบบ Mechanic ที่ใช้อยู่ตามสถานีตรวจอากาศมีอยู่ 2 แบบคือ

2.2.1 Contact – type anemometer แบบมาตรฐานทั่วไปใช้เป็นแบบลูกถ้วย 3 ใบ เป็นตัวหมุนปลายของ แกนหุนตามแนวตั้งจะเป็นเฟืองเกลียว ซึ่งจะไปทำให้หลอดแก้วที่บรรจุปรอททำหน้าที่ Electric contact ทุกๆครั้งที่ลมผ่านไป $\frac{1}{20}$ ไมล์



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของแอนิโมมิเตอร์ชนิดถ้วย [5]

จากรูปที่ 2.3 เป็นโครงสร้างภายในของแอนิโมมิเตอร์ชนิดนี้

A คือ เมอคิวรี่สวิตช์, B เป็นลูกเบี้ยวที่ไปกระดก A ให้ทำงานซึ่ง B จะหมุนไปตามลูกน้ำหนัก C ลูกน้ำหนัก C หมุนขึ้นสูงได้ด้วยการดันของกระเดื่องบนเฟืองล้อซึ่งประสานอยู่กับ

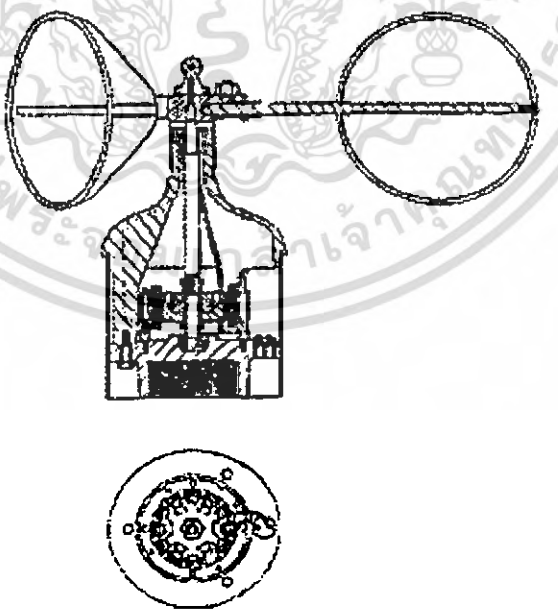
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟืองเกียร์และลูกน้ำหนัก C จะตกลงเมื่อเคลื่อนขึ้นถึงตำแหน่งสูงสุด สำหรับเมอคิวรี่สวิตช์นั้นต่ออยู่กับวงจรแบตเตอรี่ เพื่อให้ Telephone massage refistor ทำงาน แต่อาจจะใช้ electro – magnetic recorder แบบอื่นแทนได้ เครื่องมือชนิดนี้วัดความเร็วลมได้เที่ยงตรงที่ช่วงความเร็ว 0.2 ถึง 0.3 เมตรต่อวินาที

2.2.2 Cup – generator anemometer แบบนี้วัดความเร็วลมได้อย่างต่อเนื่องเป็นไมล์ต่อชั่วโมงแบบล่าสุดที่ใช้อยู่มีลักษณะตัวหมุนเป็นลูกถ้วยรูปกรวย 3 ใบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ติดกับแกนสั้นๆใช้กับบอลแบริ่ง

ปลายของแกนหมุนตามแนวดั้งประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร 11 ขั้ว โดยจะล้อมรอบด้วยสเตเตอร์ที่พันด้วยขดลวดที่มีความต้านทานต่ำทั้งหมดนี้จะนำมาประกอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้แรงดัน 10 โวลต์ ที่ 100 รอบต่อนาที สำหรับเครื่องอ่านเป็น moving – voil voltmeter หมุนได้ 240 องศามีสเกลเป็นไมล์ต่อชั่วโมงวัดได้ 5 ถึง 100 ไมล์ต่อชั่วโมงและให้กระแสสลับสูงสุด 5 มิลลิแอมป์

นอกจาก แอนิโมมิเตอร์แบบลูกถ้วยที่ใช้แมคคานิคแล้วยังมีแบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นแบบค่อนข้างใหม่ ดังรูปที่ 2.4 เป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ปลายข้างหนึ่งของแกนหมุนติดกับวงล้อกลมที่เจาะรูโดยรอบแสงจะส่องจากหลอดไฟผ่านรูของวงล้อไปตกกระทบบนโฟโต้ไดโอดโดยเมื่อลมแรงวงล้อจะหมุนเร็วทำให้แสงตกโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แอมปิล์ ซึ่งมีโฟโต้ไดโอดประกอบด้วยอยู่จะมีระดับสัญญาณออกสูง ซึ่งสัญญาณออกถูกส่งผ่านสายไปยังเครื่ออ่านหรือบันทึกต่อไป ราคาโดยประมาณของแอนิโมมิเตอร์ราคาประมาณ 15,000 ถึง 30,000 บาท



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของแอนิโมมิเตอร์ชนิดผลติกระแสไฟฟ้า [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กังหันลม (Wind turbine)

ในการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์เราต้องมีเครื่องแปลงพลังงานลมให้เป็นพลังงานรูปอื่นซึ่งได้แก่กังหันลม ในทางทฤษฎีพลังงานที่ได้จากลมโดยผ่านทางกังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 59.3 เปอร์เซนต์ โดยกังหันลมแบบต่างๆนั้นจะให้กำลังงานออกมามากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ, ขนาดและการออกแบบ กังหันลมที่มีประสิทธิภาพต่ำจะมีขาดใหญ่กว่าชนิดที่มีปะสิทธิภาพสูง

กังหันลมแบ่งตามแกนหมุนได้ 2 แบบ คือ

ก. กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวดั้ง (Vertical axle wind turbine)

ข. กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอน (Horizontal axle wind turbine)

2.3.1 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง

กังหันลมแบบนี้แกนหมุนของใบพัดจะตั้งฉากกับพื้นดิน กังหันลมแบบนี้มีคุณสมบัติคือสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง น้ำหนักของใบจะทิ้งลงในลักษณะสมมาตร (Symmetry) และไม่มีผลต่อความกว้างของใบ เมื่อเพิ่มแขนหมุน (Moment arm) ไม่เป็นปัญหาต่อการดิดตั้งฐาน การหมุนของใบจะอยู่ในแนวระนาบเดียวกันกับทิศทางลม ดังนั้นแรงปะทะจะเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนโดยตรง ซึ่งทำให้การใช้ประโยชน์จากแรงปะทะมีมากขึ้นส่วนเสียของกังหันลมแบบนี้คือลักษณะการวางใบไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกใบในเวลาเดียวกัน เนื่องจากมีส่วนใบที่บังลมอยู่ และยังมีใบบางส่วนที่ถูกลมปะทะทำให้เกิดแรงด้านการหมุนขึ้นอีกด้วย

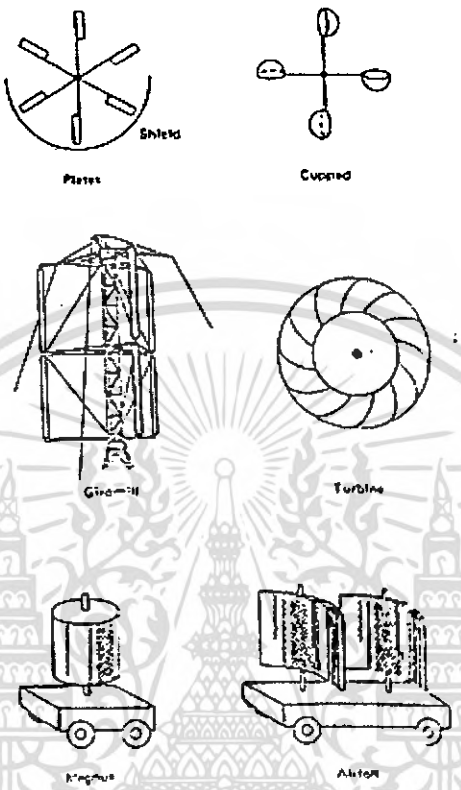
รูปที่ 2.5 แสดงภาพ ด้านบนของกังหันลม แบบ 2, 3 และ 4 ใบ [5]

แบบของกังหันลมชนิดที่มีแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง

2.3.1.1 แบบซาโวเนียส หรือ เอสโรเตอร์ (Savonius or S.rotor) เป็นกังหันลมชนิดสองใบ การหมุนเกิดจากการที่ลมปะทะทางด้านเว้าแล้วทำให้ใบหมุนรอบแกน กังหันแบบนี้มีแรงบิดบนแกนสูง ให้พลังงานค่อนข้างคงที่ ความเร็วรอบต่ำ ส่วนมากนำไปใช้งานทางด้านกล เช่น เครื่องสูบน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 แบบดาเรียส (Darrious) กังหันลมแบบนี้จะมีความเร็วรอบสูง แต่จะมีแรงบิดเริ่มต้นต่ำฉะนั้นจะต้องมีตัวช่วยเริ่มต้นการหมุนในขณะไม่มีลมหรือลมไม่แรงพอ



รูปที่ 2.6 แบบของกังหันลมแกนหมุนอยู่ในแนวดั้ง [5]

2.3.2 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอน

กังหันลมแบบนี้จะมีแกนหมุนของใบพัดขนานกับพื้นดิน คุณสมบัติของกังหันลมแบบนี้คือใบพัดของกังหันสามารถรับลมได้เต็มที่ และจะให้กำลังงานมากกว่าแบบแรกเมื่อเทียบขนาดเท่า ๆกัน เพราะว่าแบบนี้มีพื้นที่หน้าตัดของส่วนรับลมมากกว่าของกังหันลมชนิดนี้เทียบเท่าแบบหมุนในแนวดั้งกังหันแบบนี้มีความซับซ้อนมาก ติดตั้งลำบากต้องหันตัวกังหันลมเข้าสู่ทิศทางที่ลมผ่าน ใบพัดมีลักษณะอยู่ในแนวดั้งยึดติดกับเดือยของแกนหมุนในแนวนอนจำนวนใบพัดมีตั้งแต่ 2 ใบขึ้นไป

เนื่องจากแบบแนวนอนรับลมทางเดียว จึงต้องมีเครื่องมือทำให้ตัวกังหันเข้าสู่ทิศทางลมและถ้าลมแรงมากก็จะเสียหายง่ายกว่าแบบหมุนแกนดั้ง จึงต้องออกแบบใบพัดให้มีลักษณะที่สามารถพับใบพัดหรือเบี่ยงเบนใบพัดออกจากทิศทางลมในช่วงเวลานั้น ๆได้โดยแบ่งแบบของกังหันลมที่มีแกนหมุนในแนวนอนดังนี้

2.3.2.1 แบบที่มีจำนวนใบไม่มาก คือมีตั้งแต่ 2 ถึง 4 ใบ กังหันลมแบบนี้จะมีความเร็วรอบสูง คือประมาณ 300 รอบต่อนาที หรือมากกว่า แต่แรงบิดเริ่มต้นต่ำ ดังนั้นกังหัน

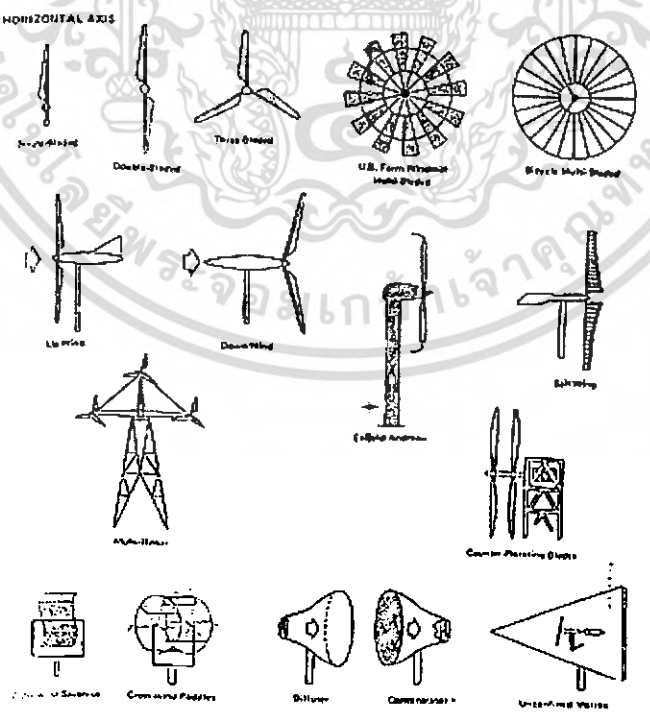
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลมแบบนี้จึงควรใช้ในที่ที่มีความเร็วลมพอประมาณจนถึงความเร็วลมสูง เมื่อความเร็วสูงจึงนิยมไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องการความเร็วรอบสูง

2.3.2.2 แบบที่มีจำนวนใบมาก กังหันลมแบบนี้จะให้แรงบิดเริ่มต้นสูง แต่ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำดังนั้นกังหันประเภทนี้จึงเหมาะที่จะใช้งานทางกล เช่น ชุดระหัดวิดน้ำ, ปั๊มน้ำ เป็นต้น

2.3.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกังหันลม 2 แบบ

กังหันลมแนวตั้ง	กังหันลมแนวนอน
ข้อดี	ข้อดี
- รับลมได้รอบด้าน	- มีพื้นที่รับลมมากกว่าเมื่อน้ำหนักเท่ากัน
- น้ำหนักตกลงบนฐานสมดุลกว่า	- มีประสิทธิภาพสูง
- เริ่มหมุนได้เองที่ความเร็วต่ำ	- มีแรงบิดรอบแกนสูง
- ระบบการผลิต ส่งกำลังทำได้ง่าย	- รอบจัดกว่าเมื่อความเร็วเท่ากัน
- ราคาถูก	- รอบหมุนคงที่กว่า
- เพิ่มแขนการหมุนได้ไม่จำกัด	
ข้อเสีย	ข้อเสีย
- เกิดแรงต้านการหมุน	- มีปัญหาในการประกอบใบพัดกับฐาน
- ไม่สามารถรับลมได้ทุกใบ	- มีปัญหาในการหมุนใบรับทิศทางลมที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.7 แบบของกังหันหมุนในแนวนอน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ประสิทธิภาพของกังหันลม

กังหันลมสามารถเอากำลังงานจากลมโดยตรง โดยการลดความเร็วลมให้ช้าลง ถ้ากังหันลมสามารถทำให้ลดความเร็วจากเดิมจนหยุดได้สมบูรณ์แล้วคือ ความเร็วของลมหลังจากผ่ากังหันแล้วกลายเป็นศูนย์ จะได้พลังงานจากลม 100 เปอร์เซนต์ แต่จริงๆแล้วกังหันลมไม่สามารถทำให้ลมที่พัดผ่านหยุดได้กำลังลมมากที่สุด ทางทฤษฎี ที่กังหันลมสามารถรับไว้ได้จะเป็น 59.3 เปอร์เซนต์ ของกำลังทั้งหมด หมายความว่าสามารถลดความเร็วลมได้ 3 ส่วนของความเร็วต้นเท่านั้น ดังนั้นกังหันลมที่สามารถเอากำลังงานจากลมออกมาได้มากที่สุด 59.3 เปอร์เซนต์ จึงถือว่ามีประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซนต์

ถ้ากังหันลมมีประสิทธิภาพ 75 เปอร์เซนต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 75 เปอร์เซนต์ กำลังงานกลของกังหันลมสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 33.34 เปอร์เซนต์ คือ

75% ของกังหันลม คือ 75% ของ 59.3% = 0.75 x 59.3

75% ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า = 0.75 x 59.3 x 0.75 = 33.34 เปอร์เซนต์

ค่าประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับชนิดของกังหันลม การออกแบบและการสูญเสียของระบบเฟืองต่างๆ ในกรณีที่ใช้สำหรับทดรอบความเร็วให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเห็นได้ชัดว่า 0.1 ถึง 0.4 (10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 40 เปอร์เซนต์) ไม่มากกว่านี้ ค่านี้กำหนดให้เป็น efficiency factor ของกังหันลม ใช้สัญลักษณ์ E ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดกังหันและ speed ratio โดย speed ratio ของกังหันขึ้นอยู่กับการหมุนของกังหันและความเร็วลมที่พัดผ่าน การหมุนของกังหันหมายความว่าส่วนประกอบของใบพัดบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางหมุนช้าๆ ขณะที่ส่วนปลายของใบพัดหมุนเร็ว อัตราส่วนการหมุนขึ้นอยู่กับรัศมีใบพัดและความเอียงใบพัด

จากลักษณะการหมุนที่กล่าวแล้วสามารถกำหนดอัตราส่วนการหมุนของความเร็วซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการออกแบบกังหัน ให้ค่านี้เป็น $\frac{u}{v}$ เมื่อ

u = ความเร็วของกังหันลมที่มีใบพัดเอียงทำมุมเอียงในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง

v = ความเร็วลมที่พัดผ่านกังหัน

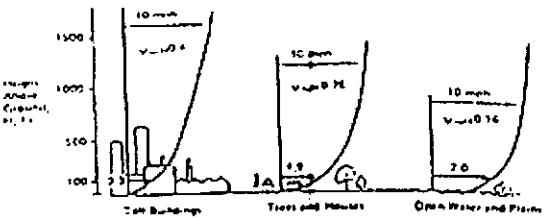
ค่า $\frac{u}{v}$ นี้ประมาณ 1 ถึง 2 เมื่อกังหันหมุนช้า และเท่ากับ 5 ถึง 7 หรือ 8 เมื่อกังหันหมุนเร็ว

2.3.5 การเลือกสถานที่ตั้ง

ต้องใช้ความระมัดระวัง เพราะมีแรงเฉือนกับแรงกดในแนวตั้งฉากกับแนวระดับของกระแสลม เมื่อกระแสลมพัดผ่านไปบนพื้นที่ของโลก แรงเฉือนนี้จะมีผลเมื่อกระแสความเร็วต่ำใกล้ผิวโลกมากกว่าที่สูงขึ้นไป ในกรณีเฉพาะคือเมื่อการไหลเป็นแบบอิสระที่สูงมากพอที่จะทำให้ไม่มีผลของแรงเฉือน

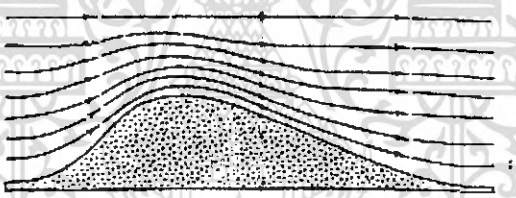
กฎทั่วไป คือ ความเร็วที่ใกล้ผิวโลกจะเพิ่มเป็นกำลังเศษหนึ่งส่วนเจ็ดของความสูงเหนือผิวโลกเหนือระดับดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

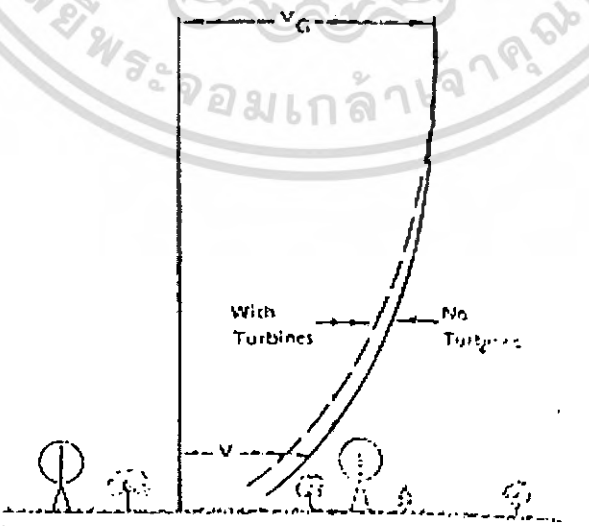


รูปที่ 2.8 ผลกระทบของลมจากพื้นที่ต่างๆ ณ ความเร็วต่างๆ [5]

แต่อย่างไรก็ตามแรงเฉือนตามลมหรือกำลังลมที่ได้จะมีความเรียบของผิวโลกอีกด้วยถ้าในพื้นที่นั้นมีตึกสูงๆสิ่งที่ปลูกสร้างหรือสิ่งกีดขวางอย่างอื่นความเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมต่อความสูงเหนือระดับพื้นดิน จะมีค่ามากกว่าในกรณีที่เป็นที่ราบ ดังรูป 2.9, 2.10 และ 2.11 ผลที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ กระแสลมที่มีความเร่งเพิ่มขึ้นเมื่อพัดผ่านเนินหรือหุบเขาแคบๆ ดังรูปที่ 2.12 ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มพลังงานที่ได้ออกมาของกังหันลมจึงมีการนิยมตั้งกังหันลมในสถานที่เช่นนี้เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

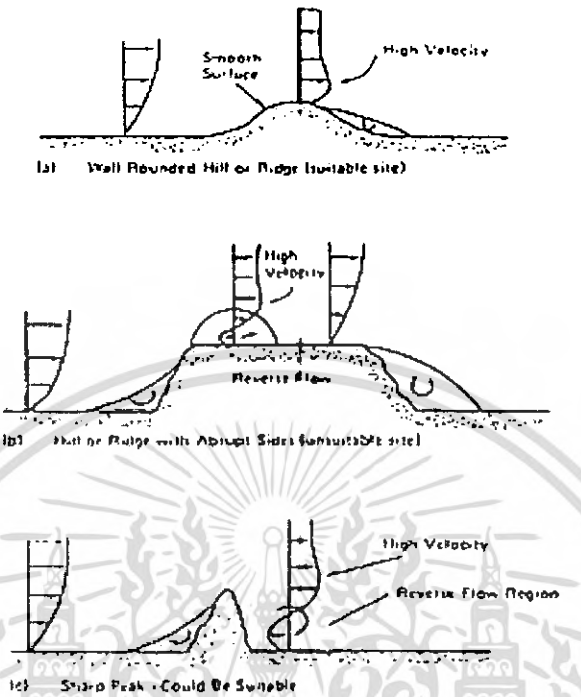


รูปที่ 2.9 อัตราการเร่งของลมผ่านเนินเขา [5]

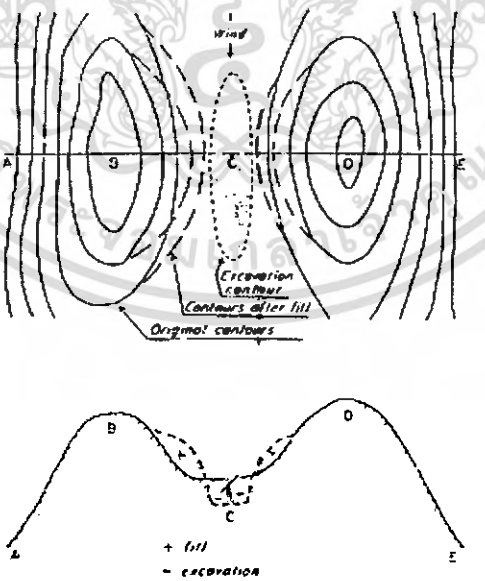


รูปที่ 2.10 ผลของการจัดเรียงของกังหันลมในความเร็วลม ณ ความสูงต่างๆ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การดูแลการปฏิบัติในการเลือกทำเลที่ตั้ง [5]



รูปที่ 2.12 ข้อเสนอชนิดของภูมิประเทศที่เปลี่ยนแปลงไป
สำหรับการทดลองของการเพิ่มความเร็วลม [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 สรุปลักษณะของสถานที่ตั้งที่เหมาะสม

ก. มีความเร็วลมเฉลี่ยตลอดปีสูงพอ (หาได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา)

ข. ไม่มีสิ่งกีดขวางกระแสในทางลมสูง

ค. ควรจะอยู่บนเนินที่เรียบหรืออยู่บนเกาะในทะเลหรือเป็นที่ราบ

ง. ช่องระหว่างภูเขา

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของลมและผลกระทบ

ลักษณะของลม	ผลดกกระทบ
ไม่สม่ำเสมอ	พลังงานที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งเก็บสะสมพลังงาน
ถ้ามีลมหลายทิศทาง	เพื่อให้ได้พลังงานออกมาสูงสุด จะต้องใช้โรเตอร์แบบแกนในแนวราบ
ความเปลี่ยนแปลงทางแนวตั้ง	ความราบเรียบทำให้เกิดความปั่นป่วนของลม ดังนั้นในบริเวณที่ไม่เรียบจะต้องมีหอคิดตั้งสูงกว่าบริเวณที่ราบเรียบเพื่อให้ถึงระดับที่ลมมีการไหลสม่ำเสมอ
ความเปลี่ยนแปลงตามแนวราบ	ยากที่จะหาพื้นที่ที่เหมาะสม

2.3.7 ส่วนประกอบของระบบกังหันลม

ส่วนประกอบสำคัญ ๆ ของระบบกังหันลมทั่ว ๆ ไปอาจแบ่งได้ดังนี้

2.3.7.1 ใบกังหัน

ใบกังหันนับว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดพลังงานกลที่เพลาของกังหัน จำนวนใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งถึงหลายสิบใบ กังหันลมที่มีจำนวนใบมากส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิด (Torque) สูง ในทางตรงข้ามกังหันที่มีจำนวนใบน้อยส่วนใหญ่ใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง เช่น การผลิตไฟฟ้า รูปหน้าตัดของใบกังหันอาจมีตั้งแต่ลักษณะแพนอากาศ (Airfoil) หรือลักษณะคล้ายปีกเครื่องบิน เป็นแผ่นโค้ง และเป็นแผ่นราบตรง วัสดุที่ใช้ทำใบกังหันควรจะเป็นวัสดุเบาและแข็งแรงซึ่งอาจเป็นอลูมิเนียมอัลลอยด์ แผ่นเหล็ก ไม้ และไฟเบอร์กลาส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ออกแบบ

2.3.7.2 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมในชุดกังหันลมส่วนใหญ่จะมี 2 ชนิด โดยเฉพาะแบบแกนนอนคือควบคุมให้ตัวกังหันลมนั้นหันหน้าเข้าหาทิศทางลมตลอดเวลา รวมทั้งควบคุมเพื่อป้องกันการเสียหายเนื่องจากความเร็วลมแรงมาก ๆ ระบบควบคุมให้กังหันหน้าที่เข้าหาทิศทางลม ส่วนมากระบบนี้จะใช้ระบบหางเสือโดยเฉพาะกังหันลมชนิดเล็กเพราะระบบนี้เป็นแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนมาก ส่วนระบบควบคุมเพื่อป้องกันการเสียหายเนื่องจากความเร็วลมแรงมาก ๆ ปกติเมื่อลมพัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากๆ จะมีแรงกระทำกับใบกังหันอย่างมาก ดังนั้นการออกแบบจะออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานที่ความเร็วสูงสุดที่กังหันจะรับได้ค่าหนึ่ง การควบคุมจะมีลักษณะการทำงานอยู่ 2แบบคือ

ก. ทำให้กังหันลมหันหน้าออกจากกระแสลมโดยการหันไปข้างๆ หรือหันเงยหน้าขึ้นหรือทำให้ใบกังหันหุบตัวเพื่อให้มีพื้นที่ของกังหันที่รับกระแสลมน้อยลง

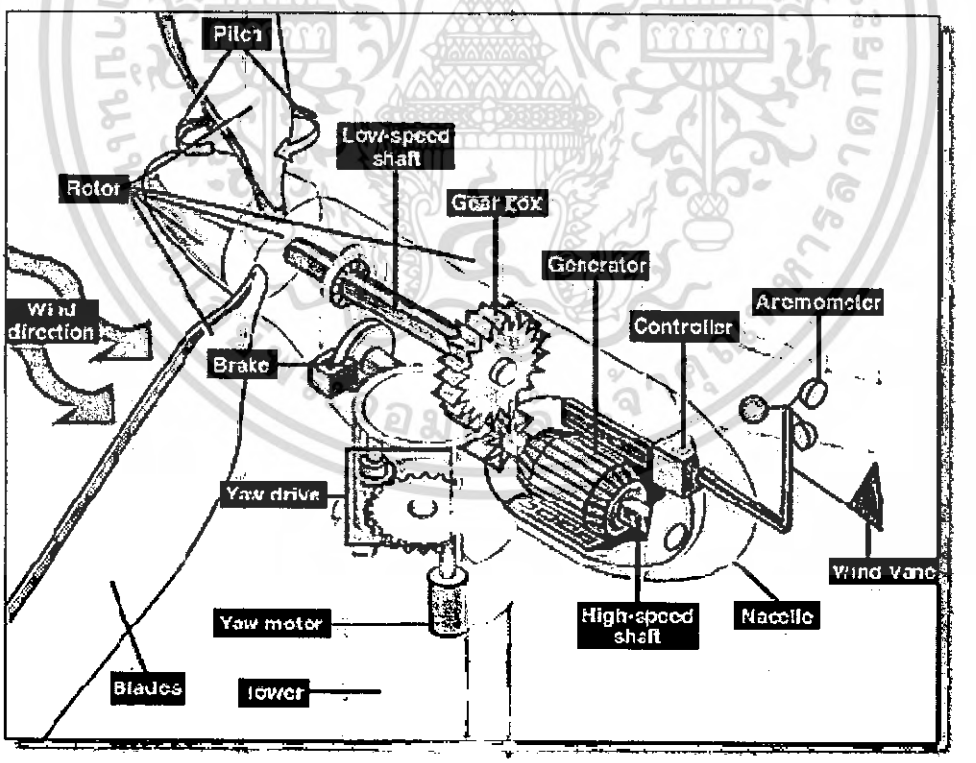
ข. ทำให้เกิดการหน่วงต่อการหมุนของกังหันลม ซึ่งอาจทำได้โดยการปิดมุมของใบกังหันลมให้เกิดการหน่วงมากกว่าการขับ หรือเพิ่มชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดแรงหน่วงขึ้นอย่างสูงเมื่อความเร็วถึงจุดที่กำหนดไว้

2.3.7.3 ระบบส่งกำลัง

การส่งกำลังจากตัวกังหันลมเพื่อไปใช้งานอาจต่อกับเพลาได้โดยตรง หรือผ่านระบบส่งกำลัง เช่น เฟือง สายพาน และไฮดรอลิคส์ ซึ่งจะมีการทดรอบให้สอดคล้องกันระหว่างความเร็วรอบของแกนของกังหันลมกับการใช้งาน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.3.7.4 หอคอย

หอคอยทำหน้าที่ยึดตัวกังหันลมให้อยู่ในระดับสูง เพื่อรับกระแสลมได้มากขึ้นทุกทิศทาง หอคอยอาจเป็นท่อตรงที่มีสายยึดหรืออาจเป็นโครงสร้างเหล็ก (หรือไม้) ที่สามารถรับน้ำหนักและการสั่นสะเทือนเนื่องจากตัวกังหันได้



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของกังหันลม

โดยมีรายละเอียดส่วนประกอบของกังหันลมดามรูปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของกังหันลม

ส่วนประกอบของกังหันลม	หน้าที่และการทำงาน
แอนิโมมิเตอร์ (Anemometer)	วัดความเร็วลม และส่งข้อมูลไปที่ตัวควบคุม
ใบพัด (Blades)	ใบพัดจะทำให้เกิดการหมุน โดยจะมีตั้งแต่ 2 ใบพัดขึ้นไป
จานเบรก (Brake)	จานเบรกสำหรับไว้ทำการหยุดเมื่อเกิดกรณีฉุกเฉิน หรือต้องการซ่อมบำรุง
ตัวควบคุม (Controller)	ตัวควบคุมการทำงาน จะให้ทำงานเมื่อลมมีความเร็ว 8 ถึง 16 miles/hour (mph) และหยุดทำงานเมื่อลมมากกว่า 65 mph. ที่ไม่สามารถทำงานได้เพราะอาจจะทำให้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความร้อนเกิน(Overheat)
ห้องส่งกำลัง,เฟืองเกียร์ (Gear box)	เฟืองเกียร์ที่ต่อกับแกนที่หมุนจากใบพัดกับเฟืองเกียร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีการทดรอบทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนได้เร็วขึ้น
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)	ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกล ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า
เพลาแกนหมุนความเร็วสูง(High-speed shaft)	แกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เพลาแกนหมุนความเร็วต่ำ(Low-speed shaft)	แกนหมุนของใบพัด
ฝาครอบ (Nacelle)	ตัวครอบให้อุปกรณ์ต่างๆ อยู่ภายในซึ่งจะป้องกันความเสียหายได้
แกนปรับองศา (Pitch)	ตัวปรับองศาของใบพัดให้เหมาะสมกับลมเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้น
โรเตอร์ (Rotor)	ก็คือส่วนที่หมุนได้ เช่น ใบพัด โดยจะเรียกรวมกันว่าโรเตอร์
เสา (Tower, Tubular)	ทำมาจาก tubular steel หรือ steel lattice เพราะว่าลมจะแรงขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงขึ้น
ทิศทางลม (Wind direction)	ทิศทางของลมจะมี 2 ลักษณะคือ มาจากข้างหน้า และมาจากด้านหลัง
หางเสือ (Wind vane)	เครื่องมือวัดว่าลมมาจากทางด้านไหน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

72734

ส่วนประกอบของกังหันลม	หน้าที่และการทำงาน
แกนคอหมุนรับทิศทางลม (Yaw drive)	บางทีลมมีการเปลี่ยนทิศทางจึงต้องมีการเปลี่ยนทิศทางของกังหันด้วยเพื่อทำให้สามารถรับลมได้ดีที่สุด
มอเตอร์ขับแกนคอหมุน (Yaw motor)	มอเตอร์ จะหมุน Yaw drive ทำให้เปลี่ยนทิศทางของกังหันได้

2.3.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยพลังงานลม

ขั้นแรกเริ่มจากการเปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกลนั้นสามารถกระทำให้สำเร็จด้วยวัตถุประเภทใบพัดและเฟืองอุปกรณ์ผลักหมุนใบพัดและอุปกรณ์ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทต่างๆ บางครั้งใช้สายพานหรือระบบเฟืองเกียร์เพื่อปรับเปลี่ยนอัตราความเร็วหมุนของเครื่องขับพลังงานลมให้เหาะสมกับความเร็วหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การใช้ลมมาช่วยในการผลิตไฟฟ้านั้นจะประสบปัญหาอย่างหนึ่งคือ เมื่อลมมีความเร็วต่ำมากก็ไม่สามารถใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงต้องมีตัวเก็บพลังงานไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่และต้องมีการวางแผนสร้างความเหมาะสมให้กับสภาพแวดล้อมความเร็วลมโดยเฉลี่ยในพื้นที่หนึ่งๆระบบที่ใช้กันมากคือใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชาร์จแบตเตอรี่ แล้วจึงจ่ายกระแสไฟตรงออกมาจากแบตเตอรี่ไปยังแหล่งที่ต้องการ

ในปัจจุบันสามารถตั้งกฎเกณฑ์จากประสบการณ์ได้ว่าถ้ามีความเร็วลมเฉลี่ยประจำปีประมาณ 9 ถึง 10 ไมล์ต่อชั่วโมง (15 ถึง 16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ก็พอเพียงสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังลมและกระแสลมที่ผลิตไฟฟ้าได้อย่างดีนั้นมีกำหนดได้ประมาณ 15 ถึง 25 ไมล์ต่อชั่วโมง เพื่ออัตราความเร็วลมขนาดนี้คงอยู่ตลอด 2 วันในส่วนเฉลี่ยของความเร็วทั้งปีก็ถือว่าเพียงพอแล้ว

ในปัจจุบันนี้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมมีขนาดตั้งแต่ 50 ถึง 6,000 วัตต์ จนสูงขึ้นไปจนถึง 3,000 กิโลวัตต์ ซึ่งโครงการวิจัยขององค์การนาซาได้รายงายว่าสามารถทำได้ถึง 300 ล้านกิโลวัตต์

สมการว่าด้วยการคำนวนกำลังที่ได้จากกังหันลม

$$P_1 = \frac{1}{2}(\rho AV)(V^2) = \frac{1}{2}\rho AV^3 \qquad (2.3)$$

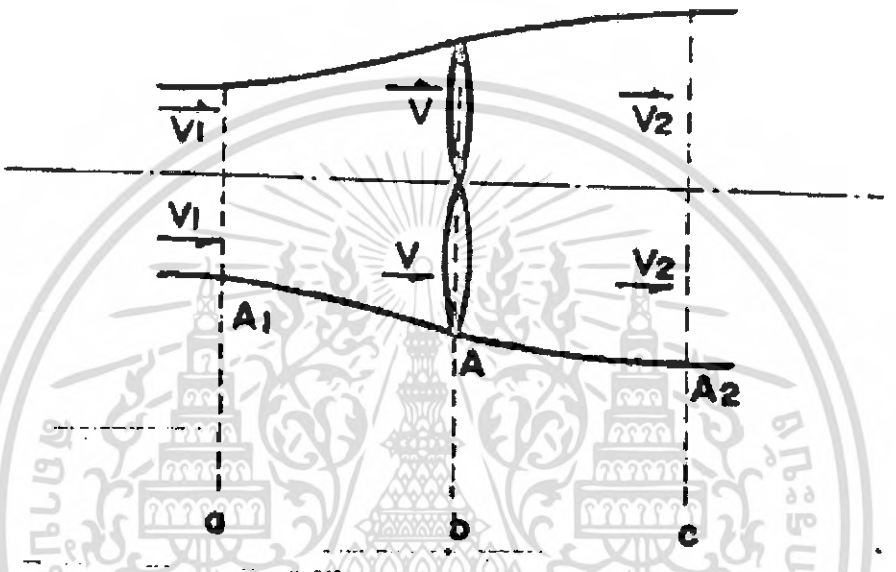
กังหันลมจะทำหน้าที่สกัดกำลังงานที่มีอยู่ในกระแสลมมาใช้ประโยชน์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น กำหนดให้ C_p เป็นสัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient) ซึ่ง C_p จะเป็นตัวบ่งชี้สัดส่วนของกำลังงานที่กังหันจะสามารถสกัดได้จากกระแสลม ถ้า P แทนกำลังงานที่ได้จากกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$P = C_p P_1 = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \tag{2.4}$$

พิจารณากังหันลมที่มีพื้นที่หน้าตัดรับลม A ดั้งรับกระแสลม
ซึ่งมีความเร็วลม V ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.14 รูปแบบการไหลของลม

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

$$A_1 V_1 = AV = A_2 V_2 \tag{2.5}$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของกระแสลม ณ หน่วยเวลา t

$$P = \frac{1}{2}(\rho AV)(V_1^2 - V_2^2) \tag{2.6}$$

และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมที่มีต่อกังหัน โดยแรง F

$$F = \rho AV(V_1 - V_2) \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดเป็นกำลังงาน

$$P = FV = \rho AV(PV^2)(V_1 - V_2) \tag{2.8}$$

ดังนั้น

$$\rho AV^2(V_1 - V_2) = \frac{1}{2}(\rho AV)(V_1^2 - V_2^2) \tag{2.9}$$

และ

$$V = \frac{1}{2}(V_1 - V_2) \tag{2.10}$$

Betz Coefficient Betz เสนอแนวทางการหาค่าสูงสุดของการสกัดกำลังงานจากกระแสลมให้ได้สูงสุด โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วลม V_1 และ V_2
ถ้ากำหนดให้ $V_2 = dV_1$ แทนค่าลงในสมการที่ (2.6)

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2}\rho A[\frac{1}{2}(V_1 + dV_2)](V_1^2 - d^2V_2^2) \\ &= \frac{1}{4}\rho AV_1^3(1+d)(1-d^2) \end{aligned} \tag{2.11}$$

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

ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_{max} &= \frac{1}{4}\rho AV_1^3(1+\frac{1}{3})(1-\frac{1}{9}) \\ &= \frac{1}{2}(\frac{16}{27})\rho AV_1^3 \end{aligned} \tag{2.12}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีคิดอย่างง่ายสำหรับระบบพลังงานต่ำ

ให้เครื่องไฟฟ้าที่ติดตั้งมีกำลัง 48 กิโลวัตต์ – ชั่วโมง ต่อ 1 เดือนที่แรงดัน 12 โวลต์ความดัน 4,000 แอมแปร์ - ชั่วโมง ในทุกๆแอมแปร์ – ชั่วโมง จะส่งไปประจุในแบตเตอรี่ พลังงานนี้จะถูกนำไปใช้งาน

สมมุติว่าเราต้องการกำลัง 120 วัตต์ ที่ 12 โวลต์ หากระแสที่ใช้ได้ คือ

$$I = \frac{P}{E} = \frac{120}{12} = 10 \text{ แอมแปร์}$$

I = กระแส (แอมแปร์)

P = กำลัง (วัตต์)

E = แรงดัน (โวลต์)

ให้ใช้เครื่องกับสถานีรับส่งวิทยุที่ทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำงานประมาณ 80 เปอร์เซนต์ นอกจากรับส่งแล้วกระแสบางส่วนยังต้องไปเลี้ยงเครื่องรับและเครื่องสำรอง สมมิตว่าทั้งหมดใช้ในงานเป็น 50 เปอร์เซนต์ ฉะนั้น ถ้าทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน จะมีเวลา 4 ชั่วโมง ทำงานตลอดเวลาที่ 120 วัตต์ เพราะฉะนั้นจะสิ้นเปลืองไฟฟ้า 40 แอมแปร์-ชั่วโมง (10 x 0.5 x 8) ในหนึ่งเดือนสิ้นเปลือง 1240 แอมแปร์-ชั่วโมง ในอัตราส่วนเฉลี่ยเบื้องต้นอุปกรณ์นี้สามารถทำงานได้ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมมีกำลังความจุ 4000 แอมแปร์-ชั่วโมง

ถ้าไม่มีลมพัด 6 วันในหนึ่งสัปดาห์ กำลังทั้งหมดที่ต้องการใช้ในหกวันประมาณ 240แอมแปร์-ชั่วโมง (6 x 40) ดังนั้นต้องแบตเตอรี่ที่มีความจุ 240 แอมแปร์-ชั่วโมง มาเป็นตัวเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้เวลาไม่มีลมพัด

การคำนวณกำลังงานจากกังหันลม

สามารถใช้การคำนวณได้หลายอย่าง ซึ่งสูตรเหล่านี้ได้จากการคิดเริ่มต้นอย่างเดียวกัน แต่นำมาทำให้เข้าใจง่ายขึ้น

ความหนาแน่นของอากาศแปรผันกับความดันและอุณหภูมิ

$$\rho = 1.3 \times \frac{P}{760\left(1 + \frac{t}{273}\right)}$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)

P = ความดันบรรยากาศ

t = อุณหภูมิ (องศาเซียลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าที่บรรยากาศปกติ

P = 760 มิลลิเมตรของบาโรมิเตอร์

t = 25 องศาเซียลเซียส

จะได้

$$\rho = 1.3\left(\frac{760}{760\left(1+\frac{25}{273}\right)}\right) = 1.20 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเมตร}$$

พลังงานกล (Kinetic energy) ของลมที่มีมวล m กิโลกรัม และมีความเร็ว v เมตรต่อวินาที หาได้จาก

$$K.E = \frac{1}{2}mv^2 \text{ จูล}$$

พลังงานภายใน 1 วินาที ที่ลมพัดผ่านพื้นที่ตัดขวาง (A) ของกังหันลมมีหน่วยเป็นตารางเมตร

ปริมาตรของลมที่พัดผ่าน $= AV$

มวล $= \rho AV$

กำลัง (Power) $= \frac{1}{2}(\rho AV)V^2$

$= \frac{1}{2}\rho AV^3$ วัตต์

เมื่อ E = efficiency factor

แทนค่า $\rho = 1.2$

กำลัง $= 0.6AV^3E$

หรือจาก $H.P. = P \times A \times E$

เมื่อ P = power factor (หาได้จาก chart A เมื่อรู้ค่าความเร็วลม V ไมล์ต่อชั่วโมง)

A = พื้นที่ตัดขวาง

E = efficiency factor

$H.P.$ = กำลังม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า Power Factor จาก Chart A เมื่อรู้ค่าความเร็วลม V ไมล์ / ชม.

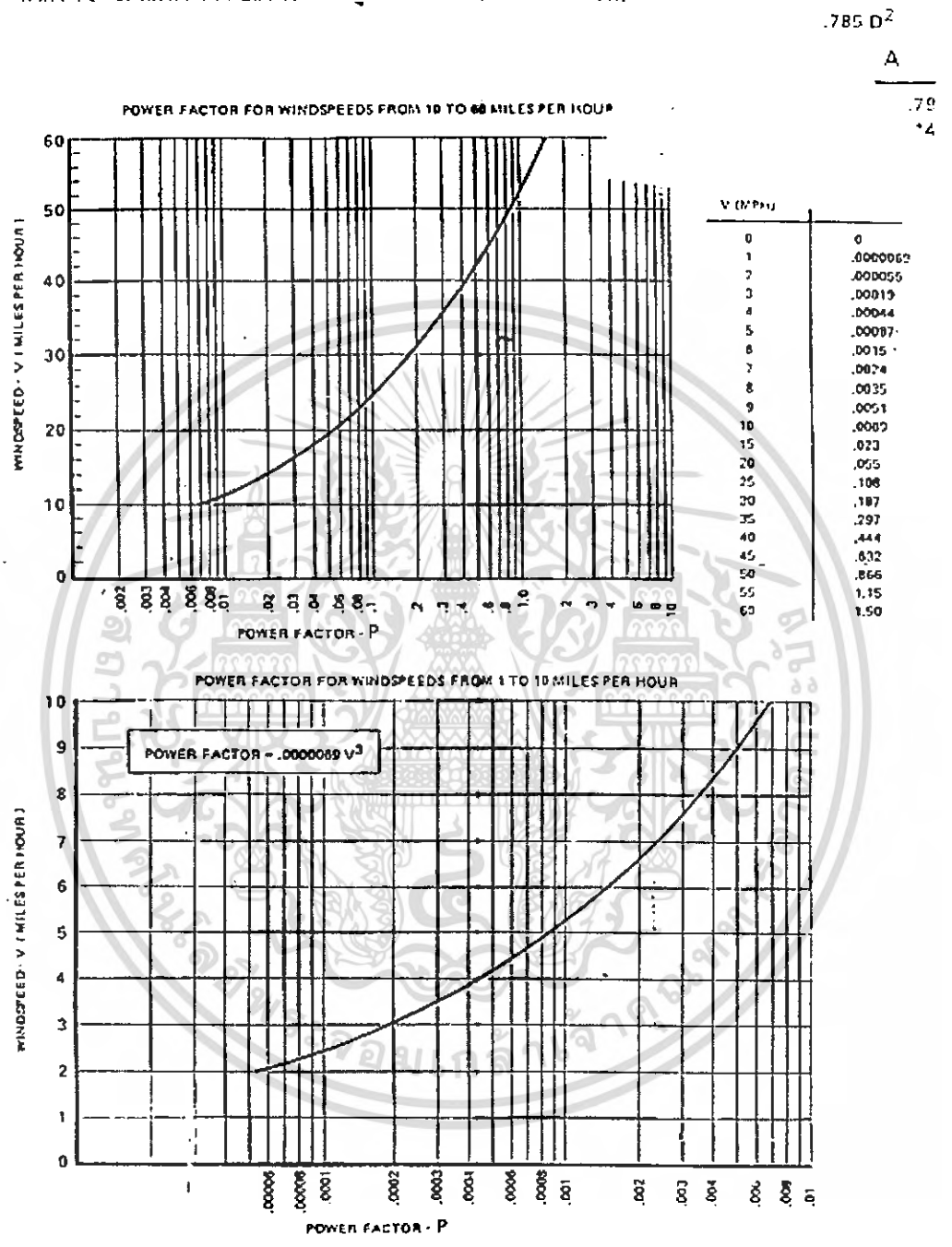
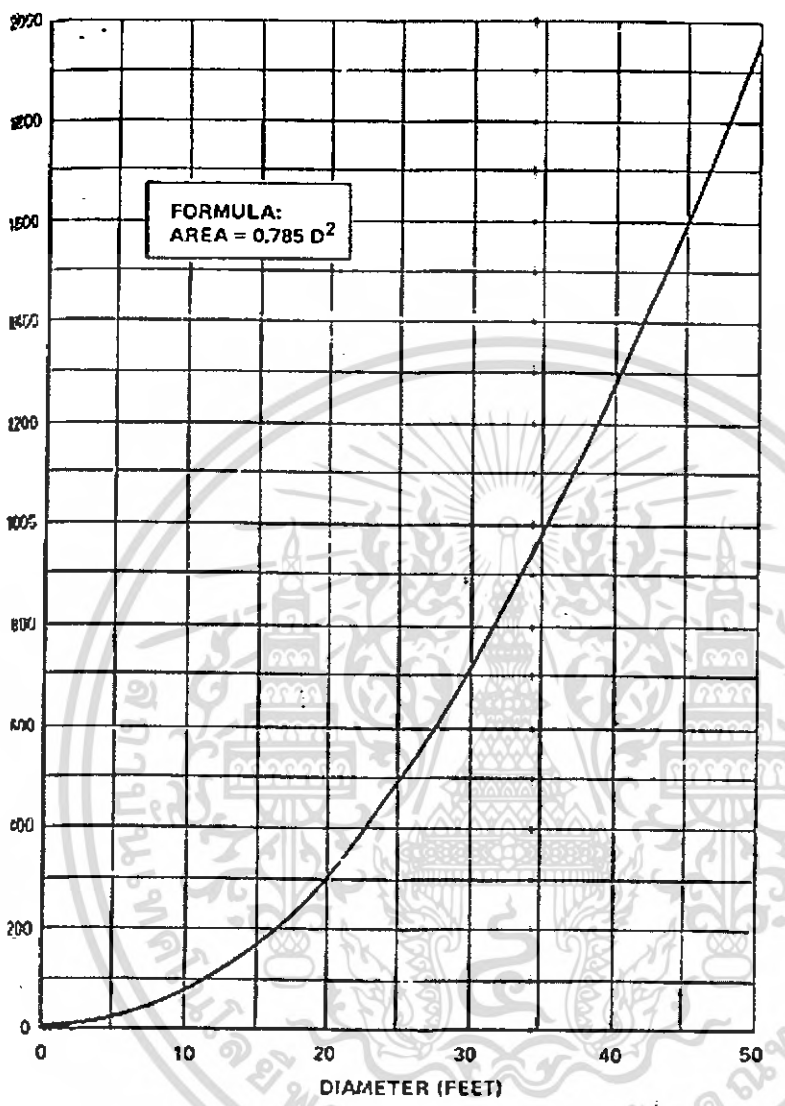


CHART A

รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเพาเวอแฟคเตอร์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A = .785 D^2

D	A
1	.79
2	3.14
3	7.07
4	12.57
5	19.63
6	28.27
7	38.48
8	50.27
9	63.62
10	78.54
11	95.03
12	113.10
13	132.73
14	153.86
15	176.71
20	314.16
25	490.97
30	706.86
35	962.11
40	1256.64
45	1590.43
50	1963.50

รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดกังหันลมกับเส้นผ่านศูนย์กลาง [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
เกณฑ์การจำแนกประเภทและการคัดเลือกกังหันลม

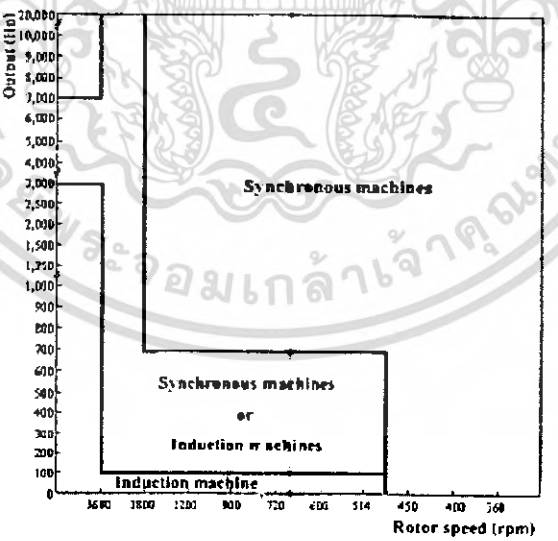
3.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆได้ 2 กลุ่มด้วยกัน คือ

ก. เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งใช้งานระดับปานกลางที่ขนาดไม่สูงมากนัก

ข. เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งถูกใช้งานในวงการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับนั้นยังสามารถแยกออกไปเป็นหลักใหญ่ๆอีก 2 ชนิด คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Machines) ซึ่งมีความเร็วรอบของโรเตอร์เท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน และอีกชนิดคือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Machines) ซึ่งความเร็วของโรเตอร์จะไม่เท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงถูกเรียกอีกอย่างว่า เครื่องจักรกลอะซิงโครนัส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถพบเห็นการทำงานทั่วไปทั้ง มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเบรก มีทั้งเฟสเดียวและหลายเฟส โดยจะออกแบบตามระบบกำลังไฟฟ้าของแต่ละประเทศผู้ใช้งาน โดยจะนิยมใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ซึ่งพอจะสรุปการจัดเป็นแนวทางตามความเหมาะสมในการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในวงการอุตสาหกรรม [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การพิจารณาหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ทั้งเพื่อเป็นหลักพื้นฐานในการเรียนรู้และการประยุกต์ใช้งานเครื่องจักรกลดังจะกล่าวต่อไป ซึ่งในปัจจุบันเห็นได้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีโครงสร้างแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ สเตเตอร์ (stator) เป็นส่วนที่อยู่กับที่ และโรเตอร์ (rotor) เป็นส่วนที่หมุนเคลื่อนที่ ซึ่งประกอบติดกับเพลาขับเคลื่อน ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีช่องว่างอากาศห่างกันประมาณ 0.4 มิลลิเมตร ถึง 4 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับพิกัดของมอเตอร์

สเตเตอร์ ทำจากแผ่นเหล็กซิลิกอนบางๆ (Silicon sheet steel) เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้า และจะนำมาอัดซ้อนเป็นแกน (lamination) โดยยึดเข้าด้วยกันกับโครงเหล็กรูปทรงกระบอกที่เป็นโครงสร้างภายนอกร่องสล็อตจะใช้สำหรับใส่ขดลวดทองแดงเคลือบฉนวนไฟฟ้า โดยมีฉนวน เช่น ไมก้า (Mica) คอยกั้นระหว่างขดลวดทองแดงและแกนเหล็ก

โรเตอร์ ประกอบด้วยแผ่นเหล็ก วางซ้อนกันเป็นแกน และยึดติดเข้ากับเพลาหมุน โรเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

ก. โรเตอร์ชนิดกรงกระรอก (Squirrel cage type rotor) ซึ่งประกอบด้วยแท่งตัวนำที่ทำมาจากอลูมิเนียม หรือทองแดง ฝังอยู่ในร่องสล็อตของโรเตอร์ โดยที่ตัวนำดังกล่าวนี้ถูกลัดวงจรที่ปลายทั้งสองด้านด้วยตัวนำ อลูมิเนียมหรือทองแดงรูปวงแหวน

รูปที่ 3.2 ภาพตัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก [6]

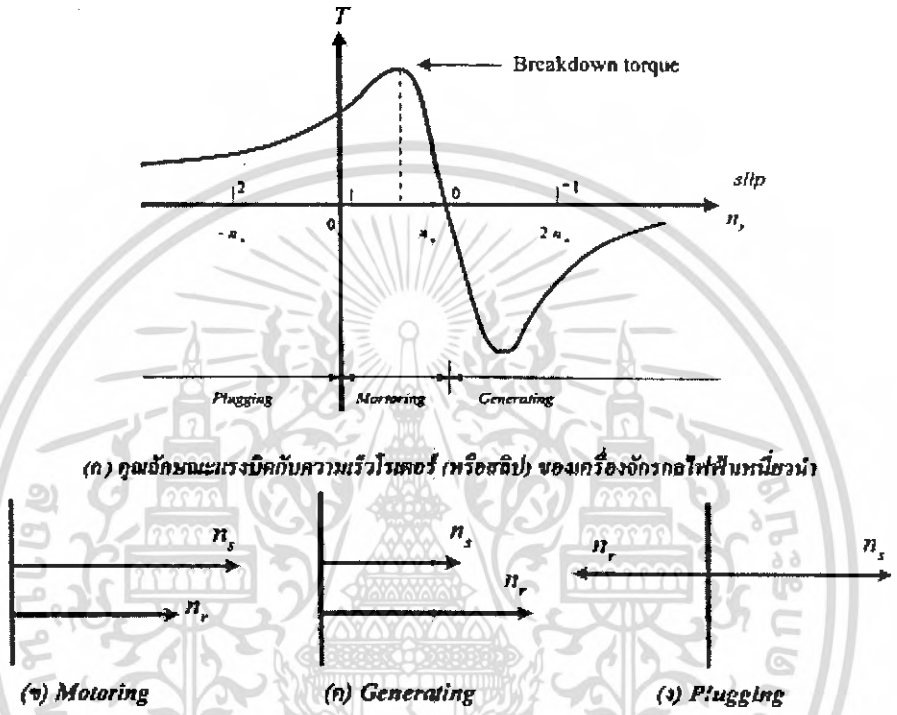
ข. โรเตอร์ชนิดขดลวดพัน (Wound rotor type rotor) ซึ่งลักษณะการพันของขดลวดเหมือนกับขดลวดสเตเตอร์ โดยที่ขั้วของขดลวดโรเตอร์ถูกต่อเข้ากับวงแหวนลื่น (slip rings) ทั้ง 3 ชุด และโรเตอร์ชนิดดังกล่าวนี้สามารถต่อความต้านทานจากวงจรภายนอกเข้าไปได้ ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ในการปรับปรุงรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnitomotive force; mmf) แรงบิดที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างขึ้นและการควบคุมความเร็ว โดยที่การวางขดลวดเป็นลักษณะวางแบบกระจายทั้งที่โรเตอร์และสเตเตอร์ในแต่ละเฟส ดังนั้นเมื่อกระแสไหลผ่านขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่วางกระจายอยู่นั้น มันจะทำให้เกิดการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในลักษณะรูปคลื่นไซนูซอยดอล์ย (sinusoidal) ในช่องว่างอากาศ

3.1.2 ทฤษฎีการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 3 โหมดการทำงาน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โหมดการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [6]

3.1.2.1 โหมดการทำงานเป็นมอเตอร์ (Motor)

ถ้าขดลวดสเตเตอร์ถูกต่ออยู่กับแหล่งจ่าย 3 เฟส โรเตอร์จะหมุนในทิศทางตามสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ซึ่งถือว่าเป็นโหมดการทำงานตามปกติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยที่ความเร็ว $n_r < n_s$ มีค่าสลิป $0 < S < 1$ ดังรูปที่ 3.2 (ข)

3.1.2.2 โหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด (Generating)

ในกรณีที่ปรับความเร็วระบบขับเคลื่อนให้มีค่าสูงกว่าค่าความเร็ว n_s และการหมุนของระบบยังอยู่ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ดังรูปที่ 3.2 (ค) เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างแรงบิดที่เรียกว่า "generating torque" แรงบิดดังกล่าวนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ (หรือตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์นั่นเอง) ซึ่งการทำงานในโหมดนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์ในการหยุดของเครื่องจักรบนระบบขับเคลื่อนที่เรียกว่า "regenerative braking" โดยที่ความเร็ว $n_r > n_s$ มีค่าสลิป $S < 0$

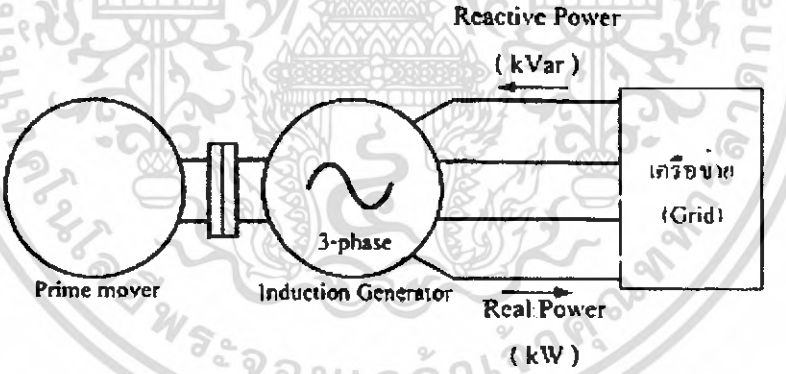
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 โหมดการทำงานโดยความเร็วโรเตอร์กลับทิศทาง (Plugging) โหมดการทำงานนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการหยุดหมุนของมอเตอร์อย่างทันทีทันใดได้โดยอาศัยการทำให้สนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์หมุนในทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของโรเตอร์ และขบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า "Plugging operation" มีค่าสลิป $S > 1$ ดังรูปที่ 3.2 (ง) ซึ่งจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์กลับมาเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นในทิศทางที่ตรงกันข้าม จนกว่าแหล่งจ่ายจะถูกปลดออกที่ความเร็วเป็นศูนย์

3.1.3 ลักษณะการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งาน

เราสามารถแบ่งประเภทของการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานได้ตามลักษณะของการเชื่อมต่อได้ดังนี้

3.1.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับเครือข่าย (Grid-connection Induction Generation) หลักการทำงานเมื่อต่อเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบเครือข่าย (Grid-system) โดยตรงซึ่งยังไม่มีตัวต้นกำลัง (Prime mover) มันจะแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ และรับกำลังไฟฟ้ามาจากระบบเครือข่าย โดยหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ (rotor speed) ซึ่งต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส เนื่องจากมีค่าสลิป แต่เมื่อเราให้ตัวต้นกำลังไปยังโรเตอร์ ในทิศทางความเร็วเดิมจนความเร็วของโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัส ขณะนี้เองที่ทิศทางของกำลังไฟฟ้าจะไหลกลับสู่ระบบเครือข่าย



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่าย [6]

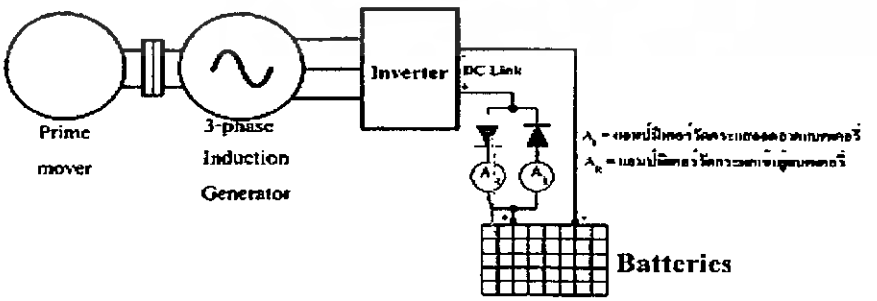
ซึ่งเป็นสภาพที่เครื่องจักรไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเริ่มแสดงพฤติกรรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อแสดงพฤติกรรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะมีข้อจำกัดคือ ถึงแม้ว่าจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (กิโลวัตต์) ให้กับระบบเครือข่ายแล้วก็ตาม แต่ยังคงไม่สามารถสร้างกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (กิโลวาร์) ขึ้นมาเองได้ ในทางตรงกันข้าม กลับต้องมีความต้องการกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบเครือข่ายอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อต้องการนำไปสร้างสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic field) ที่ส่วนกระตุ้น (exciting) สำหรับแรงดันไฟฟ้าและความถี่จะขึ้นอยู่กับระบบเครือข่ายที่ต่ออยู่ แต่จะไม่ขึ้นกับความเร็วของโรเตอร์เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อกับระบบเครือข่าย ข้อดีที่สำคัญคือเป็นระบบที่ง่ายไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการตัวดันกำลังที่มีความเร็วคงที่ แต่ต้องการตัวดันกำลังที่มีความเร็วของโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น จึงพบกันอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้าที่ได้มาจากพลังงานลม โดยใช้กังหันลมขนาดกลาง (Medium Wind Turbine) และขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine) ที่ใช้สำหรับผลิตกำลังไฟฟ้าแบบต่อเชื่อมกับเครือข่าย ส่วนใหญ่จะมีการติดตั้งแบบหลายตัวเป็นทุ่งกังหันลม (Wind Turbine Farm) ทั้งบนบกและในทะเล ซึ่งส่วนของประเทศไทยนั้น ระบบนี้ได้นำมาใช้ที่สถานีพลังงานทดแทนพรหมเทพ อยู่ที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต (ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพฯ 900 กิโลเมตร ที่สถานีนี้ซึ่งแต่เดิมไม่มีเครื่องอำนวยความสะดวกใดๆมาก่อน แต่ด้วยแรงลมตะวันตกเฉียงใต้จากทะเลอันดามันในช่วงมรสุม อีกทั้งความเข้มแสงอาทิตย์ ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งปี แหลมพรหมเทพนี้ จึงเป็นที่ตั้งสมบูรณ์แบบสำหรับการทดลองเซลล์แสงอาทิตย์ และกังหันลม) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าร่วม เซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมขนาดเล็ก (Small Wind Turbine) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ขนาดแรงดัน 400 โวลต์ 50 เฮิร์ทซ กังหันลมเครื่องนี้ติดตั้งใช้งานเมื่อเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2539 ที่สถานีพลังงานทดแทนที่เกาะภูเก็ต ซึ่งปัจจุบันใช้งานอยู่ 3 เครื่อง ได้แก่ กังหันลมขนาด 10 กิโลวัตต์ จำนวน 2 เครื่อง เป็นกังหันลมที่ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อประจุแบตเตอรี่ 240 โวลต์ ชุดเดียวกับเซล์แสงอาทิตย์

3.1.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่แยกจากเครือข่าย (Isolated Induction Generator) การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะทำงานเพียงลำพังและจ่ายภาระทางไฟฟ้าเฉพาะ (Specific load) ค่าหนึ่งเท่านั้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก.แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก (Separate-Excited Induction Generator) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะสร้างแหล่งจ่ายขึ้นมาเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งอาจจะใช้แบตเตอรี่ แล้วใช้อินเวอร์เตอร์ เพื่อทำการแปลงพลังงานของแบตเตอรี่ที่เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ และภายในอินเวอร์เตอร์จะต้องมีตัวเก็บประจุ ถ้าไม่มีตัวเก็บประจุจะทำให้ไม่เกิดการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build-up) เพราะจะไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจินตภาพให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



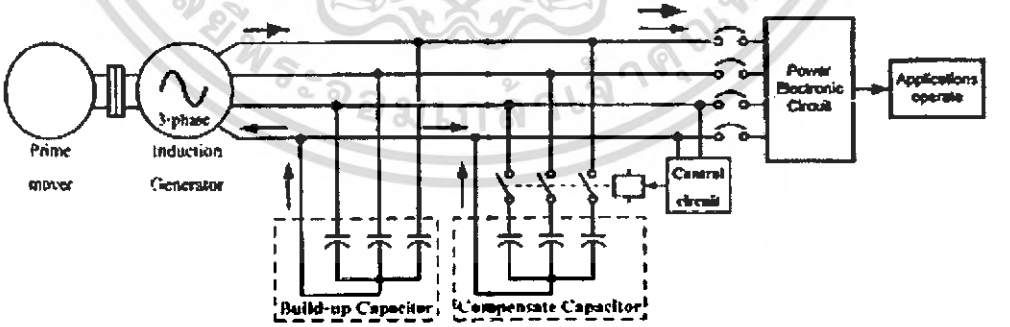
รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ตัวกระตุ้นแยกออกจากระบบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานคล้ายกับระบบที่ต่อเข้ากับเครือข่ายโดยตรง โดยเริ่มต้นจะจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่มาจากอินเวอร์เตอร์เข้าไฟยังเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อนำมาสร้างสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field) โดยที่ขณะนี้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์และรับกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นจึงค่อยจ่ายตัวต้นกำลังทางกลเข้าไปทางเพลาของเครื่องจักรที่ต่ออยู่กับโรเตอร์ จนความเร็วของโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัสซึ่งเป็นความเร็วที่ได้จากค่าสนามแม่เหล็กหมุน และในขณะนี้เองที่กำลังไฟฟ้าจะกลับทิศโดยไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายซึ่งเป็นพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสามารถจ่ายโหลดได้โดยตรงและสามารถนำกลับไปสะสมในแบตเตอรี่ได้ โดยจะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่ในการใช้งานได้จากการควบคุมแรงดันไฟฟ้า และควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งต้องมีการควบคุมที่เหมาะสมกับความเร็วของโรเตอร์ตลอดจนภาระโหลดที่อาจมีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่คงที่และเหมาะสมตลอดย่านการใช้งาน สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกประการคือ แหล่งจ่ายกระแสกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งในที่นี้คือแบตเตอรี่ ต้องมีขนาดเพียงพอต่อการกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ข. แบบกระตุ้นด้วยตนเอง (Self-Excited Induction Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะได้รับกระแสกระตุ้นจากตัวเก็บประจุ ในกรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก มีหลักการคล้ายกับอินเวอร์เตอร์ แต่สามารถใส่ค่าตัวเก็บประจุเพิ่มเข้าไปในระบบได้อีก โดยมากแล้วจะนำ 2 แบบนี้มาใช้ผสมกัน รูปที่ 3.6 จะมีการเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุตามขนาดภาระทางไฟฟ้า โดยมีชุดควบคุมการเพิ่มและลดค่าของตัวเก็บประจุเพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วโรเตอร์และขนาดของโหลด



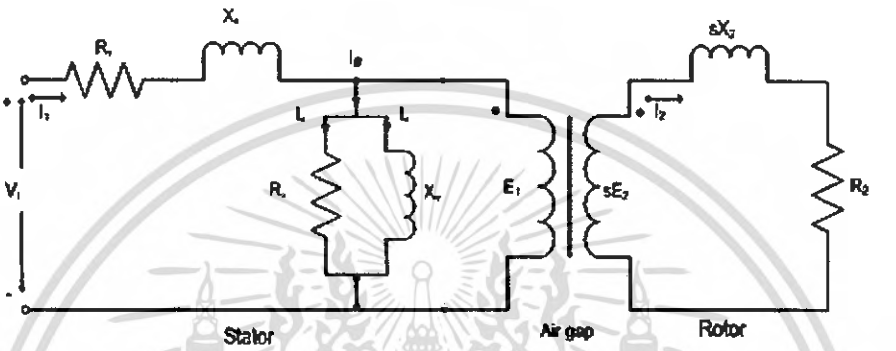
รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ตัวกระตุ้นแยกออกจากระบบโดยใช้ตัวเก็บประจุ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.2.1 รูปแบบวงจรสมมูล (Equivalent circuit model)

การศึกษาสมรรถนะเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพิจารณาจากวงจรสมมูล โดยมีลักษณะเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งข้อแตกต่างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าคือมีช่องว่างอากาศ(Air gap) ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 รูปแบบวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส

3.2.2 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Stator Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 (ก) เมื่อกำหนดให้

V_1 คือแรงดันไฟฟ้าพิกัดสเตเตอร์

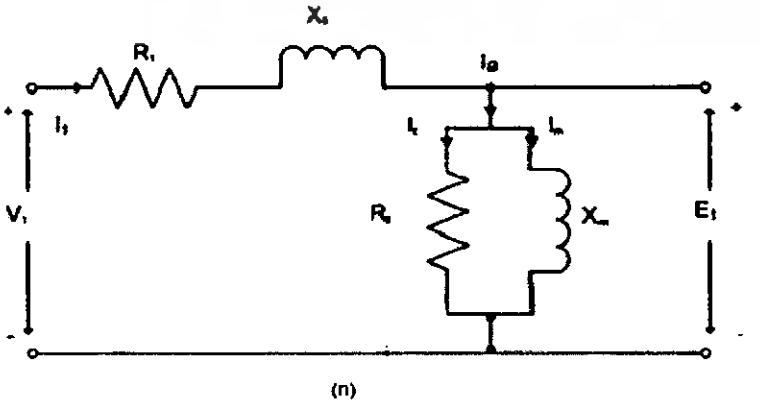
E_1 คือแรงดันเหนี่ยวนำสร้างจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ

R_1 คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

X_1 คือค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ (Leakage reactance) ต่อเฟสที่สเตเตอร์

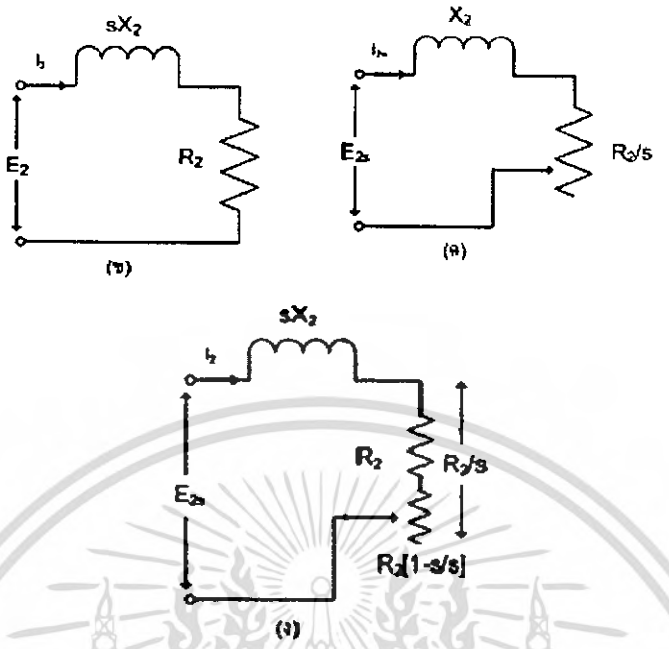
X_m คือค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์จากการทำแม่เหล็ก (Magnetizing reactance) ที่สเตเตอร์ต่อเฟส

R_c คือค่าความต้านทานจากการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core loss resistance) ที่สเตเตอร์ต่อเฟส

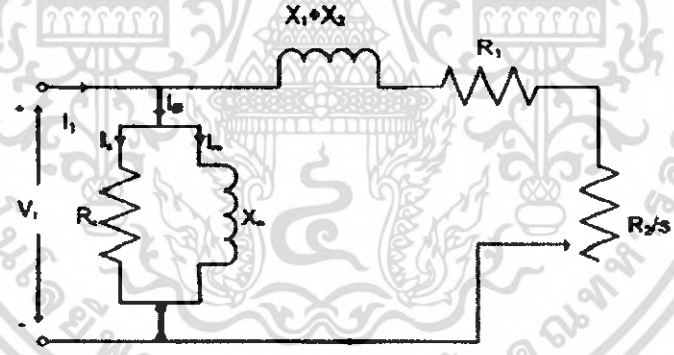


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การพัฒนาวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลแบบประมาณของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.2.3 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Rotor Equivalent Circuit)
ค่าความถี่ของวงจรโรเตอร์จะเปลี่ยนไปตามค่าสลิป วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่สลิป s ใดๆแสดงดังรูปที่ 3.9 (ข) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป

$$X_{2s} = sX_2 \tag{3.1}$$

เมื่อกำหนดให้

X_{2s} คือค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ต่อเฟสของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใดๆ

X_2 คือค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ต่อเฟสของโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{2s} = sE_2 \tag{3.2}$$

เมื่อกำหนดให้

E_{2s} คือค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ต่อเฟสที่ค่าสลิปใดๆ

E_2 คือค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

และสำหรับกระแสในวงจรสมมูลโรเตอร์ I_{2s} ที่ความถี่ด้านโรเตอร์ กำหนดได้ดามสมการที่ (3.3)

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} \tag{3.3}$$

เมื่อกำหนดให้

R_2 คือค่าความด้านทานของขดลวดโรเตอร์ต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

X_2 คือค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ต่อเฟสที่ขดลวดโรเตอร์

ในส่วนประกอบทางด้านภาระ (Load component) I_2 ของกระแสทางด้านสเตเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ เพื่อรักษาระดับฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศไว้ และสมมติให้จำนวนรอบของขดลวดด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์เท่ากัน ดังนั้นค่ากระแสทางด้านสเตเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ I_2 และกระแสในวงจรสมมูลของโรเตอร์ I_{2s} จึงมีความสัมพันธ์เป็น

$$I_2 = I_{2s} \tag{3.4}$$

จากสมการ (3.4) จะทำให้สามารถเขียนสมการ (3.3) ใหม่ดังนี้คือ

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \tag{3.5}$$

จากวงจรสมมูลรูปที่ 3.9 (ค) ค่ากำลังไฟฟ้าต่อเฟสที่ส่งผ่าน (Transfer) ผ่านช่องว่างอากาศ (Power transfer across air gap) P_g จะได้

$$P_g = I_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{3.6}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากขดลวดทองแดงที่โรเตอร์ต่อเฟสซึ่งเกิดขึ้นในรูปความร้อนสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{cu,2} = I_2^2 R_2 = sP_g \tag{3.7}$$

กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโรเตอร์(Rotor output-electromagnetic power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} \tag{3.8}$$

ดังนั้นจากรูปที่ 3.9 (ง) จะเห็นว่าความเร็วขึ้นอยู่กับเทอม $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ ดังนั้นกำลังทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

$$P_e = (1-s)P_g = I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \tag{3.9}$$

ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \tag{3.10}$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากมอเตอร์ (Output power = mechanical power)

$$P_o = P_e - \textit{Rotational and Core Losses} \tag{3.11}$$

เมื่อทำงานเป็นมอเตอร์จะได้

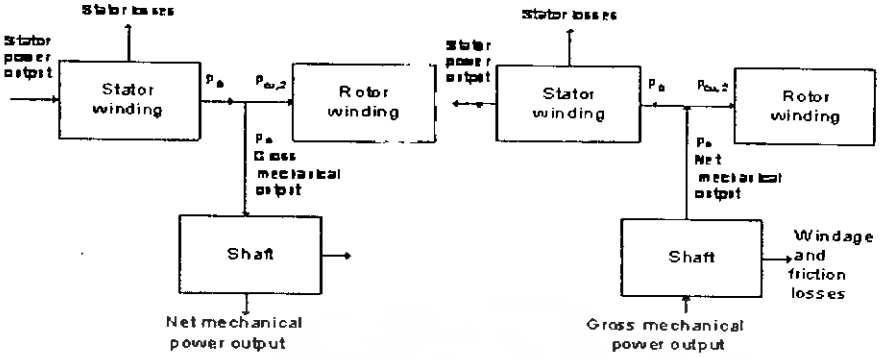
$$P_g : P_{cu,2} : P_e = 1 : s : (1-s) \tag{3.12}$$

เมื่อทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็น

$$P_g : P_{cu,2} : P_e = 1 : s : (1+s) \tag{3.13}$$

สามารถเขียนไดอะแกรมได้เป็นดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมแสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
(ก) Motioning mode (ข) Generating mode

3.3 ประเภทของกังหันลม

3.3.1 กังหันลมที่มีการนำมาใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งตามลักษณะของความเร็วลมที่สามารถทำให้โรเตอร์ทำงานได้ดังนี้

ก. กังหันลมแบบฟิกซ์สปีด (Fixed-speed wind turbine) เป็นกังหันลมที่มีการกำหมดหรือจำกัดความเร็วของกังหันลมที่โรเตอร์ไว้ โดยความเร็วที่ถูกจำกัดนั้นจะขึ้นอยู่กับความถี่จากกริดที่มีการเชื่อมต่อกับกังหันลม และการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในกังหันลม ซึ่งจะถูกต่อโดยตรงเข้าสู่กริดผ่านซอฟท์สตาร์ทเตอร์ (Soft-starter) และคาปาซิเตอร์แบงค์ (Capacitor bank) เพื่อลดกระแสพุ่งเข้า (Inrush current) จากการเริ่มทำงานของกังหันลม และชดเชยกำลังจินตภาพ (Reactive power) โดยออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วโรเตอร์ค่าๆหนึ่งเท่านั้น ส่วนการเพิ่มกำลังการผลิตโดยการทำงานที่ความเร็วลมหลายๆค่านั้นสามารถทำได้โดยการพันขดลวด 2 ชุด เมื่อความเร็วลมมีค่าต่ำๆจะใช้ขั้วแม่เหล็กประมาณ 8 ขั้ว และความเร็วลมที่มีค่าสูงๆจะใช้ขั้วแม่เหล็กประมาณ 4-6 ขั้ว

ข้อดี	ข้อเสีย
- มีการผลิตที่ง่าย	• ไม่สามารถควบคุมการบริโภคกำลังจินตภาพจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้
- ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน	
- แข็งแรงทนทาน	
- มีความน่าเชื่อถือสูง	• มีความเครียดทางกลสูง
- ราคาต่ำ	• มีข้อจำกัดทางด้านคุณภาพไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมแบบฟิกซ์สปีด เมื่อความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อกำลังการผลิตและส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของโวลต์เตจขึ้นทันที ซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียในสายส่งเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

ข. กังหันลมแบบแวริเอเบิลสปีด (Variable-speed wind turbine) ได้รับการออกแบบทางพลศาสตร์ให้ทำงานที่ความเร็วลมหลายระดับอย่างต่อเนื่อง โดยการปรับค่า ω_r เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมแบบฟิกซ์สปีด กับกังหันลมแบบแวริเอเบิลสปีดมีความอิสระในการทำงานมากกว่าและมีกำลังผลิตมากกว่าที่ความเร็วลมเท่ากัน ทางด้านระบบไฟฟ้าจะมีความซับซ้อนมากกว่าเพราะมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาเป็นส่วนประกอบ

ข้อดี	ข้อเสีย
- มีกำลังการผลิตสูง	• มีการสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์อุปกรณ์
- สามารถควบคุมคุณภาพทางไฟฟ้าได้ดี	อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ความเครียดทางกลต่ำ	• มีราคาสูง

3.3.2 การแบ่งประเภทของกังหันลมตามการควบคุมกำลัง (Power control)

ก. การควบคุมแบบสทอล (Stall control (Passive control)) โดยการควบคุมแบบนี้ใบพัดของกังหันลมจะติดอยู่กับตัวเพลา ไม่สามารถหมุนหรือปรับองศาของใบพัดได้แต่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตน้อยกว่าการควบคุมแบบพิทช์ ถึงกระนั้นก็มีประสิทธิภาพต่ำที่ความเร็วลมต่ำๆและไม่สนับสนุนการเริ่มทำงานที่ความเร็วลมต่ำ

ข. การควบคุมแบบพิทช์ (Pitch control (Active control)) โดยการควบคุมแบบนี้ใบพัดสามารถหมุนหรือปรับองศาได้ ข้อดีก็คือสามารถควบคุมกำลังการผลิตได้ดีนั่นก็คือมีประสิทธิภาพสูงและสนับสนุนการเริ่มหรือหยุดกลางคัน ข้อด้อยก็คือมีความซับซ้อนในการสร้างและมีความแปรปรวนของกำลังการผลิตในระดับสูง

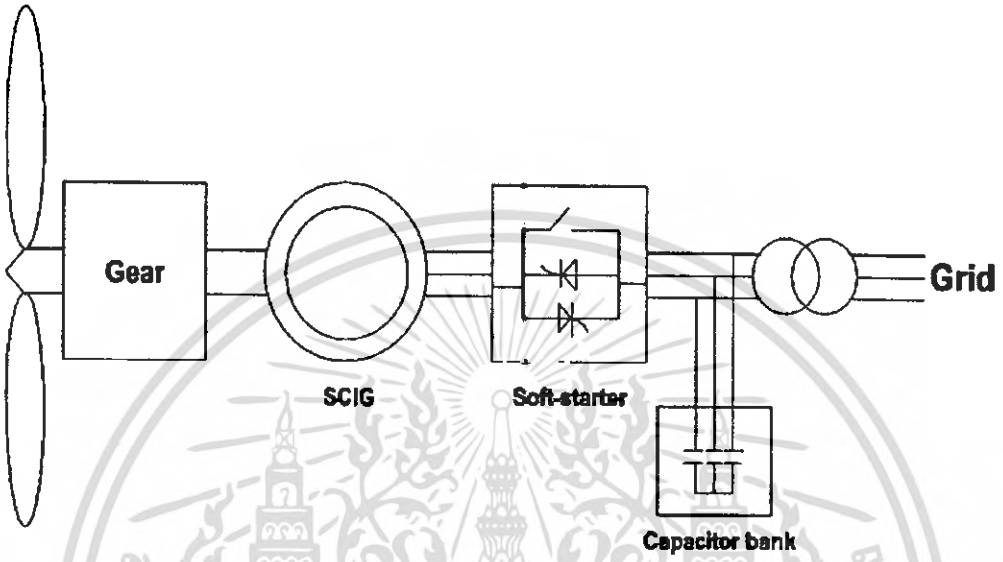
ค. การควบคุมแบบแอคทีฟสทอล (Active stall control) โดยการควบคุมแบบนี้เป็นการรวมข้อดีของการควบคุมทั้ง 2 แบบเบื้องต้นเข้าไว้ด้วยกัน นั่นก็คือเมื่อมีความเร็วลมต่ำๆจะใช้การควบคุมแบบพิทช์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อความเร็วลมสูงๆจะเปลี่ยนมาใช้การควบคุมแบบสทอลแทน ซึ่งทำให้การควบคุมแบบแอคทีฟสทอลนั้นให้กำลังผลิตที่สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพสูงนั่นเอง แต่มีข้อเสียคือโครงสร้างซับซ้อนและราคาแพง

3.3.3 การแบ่งประเภทตามชนิดของวงจรและส่วนประกอบภายในของกังหันลม

ก. แบบ A โดยกังหันลมชนิดนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel cage induction generator: SCIG) และต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตรงเข้าสู่กริดผ่านหม้อแปลง ข้อเสียก็คือจะต้องมีการชดเชยกำลังจินดภาพให้กริดนั่นหมายถึงว่าจำเป็นที่จะต้องมีคาปาซิเตอร์แบงค์ และซอฟท์สตาร์ทเตอร์ เมื่อเราพิจารณาความเร็วลมที่ไม่คงที่จะมีผลทำให้เกิดความแปรปรวนต่อกำลังการผลิตโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบ A0 จะเป็นกังหันลมที่มีส่วนประกอบแบบ A และมีการควบคุมแบบสทอล
- แบบ A1 จะเป็นกังหันลมที่มีส่วนประกอบแบบ A และมีการควบคุมแบบพิทช์
- แบบ A2 จะเป็นกังหันลมที่มีส่วนประกอบแบบ A และมีการควบคุมแบบแอคทีฟสทอล

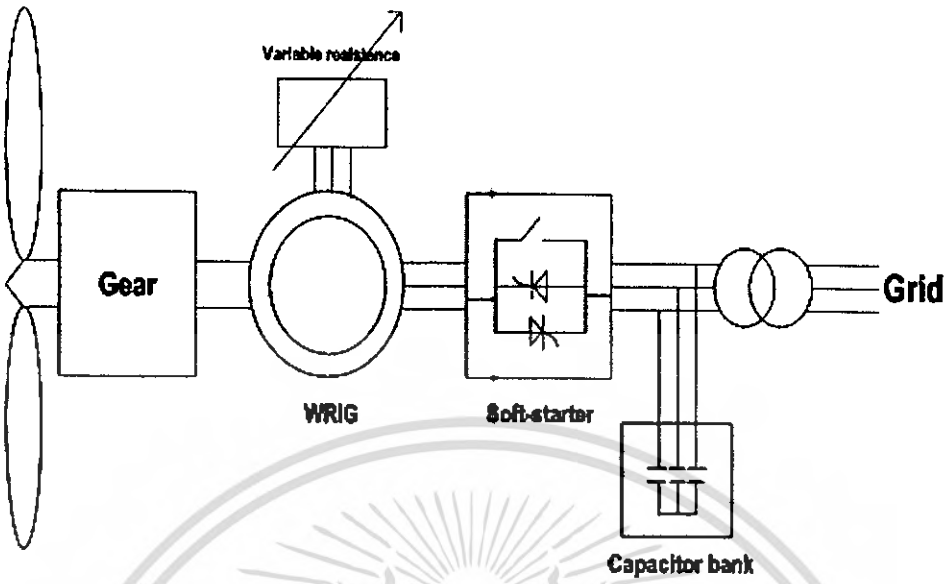


รูปที่ 3.11 กังหันลมแบบ A

ข้อดี	ข้อเสีย
-มีการผลิตที่ไม่ซับซ้อน	-ไม่สามารถควบคุมการบริโภคกำลัง
-ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน	จินตภาพจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้
-แข็งแรงทนทาน	-มีข้อจำกัดทางด้านคุณภาพไฟฟ้า
-ราคาต่ำ	

ข. แบบ B ใช้การทำงานแบบออปติสลิป (Optislip:Variable generator rotor resistance) โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้จะเป็นแบบโรเตอร์ชนิดขดลวดพัน (Wound rotor induction generator : WRIG) ซึ่งมีการเชื่อมต่อโดยตรงเข้าสู่กริด และยังใช้คาปาซิเตอร์แบงค์รวมทั้งซอฟท์สตาร์ทเตอร์อยู่ ส่วนแนวคิดของกังหันลมแบบ B นี้จะใช้ออปติสลิปเป็นตัวควบคุม โดยเมื่อค่าความต้านทานของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงจะสามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ได้ ซึ่งมีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียคือมีการสูญเสียจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ออปติสลิป

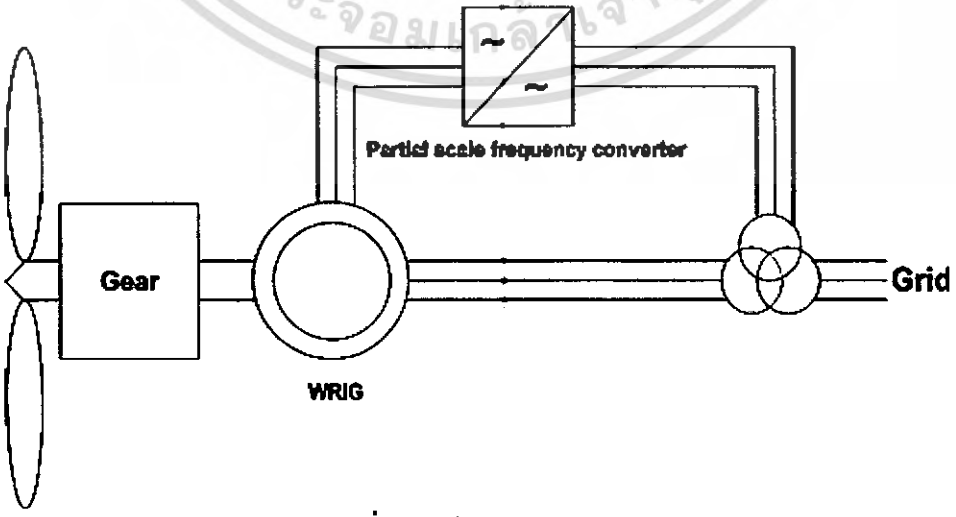
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กังหันลมแบบ B

ข้อดี	ข้อเสีย
-ช่วงความเร็วลมในการทำงานกว้าง	-มีความจำเป็นต้องใช้สลิปริง
-ความเครียดทางกลต่ำ	-ต้องการอุปกรณ์ชดเชยแรงดันจินดภาพ
-กำลังไฟฟ้าที่ผลิตมีค่าใกล้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด	-มีการสูญเสียกำลังที่โรเตอร์สูง

ค. แบบ C (Doubly fed) จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันโดยมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมความถี่เป็นตัวชดเชยกำลังจินดภาพและทำหน้าที่เป็นซอฟท์สตาร์ทเตอร์ แต่ก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สลิปริง

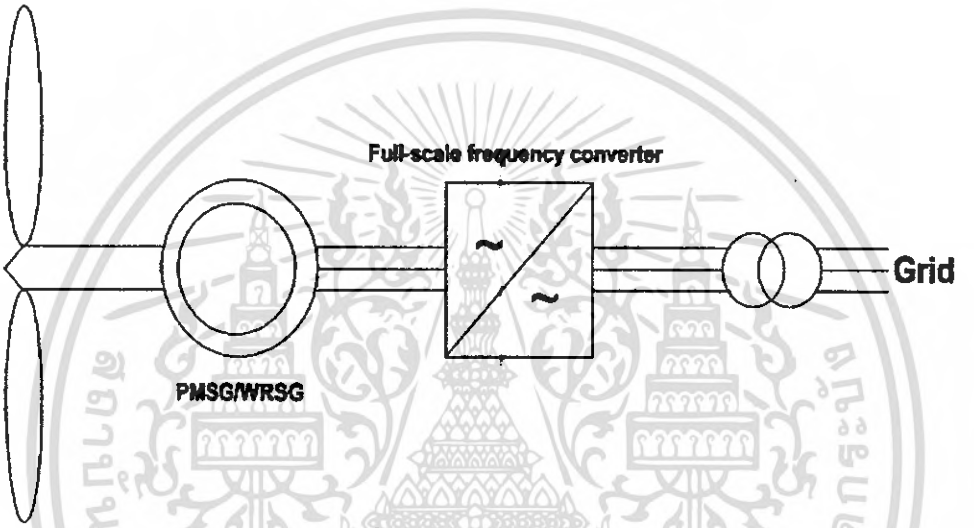


รูปที่ 3.13 กังหันลมแบบ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี	ข้อเสีย
-ช่วงความเร็วลมในการทำงานจำกัด (-30% ถึง +20% ของความเร็วการทำงานปกติ)	-มีความจำเป็นต้องใช้สลิปริง -มีความจำเป็นต้องใช้เกียร์บ๊อกซ์
-อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก	
-ควบคุมกำลังจริงและกำลังจินตภาพได้ดี	

ง. แบบ D จะมีความคล้ายคลึงกับแบบ C แต่จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดขดลวดพันแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน และไม่มีเกียร์บอกซ์



รูปที่ 3.14 กังหันลมแบบ D

ข้อดี	ข้อเสีย
-ทำงานที่ช่วงความเร็วลมทุกระดับ	-มีความจำเป็นต้องใช้สลิปริง
-อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก	-มีความจำเป็นต้องใช้เกียร์บ๊อกซ์
-ควบคุมกำลังจริงและกำลังจินตภาพได้ดี	

ตารางที่ 3.1 ประเภทของกังหันที่มีการผลิตหรือนำมาใช้งาน [1]

Speed control		Power control		
		Stall	Pitch	Active stall
Fixed speed	Type A	Type A0	Type A1	Type A2
Variable speed	Type B	**Type B0**	Type B1	**Type B2**
	Type C	**Type C0**	Type C1	**Type C2**
	Type D	**Type D0**	Type D1	**Type D2**

หมายเหตุ อักษรตัวหนาหมายถึงยังไม่มีการผลิตหรือนำมาใช้ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ส่วนแบ่งการตลาดของกังหันลมแบบต่าง ๆ [1]

Design Concept	World Market Share	Market Share Germany
Fixed speed (Stall or active stall regulation, fixed speed operation, gearbox, pole-switchable asynchronous)	23 %	22 %
Dynamic slip control (Limited variable speed, pitch regulation, pole-switchable asynchronous generators with variable slip)	11 %	0 %
Doubly-fed generator (Variable speed operation, pitch control, gearbox, doubly-fed generator utilizing power electronics in the inverter)	50 %	49 %
Direct-driven variable speed synchronous (generators with large-diameter synchronous ring generator, including pitch control, but no gearbox, utilizing power electronics in the inverter)	16 %	29 %
Total	100 %	100 %

จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเบื้องต้น ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์ภายในกังหันลมมีหลักการทำงานอย่างไร ส่วนการเปรียบเทียบกังหันลมที่มีการผลิตในปัจจุบันส่วนใหญ่นั้นจะเลือกใช้กังหันลมแบบ C1 ซึ่งจะเป็นกังหันลมแบบแวริเอเบิลสปีดและใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันแบบดับบลีเฟด (Doubly fed induction generator) ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบันโดยมีส่วนประกอบคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน, partial scale frequency converter และเกียร์บอกซ์ เป็นต้น โดยกังหันลมชนิดนี้สามารถทำงานที่ความเร็วลมระดับต่าง ๆในช่วงที่กว้างกว่ากังหันลมบางชนิดที่ผลิตได้ในปัจจุบัน มีการสูญเสียกำลังจากอุปกรณ์ภายในต่ำและยอมรับได้ และมี partial scale frequency converter ทำหน้าที่ชดเชยความแตกต่างของความถี่ทางไฟฟ้ากับความถี่ทางกล ซึ่งทำให้มีความสามารถที่จะควบคุมกำลังจริงและกำลังจินตภาพในระหว่างการทำงานได้เป็นอย่างดี

เพาเวอร์คอนเวอเดอร์ที่ใช้ภายในกังหันลมชนิดนี้จะประกอบด้วยคอนเวอเดอร์ 2 ชนิด คือคอนเวอเดอร์ทางด้านโรเตอร์ และคอนเวอเดอร์ทางด้านกริด ซึ่งจะมีการทำงานเป็นอิสระจากกัน โดยคอนเวอเดอร์ทางด้านโรเตอร์จะเป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพโดยอาศัยการควบคุมจากส่วนประกอบของกระแสโรเตอร์ (Rotor current components) ส่วนคอนเวอเตอร์ทางด้านกริด จะเป็นตัวควบคุมแรงดันเพื่อให้ได้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของกังหันลมชนิดนี้ก็คือ มีความสามารถในการควบคุมกำลังจินดภาพอีกทั้งยังไม่ต้องการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจากกริดอีกด้วย เพราะสามารถกระตุ้นได้ด้วยตัวมันเอง ขนาดของคอนเวอร์ไม่มีความเกี่ยวข้องกับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่จะเป็นตัวกำหนดช่วงการทำงานที่ความเร็วต่างๆ ดังนั้นเมื่อราคาคอนเวอเดอร์สูงขึ้นช่วงการทำงานที่ความเร็วลมระดับต่างๆก็จะกว้างขึ้นนั่นเองส่วนข้อเสียของกังหันลมชนิดนี้ก็คือยังมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สลิปริง ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกแล้วแม้ว่าจะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แต่ก็ไม่สามารถควบคุมกำลังจินดภาพได้ดีเท่า อีกทั้งยังมีกำลังการผลิตที่น้อยกว่าที่ความเร็วลมเท่ากัน และมีช่วงการทำงานที่ความเร็วลมระดับต่างๆได้ไม่มากนัก มีความเครียดทางกลสูง และแรงดันมีได้ความแปรปรวนสูง ทำให้ความเหมาะสมของกังหันลมที่ควรจะเลือกใช้ควรจะเป็นแบบ C1 นั่นเองส่วนแบบ C0, C2 นั้นไม่มีการผลิตมาใช้ในปัจจุบันจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 6.7 ซึ่งแสดงส่วนแบ่งการตลาดของการใช้งานกังหันลมแบบต่างๆ ส่วนความเหมาะสมของการเลือกกังหันลมนั้นจะดูที่ค่าความเร็วลมที่เหมาะสมกับการทำงาน (Nominal speed) และกำลังการผลิตที่ระดับความเร็วลมเท่ากันกังหันลมตัวใดจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากันนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power quality)

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะเฉพาะทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าของกังหันลมตามมาตรฐาน ของ IEC 61400-21 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะเป็นไปตามลักษณะเฉพาะทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าของกังหันลมดังนี้

4.1 ข้อมูลที่กำหนด (Rated data)

ข้อมูลที่กำหนดของกังหันลม (P_n, Q_n, S_n, I_n) สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. กำลังที่กำหนด (P_n) คือค่ากำลังจริงที่ผลิตได้สูงสุดของกังหันลมที่ถูกออกแบบภายใต้เงื่อนไขการทำงานในสภาวะปกติ

ข. กำลังจินตภาพที่กำหนด (Q_n) คือค่ากำลังจินตภาพของกังหันลมขณะทำงาน

ค. กำลังปรากฏที่กำหนด (S_n) คือค่ากำลังปรากฏของกังหันลมขณะทำงาน

ง. กระแสที่กำหนด (I_n) คือค่าค่ากระแสจากกังหันลมขณะทำงาน

4.2 กำลังการผลิตสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum permitted power : P_{mc})

กำลังการผลิตโดยเฉลี่ย 10 นาที ของกังหันลม (ขึ้นอยู่กับการออกแบบกังหันลม) มีโอกาสมากกว่ากำลังที่กำหนดของตัวกังหันลมเอง ด้วยเหตุนี้ค่าพารามิเตอร์ของกำลังการผลิตสูงสุดที่ยอมรับได้ สามารถนำไปใช้ในการหาค่าจำกัดความ ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดในเวลาเฉลี่ย 10 นาทีได้ โดยถูกจัดให้อยู่ในรูปสมการดังนี้ที่ความเร็วคงที่และมีวิธีควบคุมการหยุดทำงานของกังหันลมเป็นแบบเดียวกัน

$$P_{mc} = P_n \tag{4.1}$$

ส่วนการดิดตั้งโดยทั่วไปของกังหันลมปกติค่า P_{mc} จะมากกว่า P_n ประมาณ 20 เปอร์เซนต์

4.3 กำลังการผลิตสูงสุดที่วัดได้ (Maximum measure power)

กำลังการผลิตสูงสุดที่วัดได้ P_{60} คือการวัดกำลังการผลิตสูงสุดในเวลา 60 วินาทีโดยเฉลี่ย และ $P_{0.2}$ คือการวัดกำลังการผลิตสูงสุดในเวลา 0.2 วินาทีโดยเฉลี่ย ซึ่งมีจุดประสงค์คือจะนำค่า P_{60} และ $P_{0.2}$ มาพิจารณาเพื่อทำการการดิดตั้งรีเลย์ป้องกัน โดยที่ตัวแปรกำลังการผลิตสูงสุดที่วัดได้ของกังหันลมจะจัดอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$P_{0.2} = P_{60} = P_n \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามที่ความเร็วลมคงที่ $P_{0.2}$ จะมีค่าที่มากกว่ากว่า P_{π}

4.4 กำลังจินตภาพ (Reactive power)

กำลังจินตภาพของกังหันลมจะถูกกำหนดจากค่า P_{mc} , P_{60} และ $P_{0.2}$ ค่าดังกล่าวจะมีขนาดตั้งแต่ 0.1 เปอร์เซนต์ ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังการผลิต โดยกังหันลมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเชื่อมต่อโดยตรงกับกริด ซึ่งกำลังจินตภาพจะถูกชดเชยโดยตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่ออยู่ด้วยหรือใช้เครื่องเปลี่ยนความถี่กระแสไฟฟ้าก็สามารถควบคุมกำลังจินตภาพได้ แต่ก็ถูกจำกัดโดยขนาดของคอนเวอร์เตอร์

4.5 สัมประสิทธิ์ฟลิคเกอร์ (Flicker Coefficient)

ความแปรปรวนของกำลังการผลิตจากกังหันลมในช่วงการทำงานอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการแปรปรวนของแรงดันภายในกริด โดยการแกว่งขึ้นลงของแรงดันจะขึ้นอยู่กับความมีเสถียรภาพของกริดด้วย ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงแอมปลิจูดของกำลังการผลิต โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน จะส่งผลทำให้แสงในหลอดไฟมีการกระพริบผลของการกระพริบนี้มีสาเหตุมาจากฟลิคเกอร์และสามารถวัดได้โดยใช้ฟลิคเกอร์มิเตอร์ (ฟลิคเกอร์มิเตอร์จะใช้แรงดันขาเข้าเปรียบเทียบกับแรงดันขาออก) โดยค่าสัมประสิทธิ์ฟลิคเกอร์จะวัดโดยใช้ค่าดรรชนีไฟกระพริบระยะสั้นที่แสดงออกมามากที่สุด (ค่าเปอร์เซนต์ไทล์ที่ 99) ของกังหันลมระหว่างการทำงานอย่างต่อเนื่องโดยมีสมการดังนี้

$$c(\psi_k, v_a) = P_{st}\left(\frac{S_k}{S_n}\right) \tag{4.3}$$

เมื่อ P_{st} คือ ดรรชนีไฟกระพริบระยะสั้น

S_n คือ กำลังปรากฏที่กำหนดของกังหันลม

S_k คือ กำลังปรากฏลัดวงจรภายในกริด

โดยกำหนดค่าความต้านทานของระบบที่มุมเฟส (30°, 50°,70°,85 °) และอัตราความเร็วลมเฉลี่ยต่อปี (6 m/s , 7.5 m/s, 8.5 m/s, 10 m/s)

4.6 จำนวนครั้งสูงสุดของการสับเปลี่ยนการทำงานของกังหันลม (Maximum number of wind turbine switch operation)

กรณีการสับเปลี่ยนดังต่อไปนี้จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายในระบบ

ก. กังหันลมเริ่มทำงานที่ความเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมจะเริ่มทำงาน

ข. กังหันลมเริ่มทำงานที่ความเร็วลมที่ค่าที่ตั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. กรณีที่แย่ที่สุดของการสับเปลี่ยนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นมีลมพายุ เป็นต้น (สามารถใช้ได้เฉพาะกังหันลมที่มีเจนเนอเรเดอร์มากกว่า 1 ตัว หรือเจนเนอเรเดอร์ตัวเดียวที่มีการพันขดลวดหลายขด)

การยอมรับการสับเปลี่ยนของระบบกังหันลมไม่เพียง แต่ขึ้นกับผลกระทบที่แรงดันของกริด แต่ยังขึ้นกับความถี่ของระบบอีกด้วย ดังนั้นจำนวนครั้งสูงสุดของการสับเปลี่ยนการทำงานของกังหันลมที่เกิดภายในคาบเวลา 10 นาที N_{10} และ N_{120} จะถูกควบคุมโดยการติดตั้งระบบควบคุมกังหันลมจากบริษัทผู้ผลิต

4.7 ตัวกระกอบกำลังฟลิคเกอร์ (Flicker step factor)

ตัวกระกอบกำลังฟลิคเกอร์ คือการวัดค่าการเกิดฟลิคเกอร์เนื่องจากการสับเปลี่ยนการทำงานเพียงครั้งเดียวของกังหันลมโดยมีสมการดังนี้

$$k_f(\psi_k) = \left(\frac{1}{130}\right)\left(\frac{S_k}{S_n}\right) P_{st} T_P^{0.31} \tag{4.4}$$

เมื่อ T_p คือ ช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจากการสับเปลี่ยนการทำงน

P_{st} คือ การเกิดฟลิคเกอร์ของกังหันลม

S_n คือ กำลังปรากฏที่กำหนดของกังหัน

S_k คือ กำลังปรากฏลัดวงจรภายในกริด

ตัวกระกอบกำลังฟลิคเกอร์จะถูกกำหนดค่าให้เหมาะสมกับความต้านทานของระบบที่มุมเฟส (30º, 50º, 70º, 85 º) และรูปแบบของการสับเปลี่ยนการทำงานที่กำหนด

4.8 ตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage change factor)

ตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน คือการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจากการสับเปลี่ยนการทำงานเพียงครั้งเดียวของกังหันลม

$$k_u(\psi_k) = \sqrt{3}\left[\frac{(U_{\max} - U_{\min})}{U_n}\right]\frac{S_k}{S_n} \tag{4.5}$$

เมื่อ $U_{\max} - U_{\min}$ คือ ผลต่างของแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุด

U_n คือ แรงดันต่อเฟส

S_n คือ กำลังปรากฏที่กำหนดของกังหันลม

S_k คือ กำลังปรากฏลัดวงจรภายในกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน จะถูกกำหนดค่าให้เหมาะสมกับการกำหนดค่าความต้านทานของระบบที่มุมเฟส (30°, 50°, 70°, 85°) และรูปแบบของการสับเปลี่ยนการทำงานที่กำหนด

4.9 กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic currents)

กระแสฮาร์มอนิกเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภทคอนเวอร์เตอร์ ในสภาวะการทำงานอย่างต่อเนื่องของกังหันลม กระแสฮาร์มอนิกจะถูกกำหนดให้วัดในช่วงเวลา 10 นาที สำหรับฮาร์มอนิคตำแหน่งที่ 50 จะเป็นกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงสุด การเกิดกระแสฮาร์มอนิกจะถูกบันทึกเมื่อทำการติดตั้งกังหันลม 2 ถึง 3 เครื่องโดยติดตั้งอุปกรณ์การวัดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่จะไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์การวัดที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภทคอนเวอร์เตอร์ ส่วนในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

4.10 สรุปลักษณะเฉพาะทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลมหลายรูปแบบ (Summary power quality characteristics for various wind turbine types)

ลักษณเฉพาะทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลมหลากหลายรูปแบบในตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ตามความเป็นจริงตามชนิด และรูปแบบของกังหันลมส่วนการเปลี่ยนแปลงและความละเอียดของวิธีการวัดหรือข้อกำหนดนั้นจะต้องสอบถามจากผู้ผลิต

ตาราง 4.1 รูปแบบลักษณะเฉพาะทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลมหลากหลายชนิด

ปริมาณ	ชนิดของกังหันลม					
	A0	A1	A2	B	C	D
Maximum permitted power P_{mc}	$P_{mc} > P_n$	$P_{mc} = P_n$	$P_{mc} = P_n$	$P_{mc} = P_n$	$P_{mc} = P_n$	$P_{mc} = P_n$
Maximum measure power 60 s average P_{60}	$P_{60} > P_n$	$P_{60} = P_n$	$P_{60} = P_n$	$P_{60} = P_n$	$P_{60} = P_n$	$P_{60} = P_n$
Maximum measure power 0.2 s average $P_{0.2}$	$P_{0.2} > P_n$	$P_{0.2} > P_n$	$P_{0.2} > P_n$	$P_{0.2} = P_n$	$P_{0.2} = P_n$	$P_{0.2} = P_n$
Reactive power Q_b	$f(P)$	$f(P)$	$f(P)$	$f(P)$	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ	ชนิดของกังหันลม					
	A0	A1	A2	B	C	D
Flicker coefficient $c(\psi_k, v_a)$	Average	High	Average	Low	Low	Low
Maximum number of switching operation in a 10 min period N_{10}	CPS	CPS	CPS	CPS	CPS	CPS
Maximum number of switching operation in a 10 h period N_{120}	CPS	CPS	CPS	CPS	CPS	CPS
Flicker step factor $k_f(\psi_k)$	High	Average	Average	Low	Low	Low
Flicker change factor $k_u(\psi_k)$	High	Average	Average	Low	Low	Low
Maximum harmonic current I_h^c	-	-	-	-	Low	Low

CPS = การตั้งค่าควบคุมพารามิเตอร์ (control parameter setting)

4.11 การเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้า ๆ (Slow voltage variations)

เมื่อมีโหลดโฟลว์(Load-flow) แล้วนำมาทำการวิเคราะห์เราสามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้า ๆได้ (การเปลี่ยนแปลงแรงดันถูกแสดงออกมาเมื่อเวลาเฉลี่ย 10 นาที) การพิจารณาโหลดที่กำหนดสามารถระบุได้ดังนี้ ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าแอมปลิจูดของแรงดันมากที่สุดและน้อยที่สุดตามลำดับ

ก. ค่าโหลดของผู้ใช้งานสูงสุดที่ฟีดเดอร์และไม่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม

ข. ค่าโหลดของผู้ใช้งานต่ำสุดที่ฟีดเดอร์และมีการผลิตกำลังไฟฟ้าออกมามากที่สุด

จากข้อกำหนด EN 50160 การเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้า ๆที่เวลาเฉลี่ย 10 นาที ในส่วนของผู้บริโภคควรมีความผิดพลาดอยู่ในช่วงบวกลบ 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่า U_n ในช่วง 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใน 1 สัปดาห์ โดยเฉพาะในส่วนของแรงดันต่ำการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้าๆควรอยู่ภายในลบ 15 เปอร์เซ็นต์ ถึงบวก 10เปอร์เซ็นต์ ของค่า U_n

โดยการประมาณผลที่เป็นไปได้สูงสุดและต่ำสุดของระดับโหลด ควรอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย และไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดที่ว่าด้วยข้อจำกัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้าๆ โดยอาจจะลดผลกระทบด้วยการปรับค่าเพาเวอร์แฟคเดอร์ของกังหันลม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการลดเพาเวอร์แฟคเดอร์ทำให้เกิดการสูญเสียของระบบมากขึ้น จึงแสดงให้เห็นว่าข้อกำหนดการปรับค่าเพาเวอร์แฟคเดอร์นั้นต้องใช้อย่างระมัดระวังและควรมีการประเมินก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลง

4.12 ฟลิคเกอร์ (Flicker)

ฟลิคเกอร์หรือไฟกระพริบเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปมักจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือการเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบ จากข้อกำหนด EN 50160 โดยปกติเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็วค่าดังกล่าวควรจะมีค่าน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ของ U_n แม้ว่าอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ในบางครั้งของแต่ละวันภายใต้สถานการณ์ที่ได้มีการประเมินไว้แล้วก็ตาม

ดรรชนีไฟกระพริบระยะสั้นคือ P_{st} โดยวัดค่าที่เกิดในคาบเวลา 10 นาที หรือดรรชนีไฟกระพริบระยะยาว P_{lt} มีคาบเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการดังนี้คือ

$$P_{lt} = \left[\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_{st,i}^3}{12} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \tag{4.6}$$

จากข้อกำหนด EN 50160 ค่าดรรชนีไฟกระพริบระยะยาวจะต้องมีค่าไม่เกินหรือเท่ากับ 1 ในช่วง 95 เปอร์เซ็นต์ ของ 1 สัปดาห์ สรุปก็คือการเกิดฟลิคเกอร์ของกังหันลมเป็นผลมาจากการสับเปลี่ยนการทำงาน เช่น การเริ่มต้นการทำงานและเกิดจากการแกว่งอย่างรวดเร็วของกำลังการผลิตระหว่างการทำงานอย่างต่อเนื่อง

4.13 การสับเปลี่ยนระหว่างการทำงาน (Switching operation)

วิธีการในการประเมินการเกิดฟลิคเกอร์ที่เกิดจากการสับเปลี่ยนการทำงาน จะสมมุติว่ากังหันลมแต่ละตัวถูกกำหนดโดยฟลิคเกอร์สเต็ปแฟคเดอร์ (Flicker step factor, $k_f(\psi_k)$) ซึ่งก็คือการวัดในรูปแบบปกติของการเกิดฟลิคเกอร์ในกรณีการสับเปลี่ยนการทำงานที่แย่ที่สุด โดยปกติจะเกิดจากการเริ่มต้นการทำงาน แม้ว่า IEC 61400-21 ยังคงต้องการการประเมินการสับเปลี่ยนการทำงานระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายๆตัว นอกจากนี้ตามวิธีการดังกล่าวจะสมมุติว่า N_{10} และ N_{120} คือจำนวนครั้งในการสับเปลี่ยนการทำงานของกังหันลมในช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 นาที และ 120 นาทีตามลำดับ โดยที่การเกิดฟลิคเกอร์เนื่องจากการสับเปลี่ยนการทำงานของกังหันลมสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้คือ

$$P_{st} = \frac{18}{S_k}\left\{\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10}\left[k_{f\cdot i}(\psi_k)S_{n\cdot i}\right]^{3.2}\right\}^{0.31} \tag{4.7}$$

$$P_{lt} = \frac{8}{S_k}\left\{\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120}\left[k_{f\cdot i}(\psi_k)S_{n\cdot i}\right]^{3.2}\right\}^{0.31} \tag{4.8}$$

เมื่อ N_{wt} คือจำนวนกังหันลมทั้งหมด

4.14 การทำงานที่สภาวะต่อเนื่อง (Continuous operation)

วิธีการประเมินในการเกิดฟลิคเกอร์ที่เกิดจากการทำงานอย่างต่อเนื่องจะสมมุติว่ากังหันลมแต่ละตัวถูกกำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์ฟลิ๊กเกอร์ $c(\psi_k, v_a)$ ซึ่งก็คือการวัดการเกิดฟลิคเกอร์โดยที่สัมประสิทธิ์ฟลิคเกอร์ $c(\psi_k, v_a)$ คูณด้วย $\frac{S_n}{S_k}$ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$P_{st} = P_{lt} = \frac{1}{S_k}\left\{\sum_{i=1}^{N_{wt}}\left[c_i(\psi_k, v_a)S_{n\cdot i}\right]^2\right\}^{0.5} \tag{4.9}$$

4.15 แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage dips)

แรงดันดกชั่วขณะถูกนิยามใน EN 50160 ว่าคือการลดลงอย่างฉับพลันของแรงดันที่อยู่ในช่วงระหว่าง 1% ถึง 90% ของ U_n โดยแรงดันจะกลับคืนสู่แรงดันค่าเดิมภายในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 1 มิลลิวินาที ถึง 1นาที การคาดคะเนจำนวนครั้งของแรงดันตกภายในเวลา 1 ปี จะมีความแตกต่างกันตั้งแต่ 20 ถึง 30 ครั้งหรืออาจจะถึง 1,000 ครั้งก็ได้ โดยจาก EN 50160 ช่วงของแรงดันตกจะเกิดขึ้นระหว่าง 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ของ U_n โดยมักจะเกิดจากการสับเปลี่ยนโหลดแต่ถ้าเกิดการลดลงมากกว่านั้นมักจะเกิดจากการลัดวงจร

การเริ่มต้นการทำงานของกังหันลมมีโอกาศที่ จะทำให้เกิดแรงดันลดลงอย่างรวดเร็วและจะกลับสู่สภาวะปกติในช่วง 2 ถึง 3 วินาทีต่อจากนั้น โดยจะกำหนดว่ากังหันลมแต่ละตัวมีคุณลักษณะเป็นค่าตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงแรงดัน $(k_u(\psi_k))$ และแรงดันที่ลดลงอย่างรวดเร็วสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$d = 100k_u(\psi_k)\frac{S_n}{S_k} \tag{4.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 แรงดันฮาร์มอนิกส์ (Harmonics voltage)

โหลดที่ไม่มีความเสถียรจะทำให้รูปคลื่นแรงดันมีความผิดเพี้ยน และในกรณีที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงจะเกิดความร้อนเกินในตัวนำที่เป็นกลางและหม้อแปลงส่งจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังก็มีโอกาสที่จะทำงานผิดปกติได้

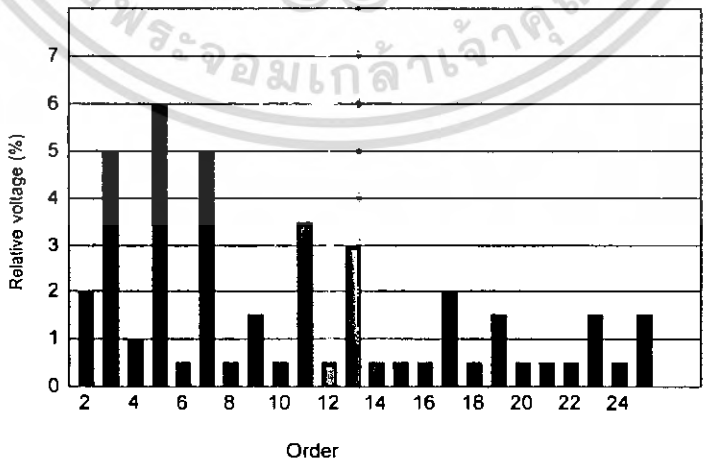
โดยปกติระบบสื่อสารจะเกิดความผิดเพี้ยน โดยการบิดเบือนของรูปคลื่น ซึ่งจะแสดงออกมาเป็นผลรวมของรูปคลื่นย่อยๆ กับความถี่และแอมปลิจูดที่หลากหลาย และจะแสดงออกมาเป็นการเปลี่ยนรูปของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) โดยรูปคลื่นย่อยๆและความถี่หลายค่าจะมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มเป็นเท่าของความถี่มูลฐานที่แสดงออกมาเป็น (Harmonics) ขณะที่ความถี่อื่นๆที่ไม่มีการเพิ่มเป็นเท่า จะแสดงเป็นอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ (Interharmonics)

แรงดันฮาร์มอนิกส์ (U_h) เมื่อ h แสดงถึงลำดับฮาร์มอนิกส์ที่สามารถหาค่าได้จากความ สัมพันธ์ของแอมปลิจูดจากสมการดังนี้คือ

$$u_h = \frac{U_h}{U_n} \tag{4.9}$$

จาก EN 50160 ระบุไว้ว่า ค่าเฉลี่ย RMS ในเวลา 10 นาที ของค่า u_h แต่ละตัวจะต้องมีค่าไม่เกินข้อจำกัดที่กำหนดไว้ใน รูป 4.1 ในระหว่างช่วงเวลา 95 เปอร์เซ็นต์ ใน 1 สัปดาห์ โดยที่ผลรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน (THD) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$THD = \left[\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{4.10}$$



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างลำดับฮาร์มอนิกส์กับแรงดันจินตภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า

5.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าภายในประเทศ

จากข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าภายในประเทศนั้น จะมีมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเราจะพิจารณาเฉพาะข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพราะการที่จะทำการติดตั้งทุ่งกังหันลมนั้นจากการศึกษาพื้นที่ๆ ที่เหมาะสมในการติดตั้งแล้วจะเป็นพื้นที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทั้งหมด

5.1.1 ปริมาณพลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ก. ระบบ 22 kV ไม่เกิน 8.0 MW / ผู้ได้รับอนุญาต

ข. ระบบ 33 kV ไม่เกิน 10.0 MW / ผู้ได้รับอนุญาต

ค. หากปริมาณพลังไฟฟ้าเกินกว่าที่กำหนดในข้อ ก. หรือ ข. ให้จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในส่วนของระบบ 69 หรือ 115 kV แล้วแต่กรณีทั้งนี้ปริมาณจริงที่จะรับเข้าระบบของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะได้รับพิจารณาถึงความปลอดภัยมาตรฐานทางด้านบริการ และ ผลประโยชน์ต่อส่วนรวมเป็นหลัก

5.1.2 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกัน

ก. การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าของผู้ได้รับอนุญาตกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะต้องมีรูปแบบดังรายละเอียดตามภาคผนวก ง. และผู้ได้รับอนุญาตต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันไม่น้อยกว่าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดให้ ดังรายละเอียดตามภาคผนวก ง. ทั้งนี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ ในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเชื่อมโยงและอุปกรณ์ป้องกันตามความเหมาะสม โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมโยงระบบจะต้องมีมาตรฐานตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยอมรับ

ข. การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าของผู้ได้รับอนุญาต เข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะต้องผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า (Isolated Transformer) เพื่อแยก Zero Sequence ทั้ง 2 ระบบออกจากกัน ที่มี Winding Connection ที่สอดคล้องต่อปริมาณการจ่ายเข้าระบบ และลักษณะการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบตามภาคผนวก ง. โดยจะต้องได้รับความเห็นชอบจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก่อน

สำหรับผู้ได้รับอนุญาตรายเดิมที่มิได้เปลี่ยนแปลงปริมาณที่เพิ่มขึ้น และประเภทของสัญญาการซื้อขายไฟฟ้าให้สามารถใช้รูปแบบการเชื่อมโยงเดิมได้

5.1.3 มาตรวัดไฟฟ้า ซีที พีที และอุปกรณ์ประกอบระหว่างผู้ได้รับอนุญาตกับการไฟฟ้า

ก. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สงวนสิทธิ์ในการพิจารณา ออกแบบ ตรวจสอบและบำรุงรักษา มาตรวัดไฟฟ้า ซีที พีที ระหว่างผู้ได้รับอนุญาตกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและอุปกรณ์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ห้ามผู้ได้รับอนุญาต ดำเนินการใดๆ เกี่ยวกับมาตรวัดไฟฟ้า ซีที และอุปกรณ์ประกอบ หากพบว่ามีปัญหาให้แจ้งให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทราบ

5.1.4 ค่าใช้จ่ายในการเชื่อมโยงระบบ

ก. ผู้ได้รับอนุญาตเป็นผู้รับภาระค่าใช้จ่ายในการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า โดยการปรับปรุงระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ต่างๆ ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเห็นว่ามีความจำเป็น

ข. ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องรับภาระค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น บำรุงรักษา ซ่อมแซม แก้ไข หรือเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้าดังกล่าวที่เกี่ยวกับการเชื่อมโยงระบบกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ค. ผู้ได้รับอนุญาต จะต้องรับภาระค่าใช้จ่ายในการประเมิน ตรวจสอบ และทดสอบต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเชื่อมโยงระบบกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทั้งก่อนและหลังการทำสัญญา

5.1.5 จุดแบ่งความรับผิดชอบในการดำเนินการ

ก. การเชื่อมโยงระบบ 22 kV ถึง 33 kV กำหนดให้สวิตช์ตัดตอนตัวแรกที่ต่อกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นจุดแบ่งความรับผิดชอบ ทั้งนี้ ตำแหน่งที่ติดตั้งสวิตช์ตัดตอนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สงวนสิทธิ์ในการเข้าไปควบคุมได้โดยอิสระ

ข. การเชื่อมโยงระบบ 69 kV ถึง 115 kV ที่เป็นแบบ Terminal Substation กำหนดให้เสาไฟฟ้าระบบ 69 kV ถึง 115 kV ต้นแรกของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นจุดแบ่งความรับผิดชอบ ทั้งนี้ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ในการเข้าไปควบคุม Substation ได้โดยอิสระ โดยผู้ได้รับอนุญาตต้องจัดทำถนนเฉพาะจากทางสาธารณะไปยังอาคารควบคุมภายใน Substation

ค. กรณีการขอใช้ Terminal หรือ Bus ภายในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และมีการสร้างระบบไฟฟ้า วงจรอิสระไปยังสถานีไฟฟ้านั้น ให้ถือว่า Circuit Breaker ที่ป้องกันระบบไฟฟ้าเป็นจุดแบ่งความรับผิดชอบ

5.16 จุดซื้อขายไฟฟ้า กำหนดให้มาตรวัดไฟฟ้าเป็นจุดซื้อขายไฟฟ้า

5.1.7 หลักปฏิบัติในการจ่ายไฟ

ก. ผู้ได้รับอณุญาตต้องควบคุมมิให้มีการจ่ายไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของผู้ได้รับอนุญาตเข้ามาในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นอกจากได้ตกลงไว้ในสัญญาหรือได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเรียนร้อยแล้ว

ข. ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องไม่มีการจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในขณะที่ระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ส่วนที่เชื่อมต่อกับระบบของผู้ได้รับอนุญาตไม่มีแรงดันไฟฟ้า

ค. ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องจัดหาเครื่องมือสื่อสารเพื่อใช้ในการติดต่อประสานงานในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบไฟฟ้า ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอย่างต่ำ 2 ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องปฏิบัติตามแนวทางการปฏิบัติงานด้านปฏิบัติการร่วมกันระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและผู้ได้รับอนุญาต

จ. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ในการพิจารณาความเหมาะสมในการจ่ายไฟแบบ Islanding กับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ให้กับผู้ได้รับอนุญาตเป็นรายๆไป

5.1.8 หลักเกณฑ์คุณภาพไฟฟ้า

ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องควบคุมการจ่ายไฟจากการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคดังนี้

ก. ระดับแรงดัน ระดับแรงดันสูงสุดละต่ำสุด ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

ตาราง 5.1 ข้อกำหนดแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การไฟฟ้าภูมิภาค		
ระดับแรงดัน(kV)	ระดับแรงดัน Max(kV)	ระดับแรงดัน Min(kV)
115	120.7	109.2
69	72.4	65.5
33	34.6	31.3
22	23.1	20.9

ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องออกแบบระบบควบคุม เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะช่วงแรงดันข้างต้น หรือตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร้องขอ

ข. ความถี่ไฟฟ้า โดยผู้ได้รับอนุญาตจะต้องรักษาความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที

ค. Power Factor ผู้ได้รับอนุญาตต้องจ่ายไฟฟ้าโดยรักษาค่า Power Factor ให้อยู่ในช่วง 0.85 Leading ถึง 0.85 Lagging

ง. Harmonics ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดัน และกระแสในระบบของการไฟฟ้าผิดเพี้ยนมากเกินไป ปริมาณความผิดเพี้ยนดังกล่าววัดที่จุดต่อร่วมจะต้องไม่เกินที่กำหนดตามข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้า ประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/1998) ของการไฟฟ้า รายละเอียดตามภาคผนวก ข.

จ. Voltage Fluctuation (แรงดันกระเพื่อม) ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องไม่ทำให้เกิด Voltage Fluctuation เกินข้อกำหนดเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจ และอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/1998) ของ 3 การไฟฟ้า เมื่อตรวจวัดที่จุดต่อร่วม รายละเอียดตามภาคผนวก ค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.9 การประเมิน ตรวจสอบ และทดสอบ

ก. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สงวนสิทธิ์ในการตรวจสอบและทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้หรือมีผลในการเชื่อมโยงระบบกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ตามข้อ 5.1.2) ทุก 2 ปี หรือตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเห็นสมควร

ข. ในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในครั้งแรก ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องแจ้งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเข้าร่วมตรวจสอบก่อนนำเข้าใช้งาน

ค. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สงวนสิทธิ์ในการประเมินคุณภาพไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมโยงระบบกับผู้ได้รับอนุญาตของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทุก 1 ปี หรือตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเห็นสมควร

ง. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สงวนสิทธิ์ในการตรวจสอบและทดสอบมิเตอร์ซื้อขายไฟฟ้า ทุก 1 ปี หรือตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเห็นสมควร

5.1.10 อื่นๆ

ก. โดยทั่วไปการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะมี Automatic Reclosing Scheme ที่ระบบไฟฟ้า ดังนั้นผู้ได้รับอนุญาตจะต้องแน่ใจว่าสวิตช์ตัดตอนของผู้ได้รับอนุญาตจะปลดการจ่ายไฟออกก่อนที่ Automatic Reclosing ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะทำงาน

ข. หากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคพิจารณาเห็นควรต้องปรับปรุงวิธีการ Reclosing หรือต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์เช่น ติดตั้งระบบ Synchronizing, ระบบ Transfer Trip หรือระบบ Block Reclosing ทั้งในส่วนของผู้ได้รับอนุญาต และในส่วนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยคิดค่าใช้จ่ายจากผู้ได้รับอนุญาต ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องยอมรับและปฏิบัติตาม และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะไม่รับผิดชอบความเสียหายต่ออุปกรณ์ของผู้ได้รับอนุญาตเนื่องจากการ Reclosing นี้

ค. Interconnection Circuit Breaker และ Circuit Breaker รวมทั้งอุปกรณ์ตัดตอนที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงที่ติดตั้งใน Terminal Station ในระบบ 69 และ 115 kV จะต้องสามารถควบคุมได้โดยระบบ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) ของศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ง. Interconnection Circuit Breaker หรืออุปกรณ์ตัดตอนในระบบ 22 kV และ 33 kV จะต้องสามารถควบคุมได้โดยระบบ SCADA ของศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

จ. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่รับผิดชอบความเสียหายของผู้ได้รับอนุญาต ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ฉ. หากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเห็นว่าการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคส่วนดังกล่าวไม่มีความปลอดภัย หรือส่งผลกระทบกับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ได้รับอนุญาตต้องดำเนินการปรับปรุงและแจ้งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเข้าร่วมตรวจสอบดังกล่าวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช. การปรับปรุงระบบไฟฟ้าภายในของผู้ได้รับอนุญาต จะต้องได้รับความเห็นชอบจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก่อนทุกครั้ง

ซ. หากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเห็นว่าผู้ได้รับอนุญาต ไม่สามารถปฏิบัติตามระเบียบฯฉบับนี้ข้อใดข้อหนึ่ง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ในการระงับหรือยกเลิกการเชื่อมโยงระบบกับผู้ได้รับอนุญาต

5.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าตามมาตรฐานของต่างประเทศสำหรับกังหันลม

5.2.1 การควบคุมกำลังจริง (Active power control) โดยทั่วไปการผลิตกำลังไฟฟ้าและการใช้กำลังไฟฟ้าภายในระบบจะมีความสมดุลกัน เพราะฉะนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงการผลิตกำลังไฟฟ้าหรือมีการใช้กำลังไฟฟ้า จะทำให้สูญเสียความสมดุลภายในระบบชั่วคราวและยังส่งผลต่อการทำงานของโรงไฟฟ้าอีกด้วย เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดความไม่สมดุลของระบบในระยะยาว จึงต้องมีการคาดคะเนการใช้กำลังไฟฟ้าล่วงหน้าเพื่อที่โรงไฟฟ้าจะได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการ จุดประสงค์ของความต้องการการควบคุมกำลังจริงของทุ่งกังหันลม (wind farm) ก็คือการควบคุมความถี่ในระบบซึ่งจะต้องมีเสถียรภาพเพื่อป้องกันการเกิดโหลดเกิน (overload) ของสายส่ง และต้องผ่านมาตรฐานการควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้า (power quality standard) และเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแรงดันกระโดด (large voltage step) รวมทั้งกระแสพุ่งเข้า (inrush current) ในช่วงที่มีการเริ่มหรือหยุดการทำงานของกังหันลม

มาตรฐานของ Scottish และ ESBNG (Ireland) ได้ครอบคลุมถึงการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังจริงสูงสุด (maximum active power) ในช่วงการเริ่มหรือหยุดของกังหันลม รวมทั้งช่วงการเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วลมเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบที่มีต่อระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 5.2 ข้อกำหนดการควบคุมกำลังจริง

ข้อกำหนดการควบคุมกำลังจริงที่ผลิตได้	แหล่งข้อมูล
ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้เฉลี่ยใน 1 นาที จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ + 5% ของกำลังจริงสูงสุดที่ผลิตได้	Eltra
ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้เฉลี่ยใน 1 นาที จะต้องมีค่าเท่ากับ ± 5% ของกำลังที่กำหนดของกังหันลมจากค่าที่ตั้งไว้ (0% ถึง 100% ของค่ากำลังจริงที่ผลิตได้สูงสุดของทุ่งกังหันลม)	Eltra and Elkraft
ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้เฉลี่ยใน 10 นาที จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $K \times$ registered capacity (ค่า k คือค่าคงที่ของ Weibull) ซึ่งค่ากำลังจริงที่ผลิตได้จะต้องมีค่าน้อยกว่าค่า registered capacity	DEFU 111,AMP, E.ON,ESBNG, VDEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ข้อกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังจริงที่ผลิตได้

ข้อกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังจริงที่ผลิตได้	แหล่งข้อมูล
ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้ห้ามลดลงต่ำกว่า 20% ของกำลังจริงที่ผลิตได้ภายในเวลา 2 วินาทีสำหรับ Eltra และ 5 วินาทีสำหรับ SvK	Eltra, SvK
ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้สามารถเปลี่ยนแปลงจากจุดที่มีการทำงานเทียบกับจุดที่มาตรฐาน E.ON มีการกำหนดไว้ดังนี้ ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้สามารถลดลงได้ต่ำสุดไม่เกิน 10% ของ registered capacity ต่อนาที ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้สามรถเพิ่มขึ้นได้ไม่เกิน 10% ของ registered capacity ต่อนาที	E.ON
ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้สามารถปรับได้ในช่วง 10% ถึง 100% ของกำลังที่กำหนดต่อนาที	Eltra and Elkraft
ภายในเวลา 15 นาทีกำลังจริงที่ผลิตได้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้ 5% ของกำลังที่กำหนดของทุ่งกังหันต่อนาที (P_{WF} < 100 MW) 4% ของกำลังที่กำหนดของทุ่งกังหันต่อนาที (P_{WF} < 200 MW) 3% ของกำลังที่กำหนดของทุ่งกังหันต่อนาที (P_{WF} > 200 MW)	ESBNG

ตารางที่ 5.4 ข้อจำกัดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังจริงที่ผลิตได้

ข้อจำกัดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังจริงที่ผลิตได้	แหล่งข้อมูล
60 MW per hour,10 MW over 10 min,3MW over 1 min สำหรับ P_{WF} < 15 MW	
4x registered capacity per hour,registered capacity/1.5 over 10 min, registered capacity/5 over 1 min สำหรับ 15 MW < P_{WF} < 150 MW	
600 MW per hour,100 MW over 10 min,30 MW over 1 min สำหรับ P_{WF} > 150 MW	

ตารางที่ 5.5 ข้อกำหนดเมื่อกังหันลมเริ่มทำงาน

ข้อกำหนดเมื่อกังหันลมเริ่มทำงาน	แหล่งข้อมูล
ทุ่งกังหันลมจะมีการกำจัดสัญญาณที่เป็นสาเหตุให้ทุ่งกังหันลมหยุดทำงาน ซึ่งจะใช้สัญญาณนี้เป็นตัวสั่งให้กังหันลมเริ่มทำงานต่อไป	Eltra
จะทำงานก็ต่อเมื่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงเป็นไปตามมาตรฐานข	Scotland, E.ON
จะทำงานก็ต่อเมื่อคุณภาพของแรงดันเป็นไปตามมาตรฐานของข้อกำหนด	DEFU111,AMP, Sintef,VDEW, Scotland,Eltra,E.ON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ข้อกำหนดเมื่อกังหันลมหยุดทำงาน

ข้อกำหนดเมื่อกังหันลมหยุดทำงาน	แหล่งข้อมูล
เมื่อลมมีความเร็วสูงมากๆจะต้องไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้กังหันลมหยุดหมุน ถ้าไม่เกินกว่าข้อกำหนดที่ได้ตั้งไว้	Eltra, SvK
ถ้าผลิตกำลังจริงได้ไม่เกิน 2% ของกำลังจริงที่กังหันลมควรจะผลิตได้จะทำการตัดวงจร	Scotland
จะทำงานก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงและเป็นไปตามข้อกำหนด	Scotland
จะทำงานก็ต่อเมื่อคุณภาพของแรงดันเป็นไปตามข้อกำหนด	DEFU 111, AMP, VDEW

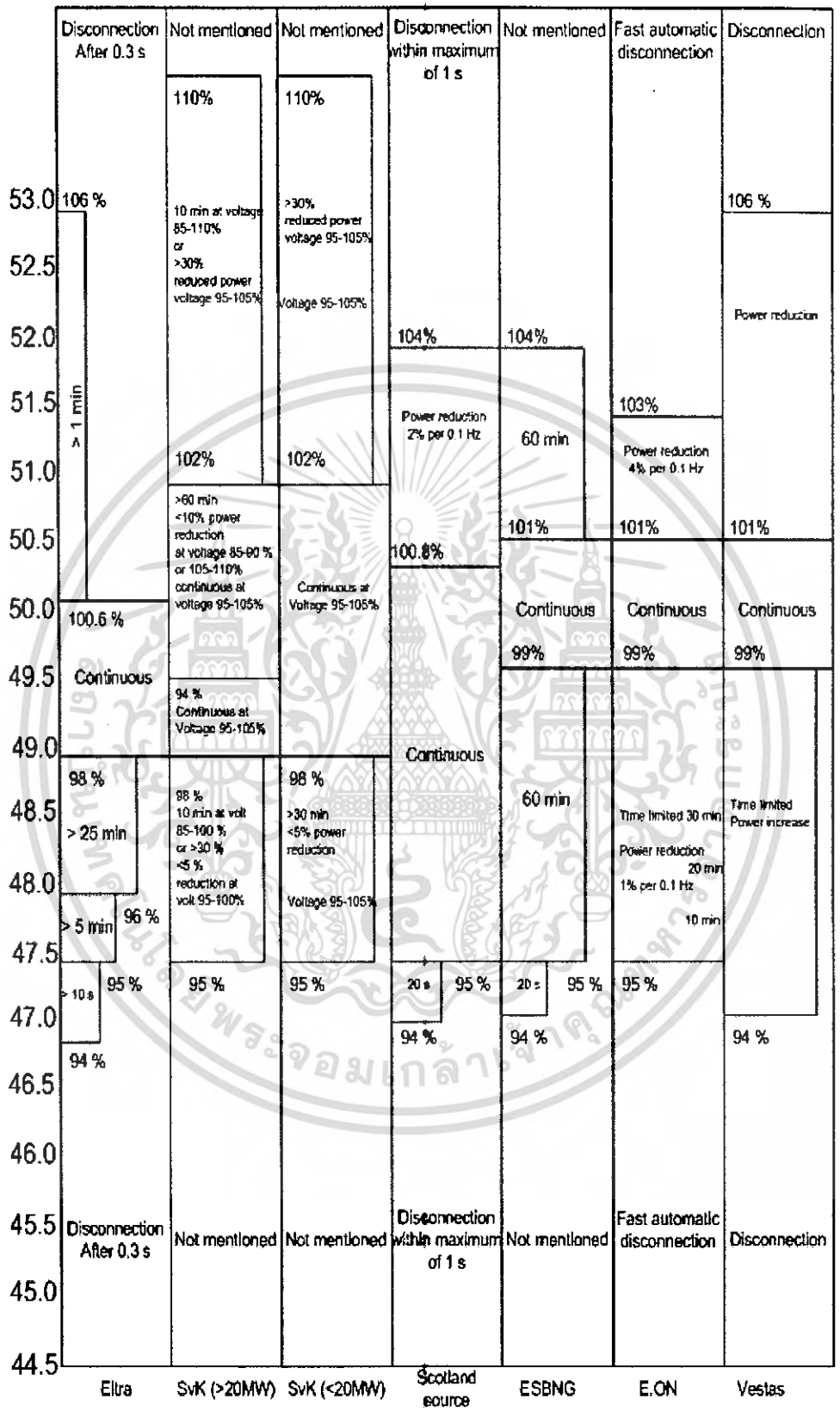
P_{WF} คือ กำลังที่กำหนดของทุ่งกังหันลม

5.2.2 การควบคุมความถี่ (Frequency control)

ในระบบไฟฟ้ากำลัง ความถี่จะเป็นค่าที่ใช้บอกว่าระหว่างการผลิตกำลังไฟฟ้าและการใช้กำลังไฟฟ้านั้นมีความสมดุลกันหรือไม่ สำหรับการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังปกติส่วนมากความถี่จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ระบุไว้ ประเทศในยุโรปส่วนมากอยู่ในช่วง 50±0.1 เฮิร์ทซ และส่วนที่เหลือจะอยู่ในช่วง 49 ถึง 50.3 เฮิร์ทซ

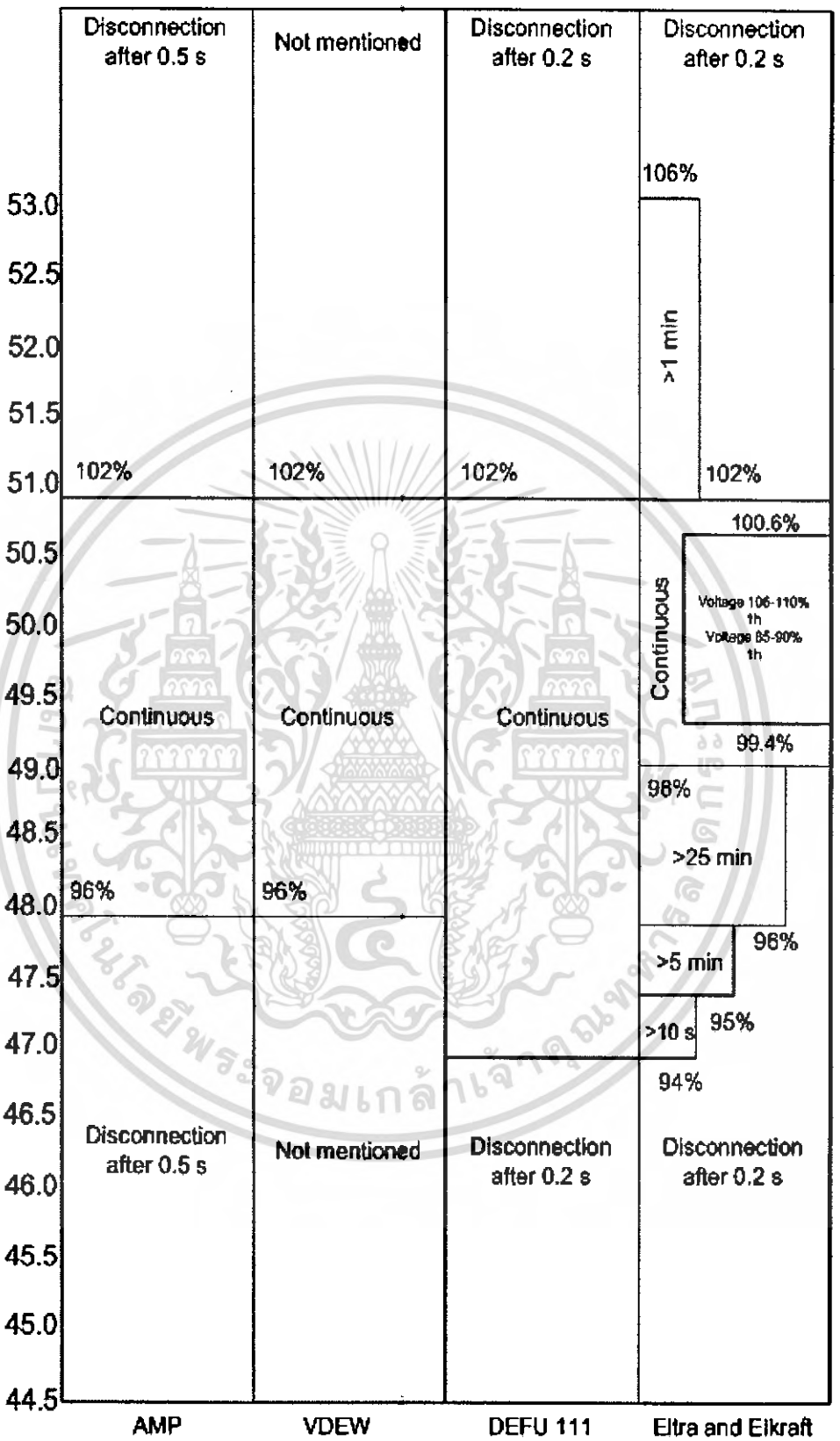
ในกรณีที่การผลิตกำลังไฟฟ้ากับการใช้กำลังไฟฟ้าไม่สมดุลกัน ตัวควบคุมอันดับแรกและอันดับที่สองจะเป็นตัวที่ทำให้ระบบกลับมาสมดุลกันเหมือนเดิม เช่น ในกรณีที่การใช้กำลังไฟฟ้ามีมากกว่าการผลิตกำลังไฟฟ้า พลังงานที่สะสมในเครื่องจักรกลซิงโครนัส (Synchronous machine) จะถูกนำมาใช้เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการผลิตกำลังไฟฟ้าและการใช้กำลังไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง และจะทำให้ความถี่ของระบบลดลงด้วย ในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีตัวควบคุมอันดับแรกคอยทำหน้าที่ตรวจจับความถี่ และเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการผลิตกำลังไฟฟ้ากับการใช้กำลังไฟฟ้า โดยความถี่จะคงที่ภายในเวลาข 1 วินาที ถึง 30 วินาที การที่จะทำให้ความถี่กลับมาที่ค่ามาตรฐานนั้น จะต้องปลดการทำงานของตัวควบคุมอันดับแรกก่อน และตัวควบคุมอันดับที่สองจะทำงานโดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที ถึง 15 นาที ในต่างประเทศส่วนมากนั้นจะใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติ แต่ในบางประเทศจะใช้บุคคลเป็นผู้ควบคุม ที่การทำงานในสถาวะปกติภายในเวลา 15 นาทีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นสามารถเพิ่มขึ้นได้ 15% ของกำลังไฟฟ้าที่ดิดตั้ง ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความไม่สมดุลภายในระบบระว่างการผลิตกำลังไฟฟ้าและการใช้กำลังไฟฟ้า โดยส่วนมากจะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มหรือหยุดการทำงานของกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ระเบียบการควบคุมความถี่ตามมาตรฐานต่าง ๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ระเบียบการควบคุมความถี่ตามมาตรฐานต่างๆ (ต่อ) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

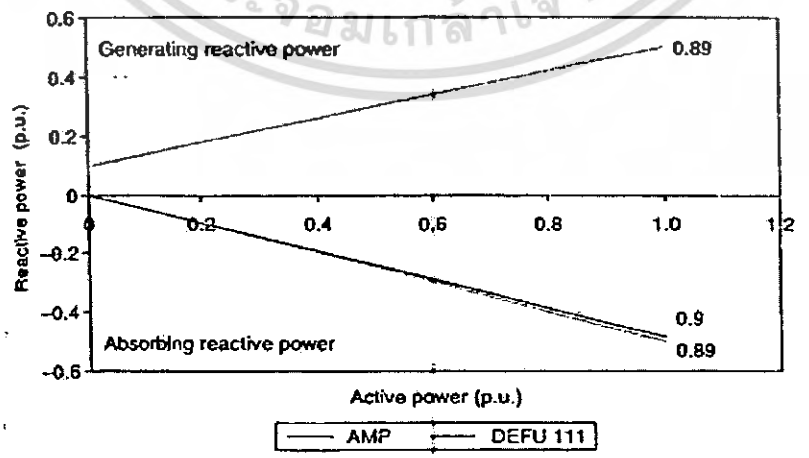
5.2.3 การควบคุมแรงดัน (Voltage control)

อุปกรณ์และเครื่องมือของผู้ใช้ไฟฟ้า จะถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ที่บางอัตราของแรงดันเท่านั้น เกณฑ์การควบคุมแรงดันและกำลังจินตภาพ(Reactive power) ของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า จะถูกใช้เพื่อควบคุมให้แรงดันอยู่ภายในระดับที่ต้องการ และหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่มีเสถียรภาพของแรงดัน กังหันลมยังช่วยในการควบคุมระดับแรงดันในระบบโดยจะรักษาระดับแรงดันระหว่างกังหันลมหรือทุ่งกังหันลมกับระบบไฟฟ้า โดยจะมีกำลังจินตภาพไว้ชดเชยให้กับระบบ

การชดเชยกำลังจินตภาพจะถูกกำหนดไว้ในเทอมของตัวประกอบกำลัง ดังรูปที่ 5.3 จะแสดงถึงเกณฑ์การชดเชยกำลังเสมือนให้กับระบบไฟฟ้า และในรูปที่ 5.4 จะแสดงถึงเกณฑ์การชดเชยกำลังเสมือนให้กับระบบสายส่ง ในมาตรฐานของสวีเดน (SvK) จะให้การชดเชยกำลังจินตภาพแสดงในเทอมของแรงดันที่แบ่งเป็นช่วงๆ ทุ่งกังหันลมขนาดใหญ่มีขนาดมากกว่า100 MW และขนาดกลางที่มีขนาด 20 MW ถึง 50 MW จะต้องรักษาระดับกำลังจินตภาพโดยใช้ตัวควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะใช้แรงดันเป็นค่าอ้างอิงซึ่งสามารถปรับได้อย่างน้อย ±10% ของแรงดันขณะมีการทำงานในสภาวะปกติ

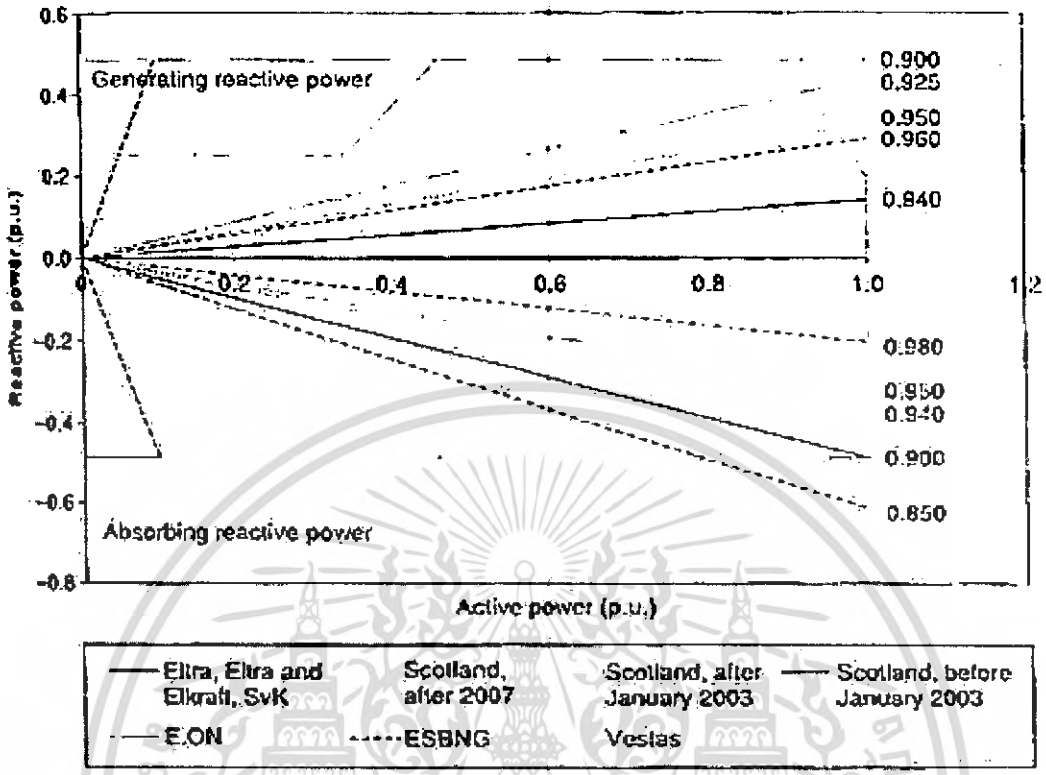
ก.คุณภาพแรงดัน (Voltage quality) ข้อกำหนดคุณภาพของแรงดันสามารถแบ่งได้ดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างกระทันหัน (Rapid voltage changes) คือ ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ในขณะที่มีการเริ่มหรือหยุดการทำงานของทุ่งกังหันลม
- แรงดันฟลิกเกอร์ (Voltage flicker) คือการที่แรงดันถูกรบกวนจากความถี่ต่ำ
- ฮาร์มอนิกส์ (Harmonic) คือช่วงที่แรงดันหรือกระแสถูกรบกวนที่ความถี่ $f = n \times 50$ เฮริท์ซ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม



รูปที่ 5.3 เกณฑ์การพิจารณากำลังไฟฟ้าจินตภาพ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 เกณฑ์การพิจารณากำลังไฟฟ้าจินดภาพ [1]

ตารางที่ 5.7 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน

ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน	แหล่งข้อมูล
แรงดันห้ามเปลี่ยนแปลงเกิน 2% ของแรงดันมาตรฐานที่จุดเชื่อมต่อ	VDEW
แรงดันห้ามเปลี่ยนแปลงเกิน 3% ของแรงดันมาตรฐานที่จุดเชื่อมต่อ	Eltra,Scotland,Eltra and Elkraft(50-60 kV)
แรงดันห้ามเปลี่ยนแปลงเกิน 4% ของแรงดันมาตรฐานที่จุดเชื่อมต่อ	Sintef,Eltra and Elkraft(10-20 kV)
แรงดันห้ามเปลี่ยนแปลงเกิน 2.5% ของแรงดันมาตรฐานที่จุดเชื่อมต่อและห้ามเกิน 10 ครั้งต่อชั่วโมง	Eltra
แรงดันห้ามเปลี่ยนแปลงเกิน 1.5% ของแรงดันมาตรฐานที่จุดเชื่อมต่อและห้ามเกิน 100 ครั้งต่อชั่วโมง	Eltra
$k_f(\psi_k) \le 0.04R_k$ หรือ $k_i \le 0.04R_k$	DEFU 111
Voltage flicker : $P_{st} < 0.30$	Eltra
Voltage flicker : $P_{st} < 0.70$	Sintef
Voltage flicker : $P_{st} < 0.35$	AMP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน (ต่อ)

ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน	แหล่งข้อมูล
Voltage flicker : $P_{lt} < 0.25$	Eltra, DEFU 111, AMP
Voltage flicker : $P_{lt} < 0.46$	VDEW
Voltage flicker : $P_{lt} < 0.25$	DEFU 111,Eltra and Elkraft(10-20kV), Sintef
Voltage flicker : $P_{lt} \leq 0.35$	Eltra and Elkraft (50-60kV)

ตารางที่ 5.9 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน (ต่อ)

ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน	แหล่งข้อมูล
$k_f(\psi_k) < 0.031 \frac{R_k}{N^{\frac{1}{3.2}}}$ หรือ $k_i < 0.031 \frac{R_k}{N^{\frac{1}{3.2}}}$ (ในระหว่างการเริ่มหรือหยุดการทำงานของกังหันลม) $c_c(\psi_k) < 0.25 R_k$ (ในระหว่างการทำงาน)	DEFU 111
$k_f(\psi_k) < P_{lt} / \left(8N^{1/3}\right) S_k / \left(S_{park} S_{rG}^2\right)^{1/3}$ (ในระหว่างการเริ่มหรือหยุดการทำงานของกังหันลม) $c_c(\psi_k) < P_{lt} S_k / \left(S_{park} S_{rG}^2\right)^{1/2}$ (ในระหว่างการทำงาน)	Eltra and Elkraft
จะต้องผ่านตามมาตรฐาน G5/4	Scotland
จะต้องผ่านตามมาตรฐาน IEC/TR3 61000-3-7 (IEC,1996b)	ESBNG
Harmonics : $D_n <$ 1% ของแรงดันมูลฐานสำหรับ 1 < n < 51 $THD <$ 1.5%	Eltra
Harmonics : $D_n <$ 0.3% ถึง 0.5% ของกระแสมูลฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับ n โดยที่ n เป็นจำนวนคี่	DEFU 111,Sintef
Harmonics : $D_n <$ 0.8% ถึง 3% ของแรงดันมูลฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับ n โดยที่ n เป็นจำนวนคี่ Harmonics : $D_n <$ 0.2% ถึง 2% ของแรงดันมูลฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับ n โดยที่ n เป็นจำนวนคู่	Eltra and Elkraft

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน (ต่อ)

ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพแรงดัน	แหล่งข้อมูล
Harmonics : $D_n <$ 0.01% ถึง 0.115 A/MVA สำหรับ 10 kV ซึ่งขึ้นอยู่กับ n โดยที่ n เป็นจำนวนคี่ Harmonics : $D_n <$ 0.06/n สำหรับ 10 kV โดยที่ n เป็นจำนวนคู่แต่ถ้า n เป็นจำนวนคี่ จะต้องมีค่ามากกว่า 26 Harmonics : $D_n <$ 0.005 ถึง 0.058 A/MVA สำหรับ 20 kV ซึ่งขึ้นอยู่กับ n โดยที่ n เป็นจำนวนคี่ Harmonics : $D_n <$ 0.03/n สำหรับ 20 kV โดยที่ n เป็นจำนวนคู่แต่ถ้า n เป็นจำนวนคี่ และต้องมีค่ามากกว่า 26	VDEW
Harmonics : $D_n <$ 4% ซึ่งขึ้นอยู่กับ n โดยที่ n เป็นจำนวนคี่ Harmonics : $D_n <$ 1% ซึ่งขึ้นอยู่กับ n โดยที่ n เป็นจำนวนคู่	AMP
จะต้องผ่านตามมาตรฐาน G5/4	Scotland
จะต้องผ่านตามมาตรฐาน IEC/TR3 61000-3-6 (IEC,1996a)	ESBNG

$k_f(\psi_k)$ คือ ตัวกระกอบกำลังฟลิคเกอร์

$c_c(\psi_k)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟลิคเกอร์

R_k คือ อัตราส่วนการลัดวงจร

k_i คือ ตัวประกอบกระแสพุ่งเข้า

S_k คือ กำลังปรากฏขณะลัดวงจร

S_{park} คือ กำลังปรากฏของทุ่งกังหันลม

S_{rG} คือ กำลังปรากฏของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

N คือ จำนวนครั้งที่ทำการสับเปลี่ยนการทำงาน

P_{lt} คือ ดรรชนีไฟกระพริบระยะยาว

P_{st} คือ ดรรชนีไฟกระพริบระยะสั้น

THD คือ ผลรวมความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์

D_n คือ Harmonic interface for each individual harmonic n

5.2.4 การป้องกันทุ่งกังหันลม (Wind farm protection)

สำหรับการเชื่อมต่อทุ่งกังหันลมเข้ากับระบบ ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า ระบบจะต้องทำการตัดการเชื่อมต่อกับทุ่งกังหันลม (DEFU111, AMP) ถ้าระบบถูกรบกวนอย่างหนัก จะต้องมีการตัดการเชื่อมต่อของระบบสายส่งหลาย ๆสายเพิ่มขึ้นและทุ่งกังหันลมก็จะถูกแยกออกมา ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างการผลิตกำลังไฟฟ้าและการใช้กำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีกระแสลัดวงจร(High short circuit current), แรงดันต่ำเกิน (undervoltage), แรงดันสูงเกิน (overvoltage) เกิดขึ้นระหว่างหรือหลังจากเกิดการลัดวงจร จะทำให้กังหันลมและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเกิดความเสียหายได้ จึงต้องมีการออกแบบรีเลย์เพื่อป้องกันทุ่งกังหันลมโดยมีหลักการออกแบบ 2 ข้อดังนี้

ก. ต้องทำงานตามข้อกำหนดเมื่อมีการทำงานตามปกติและจะต้องมีการสนับสนุนทุ่งกังหันลมในระหว่างที่เกิดการลัดวงจรและหลังจากที่เกิดการลัดวงจร

ข. ต้องป้องกันความเสียหายของทุ่งกังหันลมที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบภายในโรงจักรไฟฟ้าโดยจะต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน ความถี่ต่ำเกิน (underfrequency), ความถี่สูงเกิน (overfrequency), แรงดันต่ำเกิน (undervoltage), แรงดันสูงเกิน (overvoltage)

ตาราง 5.11 ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม

ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม	แหล่งข้อมูล
ความทนทานต่อกระแสลัดวงจร: ถ้าเกิดกระแสลัดวงจร 3 เฟส ที่สายส่งใดๆหรือที่หม้อแปลงจะถูกกำหนดให้ตัดการเชื่อมต่อโดยที่ปราศจากการต่อกลับในทันที ความทนทานต่อกระแสลัดวงจร : ถ้าเกิดกระแสลัดวงจร 2 เฟสที่สายส่งใดๆจะไม่สามารถต่อกลับได้ในทันที	Eltra
ความทนทานต่อกระแสลัดวงจร : ถ้าเกิดกระแสลัดวงจร 3 เฟสในระบบสายส่งจะสามารถทนได้ไม่เกิน 100 ms ความทนทานต่อกระแสลัดวงจร : ถ้าเกิดกระแสลัดวงจร 2 เฟสและกระแสลัดวงจร 2 เฟสลงดินจะสามารถทนได้ไม่เกิน 100 ms	Eltra and Elkraft
ในระหว่างการเกิดกระแสลัดวงจรในระบบ ทุ่งกังหันลมจะต้องทำการตัดการเชื่อมต่อก่อนที่จะกำจัดความผิดพร่อง : ถ้าระหว่างจุดเชื่อมต่อเข้าระบบกับหม้อแปลงมีสายเคเบิลความยาว 50 เมตร จะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรที่จุดเชื่อมต่อเข้ากับระบบ และถ้าความยาวของสายเคเบิลมีความยาวมากกว่านั้นการป้องกันจะขึ้นอยู่กับทิศทางว่าเกิดความผิดพร่องทางด้านทุ่งกังหันหรือทางกริด	
การป้องกันกระแสเกิน : จะต้องทำการเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่ดีที่สุด และอุปกรณ์ที่เลือกจะต้องไม่ทำการตัดการเชื่อมต่อเมื่อระบบทำงานปกติ และจะต้องพิจารณาจากค่ากระแสพุ่งเข้าสูงสุด (maximum in-rush current) และค่ากระแสสูงสุดเมื่อมีการทำงาน	Sintef, DEFU 111, AMP
ความทนทานต่อความถี่สูงเกิน : ดูจากรูปที่ 5.1 และ 5.2	All
ความทนทานต่อแรงดันต่ำเกิน(ในระหว่างและหลังจากกิดความผิดพร่อง) : ดูรูปที่ 5.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.12 ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม (ต่อ)

ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม	แหล่งข้อมูล
U=0%, WF disconnection after > 0.25s	SvK(P_{WF} >100MW)
U< 90%, WF disconnection after > 0.75s	SvK
U = 25%, WF disconnection after > 0.25s	SvK(P_{WF} >100MW)
U = 0%, WF disconnection after > 0.1s U < 60%, ,80%, WF disconnection after > 2, ,20s	Eltra
U = 20% WF disconnection after > 0.7s U < 80%, WF disconnection after > 3s	E.ON
0% ≤ U < 90%, WF disconnection after > 0.14s 15% ≤ U < 90%, WF disconnection after > 0.14s	Scotland
U = 25%, WF disconnection after > 0.1s U < 75%, WF disconnection after > 0.75s U < 90%, WF disconnection after > 10s	Eltra and Elkraft
50% ≤ U < 90%, WF disconnection after > 0.6s	ESBNG
ความทนทานต่อแรงดันต่ำเกิน (ที่การทำงานปกติ) : U < 90%, WF disconnection after 500ms	Scotland
U < 80%, WF disconnection after 3-5s U < 94%, WF disconnection after 60s U < 80%, WF disconnection after 0.2s	E.ON
U < 85%, ,95%, WF disconnection after 60s	DEFU 111
U < 90%, WF disconnection after 60s	Sintef
U < 90%, WF disconnection after 10, , 60s	Eltra and Elkraft
U < 70%, WF disconnection	VDEW
ความทนทานต่อแรงดันสูงเกิน (ที่การทำงานปกติ) : U > 106%, WF disconnection after 60s U > 110%, WF disconnection after 0.2s	Eltra and Elkraft
U > 110%, WF disconnection after 60s	AMP, Sintef
U > 120%, WF disconnection after 0.2s	AMP, Sintef
U > 95%, ,110%, WF disconnection after 50s	DEFU 111
U > 115%, WF disconnection	VDEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.13 ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม (ต่อ)

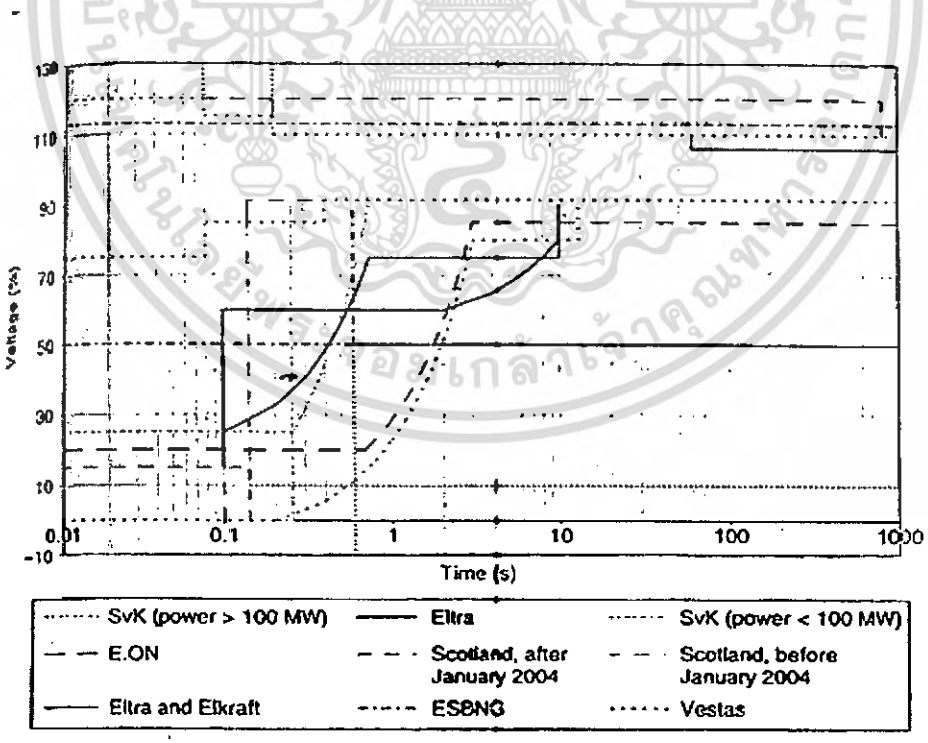
ข้อกำหนดการป้องกันทุ่งกังหันลม	แหล่งข้อมูล
ความทนทานต่อแรงดันสูงเกิน $U >$ 115%(at 275 kV) or U $>$ 120%(at 132kV), WF disconnection after 250 ms	Scotland
$U >$ 120%, $<$ 100ms,voltage reduction	Eltra
$U >$ 120%, disconnection after maximum of 100ms (if equipped with capacity banks) $U >$ 120%, disconnection after maximum of 200ms (if not equipped with capacity banks)	DEFU 111

WT คือ กังหันลม

WF คือ ทุ่งกังหันลม

P_{WF} คือ กำลังไฟฟ้าของทุ่งกังหันลม

U คือ แรงดัน



รูปที่ 5.5 เกณฑ์ความทนทานต่อแรงดันต่ำเกินหลังจากเกิดความผิดพร่องภายในระบบ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 สรุปและเปรียบเทียบมาตรฐานการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า

จากการศึกษาการเลือกชนิดของกังหันลม ซึ่งกังหันลมที่เลือกมาคือชนิด C1 หรือแบบแวริเอเบิลสปีด (Variable speed) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันแบบดับบรีเฟด (Doubly Fed induction generator) ซึ่งการศึกษาคุณภาพทางไฟฟ้าก็สนับสนุนกังหันลมแบบแวริเอเบิลสปีดเช่นกัน ขดลวดพันชนิดดับบรีเฟด และก่อนที่จะนำมาขนานเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น เราจะต้องพิจารณาถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า แต่เนื่องจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อกังหันลมเข้ากับระบบไฟฟ้าในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐาน ดังนั้นจึงนำมาตรฐานการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และได้นำมาตรฐานการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของต่างประเทศที่เป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อของกังหันลมโดยเฉพาะมาเป็นเกณฑ์อ้างอิง จากการเปรียบเทียบสามารถสรุปเกณฑ์ที่คาดว่าน่าจะนำมาใช้กับการเชื่อมต่อกังหันลมกับระบบไฟฟ้าในประเทศไทยได้ดังนี้

5.3.1 การควบคุมแรงดัน การควบคุมแรงดันตามมาตรฐานของการไฟฟ้าภูมิภาคระดับแรงดันจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 0.05 % และห้ามต่ำกว่า 0.05 % ส่วนมาตรฐานของต่างประเทศตามมาตรฐาน Eltra นั้นระดับแรงดันจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 0.01 % และห้ามต่ำกว่า 0.022 % ดังนั้นจากการเปรียบเทียบคาดว่าตามมาตรฐานของ Eltra น่าจะนำมาใช้ภายในประเทศไทยดังแสดงในตารางที่ 5.14

ตารางที่ **5.14** สรุปเรื่องการควบคุมแรงดัน

ข้อกำหนดระดับแรงดันที่คาดว่าเหมาะสม		
ระดับแรงดัน(kV)	ระดับแรงดัน Max(kV)	ระดับแรงดัน Min(kV)
115	116.15	112.47
69	69.69	67.48
33	33.33	32.27
22	22.22	21.52

5.3.2 การควบคุมความถี่ การควบคุมความถี่ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าภูมิภาคระดับความถี่จะต้องอยู่ในช่วง 49.5 - 50.5 Hz ส่วนมาตรฐานของต่างประเทศจากรูปที่ 5.2 จากมาตรฐานของ AMP ความถี่จะต้องอยู่ในช่วง 48 – 51 Hz ดังนั้นจากการเปรียบเทียบคาดว่าตามมาตรฐานของการไฟฟ้าภูมิภาคน่าจะนำมาใช้ได้เนื่องจากระดับความถี่อยู่ในช่วงที่มาตรฐานของ AMP ยอมรับได้คือ 49.5 – 50.5 Hz

5.3.3 การควบคุม Power Factor การควบคุม power factor ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าภูมิภาคค่า power factor จะอยู่ในช่วง 0.85 leading ถึง 0.85 lagging ส่วนมาตรฐานของต่างประเทศจากรูปที่ 5.3 มาตรฐานของ AMP ค่า power factor จะอยู่ในช่วง 0.89 leading ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.9 lagging ดังนั้นจากการเปรียบเทียบคาดว่ามาตรฐานของการไฟฟ้าภูมิภาคน่าจะนำมาใช้ได้คือ 0.85 leading ถึง 0.85 lagging

5.3.4 การควบคุมแรงดันกระเพื่อม การควบคุมแรงดันกระเพื่อมตามมาตรฐานของการไฟฟ้าภูมิภาคโดยใช้ค่าดรรชนีไฟกระพริบเป็นเกณฑ์ดังแสดงในภาคผนวก ค. ส่วนมาตรฐานของต่างประเทศดังแสดงในตารางที่ 5.7 ดังนั้นจากการเปรียบเทียบคาดว่ามาตรฐานของ Eltra น่าจะนำมาใช้ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 สรุปเรื่องการควบคุมแรงดันกระเพื่อม

P_{st}	P_{lt}
< 0.3	< 0.25

5.2.5 การควบคุมแรงดันฮาร์มอนิก การควบคุมแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐานของการไฟฟ้าภูมิภาค ดังแสดงในภาคผนวก ข. ส่วนมาตรฐานของต่างประเทศไม่ได้แสดงเป็นการควบคุมแรงดันฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันต่าง ๆ ได้ดังนั้นจึงใช้มาตรฐานการไฟฟ้าภูมิภาคเป็นเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 สรุปเรื่องการควบคุมแรงดันฮาร์มอนิก

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรวม V_T (%)	ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.4	5	4	2
11,12,22,24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การคัดเลือกแหล่งศักยภาพพลังงานลม

6.1 การคัดเลือกแหล่งศักยภาพลังงานลม

6.1.1 แหล่งพลังงานลมที่ดีจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลม

ผลที่ได้จากแผนที่ศักยภาพพลังงานลมเฉลี่ยทั้งปีรวมลมสงบพบว่ามีแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีจำนวน 11 แห่ง ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 แหล่งพลังงานลมที่ดีจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลม [8]

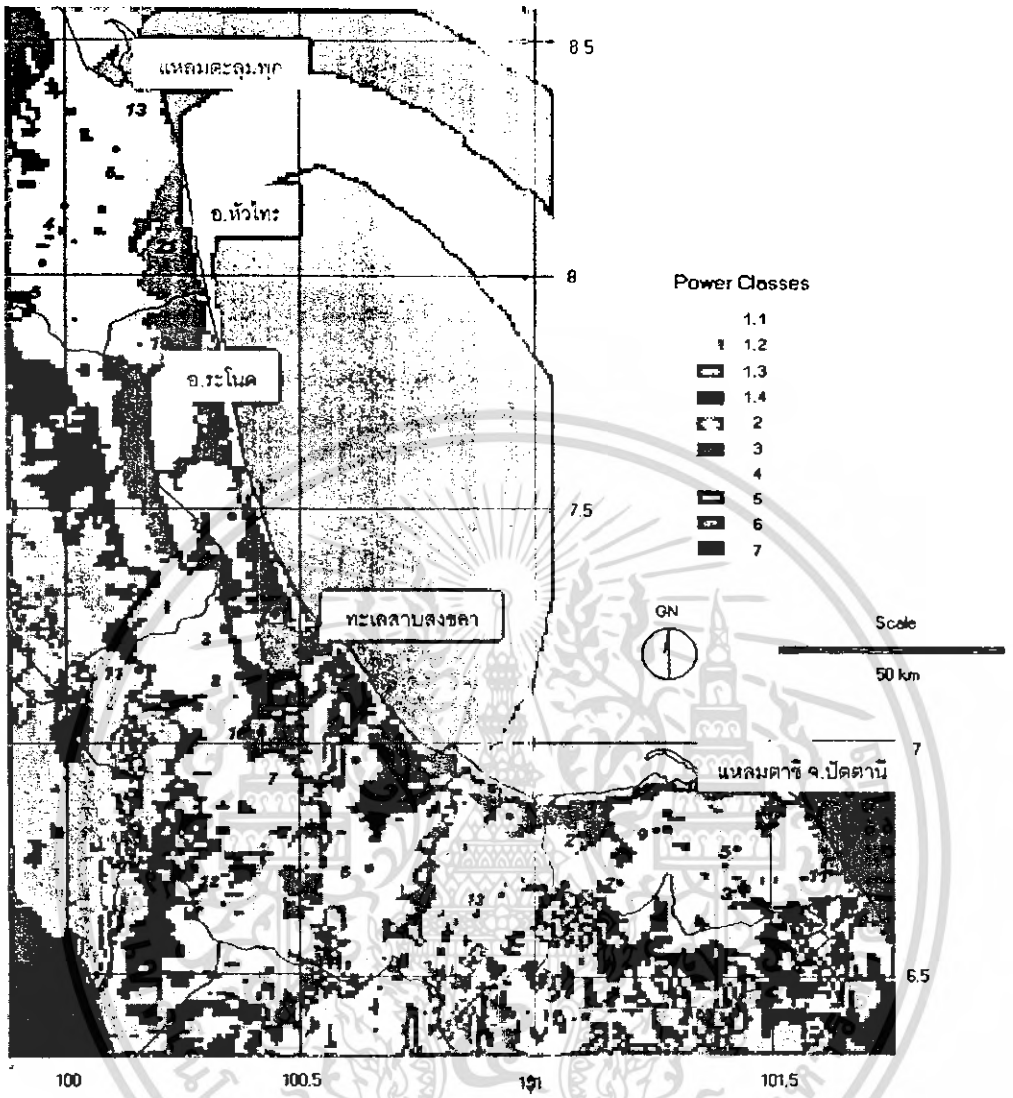
พื้นที่	จังหวัด	ระดับกำลังลม	ความเร็วลม (m/s) ที่ 50 เมตร	กำลังลม (W/m^2) ที่ 50 เมตร
1 อุทยานแห่งชาติใต้ร่มเย็น	นครศรีธรรมราช	6-7	8.00 – 11.90	600 – 2,000
2 อุทยานแห่งชาติ เขาหลวง	นครศรีธรรมราช	6-7	8.00 – 11.90	600 – 2,000
3 อุทยานแห่งชาติ เขาปู่-เขาย่า	พัทลุง	6-7	8.00 – 11.90	600 – 2,000
4 อุทยานแห่งชาติ วังเจ้า	ตาก	6	8.00 – 8.80	600 – 800
5 อุทยานแห่งชาติ ดอยอินทนนท์	เชียงใหม่	4	7.00 – 7.50	400 – 500
6 อุทยานแห่งชาติ แก่งกรุง	สุราษฎร์ธานี	4-5	7.00 – 8.00	400 – 600
7 เขาพนมเบญจา	กระบี่	6	8.00 – 8.80	600 – 800
8 อ.ระโนด	สงขลา	4	7.00 – 7.50	400 – 500
9 ทะเลสาบสงขลา	สงขลา	5-6	7.50 – 8.00	500 – 700
10 แหลมตาชี	ปัตตานี	4	7.00 – 7.50	400 – 500
11 อ.หัวไทร	นครศรีธรรมราช	3	6.40 – 7.00	300 – 400

ก. แหล่งศักยภาพพลังงานลมแนวชายฝั่งทะเล

จากแผนที่ศักยภาพพลังงานลมพบว่าแหล่งพลังงานลมที่ดี อยู่ที่ภาคใต้บริเวณแนวชายฝั่งทะเลของอ่าวไทยเริ่มตั้งแต่ อำเภอ หัวไทร จังหวัด นครศรีธรรมราช ผ่าน อำเภอระโนด อำเภอ สทิงพระทะเลสาบสงขลา จังหวัด สงขลา จรดจนถึงแหลมตาชี จังหวัดปัตตานี (รูปที่ 6.1) ได้แก่

- บริเวณ อำเภอ ระโนด จังหวัด สงขลา
- บริเวณ ทะเลสาบสงขลา จังหวัด สงขลา
- บริเวณ แหลมตาชี จังหวัด ปัตตานี
- บริเวณ อำเภอ หัวไทร จังหวัด นครศรีธรรมราช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 แหล่งพลังงานลมที่ดีจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลม [8]

พื้นที่บริเวณดังกล่าวมีความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีที่ระดับ 3 (Class 3) ขึ้นไปและมีถนนสายหลักของกรมทางหลวงผ่าน และมีระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงระดับ 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคผ่านตลอด ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบโล่งชายฝั่งทะเลไม่มีสิ่งกีดขวางทางลมมาก ลมที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม คือลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดจากอ่าวไทยในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม และ กุมภาพันธ์ ซึ่งมีลมแรงมากกว่าเดือนอื่นๆ พัดจากทะเลสู่ฝั่งที่มีลักษณะพื้นของแผ่นดินคล้ายด้ามขวานที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม ดังนั้นบริเวณดังกล่าว จึงเป็นพื้นที่ๆได้รับลมแรงมากกว่าแผ่นดินส่วนอื่นของภาคใต้ของประเทศไทย ในขณะเดียวกันเมื่อถึงเดือน มีนาคม เมษายนพฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม จะมีลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมได้พัดผ่านซึ่งสามารถพัดผ่านได้โดยสะดวกเนื่องจากไม่มีภูเขาสูงกีดขวางทางลมในขณะเดียวกันที่พื้นที่แหลมตะลุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัด

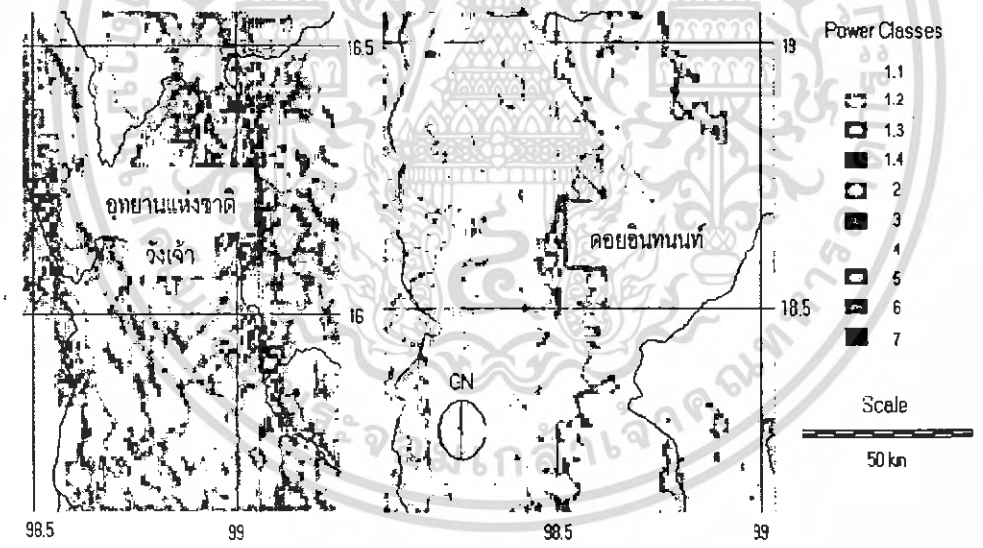
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นครศรีธรรมราช เคยมีประวัติพายุโซนร้อนฮาเรียต (Harriet) เคลื่อนที่ผ่านเมื่อปี พ.ศ. 2505 ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก ดังนั้นการออกแบบกังหันลมและโครงสร้างได้แก่ฐานรากและเสารวมถึงตำแหน่งติดตั้งกังหันลมที่อำเภอหัวไทร ซึ่งอยู่ในจังหวัดเดียวกัน และบริเวณ อำเภอระโนด จังหวัด สงขลา ซึ่งอยู่ใกล้เคียง จะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและปลอดภัยจากโอกาสที่พายุขนาดใหญ่เช่นพายุโซนร้อนหรือพายุได้ฝุ่นอาจเคลื่อนที่ผ่านด้วย

ข. แหล่งศักยภาพพลังงานลมบริเวณยอดเขาสูง

แหล่งพลังงานลมของประเทศไทยที่เป็นยอดเขาสูงได้แก่

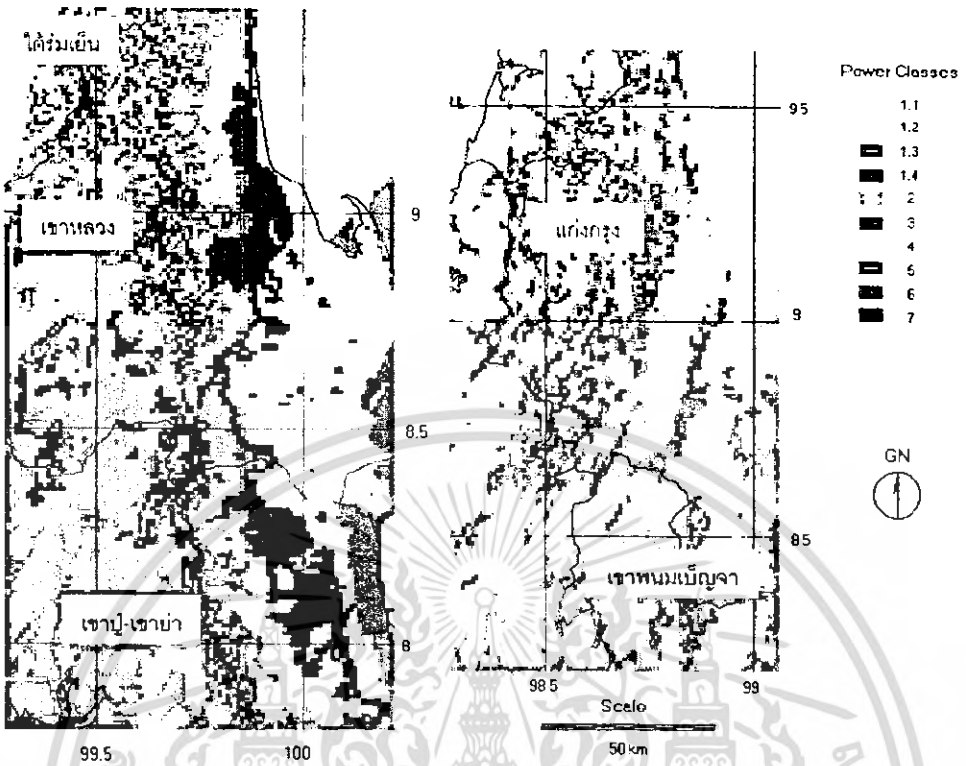
- อุทยานแห่งชาติวังเจ้า จังหวัดตาก
- อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่
- อุทยานแห่งชาติไต้ร่มเย็น จังหวัด นครศรีธรรมราช
- อุทยานแห่งชาติเขาหลวง จังหวัด นครศรีธรรมราช
- อุทยานแห่งชาติเขาปู่ ถึง เขาย่า จังหวัดพัทลุง
- อุทยานแห่งชาติ แก่งกรุง จังหวัด สุราษฎร์ธานี
- เขาพนมเบญจา จังหวัด กระบี่



รูปที่ 6.2 อุทยานแห่งชาติวังเจ้าและอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ [8]

เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวมีภูมิประเทศทุรกันดารเป็นเทือกเขาสูงและไม่มีถนนตัดผ่านยกเว้น ที่ดอยอินทนนท์ จึงอาจมีอุปสรรคในการพัฒนาเป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในพื้นที่บริเวณดังกล่าวจึงเหมาะสมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในท้องถิ่นและเนื่องจากเป็นเขตอุทยานแห่งชาติ และ เขตป่า ซึ่งต้องได้รับอนุญาตจากหน่วยราชการที่เกี่ยวข้องด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 อุทยานแห่งชาติใต้ร่มเย็น เขาหลวง เขาปู่-เขาย่า อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง และ เขาพนมเบญจา [8]

6.1.2 การสำรวจแหล่งพลังงานลมในภาคสนาม

เพื่อให้สามารถคัดเลือกแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดี และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของความเร็วลมในภาคสนามเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ รวมทั้งได้รับแจ้งจากเจ้าหน้าที่ในพื้นที่อำเภอแก้งคร้อ จังหวัดชัยภูมิ และ ที่บ้านเขาทะลุ อำเภอสวี จังหวัดชุมพร มีลมพัดแรง จึงได้ไปทำการสำรวจความเร็วลมในสนามอีกครั้ง โดยเดินทางไปตรวจวัดความเร็วลมและตรวจสอบสภาพแวดล้อมณ สถานที่จริง ในวันที่ 9 -13 มีนาคม 2544 และจัดทำรายงานการสำรวจสรุปตามที่แสดงในตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 รายชื่อสถานที่และความเร็วลมที่สำรวจในภาคสนามวันที่ 9 ถึง 13 มี.ค 2544 [8]

สถานที่	ความเร็วลม * ที่ 2 เมตร (m/s)	เวลาตรวจวัด	วันที่
1. จุดชมวิว อ.ไม้แก่น จ.ปัตตานี (ติดชายทะเล)	6 – 7	10.30 น.	9/3/44
2. บ้านรังมดแดง อ.สายบุรี จ.ปัตตานี (ติดชายทะเล)	4 - 5	11.00 น.	9/3/44
3. บ้านเก่า อ.สายบุรี จ.ปัตตานี (ติดชายทะเล)	4 – 5	11.30 น.	9/3/44
4. แหลมตาชี อ.ยะหริ่ง จ.ปัตตานี (ติดชายทะเล)	4	13.00 น.	9/3/44
5. บ้านท่าสะอ้าน ริมทะเลสาบสงขลา อ.เมือง จ.สงขลา	4	17.30 น.	9/3/44
6. ร.ร ป่าจากวิทยา อ.ควนเนียง จ.สงขลา	3 - 4	10.00 น.	10/3/44
7. บ้านหน้าห้วย อ.ระโนด จ.สงขลา (ติดชายทะเล)	5 - 5.5	12.00 น.	10/3/44
8. วัดศาลาหลวงบน ต.ท่าบอน อ.ระโนด (ติดชายทะเล)	5.5 - 6	13.00 น.	10/3/44
9. ร.ร วัดหัวคุ้ง บ้านหัวคุ้ง อ.ระโนด จ.สงขลา (ติดชายทะเล)	5.5 - 6.5	13.30 น.	10/3/44
10. บ้านปากระวะ อ.ระโนด จ.สงขลา (ติดชายทะเล)	6 - 6.5	13.45 น.	10/3/44
11. บ้านหัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช (ติดชายทะเล)	4.5	14.10 น.	10/3/44
12. ทางแยกวัดบางอุดมใกล้บ้านเกาะฝ้าย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช (ติดชายทะเล)	6 – 7	14.30 น.	10/3/44
13. บ้านปลาทราย อ.แหลมตะลุมพุก อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช (ติดชายทะเล)	4 – 5	15.20 น.	10/3/44
14. บ้านเขาทะลุ อ.สวี จ.ชุมพร	4 - 5	10.30 น.	11/3/44
15. บ้านท่าตะโก อ.สวี จ.ชุมพร (ติดชายทะเล)	5 – 7	12.30 น.	11/3/44
16. สันเขื่อนบน ห้วยลำปะทาว อ.แก้งคร้อ จ.ชัยภูมิ	4 - 5	10.00 น.	13/3/44
17. สันเขื่อนล่าง ห้วยลำปะทาว อ.แก้งคร้อ จ.ชัยภูมิ	5	12.00 น.	13/3/44
18. อ่างเก็บน้ำเขื่อนล่าง ห้วยลำปะทาว อ.เมือง จ.ชัยภูมิ	4	13.00 น.	13/3/44

* หมายเหตุ

ก. วิธีการตรวจวัดใช้เครื่องวัดลมแบบพกพาชนิดลูกถ้วย 4 ลูก (ยี่ห้อ DEUTA ANEMO)

ข. ความเร็วลมที่ค่าเฉลี่ย 3 นาที

ค. ระหว่างวันที่ 9-11 มีนาคม 2544 ได้เกิดหย่อมความกดอากาศต่ำกำลังแรงในบริเวณภาคใต้ บริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และมีลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

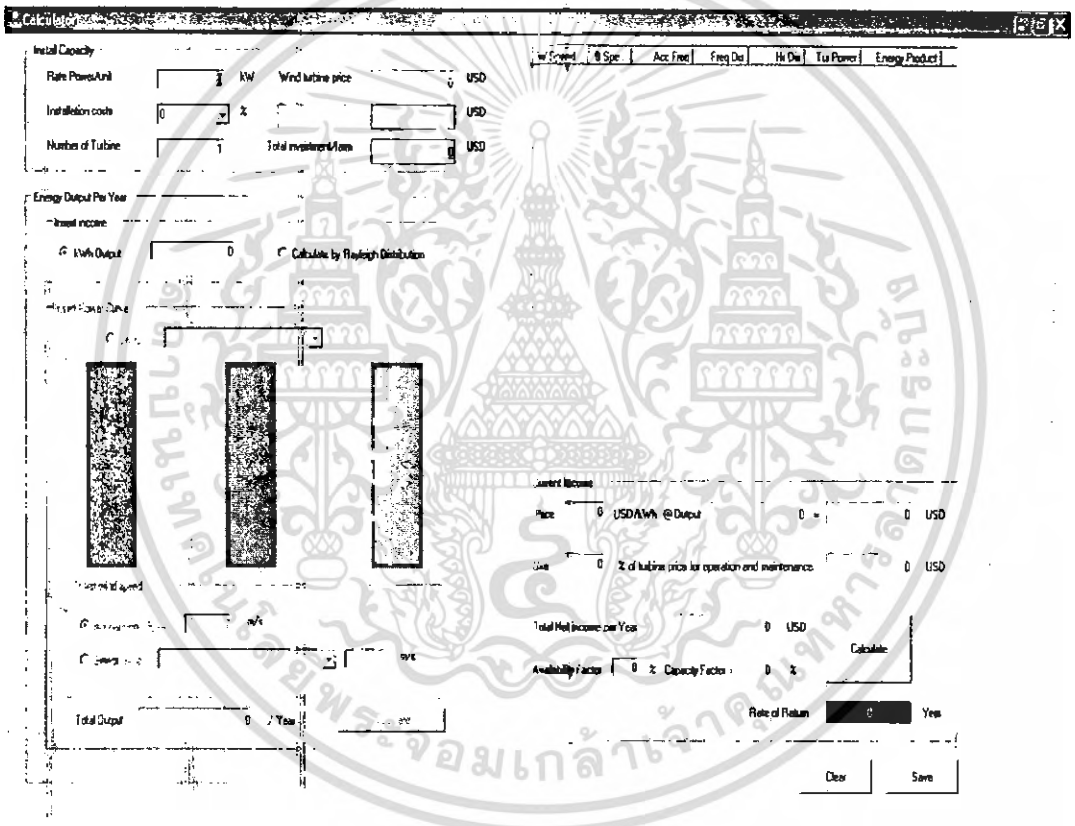
ตะวันออกและตะวันออกเฉียงใต้เป็นแนวพัดสอบในบริเวณดังกล่าว ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดฝนฟ้าคะนอง และคลื่นลมแรงในบริเวณภาคใต้โดยทั่วไปความสูงของคลื่นทางฝั่งอ่าวไทยสูงประมาณ 1 เมตร

ง. ระหว่างวันที่ 12 ถึง 13 มีนาคม 2544 ได้มีความกดอากาศต่ำกำลังปานกลางแผ่ลงมาปกคลุมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และ ภาคเหนือที่จังหวัด ขอนแก่น และ ชัยภูมิ และมีลมตะวันออก และ ตะวันออกเฉียงใต้ เป็นแนวพัดสอบพาดในบริเวณดังกล่าว ลักษณะ นี้ทำให้เกิดฝนฟ้าคะนองและลมแรงในพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
โปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า

ตามที่ได้คัดเลือกตำแหน่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีจำนวน 11 ตำแหน่งในบทที่ 6 ในบทที่ 7 นี้จะแสดงแนวทางการคัดเลือกกังหันลมสำหรับตำแหน่งดังกล่าวและคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลม เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยจะนำเสนอด้วยการออกแบบโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งมีวิธีการคำนวณและการใช้งานดังนี้



รูปที่ 7.1 โปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า

7.1 การคำนวณต้นทุนในการติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

ก. ทำการป้อนค่ากำลังการผลิตของกังหันลมที่ได้กำหนดไว้โดยมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ลงในช่อง Rate Power/unit ซึ่งค่ากำลังการผลิตของกังหันลมจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาต้นทุนของกังหันลมต่อหนึ่งตัวโดยใช้ Banana curve ซึ่งการคำนวนโดยใช้กราฟลักษณะนี้จะถูกแบ่งเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

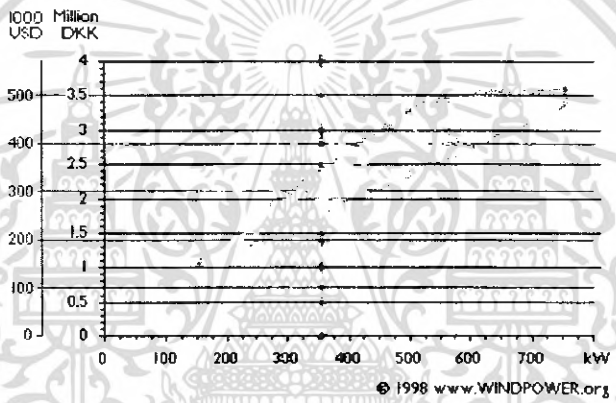
สำหรับกำลังการผลิตของกังหันลมที่มีค่ามากกว่า 146 กิโลวัตต์ ถึงน้อยกว่า 655 กิโลวัตต์

$$\textbf{Price of Wind turbine} = 1{,}000 \times \left[(0.715 \times RatePower/unit) + 46.323 \right] \quad (7.1)$$

สำหรับกำลังการผลิตของกังหันลมที่มีค่าตั้งแต่ 655 กิโลวัตต์ ถึง 750 กิโลวัตต์ จะมีต้นทุนของกังหันลมต่อหนึ่งตัวเท่ากับ 515,000 USD

สำหรับกำลังการผลิตของกังหันลมที่มีค่ามากกว่า 750 กิโลวัตต์ ขึ้นไปจะใช้สมการ

$$\textbf{Price of Wind turbine} = 1{,}000 \times (RatePower/unit) \quad (7.2)$$

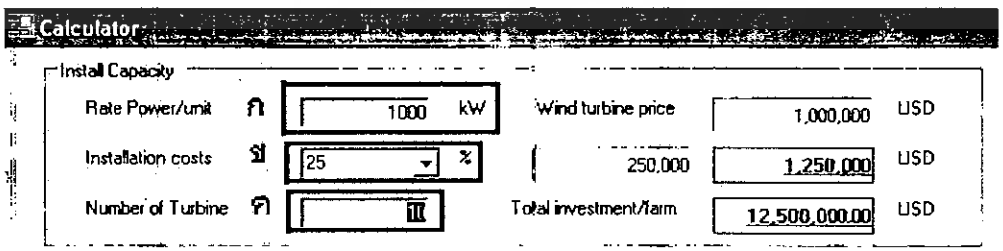


รูปที่ 7.2 Banana Curve [www.windpower.org]

ข. ทำการเลือกค่าการติดตั้งกังหันลมในช่อง Installation costs

ค. ทำการป้อนจำนวนกังหันลมที่จะทำการติดตั้งลองในช่อง Number of Turbine

เมื่อทำการป้อนข้อมูลทั้งหมดและกดเอนเทอร์และโปรแกรมจะทำการประมวลผลและแสดงผลการคำนวณที่ได้ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 ผลการคำนวนต้นทุนในการติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปีโดยใช้หลักของการแจกแจงเรย์ลีฟ (Rayleigh Distribution)

ก. ทำการเลือกระหว่างการป้อนค่าพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปี (ทราบพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปีแล้ว) หรือเลือกการคำนวนพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปีโดยใช้หลักการแจกแจงเรย์ลีฟ ซึ่งต้องทำการเลือกรุ่นของกังหันลมในส่วนของ Insert Power Curve

ข. ทำการเลือกระหว่างการป้อนค่าความเร็วลมเฉลี่ยต่อปีในช่อง Annual Wind Speed หรือเลือกสถานที่ๆเหมาะสมจากส่วนของ Select place

เมื่อป้อนและเลือกค่าทั้งหมดแล้วจึงทำการกด Calculate เพื่อคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปีออกมาเป็นตารางการแจกแจงเรย์ลีฟดังรูปที่ 7.5

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปีโดยใช้ Rayleigh Distribution (K=2) หาความถี่ของลมที่เกิดขึ้นในรอบปี (8,760 ชั่วโมง) จากสมการ

$$Accumulative\ time\ at\ U\ or\ below = 1 - e^{\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{U}{U_a}\right)^2\right]} \qquad (7.3)$$

โดยที่ U คือ Bin Speed ตั้งแต่ 1-25 m/s

U_a คือความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีที่ Lower Limit จากตาราง Wind Power Class

ตัวอย่างการคำนวน

(1) ที่บริเวณ บ้านปากระวะ อำเภอ ระโนด จังหวัดสงขลา (ตำแหน่งที่ 1) มีกำลังลม ระดับ 4 (Class 4) ความเร็วลมอยู่ระหว่าง 7.0-7.5 m/s ที่ความสูง 50 เมตร

(2) เลือกขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 750 kW (Generic) ซึ่งมี Power Curve ดังนี้

ตารางที่ 7.1 Power Curve ของ กังหันลมขนาด 750 kW (Generic)*

Speed, m/s	Power, kW
4	15.10
5	45.30
6	84.90
7	128.3
8	212.0
9	305.9
10	411.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Speed, m/s	Power, kW
11	514.2
12	602.2
13	663.9
14	707.9
15	736.0
16	747.5
17	750.0
18	744.8
19	735.9
20	725.6
21	715.7
22	706.6
23	700.3
24	699.2
25	701.6

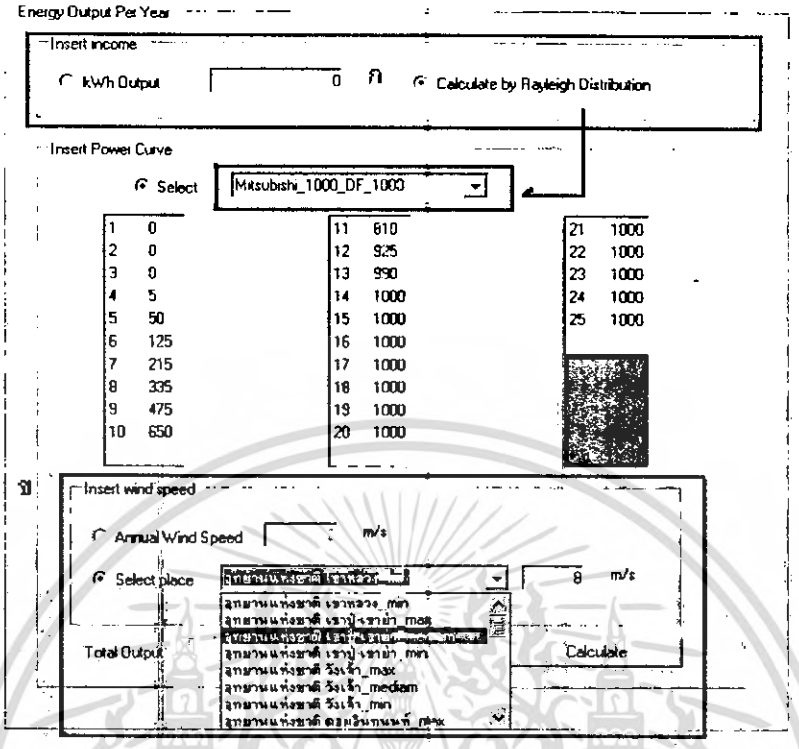
(3) คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมที่ผลิตได้ในรอบปีโดยใช้ Rayleigh Distribution และสร้าง ตาราง Histogram จะได้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2,030,007 kWh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 ตาราง Histogram โดย Rayleigh Distribution ที่ความเร็วลม 7.0 m/s

Annual Wind Speed, m/s	Bin Speed, m/s	Accumulative Frequency, p.u	Frequency Distribution, %	Hr Distribution	Turbine Power Curve (750 kW Generic), kW	Energy Production kWh
7.0	1	0.0159	1.59%	139		
	2	0.0621	4.62%	405		
	3	0.1343	7.22%	633		
	4	0.2262	9.19%	805	15.10	12,153.09
	5	0.3302	10.39%	911	45.30	41,248.91
	6	0.4384	10.83%	949	84.90	80,528.02
	7	0.5441	10.56%	925	128.30	118,715.22
	8	0.6415	9.74%	854	212.00	180,954.00
	9	0.7270	8.55%	749	305.90	229,133.72
	10	0.7987	7.17%	628	411.10	258,104.80
	11	0.8562	5.75%	504	514.20	259,176.48
	12	0.9006	4.43%	388	602.20	233,871.22
	13	0.9334	3.28%	288	663.90	190,954.36
	14	0.9568	2.34%	205	707.90	145,116.23
	15	0.9729	1.61%	141	736.00	103,577.20
	16	0.9835	1.06%	93	747.50	69,611.96
	17	0.9903	0.68%	59	750.00	44,578.28
	18	0.9944	0.42%	37	744.80	27,265.12
	19	0.9969	0.25%	22	735.90	16,017.19
	20	0.9984	0.14%	12	725.60	9,067.93
	21	0.9991	0.08%	7	715.70	4,960.85
	22	0.9996	0.04%	4	706.60	2,624.77
	23	0.9998	0.02%	2	700.30	1,347.32
	24	0.9999	0.011%	1	699.20	673.46
	25	1.0000	0.005%	0.47	701.60	327.07
TOTAL			100%	8,760		2,030,007.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 วิธีการป้อนค่าเพื่อใช้คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปี

W Speed	B Spe...	Acc Freq	Freq D...	Hr Dis	Tur Power	Energy Product
	2	0.05	3.57	312.78	0.00	0.00
	3	0.10	5.57	496.37	0.00	0.00
	4	0.18	7.37	645.69	5.00	3,228.46
	5	0.26	8.59	752.70	50.00	37,634.88
	6	0.36	9.29	813.92	125.00	101,740.47
	7	0.45	9.48	830.44	215.00	178,545.33
	8	0.54	9.21	807.23	335.00	270,421.33
	9	0.63	8.59	752.06	475.00	357,230.21
	10	0.71	7.70	674.25	650.00	438,264.15
	11	0.77	6.66	583.33	810.00	472,497.16
	12	0.83	5.57	487.99	925.00	451,390.99
	13	0.87	4.51	395.34	990.00	391,389.77
	14	0.91	3.54	310.54	1,000.00	310,535.67
	15	0.94	2.70	236.71	1,000.00	236,712.77
	16	0.96	2.00	175.24	1,000.00	175,236.19
	17	0.97	1.44	126.06	1,000.00	126,059.89
	18	0.98	1.01	88.16	1,000.00	88,164.62
	19	0.99	0.68	59.97	1,000.00	59,972.72
	20	0.99	0.45	39.69	1,000.00	39,692.16
	21	1.00	0.29	25.57	1,000.00	25,566.69
	22	1.00	0.18	16.03	1,000.00	16,031.42
	23	1.00	0.11	9.79	1,000.00	9,787.94
	24	1.00	0.07	5.82	1,000.00	5,819.88
	25	1.00	0.04	3.37	1,000.00	3,370.64
Total			99.95	8,755.91		3,799,293.35

Current Income

Price 0 USD/kWh @ Output 37,992,933.53 = 0 USD

รูปที่ 7.5 ตารางการแจกแจงเรย์ลีฟที่โปรแกรมคำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 การคำนวณค่าคาปาซิตี้แฟคเตอร์ (Capacity Factor) และความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ก. ทำการป้อนราคาพลังงานไฟฟ้าต่อยูนิตลงในช่อง Price

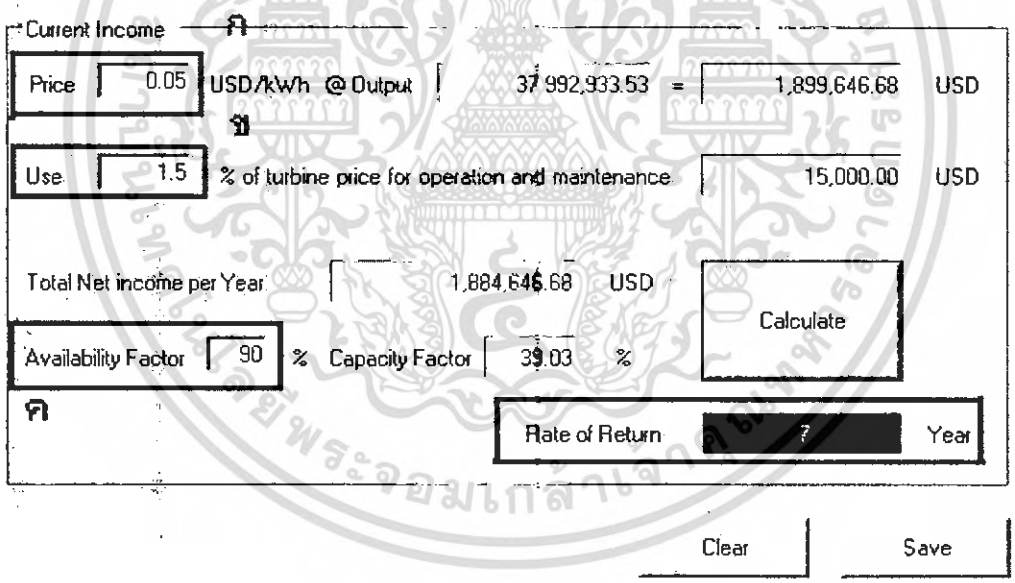
ข. ทำการป้อนค่าการบำรุงรักษาต่อปีลงในช่อง Use

ค. ทำการป้อนค่า Availability Factor

เมื่อป้อนค่าทั้งหมดแล้วจึงกดปุ่ม Calculate เพื่อทำการการคำนวณค่าคาปาซิตี้แฟคเตอร์ซึ่งจะแสดงออกมาเป็นหน่วยเปอร์เซนต์ โดยค่าคาปาซิตี้แฟคเตอร์ไม่ควรจะมีค่าน้อยกว่า 29.3 เปอร์เซ็นต์ และความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะแสดงออกมาว่าจะคุ้มทุนภายในกี่ปีในช่อง Rate of Return

สามารถคำนวณ Capacity Factor ได้จากสมการดังนี้

$$Capacity\ Factor = \left(\frac{OutputPower \times AvailabilityFactor}{RatePower \times 8{,}760} \right) \times 100\% \qquad (7.4)$$



รูปที่ 7.6 การคำนวณค่าคาปาซิตี้แฟคเตอร์ (Capacity Factor) และความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.3 รายละเอียดของกังหันลมแยกตามบริษัทผู้ผลิต

Company	Specification	Rated power (kW)	Cut-in wind speed (m/s)	Nominal wind speed (m/s)	Cut-out wind speed (m/s)	Rotor diameter (m)	Hub height ht (m)
GE	1.5s	1500	4	13	25	70.5	64.7
	1.5se	1500	4	13	25	70.5	54.6,64.7
	1.5sl	1500	3.5	14	20	77	61.4-100
	1.5sle	1500	3.5	14	25	77	61.4,64.7,80,85,100
	1.5xle	1500	3.5	12.5	20	82.5	58.7,80,100
	2.5xl	2500	3.5	12.5	25	100	100
	3.0s	3000	3.5	14	25	90	70
	3.0sl	3000	4	12.5	25	94	85
Enercon	E 33	330	3	13	28-34	33.4	40-50
	E 44	900	2	17	28-34	44	55
	E 48	800	2	14	28-34	48	50-76
	E 53	800	2	13	28-34	52.9	73
	E 70	2300	2	16	28-34	71	58-113
	E 82	2000	2	13	28-34	82	70-108
Fuhrlander	FLMD 70	1500	3	11.6	25	70	65,85,114.5
	FLMD 77	1500	3	13	20	77	61.5,85,90,100,111.5
	FL 1500	1500	3	12	25	70	61.5-114.5

ตารางที่ 7.4 รายละเอียดของกังหันลมแยกตามบริษัทผู้ผลิต

Company	Specification	Rated power (kW)	Cut-in wind speed (m/s)	Nominal wind speed (m/s)	Cut-out wind speed (m/s)	Rotor diameter (m)	Hub height ht (m)
Mitsubishi	MWT-1000A	1000	3	12.5	25	61.4	55,60,69
	MWT-1000	1000	4	13.5	30	57	60,69
	MWT 92/2.4	2400	3	12.5	25	92	70
Nordex	N 60	1300	3-4	15	25	60	60,69,85
	S 70	1500	3	13	25	70	65,85
	S 77	1500	3	11.5	25	77	61.5,80,85,90,100
	N 80	2500	3	15	25	80	60,80
	N 90	2300	3	13	25	90	80,100
RE power	MD 70	1500	3.5	13.5	25	70	65,80,85,90
	MD 77	1500	3.5	12.5	20	77	61.5,85,90,100
	MM 70	2000	3.5	13.5	25	70	55,65,80
	MM 82	2000	3.5	13	25	82	59,80,100
	MM 92	2000	3.0	11.2	24	92.5	78.5,80,100
	5 M	5000	3.5	13	25	126	100,120
Vestas	RRB 27/225	225	4	14	-	27	40-50
	RRB 47/500	500	4	14	-	47	50,65
	RRB 47/600	600	4	15	-	47	50,65

ตารางที่ 7.5 รายละเอียดของกังหันลมแยกตามบริษัทผู้ผลิต

Company	Specification	Rated power (kW)	Cut-in wind speed (m/s)	Nominal wind speed (m/s)	Cut-out wind speed (m/s)	Rotor diameter (m)	Hub height (m)
Vestas	V 52	850	4	16	25	52	40,44,49,55,60,65,74,86
	V 80-1.8	1800	4	15	25	80	60,67,78
	V 80-2.0	2000	4	15	25	80	60,67,78,85,100
	V 82	1650	3.5	13	20	82	59,68.5,70,78
	V 90	1800	3.5	12	25	90	80,95,100
		2000	3.5	13	25	90	80,95,100
		3000	4	15	25	90	65,80,105
	V 100	2750	4	15	25	100	100
	V 120	4500	4	12	25	120	Site specific
Ecotecnia	Ecotecnia 48	750	2-3	14.5	25	48	45,55
	Ecotecnia 62	1300	4	14	25	62	70-80
	Ecotecnia 74	1670	3	13	25	74	60,70,80
	Ecotecnia 80	2000	3	13.5	25	80	70
	Ecotecnia100	3000	3	15	25	100	90
Siemen	SWT – 1.3	1300	4	13-14	25	62	45-68
	SWT – 2.3	2300	4	13-14	25	82.4	60,80
	SWT – 3.6	3600	3	12-14	25	107	80,100

ตารางที่ 7.6 รายละเอียดกำลังการผลิตที่ความเร็วปกติในการทำงานของแต่ละบริษัท

	Rated power (kW)	Company	Specification	Cut-in wind speed (m/s)	Nominal wind speed (m/s)	Cut-out wind speed (m/s)	Rotor diameter (m)	Hub height ht (m)
< 1000	225	Vestas	RRB 27/225	4	14		27	40-50
	330	Enercon	E 33	3	13	28-34	33.4	40-50
	500	Vestas	RRB 47/500	4	14		47	50,65
	600	Vestas	RRB 47/600	4	15		47	50,65
	750	Ecotecnia	Ecotecnia 48	2-3	14.5	25	48	45,55
	800	Enercon	E 48	2	14	28-34	48	50-76
	800	Enercon	E 53	2	13	28-34	52.9	73
	850	Vestas	V 52	4	16	25	52	40,44,49,55,60,65,74,86
	900	Enercon	E 44	2	17	28-34	44	55
	1000	Mitsubishi	MWT-1000A	3	12.5	25	61.4	55,60,69
	1000	Mitsubishi	MWT-1000	4	13.5	30	57	60,69
1000-2000	1300	Nordex	N 60	3-4	15	25	60	60,69,85
	1300	Ecotecnia	Ecotecnia 62	4	14	25	62	70-80
	1300	Siemen	SWT – 1.3	4	13-14	25	62	45-68
	1500	Nordex	S 70	3	13	25	70	65,85
	1500	Nordex	S 77	3	11.5	25	77	61.5,80,85,90,100
	1500	RE power	MD 70	3.5	13.5	25	70	65,80,85,90

ตารางที่ 7.7 รายละเอียดกำลังการผลิตที่ความเร็วปกติในการทำงานของแต่ละบริษัท

	Rated power (kW)	Company	Specification	Cut-in wind speed (m/s)	Nominal wind speed (m/s)	Cut-out wind speed (m/s)	Rotor diameter (m)	Hub height ht (m)
1000-2000	1500	RE power	MD 77	3.5	12.5	20	77	61.5,85,90,100
	1500	Fuhrlander	FLMD 70	3	11.6	25	70	65,85,114.5
	1500	Fuhrlander	FLMD 77	3	13	20	77	61.5,85,90,100,111.5
	1500	Fuhrlander	FL 1500	3	12	25	70	61.5-114.5
	1500	GE	1.5s	4	13	25	70.5	64.7
	1500	GE	1.5se	4	13	25	70.5	54.6,64.7
	1500	GE	1.5sl	3.5	14	20	77	61.4-100
	1500	GE	1.5sle	3.5	14	25	77	61.4,64.7,80,85,100
	1500	GE	1.5xle	3.5	12.5	20	82.5	58.7,80,100
	1650	Vestas	V 82	4	16	25	52	40,44,49,55,60,65,74,86
	1670	Ecotecnia	Ecotecnia 74	3	13	25	74	60,70,80
	1800	Vestas	V 80-1.8	4	15	25	80	60,67,78
	1800	Vestas	V 90	3.5	12	25	90	80,95,100
	2000	Ecotecnia	Ecotecnia 80	3	13.5	25	80	70
	2000	Enercon	E 82	2	13	28-34	82	70-108
	2000	RE power	MM 70	3.5	13.5	25	70	55,65,80
	2000	RE power	MM 82	3.5	13	25	82	59,80,100

ตารางที่ 7.8 รายละเอียดกำลังการผลิตที่ความเร็วปกติในการทำงานของแต่ละบริษัท

	Rated power (kW)	Company	Specification	Cut-in wind speed (m/s)	Nominal wind speed (m/s)	Cut-out wind speed (m/s)	Rotor diameter (m)	Hub height ht (m)
1000-2000	2000	RE power	MM 92	3.0	11.2	24	92.5	78.5,80,100
	2000	Vestas	V 80-2.0	4	15	25	80	60,67,78,85,100
	2000	Vestas	V 90	3.5	13	25	90	80,95,100
> 2000	2300	Enercon	E 70	2	16	28-34	71	58-113
	2300	Nordex	N 90	3	13	25	90	80,100
	2300	Siemen	SWT – 2.3	4	13-14	25	82.4	60,80
	2400	Mitsubishi	MWT 92/2.4	3	12.5	25	92	70
	2500	GE	2.5xl	3.5	12.5	25	100	100
	2500	Nordex	N 80	3	15	25	80	60,80
	2750	Vestas	V 100	4	15	25	100	100
	3000	GE	3.0s	3.5	14	25	90	70
	3000	GE	3.0sl	4	12.5	25	94	85
	3000	Vestas	V 90	4	15	25	90	65,80,105
	3000	Ecotecnia	Ecotecnia100	3	15	25	100	90
	3600	Siemen	SWT – 3.6	3	12-15	25	107	80,100
	4500	Vestas	V 120	4	12	25	120	Site specific
	5000	RE power	5 M	3.5	13	25	126	100,120

บทที่ 8
สรุป และ วิจารณ์

8.1 สรุปการคัดเลือกประเภทของกังหันลม

จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นทำให้ทราบว่าการที่ จะนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์เราต้องมีเครื่องแปลงพลังงานลมให้เป็นพลังงานรูปอื่น ซึ่งได้แก่กังหันลม ในทางทฤษฎี พลังงานที่ได้จากลม โดยผ่านทางกังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดได้แค่เพียง 59.3 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น รวมทั้งการศึกษาประเภทของกังหันลมละการคัดเลือกทำให้ทราบว่าอุปกรณ์ภายในกังหันลมมีหลักการทำงานอย่างไร ส่วนการเปรียบเทียบชนิดของกังหันลมเราสนใจที่จะคัดเลือกกังหันลมโดยใช้เกณฑ์การแบ่งประเภทตามชนิดของวงจร และส่วนประกอบภายในของกังหันลมตามหัวข้อ 3.3.3 ในบทที่ 3 ซึ่งการคัดเลือกโดยใช้เกณฑ์นี้จะรวมคุณสมบัติของการคัดเลือกกังหันลมประเภทอื่นมาไว้ทั้งหมด โดยการผลิตในปัจจุบันส่วนใหญ่นั้นจะเลือกใช้กังหันลมแบบ C1 ซึ่งจะเป็นกังหันลมแบบแวริเอเบิลสปีดและใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันแบบดับบลีเฟด (Doubly fed induction generator) ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบันโดยมีส่วนประกอบคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน, partial scale frequency converter และเกียร์บอกซ์ เป็นต้น โดยกังหันลมชนิดนี้สามารถทำงานที่ความเร็วลมระดับต่าง ๆในช่วงที่กว้างกว่ากังหันลมบางชนิดที่ผลิตได้ในปัจจุบัน มีการสูญเสียกำลังจากอุปกรณ์ภายในต่ำและยอมรับได้ และมี partial scale frequency converter ทำหน้าที่ชดเชยความแตกต่างของความถี่ทางไฟฟ้ากับความถี่ทางกล ซึ่งทำให้มีความสามารถที่จะควบคุมกำลังจริงและกำลังจินตภาพในระหว่างการทำงานได้เป็นอย่างดี

เพาเวอร์คอนเวอเดอร์ที่ใช้ภายในกังหันลมชนิดนี้จะประกอบด้วยคอนเวอเดอร์ 2 ชนิด คือคอนเวอเดอร์ทางด้านโรเดอร์ และคอนเวอเดอร์ทางด้านกริด ซึ่งจะมีการทำงานเป็นอิสระจากกันโดยคอนเวอเดอร์ทางด้านโรเดอร์ จะเป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพโดยอาศัยการควบคุมจากส่วนประกอบของกระแสโรเดอร์ (Rotor current components) ส่วนคอนเวอเดอร์ทางด้านกริด จะเป็นตัวควบคุมแรงดันเพื่อให้ได้ค่าเพาเวอร์แฟคเดอร์ที่เหมาะสม

ข้อดีของกังหันลมชนิดนี้ก็คือมีความสามารถในการควบคุมกำลังจินตภาพ อีกทั้งยังไม่ต้องการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจากกริดอีกด้วย เพราะสามารถกระตุ้นได้ด้วยตัวมันเอง ขนาดของคอนเวอร์ไม่มีความเกี่ยวข้องกับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่จะเป็นตัวกำหนดช่วงการทำงานที่ความเร็วต่าง ๆ ดังนั้นเมื่อราคาคอนเวอเดอร์สูงขึ้นช่วงการทำงานที่ความเร็วลมระดับต่าง ๆก็จะกว้างขึ้นนั่นเองส่วนข้อเสียของกังหันลมชนิดนี้ก็คือยังมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สลิปริง ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกแล้วแม้ว่า จะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนแต่ก็ไม่สามารถควบคุมกำลังจินตภาพได้ดีเท่า อีกทั้งยังมีกำลังการผลิตที่น้อยกว่าที่ความเร็วลมเท่ากัน และมีช่วงการทำงานที่ความเร็วลมระดับต่าง ๆได้ไม่มากนัก มีความเครียดทางกลสูง และแรงดันที่ได้ความแปรปรวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูง ทำให้ความเหมาะสมของกังหันลมที่ควรจะเลือกใช้ควรจะเป็นแบบ C1 นั่นเองส่วนแบบ C0, C2 นั้นไม่มีการผลิตมาใช้ในปัจจุบันจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 6.7 ซึ่งแสดงส่วนแบ่งการตลาดของการใช้งานกังหันลมแบบต่าง ๆ ส่วนความเหมาะสมของการเลือกกังหันลมนั้นจะดูที่ค่าความเร็วลมที่เหมาะสมกับการทำงาน (Nominal speed) และกำลังการผลิตที่ระดับความเร็วลมเท่ากันกังหันลมตัวใดจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากันนั่นเอง

8.2 ข้อกำหนดสำหรับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า

เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีการนำกังหันลมมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าอย่างจริงจัง มีแค่การศึกษาในเบื้องต้นเท่านั้น จึงต้องอ้างอิงข้อกำหนดในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับโรงไฟฟ้าประเภทอื่นนั่นก็คือข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และข้อกำหนดของต่างประเทศที่มีการใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้ามาใช้แทน จากการเปรียบเทียบสามารถสรุปข้อกำหนดที่คาดว่าสามารถนำมาใช้กับประเทศไทยได้ดังนี้

8.2.1 ระดับแรงดัน ระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุด จะต้องอยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

ตาราง 8.1 ข้อกำหนดแรงดัน

ข้อกำหนดระดับแรงดันที่คาดว่าเหมาะสม		
ระดับแรงดัน(kV)	ระดับแรงดัน Max(kV)	ระดับแรงดัน Min(kV)
115	116.15	112.47
69	69.69	67.48
33	33.33	32.27
22	22.22	21.52

8.2.2 ความถี่ไฟฟ้า จะต้องรักษาความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที

8.2.3 Power Factor จะต้องจ่ายไฟฟ้าโดยรักษาค่า Power Factor ให้อยู่ในช่วง 0.85 Leading ถึง 0.85 Lagging

8.2.4 Voltage Fluctuation (แรงดันกระเพื่อม) จะต้องไม่ทำให้เกิด Voltage Fluctuation เกินข้อกำหนดเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้า ค่าดัชนีไฟกระพริบจะต้องไม่เกินขีดจำกัดในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ข้อกำหนดไฟกระพริบ

P_{st}	P_{lt}
< 0.3	< 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.4 Harmonics ต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดัน และกระแสในระบบของการไฟฟ้าผิดเพี้ยนมากเกินไป ปริมาณความผิดเพี้ยนดังกล่าววัดที่จุดต่อร่วมจะต้องไม่เกินค่าตามตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 ข้อกำหนดแรงดันฮาร์มอนิก

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรวม V_T (%)	ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.4	5	4	2
11,12,22,24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

8.3 การคัดเลือกสถานที่และโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลม

จากการคัดเลือกแหล่งศักยภาพพลังงานลมจะได้สถานที่ๆเหมาะสมดามตารางที่ 6.1 ซึ่งพบว่าพื้นที่ๆเหมาะสมส่วนใหญ่นั้นจะอยู่ใกล้แนวชายฝั่งทะเลหรือบริเวณยอดเขาสูงเมื่อเราได้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยตลอดปีมาแล้วจะนำมาใช้ประกอบในฐานข้อมูลของโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยวิธีการคำนวณนั้นรายละเอียดทั้งหมดอยู่ในบทที่ 7

8.3.1 ข้อเสนอแนะและแนวทางการแก้ไขสำหรับโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า

ก. เนื่องจากโปรแกรมที่ได้จัดทำขึ้นนั้นมีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับหนึ่ง แต่ถ้าต้องการเพิ่มความน่าเชื่อถือ ควรจะมีการเพิ่มรายละเอียดในส่วนของความเร็วลมโดยเปลี่ยนจากการป้อนค่าความเร็วลมเฉลี่ยต่อปีเป็นความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 วัน หรือ 1 เดือน ตลอดทั้งปีก็จะได้ผลการประเมินที่มีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

ข. เนื่องจากโปรแกรมประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้านั้นใช้วิธีการคำนวนจากสมการการแจกแจงแบบเรย์ลีฟเพียงวิธีเดียว เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือควรจะมีการประเมินโดยใช้วิธีอื่นมาประกอบเพื่อเปรียบเทียบกันให้ที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Thomas Ackermann, **Wind Power in Power Systems**, Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2005.

[2] Hardi Saadat, **Power System Analysis**, 2nd Ed., McGraw-Hill Company, 2004.

[3] คณะกรรมการปรับปรุงศัพท์เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้า, **ศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง**, กรุงเทพฯ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2545.

[4] รศ.ดร.วีรเชษฐ์ ขันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, 3rd, กรุงเทพฯ, สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พริ้นติ้ง, 2548

[5] กฤตยชญ์ ทิพย์วัลย์, พีรศิลป์ อัครเดชเรืองศรี และจิรุทธ เจริญไพบูลย์กิจ, "การพัฒนากังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า," **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

[6] ฐิติพงษ์ งามถิ่น และ สมบัติ โชวงษ์, "การวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ," **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

[7] Chai Chompoo-inwai, "System Impact Study for the Interconnection of Wind Generation and Utility System", **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, VOL. 41, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2005

[8] บริษัท เฟโลว์ เอ็นจิเนียร์ส คอนซัลแตนตส์,"โครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย," **แผนที่ศักภาพพลังงานลมของประเทศไทย**, กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ภายในกังหันลม

1. ซอฟท์สตาร์ทเตอร์ (Soft-starter)

มีผู้ขายจำนวนมากที่เข้าไปขาย Soft Starter โดยชูจุดขายในเรื่องของการประหยัดพลังงาน ทั้งในขณะ Start และขณะทำงานแต่รับโหลดน้อย ๆ (Partial Load) ซึ่งจุดขายนี้สามารถพิสูจน์ให้ดูเหมือนว่าสิ่งที่กล่าวนี้เป็นจริงได้ ถ้าเรานำเอาแอมป์มิเตอร์ไปวัดกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ ก็จะพบว่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ในขณะสตาร์ทลดลงจริง เช่นเดียวกันในกรณีที่มอเตอร์ทำงานแบบไม่มีโหลดหรือรับโหลดน้อย ๆ ถ้าใน Soft Starter ทำงานในโหมดประหยัดพลังงาน ก็จะพบว่ากระแสลดลงจริง จึงเป็นเหตุให้ผู้ใช้ที่ไม่ทราบในหลักการทำงานของ Soft Starter ได้เข้าใจผิดคิดว่าSoft Starter จะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้าได้ศึกษากันอย่างลึกซึ้งแล้วจะพบว่า Soft Starter ไม่ได้ช่วยลดขนาดของพลังงานและค่าไฟได้ในสัดส่วนเดียวกันกับขนาดของกระแสที่ลดลง บทความนี้จึงถูกเขียนขึ้นเพื่อชี้แจงให้ผู้ใช้ได้เข้าใจถึงขนาดของพลังงานและค่าไฟที่แท้จริงที่สามารถประหยัดได้ ซึ่งไม่มากอย่างที่คิด แต่ถ้าประโยชน์หลักของ Soft Starter ไม่ได้อยู่ที่เรื่องของการประหยัดพลังงานแล้ว ประโยชน์ที่แท้จริงของ Soft Starter คืออะไร บทความนี้จะช่วยตอบคำถามนี้ พร้อมกันนี้ จะกล่าวถึงข้อจำกัดของการเลือก Soft Starter มาใช้งานโดยละเอียด เพื่อให้ผู้ใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งเจ้าของโรงงาน และวิศวกรของโรงงานขนาดกลางและเล็กได้ใช้เป็นข้อมูลในการติดต่อกับผู้ขาย Soft Starter เนื่องจาก Soft Starter คืออุปกรณ์ที่นำไปใช้ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับโหลดทางกล ดังนั้นจะขอแบ่งการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการนำ Soft Starter ไปใช้ใน 2 ทางคือ ผลทางไฟฟ้าและผลทางกล ดังจะได้ชี้แจงให้เห็นโดยละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ผลทางไฟฟ้า

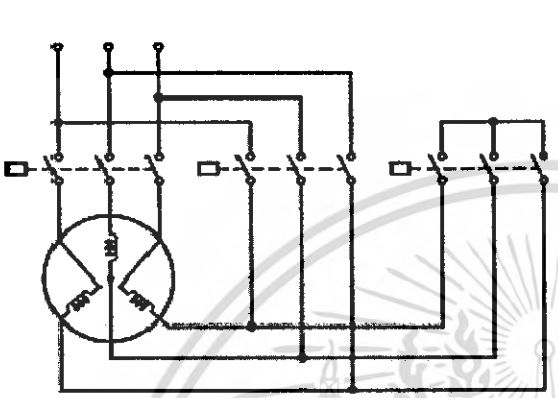
ในสมัยก่อนที่มีการเริ่มนำเอา Soft Starter มาใช้ใหม่ ๆ นั้นความสามารถของ Soft Starter ที่มีผลต่อทางไฟฟ้าจะมีเพียงอย่างเดียวคือ ลดกระแสสตาร์ทของมอเตอร์ในขณะเริ่มเดิน แต่ต่อมาได้มีการพัฒนาการใช้ประโยชน์ Soft Starter ให้ครอบคลุมไปถึงการลดกำลังการสูญเสียขณะทำงานแบบไม่มีโหลดหรือมีโหลดน้อย ๆ ด้วย ในปัจจุบันการนำ Soft Starter ไปใช้งานจึงส่งผลทางไฟฟ้าได้ 2 แนวทางคือ เพื่อลดกระแสสตาร์ทของมอเตอร์และลดกำลังการสูญเสียขณะทำงานแบบมีโหลดน้อยๆ

1.1.1 ประโยชน์ในการลดกระแสสตาร์ทของมอเตอร์

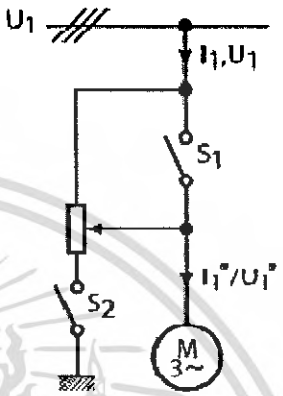
ผู้เขียนเข้าใจเป็นการส่วนตัวว่าประโยชน์ในเรื่องการลดกระแสขณะสตาร์ทของมอเตอร์เป็นจุดมุ่งหมายสำคัญของการคิดค้น Soft Starter ขึ้นมา เพราะว่าการสตาร์ทมอเตอร์แบบ Direct on Line นั้น จะทำให้กระแสสตาร์ทสูงมาก ๆ โดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 6-7 เท่า บางตัวอาจจะขึ้นไปถึง 9-10 เท่าก็เคยเจอ การที่กระแสสตาร์ทมีค่าสูง ๆ ดังกล่าวจะส่งผลกระทบหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นผลกระทบทางกลหรือผลกระทบทางไฟฟ้า จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการลดกระแสสตาร์ทขึ้นมาหลากหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นวิธีง่าย ๆ เช่น การสตาร์ทแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

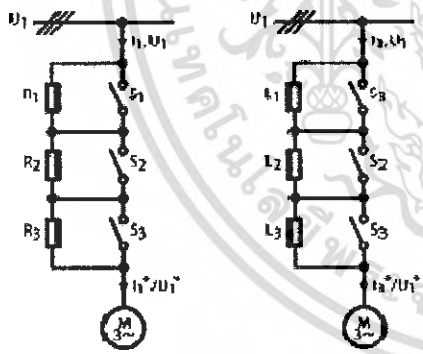
สตาร์- เดลต้าดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1(ก), การใช้วิธี Auto-transformer ดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1(ข), การใช้วิธี Step R หรือ Step L ดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1(ค) และการใช้วิธีเพิ่มความต้านทานของโรเตอร์ขณะสตาร์ทดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1(ง) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับโรเตอร์ที่เป็นสลิปริง



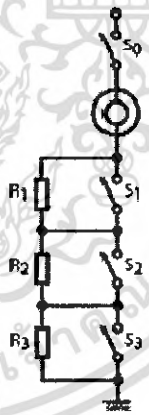
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1 (ก) การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้า



รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1 (ข) การใช้ Auto-transformer



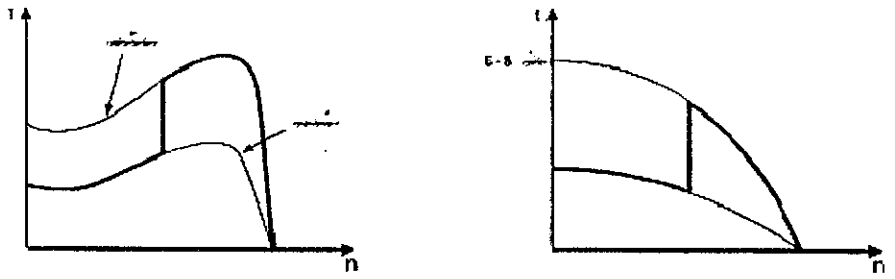
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1 (ค) การใช้วิธี Step R หรือ Step L



รูปภาพผนวกที่ 1.1 (ง) วิธีเพิ่มความต้านทานของโรเตอร์ขณะสตาร์ท

การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้านั้น ดูจะได้รับการนิยมมากที่สุด เพราะค่าใช้จ่ายดูจะน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 3 รูปแบบที่เหลือ แต่การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้านั้นก็ยังมีข้อเสียกล่าวคือยังมีการกระชากของกระแสและแรงบิดขณะเปลี่ยนจากสตาร์เป็นเดลต้าดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.1(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

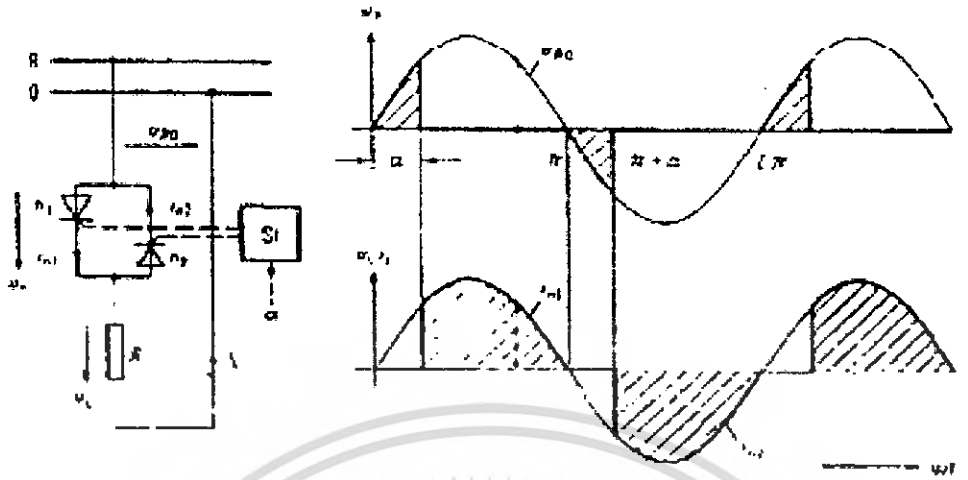


รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดและกระแสของการสตาร์ท
แบบสตาร์-เดลต้า

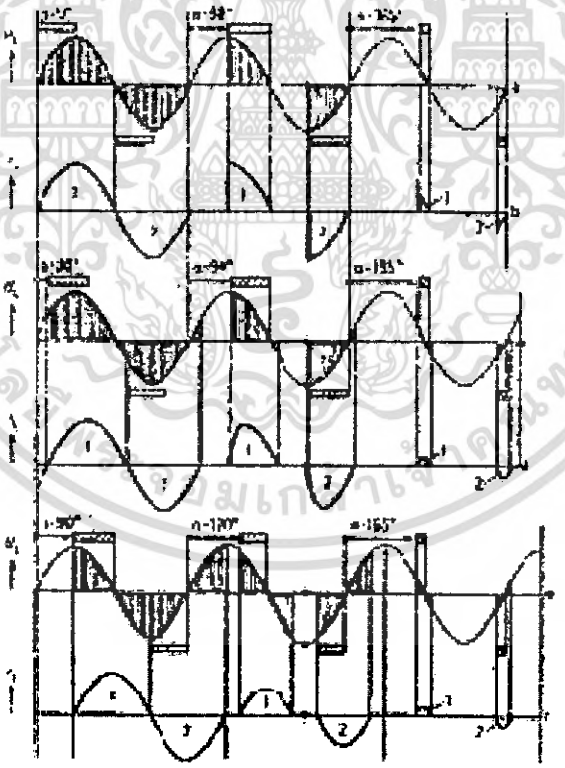
รูปแบบการสตาร์ทที่น่าจะนิ่มนวลที่สุดสำหรับการสตาร์ททั้ง 3 แบบแรกก็คือการสตาร์ทโดยใช้ Auto-transformer แต่การสตาร์ทแบบนี้มีข้อจำกัดที่สำคัญคือต้นทุนสูง และไม่เหมาะกับมอเตอร์ขนาดใหญ่ ๆ ส่วนการสตาร์ทในแบบสุดท้ายนั้นจะเหมาะสำหรับกรณีโหลดที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นหนัก ๆ ซึ่งก็มีข้อจำกัดคือตัวมอเตอร์ต้องมีโรเตอร์เป็นแบบสลิปริง การสตาร์ทแบบนี้จึงเหมาะสำหรับงานบางประเภทเท่านั้น

ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้รับการพัฒนาขึ้น จึงเกิดแนวคิดนำเอาไทริสเตอร์มาใช้ในการควบคุมแรงดันย่านการกำหนดมุมจุดชนวนไทริสเตอร์ ทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่าแปรเปลี่ยนมากน้อยตามการกำหนดมุมจุดชนวนที่ไทริสเตอร์ ดังแสดงในรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.3 – 1.7 โดยรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.3 เป็นวงจรควบคุมแรงดันกรณีแหล่งจ่ายเป็นไฟเฟสเดียว รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.4 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อมุมจุดชนวน (α) มีค่าต่าง ๆ กัน และเป็นการเปรียบเทียบกรณีที่โหลดมีรูปแบบต่าง ๆ กันทั้งกรณีที่โหลดเป็น R, RL, L จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าโหลดจะเป็นแบบไหน ถ้ามุม α มีค่ามากขึ้นทั้งแรงดันและกระแส ก็จะมีค่าลดลงตามการมากขึ้นของมุม α ซึ่งหากนำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างกระแสที่มุมต่าง ๆ กับกระแสสูงสุด (มุม α = 0) ก็จะได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.5 โดยเส้นกราฟที่กำกับด้วย $\cos\phi$ = 1 หมายถึงกรณีมีโหลดเป็น R ส่วนเส้นกราฟที่กำกับด้วย $\cos\phi$ = 0 หมายถึงกรณีมีโหลดเป็น L สำหรับโหลดที่เป็น RL จะอยู่ระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง แต่จะอยู่ตรงไหนขึ้นอยู่กับค่า R และ L ถ้า R มากกว่า L ก็จะใกล้กับกราฟ $\cos\phi$ = 1 ถ้า L มากกว่า R ก็จะขยับไปทางกราฟ $\cos\phi$ = 0 สำหรับรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.6 และ 1.7 ก็จะเป็นกรณีของไฟ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

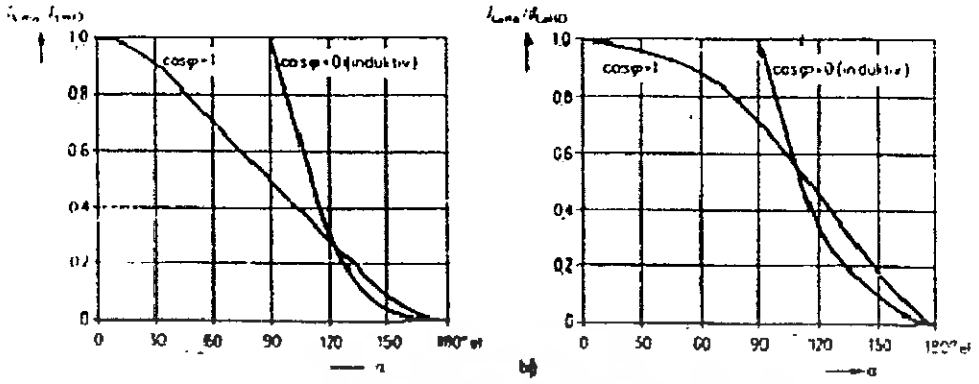


รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.3 การควบคุมแรงดันโดยใช้ไทริสเตอร์กรณีแหล่งจ่ายเป็นไฟเฟสเดียว

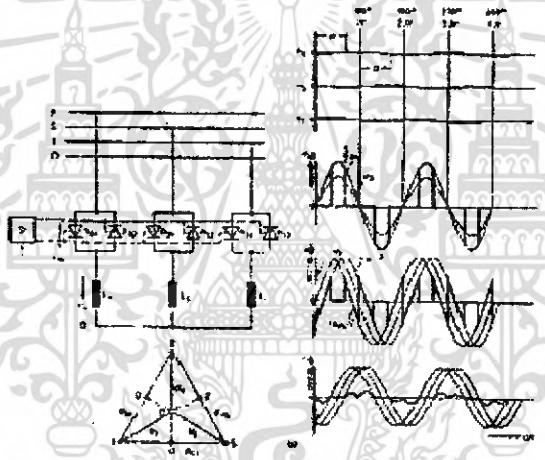


รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของโหลด R, RL และ L กรณี แหล่งจ่ายไฟเป็นไฟเฟสเดียว

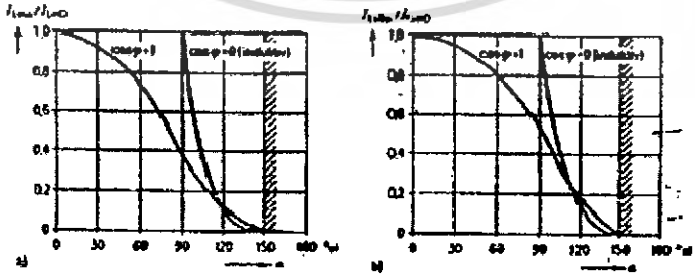
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.5 แสดงการเปรียบเทียบขนาดกระแสเฉลี่ยและกระแส RMS ที่มุม α ต่าง ๆ เมื่อเทียบกับกรณีมุม α = 0 กรณีแหล่งจ่ายเป็นไฟเฟสเดียว



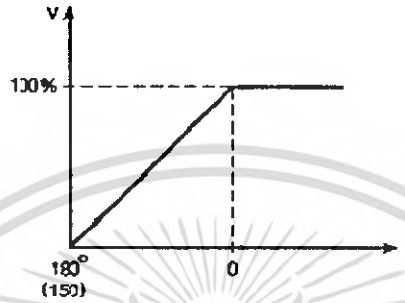
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.6 การควบคุมแรงดันโดยใช้ไทริสเตอร์กรณีแหล่งจ่ายเป็นไฟ 3 เฟส



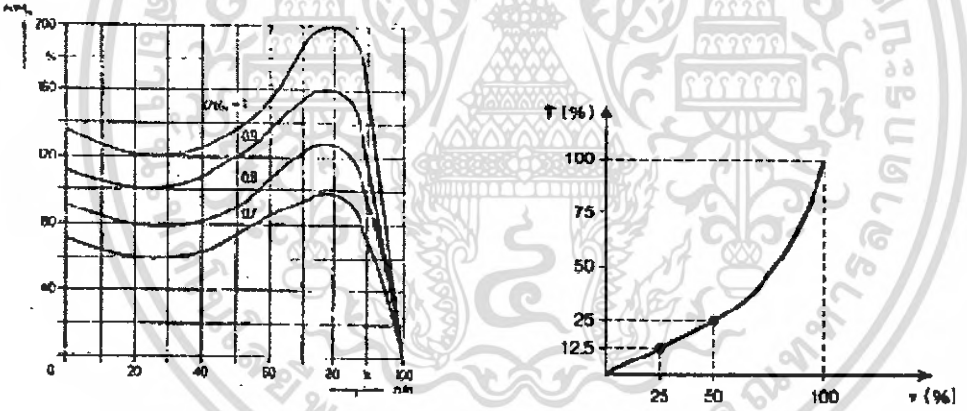
รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.7 แสดงการเปรียบเทียบขนาดกระแสเฉลี่ยและกระแส RMS ที่มุม α ต่าง ๆ เมื่อเทียบกับกรณีมุม α = 0 กรณีแหล่งจ่ายเป็นไฟ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Soft Starter ได้นำเอาหลักการควบคุมแรงดันโดยกำหนดมุมจุดชนวนไทริสเตอร์มาใช้ จะต่างกันตรงที่ว่ามุมจุดชนวนของ Soft Starter จะไม่คงที่ ณ มุมใดมุมหนึ่ง แต่จะเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ โดยจะเริ่มจากมุม 180° แล้วลดลงมาเรื่อย ๆ จนถึง 0° (หรือ 150° to 0° ในกรณีไฟ 3 เฟส) ส่งผลให้ระดับแรงดันค่อย ๆ เปลี่ยนจาก 0 เป็น 100 % ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.8 การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันเมื่อเปลี่ยนมุมจุดชนวน α



รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.9 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดของมอเตอร์ถ้าแรงดันเปลี่ยนเป็นค่าต่าง ๆ

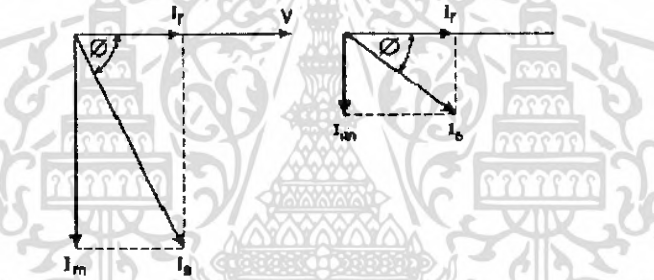
จากรูปจะเห็นได้ว่า ถ้าเริ่มปรับแรงดันจากศูนย์โวลต์ แรงบิดก็จะเริ่มจากศูนย์เช่นกัน ส่งผลให้ไม่มีแรงบิดในการสตาร์ท ในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมเริ่มปรับแรงดันจากศูนย์โวลต์ แต่จะเริ่มด้วยระดับแรงดันค่าหนึ่ง ที่อย่างน้อยสามารถสร้างแรงบิดของมอเตอร์ให้สามารถเอาชนะแรงบิดของโหลดเพื่อให้มอเตอร์เริ่มออกตัวได้ด้วยเหตุนี้กระแสสตาร์ทจึงไม่เริ่มจากศูนย์ แต่จะเริ่มที่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งจะมากน้อยเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่เริ่มสตาร์ทและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวมอเตอร์ แต่ก็จะน้อยกว่าในกรณีของการสตาร์ทแบบ Direct on Line

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติในการลดกระแสสตาร์ท และทำให้กระแสสตาร์ทไม่กระชากดังเช่นในกรณีของ Direct on Line และ Star-Delta ในขณะที่ต้นทุนก็ไม่สูงเหมือนดังเช่นกรณีของ Auto-transformer ทำให้ในระยะหลัง ๆ จึงมีผู้นิยมใช้ Soft Starter ในการสตาร์ทมอเตอร์มากขึ้น

1.1.2 ประโยชน์ในการลด Partial Load Loss และ No Load Loss ของมอเตอร์

ประโยชน์ในข้อนี้ใช้หลักความจริงที่ว่า ค่า P.F. ของมอเตอร์จะลดลงเรื่อย ๆ ตามโหลดทางกลที่น้อยลง จึงเป็นเหตุให้มอเตอร์ยังกินกระแสจำนวนหนึ่งแม้ว่าจะไม่มีโหลดเลยก็ตาม แต่ถ้าเราสามารถลดขนาด P.F. ลงได้โดยคงองค์ประกอบด้านกำลังที่แท้จริงไว้ (Active Power) ก็จะสามารถทำให้ขนาดของกระแสลดลงได้ดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.10 และถ้ากระแสลดลงก็หมายถึง Core Loss และ Copper Loss ลดลงด้วย



(ก) จ่าย V เต็มที่ (ข) ลด V โดยการเพิ่มมุม

รูปภาคผนวก ก. ที่ 1.10 ขนาดของ Is เมื่อมุม ϕ ต่างกัน

การปรับ P.F. สามารถทำได้โดยการปรับมุม ϕ ให้มากขึ้นเพื่อทำให้ความถี่มูลฐานของ V และ I ที่จ่ายให้มอเตอร์มีเฟสใกล้กันมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เราจึงสามารถใช้ Soft Starter เป็นตัวปรับ P.F. ได้ เมื่อโหลดลดลง ในปัจจุบัน Soft Starter ของเกือบทุกยี่ห้อจึงมักมีฟังก์ชันนี้ติดมาด้วย โดยเรียกชื่อว่าฟังก์ชัน Energy Saving และได้กลายมาเป็นจุดขายใหม่ของ Soft Starter ในปัจจุบัน

1.1.3 ประหยัดค่าไฟได้แค่ไหน

โดยปกติมอเตอร์จะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 60 % ถึง 97 % โดยประมาณ ถ้าทำงานที่ Full Load ตามแต่ขนาดของมอเตอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อทำงานที่โหลดน้อยลงเรื่อยๆ และมอเตอร์ตัวใหญ่จะมีประสิทธิภาพดีกว่ามอเตอร์ตัวเล็กที่เปอร์เซ็นต์ของโหลดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ผลทางกล

จากรูปภาคผนวก ก. ที่ 1.9 แสดงให้เห็นว่าการใช้ Soft Starter จะทำให้แรงบิดเริ่มสตาร์ทลดลง ซึ่งการลดลงของแรงบิดเริ่มสตาร์ทนี้จะมีทั้งผลดีและผลเสียดังนี้

1.2.1 ผลดีของการที่แรงบิดเริ่มสตาร์ทลดลง

ผลดีที่เห็นได้ชัดคือ ระบบจะสตาร์ทได้อย่างนิ่มนวลขึ้นซึ่งจะส่งผลดีตามมาในอีก 2 ทางคือ

ก. ลดการกระชากทางกล ผลดีข้อนี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ทางกล เช่น ลดการสึกหรอของเฟือง ทำให้เฟืองไม่พังเร็ว ลดการเกิดสลิปของสายพาน ช่วยยืดอายุของสายพาน และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนจะเป็นยืดอายุการใช้งานของแบริ่งนั่นเอง

ข. ไลน์การผลิตไม่กระตุกขณะสตาร์ท ทำให้กระบวนการผลิตมีความนิ่มนวลมากขึ้นประโยชน์ทางกลทั้งสองข้อนี้ถือได้ว่าเป็นประโยชน์หลักและประโยชน์ที่แท้จริงของการใช้ Soft Starter นอกเหนือไปจากใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง แต่กลับเป็นประโยชน์ที่ผู้ขายไม่ค่อยพูดถึงบ่อยนักเพราะไม่สามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนได้อย่างชัดเจนแต่สำหรับผู้ที่มีปัญหาเรื่องเกียร์พังบ่อย ๆ สายพานพังบ่อย ๆ ผู้เขียนขอแนะนำให้ลองนำ Soft Starter มาใช้ ผู้เขียนเชื่อว่า จะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านการซ่อมบำรุงได้อย่างมาก

1.2.2 ผลเสียของการที่แรงบิดเริ่มสตาร์ทลดลง

ก. ทำให้ออกตัวช้าลง หรือบางกรณีอาจถึงกับออกตัวไม่ไหวตามที่ได้อธิบายไว้ด้วยสมการที่ $T_m - T_L = J\frac{dw}{dt}$ แล้วว่าการใช้ Soft Starter จะทำให้ระยะเวลาในการสตาร์ทนานขึ้น เพราะเมื่อ T_m ลดลง แรงบิดลัพธ์ที่จะไปขับให้มอเตอร์ออกตัวก็จะน้อยลง ทำให้ระยะเวลาในการออกตัวนานขึ้น และจะเป็นปัญหามากขึ้นในกรณีที่โหลดมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) สูง ๆ เช่น โหลดที่เป็น Blower, Centrifuge หรือพวก Mill ซึ่งผู้เขียนเคยเจอกับตัวเองในกรณีของโหลด Blower ที่มีค่า J สูงมาก ในกรณีนั้นเป็น Blower ด้าน Section ที่ใช้ดูดลมออกจาก Boiler เป็น Blower ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.8 เมตร ผู้เขียนพบว่าถ้าตั้งค่าแรงดันเริ่มสตาร์ทน้อยไป มอเตอร์จะไม่ออกตัวเลย ต้องตั้งมากถึงระดับหนึ่งจึงจะออกตัวได้ แต่ความเร็วจะเพิ่มขึ้นได้อย่างช้า ๆ เพราะโหลดมีความเฉื่อยมาก ในกรณีของ Blower ตัวนี้ต้องใช้เวลาถึงเกือบ 4 นาที ความเร็วลมจึงจะเข้าสู่ความเร็วพิกัดของมอเตอร์สำหรับโหลดบางประเภท เช่น เครื่องโม่หิน สายพานลำเลียงหิน คอมเพรสเซอร์ โหลดพวกนี้โมเมนต์ความเฉื่อยไม่สูง แต่ต้องการแรงบิดเริ่มสตาร์ทสูง การใช้ Soft Starter อาจมีผลทำให้ขับโหลดไม่ไหว ถ้าแรงดันเริ่มสตาร์ทมีค่าต่ำจนมอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิด T_m มาชนะ T_L ได้ มอเตอร์ก็จะไม่สามารถเริ่มหมุนได้ การสตาร์ทโหลดประเภทนี้จึงต้องตั้งแรงดันให้สูงพอสมควร จนบางครั้งอาจต้องตั้งถึง 70-80 % จึงจะสตาร์ทไหว แต่ถ้ามาคิดดูว่าถ้าหากต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแรงดันเริ่มสตาร์ทสูงขนาดนั้น ความเป็น Soft Start ก็คงไม่เหลือแล้ว สู้ไม่ใช้เสียเลยจะดีกว่าในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตบางรายแก้ปัญหาแรงบิดเริ่มสตาร์ทสูง ๆ ด้วยการออกแบบฟังก์ชันการสตาร์ทที่เรียกว่า Torque Control กล่าวคือ เครื่องจะตรวจสอบเอาว่าสตาร์ทไหวหรือไม่ ถ้าไม่ เครื่องก็จะเพิ่มขนาดแรงดันหรือกระแส (ขึ้นอยู่กับว่าเป็น Voltage Control หรือ Current Control) จนกระทั่งออกตัวไหว หลังจากนั้นก็จะรักษาระดับแรงดันหรือกระแสที่สามารถสร้างแรงบิดให้มอเตอร์สามารถเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงความเร็วพิกัด ปัญหาเรื่องการออกตัวไม่ไหว หรือใช้เวลานานเกินไปก็จะทุเลาลง

ข. ดึงกระแสสูงกว่าพิกัดยาวนานกว่าที่ควร ถ้าโหลดมี J มากข้อเสียนี้ต่อเนื่องมากจากข้อเสียข้างต้น เพราะในกรณีที่โหลดมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมาก ๆ การลดแรงบิดเริ่มสตาร์ทจะทำให้การดึงกระแสที่สูงกว่าพิกัดยาวนานกว่าที่ควร ถึงแม้กระแสนั้นจะมีค่าต่ำกว่ากรณีสตาร์ทแบบ Direct on Line และ Star-Delta ก็ตาม แต่การดึงกระแสสูงกว่าพิกัดยาวนานผิดปกติจะทำให้เกิดปัญหาที่สำคัญคือปัญหาความร้อนสะสมทั้งที่ตัวมอเตอร์และที่ Soft Starter ตามมา ปัญหาดังกล่าวรู้จักกันในรูปของค่าจำกัด I^2t

- สรุป ประโยชน์ของ Soft Starter
    1. เพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง
    2. ลดการสึกหรอและสูญเสียทางกล
- สรุปประเด็นที่ต้องพิจารณาเมื่อเลือกซื้อ Soft Starter
    ก. แรงบิดเริ่มต้นที่โหลดต้องการ
    ข. โมเมนต์ความเฉื่อยของโหลด
    ค. ขนาดของกระแสและระยะเวลาที่ต้องใช้ในการสตาร์ท

2. คาปาซิเตอร์แบงค์ (Capacitor bank)

ในเวลาจ่ายไฟจะพบว่ามีกระแส 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่เรียกว่า active current ทำให้เกิด active power ที่จะใช้จ่ายกำลัง power ให้ load
- ส่วนที่เรียกว่า reactive current ทำให้เกิด reactive power ส่วนนี้ ไม่ให้ power ที่เป็นประโยชน์กับ Load ที่ต่ออยู่ อาจเป็นได้ทั้งกระแสชนิด inductive และ capacitive ส่วนหลังนี้ทำให้ Generator มี load เพิ่มขึ้น ทั้งยังทำให้หม้อแปลงต้องถูกจำกัดการจ่าย Active power ไปที่ load เกิด loss เพิ่มขึ้นในสาย conductor หากลดกระแสส่วนนี้ได้ก็จะทำให้สามารถ ผลิตหรือส่ง active power ได้มากขึ้นการต่อ Reactive compensator ขนานกับ load หรือ สายส่งเป็นวิธีลดกระแสส่วนนี้ให้ต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 Compensator

เนื่องจากส่วนที่เป็น Reactive power ทำให้กระแสรวมเพิ่มสูงขึ้น เกิด voltage drop และ Losses เพิ่มขึ้นในลวดตัวนำที่กระแสทั้งหมดไหลผ่านอุปกรณ์ที่ใช้ลด Reactive power ได้แก่

2.1.1 ชนิด uncontrolled reactive compensation เป็นชนิดต่อ fix ไม่มีการปลด-สับเช่น Shunt reactor / shunt capacitor bank ที่ใช้จำนวน หนึ่ง unit หรือ หนึ่ง bank ต่อขนานเข้ากับระบบจำหน่ายโดยต่อผ่าน Fuse ไม่สามารถปรับค่าได้

2.1.2 ชนิด controlled reactive compensation สามารถปรับค่าได้เพื่อควบคุม parameterบางตัวของระบบที่ต้องการ ได้แก่

ก. Synchronous condenser เป็น rotating machine

- Under excited synchronous machine เมื่อต้องการใช้เป็น inductive loads
- Over excited synchronous machine เมื่อต้องการใช้เป็น capacitive loads

ข. Static var compensator มีการออกแบบได้หลายรูปแบบ เช่น

- shunt capacitor bank/shunt reactor bank ที่ใช้ circuit breaker เป็นตัวสับเข้า-ปลดออก โดยออกแบบแบ่งเป็น Step/bank สามารถใช้งานตามจำนวน reactive power ที่ต้องการลด เรียกว่า Mechanically switched reactor/capacitor
- Continuous controlled โดยใช้ thyristor เป็นตัวตัดต่อที่สามารถควบคุมให้ได้ปริมาณ Reactive var ที่ต้องการ ได้แก่ thyristor controlled reactor: TCR
- Discontinuous controlled ใช้ thyristor เป็นตัวตัดต่อที่แทน circuit breaker สามารถควบคุมให้ทั้ง Bank เข้า-ออกได้ ได้แก่ thyristor switched capacitor: TSC และ Thyristor switched reactor: TSRอุปกรณ์เหล่านี้สามารถใช้ร่วมกันได้ การใช้รวมกันเรียกว่า static var compensation: SVC ทำหน้าที่เป็น reactive plant

2.2 Mechanically switched capacitor

ในระบบ Distribution จะใช้ capacitor unit หรือ capacitor bank ขนาดเล็กๆ ติดตั้งที่เสาต่อเข้า line ผ่าน fuse ในกรณีที่ bank มีขนาดใหญ่ขึ้น อาจใช้ switcher แทน fuse ในสถานีจำเป็นต้องใช้ bank ขนาดใหญ่มี แรงดัน และ mvar สูง จะใช้ circuit breaker เป็นตัวปลด-สับ พร้อมมีระบบป้องกัน ปกติจะมี reactor ขนาดเล็กๆ ต่อ series กับ capacitor เพื่อทำหน้าที่ลด inrush current หรือ transient ที่เกิดขึ้นขณะ energize ถ้ามีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่ลดกระแส harmonic ข้อควรระวังคือ การเกิด pre-strike หรือ re-strike ในขณะที่ breaker ทำงาน close และ open ซึ่งจะทำให้เกิด transient over voltage

Output ระหว่าง U-I จะ linear แต่ขณะที่แรงดันเปลี่ยนไป ค่า reactive power จะเปลี่ยนไปตาม factor ของ (ratio ของ U)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Energize การใช้งานประจำวันหากต้องปลด-สับหลายๆ ครั้ง ควร energize ขณะที่ capacitor ไม่มี trap charge หรือ เหลืออยู่ในระดับ 50-70 volt ซึ่งต้องมีอุปกรณ์สำหรับ dischargeเช่น discharge resistor

Harmonic capacitor unit จะมี load เพิ่มขึ้นจากกระแส harmonics ลำดับต่างๆ ที่ไหลผ่าน และเกิด Voltage stresses ที่ capacitor element

Losses ปกติจะน้อยมาก เกิดจาก dielectric loss, film loss, connecting/internal fuse loss และ discharge resistor loss over voltage / over current ค่อนข้างจะมีผลและอิทธิพล (sensitive) ต่อ shunt capacitor จึงต้องมีระบบป้องกัน ซึ่งใช้หลักการของ unbalance เช่น unbalance voltage relay,unbalance current relay

วัตถุประสงค์ในการใช้ Capacitor bank

- เป็น voltage support ในระบบที่ weak
- ปรับปรุง power factor

2.2.1. การออกแบบ capacitor bank

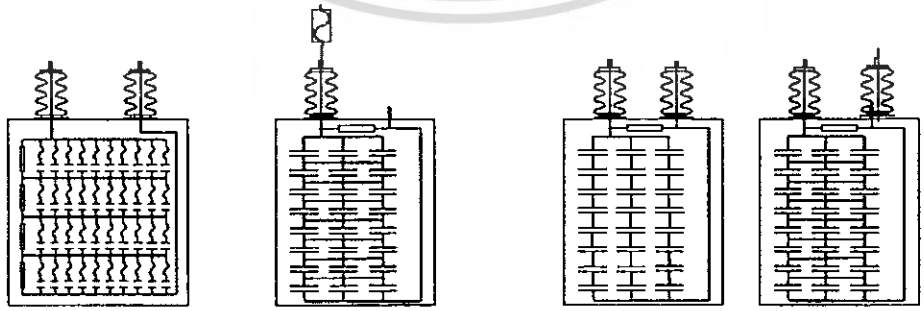
การออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึง

- ความปลอดภัยในการใช้งานและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
- Capacitor unit หรือกระป๋องต้องกำหนดขนาด แรงดันที่เหมาะสม
- ลักษณะการต่อแต่ละ unit เพื่อทำเป็น bank
- สภาพการใช้งาน

2.2.2 Capacitor unit

Capacitor unit แบ่งตามลักณะโครงสร้างได้เป็น 3 ชนิด

1. Internally fused
2. Fuseless
3. Extemally fused



Internally Fused Externally fused Fuseless

รูปภาคผนวก ก. ที่ 2.1 Internally Fused และ Extemally fused Fuseless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Capacitor unit ต้องมี discharge resistor ต่ออยู่ภายในเพื่อลดแรงดันของ trap charge หลังจากปลดออกจากระบบเพื่อให้เหลือแรงดันไม่เกิน 50-70 volt ภายในเวลา 5 -10 นาที สามารถคำนวณหาค่า Discharge resistor: R ได้จาก สมการ

$$R.\ln(1.414V/UR) = t/\ C.\ megaohm$$

V = rated voltage: kV

UR = residual voltage: kV

C = capacitance: μ F

t = discharge time: min.

แต่ละกระป๋องต้องทนแรงดันที่เกิดขึ้นจาก Internal fault (brusting pressure) ได้โดยที่ตัวถังต้องไม่ปริหรือแตกออก Dielectric fluid ที่ใช้ต้องไม่มีสาร PCB เจือปนและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม การกำหนด Output kVAR ต่อกระป๋อง ควรทำให้เป็นมาตรฐานเพื่อให้สามารถกำหนดขนาดของกระป๋อง (Dimension) ที่จะนำไปติดตั้ง และเป็นการจำกัด spare ไม่ให้มีหลายขนาด

2.2.3 การต่อแบงค์สามารถต่อใช้งานได้หลายลักษณะ เช่น

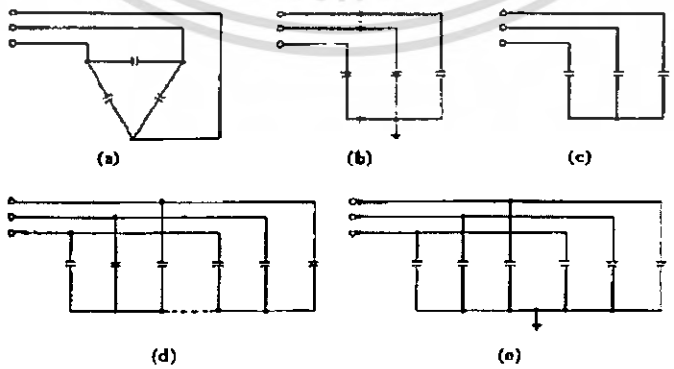
(ก) Delta

(ข) Ground Y

(ค) Ungrounded Y

(ง) Ungrounded Double Y-Neutrals

(จ) Ground Double Y



รูปภาคผนวก ก. ที่ 2.2 การต่อแบงค์แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

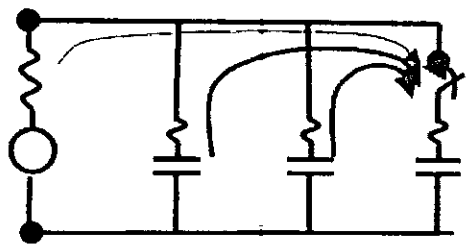
ในระบบแรงสูง Capacitor bank ที่ติดตั้งในสถานีมีการต่อใช้งานเป็น 3 ลักษณะดังนี้

- แรงดัน 22/33 kV: ungrounded bank ที่ต่อเป็นแบบ wye จะใช้ voltage transformer ต่อ ระหว่าง จุด Neutral กับ ground เพื่อใช้กับระบบป้องกันที่ตรวจวัด unbalance Voltage ของ neutral point หรือ จะต่อเป็นแบบ wye-wye ใช้ current transformer (CT) ต่อระหว่าง จุด neutral ของแต่ละ wye เชื่อมผ่าน CT เข้าหากัน เพื่อใช้กับระบบป้องกันที่ตรวจวัด Unbalance current ใน neutral wire
- แรงดัน 69/115 kV: ungrounded bank ที่ต่อเป็นแบบ wye-wye (หรือ double wye) Neutral tied, จะใช้ current transformer (CT) ต่อระหว่าง จุด neutral ของแต่ละ wye เชื่อมผ่าน CT เข้าหากัน เพื่อใช้กับระบบป้องกันที่ตรวจวัด unbalance current ใน Neutral wire
- แรงดัน 230 kV: grounded bank ที่ต่อเป็นแบบ wye-wye (หรือ double wye) neutral tied/grounded, หรือ H connection หรือ hybrid connection, ในระบบแรงสูงจำเป็นต้องนำ Capacitor หลาย unit ต่อ series กัน จึงอาจเปลี่ยนตำแหน่งของ unbalance CT ไปอยู่ที่จุดเชื่อมต่อของ capacitors ตำแหน่งที่เป็นลำดับของ group เดียวกันของแต่ละ wye เข้าหากัน และอาจต่อ neutral ของ bank ลง ground

2.2.4 การลดหรือจำกัด (limit) ค่า inrush current ในขณะ energize ขณะที่ energize capacitor bank ที่ถูก discharge แล้วหรือไม่มี trap charge เหลืออยู่แล้ว จะเหมือนเกิดลัดวงจร (short circuit) bank จะสร้าง inrush current สูงมากโดยเฉพาะ energize ในขณะแรงดันระบบเป็น peak การ energize เพียงหนึ่ง bank เรียกว่า isolated bank inrush current จะรุนแรงมากที่สุดขณะ energize ชนิด back to back คือ การ energizeขณะแรงดันระบบเป็น peak ขนานกับ bank / banks ที่ใช้งานอยู่ energized bank/banks จะ discharge พลังงานของประจุเข้าสู่ energizing bank กระแสสูงสุดจะเกิดขณะนำ bank สุดท้ายเข้าใช้ เพราะ existing bank จะมี reactance ลดลงเหลือเท่ากับ (L/n-1) และ capacitance เพิ่มเป็น (n-1)C การลดค่า inrush current จะใช้ current limiting reactor ต่อ series กับ bank เพื่อลด oscillating frequency และเพิ่ม impedance ในช่วงแรกของ inrush

ก. การคำนวณขนาด Inrush current

กรณี back to back switching (เมื่อมี bank อื่นสับเข้าอยู่ก่อน)



รูปภาคผนวก ก. ที่ 2.3 วงจรสำหรับคำนวน inrush current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{pk} = \sqrt{\frac{2Q_i Q_n}{3(Q_i + Q_n)\omega L_{eq}}} \qquad (2.1)$$

$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \ldots + \frac{1}{L_{n-1}}} + L_n \qquad (2.2)$$

I_{pk} = inrush current peak

Q = MVAr of capacitor bank

$Q_i = Q_1 + Q_2 + \ldots Q_{n-1}$

Q_n = Q ของ bank ที่จะ switching เข้า

L_{eq} = inductance series รวมทุก bank

$L_1, L_2, \ldots L_{n-1}$ = L ที่ Switching เข้าอยู่ก่อน

L_n = L ที่จะ Switching เข้า

การต่อใน Ungrounded bank จะติด current limiting reactor ไว้ที่ด้าน line แต่ Grounded bank อาจต่อที่ ด้าน neutral คือใส่ไว้ในแต่ละ phase ก่อนต่อรวมกันเป็น neutral point

แรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการนำ Capacitor bank เข้าใช้งานหาได้จากสมการ

$$\Delta u/U \approx Q/S \qquad (2.3)$$

Δu = แรงดันที่เพิ่มขึ้น

U = แรงดันก่อน energize

Q = MVAR ของ capacitor bank

S = short circuit MVA ตรงจุดที่ energize

ในทางปฏิบัติ การนำ Bank เข้าใช้งานแต่ละครั้งแรงดันไม่ควรเปลี่ยนสูงเกิน 3 %

ข. ค่า/ขนาดของ reactance มีผลต่อ resonant frequency system impedance และ capacitance ของ c-bank ที่นำเข้าใช้งานในลักษณะขนานกับระบบ อาจทำให้เกิด resonant frequency ที่ใกล้กับ harmonic ที่เกิดขึ้นจาก load

$w_r = 1/(\sqrt{Ls.C})$; h . $w_s = w_r$; $w_r = 2\pi fr$

w_r = natural frequency (resonant frequency)

w_s = system frequency : Hz

h = harmonic order

C = per phase bank capacitance : farad

L_s = system inductance : henry

h = w_r / w_s = $\sqrt{\quad}$ (short circuit level ที่จุดต่อเข้า/ capacitor bank MVAR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ Ls จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับสภาพของ network คือ จำนวน line, และหม้อแปลงที่ต่ออยู่ในระบบ รวมถึงการเดินเครื่อง generator และรวมถึง load ที่ต่อเข้า จึงทำให้ resonant frequency ไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงได้ทั่วไป capacitor bank ขนาดใหญ่จะมี reactor ต่อ series อยู่ อาจมีไว้เพื่อลดกระแส inrush หรือ มีวัตถุประสงค์ใช้เป็น harmonic filter หรือ de-tuned bankการทำ harmonic filter จะปรับ tune : resonant frequency ของ bank ให้เท่ากับ frequency ที่ต้องการกรอง (ในทางปฏิบัติจะให้เกิด resonant frequency ต่ำกว่าต้องการเล็กน้อย)การทำ de-tuned bank จะปรับให้มี resonant frequency ต่ำกว่า harmonic ต่ำสุดที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อให้ harmonic ต่างๆ เห็น impedance ของ bank เป็น inductance เช่น harmonic ลำดับที่ต่ำที่สุดในระบบคือลำดับที่ 5 จะทำ de-tuned bank ต้องเลือก reactor ขนาด 6% ทำให้bank มี resonant frequency ต่ำกว่า 5

$$X_L - X_C = 0$$

$$h.\ X_L - X_{C/h} = 0$$

$$h = \sqrt{X_C / X_L} = \sqrt{100/6} = 4.08 < 5$$

การต่อ series reactor ขนาดที่สูงขึ้นเพื่อทำเป็น tuned หรือ de-tuned bank จะทำให้แรงดันคร่อม capacitor สูงขึ้น (จึงต้องระวัง unit voltage rating) และระบบจะได้ MVAR จาก bank มากขึ้น

2.2.5 mechanically switched reactor

ประกอบด้วย shunt reactor ที่ใช้ circuit breaker เป็นอุปกรณ์ตัด-ต่อเข้ากับ transmission line, bus bar, หรือ transformer-tertiary terminal reactor มีลักษณะเหมือนหม้อแปลงเพียงแต่ core จะมี air-gap output ในช่วงแรงดันใช้งานจะมีความสัมพันธ์ของ U เป็น linear แต่ในขณะที่แรงดันสูงเกินมากๆ จะเกิด saturation ของ iron core: ทำให้ impedance ลดลง reactor ไม่ sensitive กับ over voltage สามารถทนสภาพแรงดับเกินในช่วงเวลาหนึ่ง

วัตถุประสงค์ในการใช้งาน

- เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่ปลายสายส่งยาวๆ หรือ cable
- เป็น compensation ให้ capacitance ของสายส่งยาวๆ หรือ cable
- ใช้เพื่อ control แรงดัน และ reactive power ของ underground cable

2.2.6 SVC static var compensator

มีวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

- ควบคุมแรงดันตรงจุดติดตั้งอย่างต่อเนื่อง
- เพิ่มการไหลของ active power ใน transmission line
- ลด temporary over voltage
- เพิ่ม transient stability

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- damping power system oscillation
- ใช้ลดแรงดันกระพริบ flickering voltage

เนื่องจาก SVC สามารถแก้ปัญหาของระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้หลายอย่าง ผู้ใช้จำเป็นต้องระบุสิ่งที่ต้องการหรือปัญหาที่ประสงค์จะใช้ SVC ช่วยเพื่อผู้ออกแบบจะได้ออกแบบที่เหมาะสม

2.2.7 Range ของ reactive power ที่ต้องการ

output ของ SVC สามารถกำหนดได้ดังนี้

- กำหนดค่า reactive power output ที่ rated line-line voltage เป็น

  Inductive MVAR

  Capacitive MAR

- ในช่วงของ inductive range จะเกิด maximum total reactive power output (Inductive) ที่ maximum system voltage
- ในช่วงของ capacitive range จะเกิด minimum total reactive power output (Capacitive) ที่ minimum system voltage

2.2.8 Specification of SVC

SVC ทุกชนิดสามารถให้ reactive power ตามที่ต้องการได้ที่ nominal rating อย่างไรก็ตาม SVC แต่ละชนิดจะทำงานตามลักษณะเฉพาะที่ออกแบบไว้ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องให้ข้อมูล

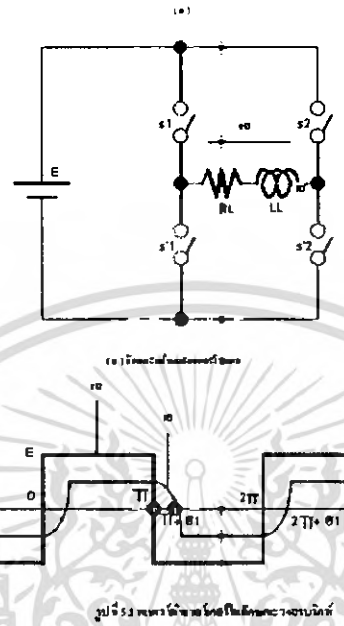
- Nominal rating
- ความสามารถในการ over load (capability)
- การควบคุมและตอบสนองขณะระบบผิดไปจากกำหนด (control and dynamic performance)
- ระดับของ harmonics ทั้งก่อน (background) และขณะใช้ SVC

2.2.9 ข้อมูลบางอย่างที่ต้องคำนึงถึง

- การกำหนดค่า inductive power สูงมาก (low reactance) ในช่วง inductive range จะมีผลทำให้ transient overload capability สูงขึ้น มี harmonic มีปริมาณสูงขึ้น ราคา reactor ถูกลง
- ถ้ากำหนด capacitive range ไม่กว้างนักจะทำให้ราคา capacitor และหม้อแปลงลงลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เร็กติไฟเออร์และอินเวอเตอร์ (Rectifier and inverters)



รูปภาคผนวก ก. ที่ 3.1 วงจรไทรีสเตอร์

3.1 ความแตกต่างระหว่างสวิตช์ทางกลและไทริสเตอร์สวิตช์

ในรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.1(ก) ถ้าให้สวิตช์ (S_1, S'_2) และ (S_2, S'_1) ทำหน้าที่ปิดและเปิดสลับกันไป จะได้รูปคลื่นของเอาต์พุทโวลเตจ e_0 และ กระแสโหลด i_0 ดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.1(ข) ดังนั้นวงจรในรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.1(ก) จึงจัดเป็นสแควร์เวฟอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่ง ในทางปฏิบัติสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นจะใช้ไทริสเตอร์สวิตช์แทนสวิตช์ทางกล ไทริสเตอร์สวิตช์จะมีข้อแตกต่างกับสวิตช์ทางกลดังนี้

1.1 กระแสจะไหลเพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

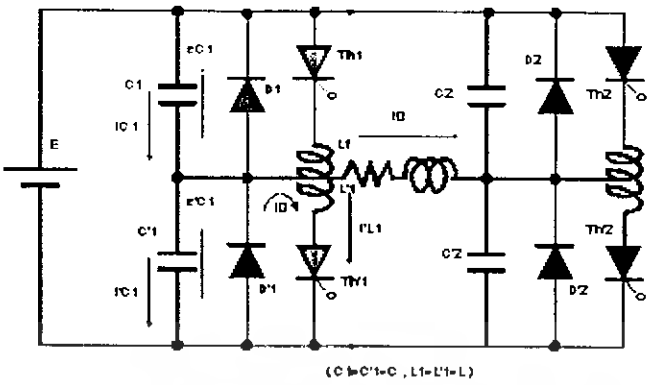
1.2 ไม่สามารถจะหยุดการนำกระแสได้ด้วยตัวเอง

1.3 ถ้าต้องการให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแสนั้น จะต้องมีรีเวอร์สโวลเตจคร่อมไทริสเตอร์ช่วงเวลาขณะหนึ่ง

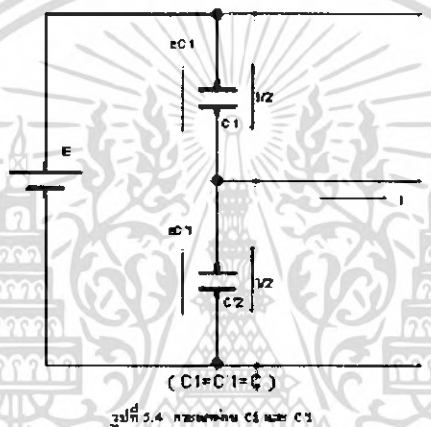
3.2 ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

เพื่อเป็นแนวทางหลักสำหรับการพิจารณาว่าสวิตช์ทางกลสามารถแทนได้ด้วยไทริสเตอร์ได้อย่างไรนั้น จะขออธิบายจากรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.2 โดยจะมาลองพิจารณาดูว่าจุดไหนบ้างที่ควรคำนึงถึง ซึ่งจุดที่คำนึงถึงเหล่านี้จะเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการกำหนดโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 [illegible]



รูปที่ 3.4 [illegible]

รูปภาคผนวก ก. ที่ 3.2 วงจรอินเวอเตอร์

3.3 การหยุดนำกระแส

ในรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.2 นั้น ในระหว่างครึ่งไซเคิลบวกซึ่ง Th_1 กำลังนำกระแสอยู่นั้น คาพาซิเตอร์ C'_1 จะถูกชาร์จไว้ที่โวลเตจ E และจะมีกระแส i_0 ไหลผ่านโหลดในขณะนี้ ถ้าให้ Th'_1 นำกระแสในอันดับต่อไป e'_{c1} จะปรากฏคร่อม L'_1 และอาศัยหลักการทำงานของหม้อแปลงแท็ป $e'_{c1} = E$ จะปรากฏคร่อมขอลวด L_1 ด้วย ดังนั้น Th_1 จะได้รับรีเวิร์ส โวลเตจเท่ากับ -E ทำให้ Th_1 OFF จะเห็นได้ว่าด้วยวิธีการที่ใช้นี้แม้ Th_1 จะไม่สามารถหยุดการนำกระแสได้ด้วยตัวเองก็ตาม แต่อาศัยความช่วยเหลือของ L, C ก็สามารถหยุดการนำกระแสได้ เราเรียก C นี้ว่า คอมมิวเทติงคาพาซิเตอร์ เรียก L ว่า คอมมิวเตติงรีแอกเตอร์ และพลังงานที่ใช้เป็นตัวกลางสำหรับการคอมมิวเตตนี้ว่า คอมมิวเตติงเอนเนอร์ยี ซึ่งในกรณีนี้คือค่า CE2/2

3.4 รีเวิร์สไบแอส

3.4.1 ในรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.2 สำหรับกรณีที่กระแส i ไหลออกจากจุดกึ่งกลางระหว่าง C_1 และ C'_1 กระแสจำนวนนี้จะมาจากกระแสที่ไหลผ่าน C_1 และ C'_1 อย่างละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งพอดี ทั้งนี้เพราะ E มีค่าคงที่ ส่วนที่เพิ่มขึ้นของโวลเตจ e_{c1} เท่านั้นที่จะต้องเท่ากับส่วนที่ลดลงของโวลเตจ e'_{c1}

3.4.2 ในรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.2 ขณะที่ Th_1 นำกระแส พลังงาน Li02/2 ของ L_1 สำหรับกรณีที่ L1 และ L'1 มีการเชื่อมต่อกันอย่างดีแล้ว จะมีการเคลื่อนย้ายถ่ายเทไปสู่ L'_1 ด้วยค่าคงที่เท่าเดิม นั่นคือ กระแสซึ่งไหลผ่าน Th_1 จะย้ายไปสู่ Th'_1 ในทันทีทันใดด้วยค่ากระแสจำนวนเท่าเดิม

3.4.3 โดยปกติช่วงเวลาระหว่างการคอมมิวเตท จะใช้เวลา 10 us ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สั้นมาก ในกรณีที่โหลดเป็นอินดัคทีฟถือว่ากระแส i_0 ในช่วงเวลานี้มีค่าคงที่

3.5 กระแสไหลได้สองทิศทาง

เมื่อ $e'_{c1} = 0$ ได้ $e_{c1} = E$ ทำให้ D'_1 ON และ $i_{c1} = i'_{c1} = 0$ กระแสโหลด i_0 จะไหลผ่าน D'_1, D_1 เพื่อเริ่มทำหน้าที่ป้อนกลับรีแอกทีฟเพาเวอร์ขณะมีโหลดกลับเข้าซัพพลาย ดังนั้นแม้ว่า Th'1 จะให้กระแสไหลได้เพียงทิศทางเดียวก็ตาม เมื่ออาศัย D'_1 ด้วยแล้วก็สามารถให้กระแสไหลได้อีกทิศทางหนึ่งในช่วง (~ (+(ดังรูปภาคผนวก ก. ที่ 3.2(ข) รวมเป็น 2 ทิศทาง

3.6 คอมมิวเทติงเอนเนอร์ยี

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วจะเห็นได้ว่า พลังงานสำหรับ L'1 คือขณะมีโหลด L'1i02/2 + CE2
ขณะไร้โหลด CE2

พลังงานส่วนนี้จะสูญเสียไปใน Th'_1, D'_1 ในรูปของความร้อน และ Th'_1 จะนำกระแสไปเรื่อยๆ จนกว่าพลังงานสูญเสียนี้จะหมดไป ทันทีที่พลังงานส่วนนี้เป็น 0 Th'_1 ก็จะ ON อีกครั้ง จะเห็นได้ว่าในการแทนสวิตช์ทางกลด้วยไทริสเตอร์นั้น จะเป็นต้องมีคอมมิวเตติงเอนเนอร์ยีเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย พลังงานดังกล่าวจำสูญเสียไปหมดในรูปความร้อน ในกรณีที่สามารถป้อนกลับพลังงานส่วนนี้กลับเข้าซัพพลาย ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ก็จะสูงขึ้น

3.7 การแบ่งชนิดของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์มีชนิดต่างๆ ด้วยกันมากมายจนอาจหาที่สิ้นสุดไม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น อินเวอร์เตอร์ที่ให้หม้อแปลงเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดจำนวนไทริสเตอร์หรืออินเวอร์เตอร์ซึ่งมี L ต่อแทรกซัพพลายเพื่อวัตถุประสงค์ของการทำให้กระแสที่ออกจากซัพพลายมีค่าคงที่ ในช่วงระหว่างการคอมมิวเทต (อินเวอร์เตอร์แบบกระแสคงที่) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วเราอาจแบ่งชนิดของอินเวอร์เตอร์ออกตามคุณสมบัติหรือโครงสร้างของวงจรได้ดังนี้

3.7.1 แบ่งตามวิธีการป้อนพลังงานกลับเข้าซัพพลาย

ก. Self Excite (อนุกรม/ ขนาน)

ข. Separately Excite

3.7.2 แบ่งตามวิธีการซึ่งทำให้พลังงานคอมมิวเทติงหายไป

ก. แบบป้อนกลับเข้าซัพพลาย

ข. แบบไม่ป้อนกลับเข้าซัพพลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 แบ่งตามคุณสมบัติของเอาท์พุท

ก. พิจารณาจากลักษณะคลื่น

- แบบสแควร์เวฟ
- แบบไซน์เวฟ

ข. พิจารณาจากจำนวนเฟส

- แบบ 1 เฟส
- แบบ 3 เฟส

ค. พิจารณาจากย่านความถี่

- แบบความถี่ต่ำ
- แบบความถี่สูง

ง. พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความถี่

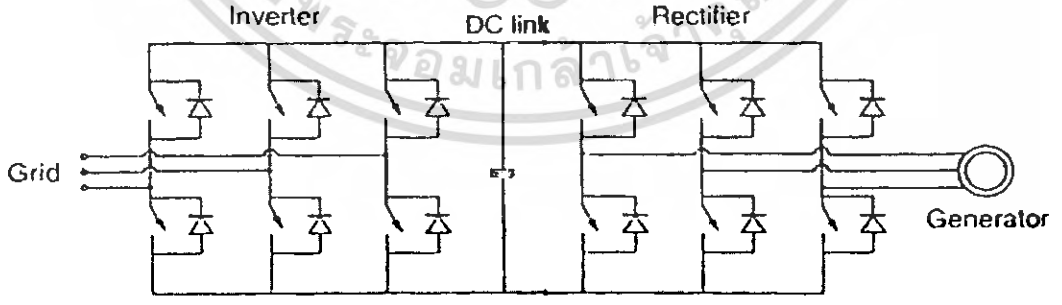
- แบบความถี่คงที่
- แบบความถี่ปรับเปลี่ยนได้

จ. พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงโวลเตจ

- แบบโวลเตจคงที่
- แบบปรับเปลี่ยนโวลเตจได้

4. Frequency converter

Back-to-back converter เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในกังหันลมมากที่สุด ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ภายใน 2 ชนิดด้วยกันคือ pulse-midth modulated (PWM) และ VSC converter



รูปภาคผนวก ก. ที่ 4.1 วงจร Back-to-back converter

โดยทางด้าน DC-link แรงดันจะถูกเพิ่มให้สูงกว่าแรงดันแอมพลิจูดของกริดเพื่อที่จะควบคุมกระแสที่เข้ามาได้และมี boost inductance, Harmonics filter ป้องกันสถานะผิดปกติบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประการของกริดด้วย คาปาซิเตอร์ที่อยู่ระหว่างอินเวอเตอร์และเรกติไฟเออร์จะเป็นตัวควบคุมความสมดุลของอินเวอเตอร์ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและด้านกริด โดยด้านกริดจะควบคุมโดยใช้ DC-link ทำให้แรงดันคงที่และด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะควบคุมความต้องการการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและความเร็วโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. ข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/1998) ของ 3 การไฟฟ้า

1. นิยาม

1.1 ฮาร์โมนิก (Harmonic) ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูล จะเรียกว่า ฮาร์โมนิกที่ 2 (Second Harmonic)

1.2 ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิก (Harmonic Distortion) การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า (Power Waveform) ไปจากรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยเกิดจากการรวมกันของค่าความถี่หลักมูล (Fundamental) และฮาร์โมนิกอื่นๆเข้าด้วยกัน

1.3 ส่วนประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Component) ส่วนประกอบของอันดับฮาร์โมนิกที่มากกว่าหนึ่งของปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งแสดงในรูปของอันดับ (Order) และค่า RMS ของอันดับนั้น

1.4 ปริมาณรวมฮาร์โมนิก (Harmonic Content) ปริมาณที่ได้จากการหักค่า DC และส่วนประกอบความถี่หลักมูลจากปริมาณเป็นคาบที่ไม่อยู่ในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave)

1.5 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกเฉพาะ (Individual Harmonic Distortion, IHD) หรืออัตราส่วนฮาร์โมนิก (Harmonic Ratio) อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Component) ต่อค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ

1.6 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion, THD) คือ อัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Component) กับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละดังแสดงในสมการ (1.1) และ (1.2)

$$THD(Voltage) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \ldots}}{V_1} \qquad (1.1)$$

$$THD(Current) = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \ldots}}{I_1} \qquad (1.2)$$

1.7 แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag or Voltage Dip) แรงดันลดลงตั้งแต่ร้อยละ 10 ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ครึ่งไซเกิลจนถึงไม่กี่วินาที โดยเกิดเนื่องจากการเดินเครื่องของมอร์เตอร์หรือโหลดขนาดใหญ่ หรือเกิดความผิดพร่อง (Fault) ในระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) ตำแหน่งของระบบในการไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่สุด ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นอาจต่อร่วมได้

1.9 เครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้ (Portable Tool) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถยกหรือจับถือได้ในช่วงเวลาการทำงานปกติ และใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น (2 – 3 นาที)

1.10 อุปกรณ์สามเฟสสมดุล (Balanced Tree-Phase Equipment) อุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสในสายเส้นไฟ (Line) ของแต่ละเฟสต่างกันไม่เกินร้อยละ 20 .

2. ขีดจำกัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก

ตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม	อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.4	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22,24,33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	8.8	5.9	4.3	7.4	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อน 10% หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ)

ตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-2 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรวม V_T (%)	ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.4	5	4	2
11,12,22,24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วิธีการประเมิน

ขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิก แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนที่ 1

3.1.1 อุปกรณ์ไฟฟ้า 3 เฟส

อุปกรณ์ประเภท Converter หรือ A.C. Regulator ไม่เกิน 1 ตัว ที่จะนำเข้าระบบแรงดัน 0.4, 11, 12 kV หากมีขนาดไม่เกินตารางภาคผนวก ข. ที่ 3-1 สามารถนำเข้าระบบได้โดยไม่ต้องพิจารณาในส่วนฮาร์มอนิก แต่ถ้ามีอุปกรณ์หลายตัวให้พิจารณาใน ขั้นตอนที่ 2

ตารางภาคผนวก ข. ที่ 3-1 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภท Converter และ A.C. Regulator แต่ละตัว

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	Converter ชนิด 3 เฟส			A.C. Regulator ชนิด 3 เฟส	
	3-Pulse (kVA)	6-Pulse (kVA)	12-Pulse (kVA)	6-Thyristor (kVA)	3-Thyristor/ 3-Diode(kVA)
0.4	8	12	-	14	10
11 and 12	85	130	250	150	100

3.1.2 อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส

ก. เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าตามมาตรฐาน IEC-1000-3-2 สามารถติดตั้งเข้าระบบได้

ข. อุปกรณ์ประเภท Converter หรือ A.C. Regulator ที่ไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิกอันดับคู่ (Even Harmonic Current) สามารถนำเข้าระบบได้ โดยอุปกรณ์ต้องมีขนาดตามที่กำหนด คือไม่เกิน 5 kVA ที่ระดับแรงดัน 230 V อุปกรณ์ประเภท Converter หรือ A.C. Regulator ที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกทั้งอันดับคู่ และอันดับคี่ จะไม่อนุญาตให้นำเข้าระบบ และหากมีการติดตั้งอุปกรณ์ประเภท Converter หรือ A.C. Regulator สำหรับ Single-Phase อยู่แล้ว แต่ต้องการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มขึ้น อนุญาตให้ทำได้หากมีการติดตั้งที่เฟสอื่น ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของอุปกรณ์ประเภท Non-Linear Load แต่หากต้องการติดตั้งอุปกรณ์มากกว่าหนึ่งตัวต่อเฟส ให้พิจารณาตามขั้นตอนที่ 2

3.2 ขั้นตอนที่ 2

3.2.1 อุปกรณ์ไฟฟ้า 3 เฟส

อุปกรณ์ที่มีขนาด (Size) เกินขอบเขตจำกัดในขั้นตอนที่ 1 สามารถนำเข้าระบบได้ก็ต่อเมื่อ

(ก) ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current) ที่จุดPCC. เกินค่าขีดจำกัดในตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่จุด PCC. ก่อนที่จะต่อเชื่อมโหลดใหม่จะต้องมีค่าไม่เกิน 75% ของค่าขีดจำกัดในตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-2

(ค) Short-Circuit Level ต้องมีค่าไม่ต่ำมาก เพื่อความสะดวกในการพิจารณา ตารางภาคผนวก ข. ที่ 4-1และ 4-2 ในภาคผนวก ข. ที่ได้แสดงขนาดของอุปกรณ์ประเภท Converter และ A.C. Regulator ที่มีค่ากระแสฮาร์มอนิกไม่เกินค่าตามตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1

3.2.2 อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส

อุปกรณ์ที่เกินขีดจำกัดในขั้นตอนที่ 1 ไม่อนุญาตให้ต่อเข้ากับระบบ การติดตั้งอุปกรณ์ 1 เฟส จะต้องสอดคล้องกับขีดจำกัดแรงดันไม่สมดุลตาม Engineering Recommendation P.16 จึงจะสามารถนำเข้าระบบได้

3.3 ขั้นตอนที่ 3

อุปกรณ์ประเภท Non-Linear ที่ไม่ผ่านการพิจารณาตามขั้นตอนที่ 2 หรือที่จุด PCC ของระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage) เกิน 75% ของค่าในตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-2 ให้พิจารณาค่าฮาร์มอนิกที่สามารถยอมรับอุปกรณ์เหล่านั้นเข้าระบบได้ตามหัวข้อ 6.6

4. ข้อแนะนำในการวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก

4.1 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ Converter – พิจารณาตามขั้นตอนที่ 2

ตารางภาคผนวก ข. ที่ 4-1 และ 4-2 เป็นแนวทางในการพิจารณาขนาดของอุปกรณ์ที่อนุญาตให้ติดตั้งเข้าระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามขอบเขตกำหนดในขั้นตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวก ข. ที่ 4-1 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ Converter แต่ละตัว พิจารณาตามขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกขั้นตอนที่ 2

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	การทำงานของ Converter	ขนาดของอุปกรณ์ (kVA) แบ่งตามจำนวนพัลซ์ของอุปกรณ์ 3 เฟส		
		3 พัลซ์	6 พัลซ์	12 พัลซ์
0.4	ไม่มีการควบคุม	-	150	300
	กึ่งควบคุม	-	65*	-
	ควบคุม	-	100	150
11,12,22 และ 24	ไม่มีการควบคุม	400	1000	3000
	กึ่งควบคุม	-	500*	-
	ควบคุม	-	800	1500
33	ไม่มีการควบคุม	1200	3000	7600
	กึ่งควบคุม	-	1200*	-
	ควบคุม	-	2400	3800
115	ไม่มีการควบคุม	1800	5200	15000
	กึ่งควบคุม	-	2200*	-
	ควบคุม	-	4700	7500

*หมายเหตุ

1. การติดตั้งอุปกรณ์ Converter จำนวนมาก

ขนาดโดยรวมของอุปกรณ์ Converter อาจมีค่าสูงกว่าตารางภาคผนวก ข. ที่ 4-1 หากมีการใช้งาน หรือการควบคุมที่ต่างกัน พิจารณาตามหัวข้อ "Coincidence Factor" และตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1

2. อุปกรณ์ Converter ชนิด 3 พัลซ์

จะไม่ยอมรับการติดตั้งอุปกรณ์ Converter ชนิดนี้ที่ระดับแรงดัน 400 V เพราะจะเกิดกระแสตรง (Direct Current) ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

3. อุปกรณ์ Converter ทีมีการทำงานแบบกึ่งควบคุม

จากตารางภาคผนวก ข. ที่ 4-1 ขนาดอุปกรณ์ Converter แบบ 6 พัลซ์ ทีมีการทำงานแบบกึ่งควบคุมจะเป็น Converter แบบ Three-Thyristor/Three-Diode Half Controlled Bridges

4. อุปกรณ์ Converter ทีมีการทำงานแบบไม่มีการควบคุม Firing Angle

ขนาดของ Converter ทีมีการทำงานแบบไม่มีการควบคุม Firing Angle ในตารางภาคผนวก ข. ที่ 4-1 เป็นขนาดที่คำนึงถึงผลสืบเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่จะช่วยลดกระแสฮาร์มอนิกให้ต่ำลงกว่าค่าที่ควรจะเป็นจากการคำนวณทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความแม่นยำในการควบคุม

ขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าว ถือว่าการทำงานของอุปกรณ์ต้องมีความแม่นยำในการควบคุมการทำงาน เช่น Firing Angle จะต้องสอดคล้องกันทั้ง 3 เฟส

ตารางภาคผนวก ข. ที่ 4-2 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ A.C. Regulator พิจารณาตามขอบเขตของกระแสฮาร์มอนิก ขั้นตอนที่ 2

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	3 เฟส		1 เฟส
	*6 Thyristor Type(kVA)	3 Diode/ 3 Thyristor Type (kVA)	*2 Thyristor Full Wave Type (kVA)
0.4	100	85	25 (240 V)
11 และ 12	900	600	45 (415 V)

*หมายเหตุ อุปกรณ์นี้ อาจรวมถึงอุปกรณ์แบบ 3 เฟส ไดรแอก (Triac) โดยไดรแอกจะมีโคดรสร้างเป็น Two Thyristors แบบ Common Gate

5. วิธีการพิจารณาเมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์ที่สร้างฮาร์มอนิกมากกว่า 1 ตัว

โดยสถิติเกี่ยวกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) หลายตัวที่แหล่งจ่ายพลังงานเดียวกัน ได้ทำการตรวจสอบเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่คำนวณพบว่าสามารถใช้ค่าตัวประกอบการคูณ จากตารางภาคผนวก ข. ที่ 5-1 เพื่อประมาณค่าฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวหลายๆ ตัวที่จุดต่อร่วมเดียวกันได้ แต่หากพบว่ามีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งสร้างฮาร์มอนิกมากกว่าร้อยละ 60 ของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมด ควรจะใช้ค่าที่เกิดขึ้นจริง สำหรับตัวประกอบการคูณ (Coincidence Factor) การพิจารณาจะเป็นไปตามที่แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ข. ที่ 5-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวก ข. ที่ 5-1 ค่าตัวประกอบการคูณสำหรับใช้หาผลรวมของกระแสฮาร์มอนิก

กลุ่มที่	ชนิดและรูปแบบการใช้งาน Converter	ตัวประกอบการคูณ
1	Converter ชนิดทำงานแบบไม่มีการควบคุม (มีค่าสูงเพราะโอกาศที่จะเกิดฮาร์มอนิกสูงสุดมีมาก)	0.9
2	Converter ชนิดทำงานโดยวิธีควบคุม Firing Angle ซึ่งมีการใช้งานเป็นช่วงเวลาที่แน่นอน และทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกสูงหลายครั้งในแต่ละวัน (มีโอกาสพอสมควรในการเกิดฮาร์มอนิกสูงสุดจากอุปกรณ์หลาย ๆ ตัว)	0.75
3	Converter ชนิดทำงานโดยวิธีควบคุม Firing Angle ซึ่งมีการใช้ตัดปันอิสระใช้งานเป็นพัก ๆ ตลอดวัน หรือเพียงสร้างกระแสฮาร์มอนิกในช่วงเวลาเริ่มเดินเครื่อง (มีค่าต่ำเหมาะสำหรับใช้พิจารณาค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงสุด ที่ช่วงเวลาอื่น ๆ)	0.6 เมื่อมีการใช้งาน Converter ไม่เกิน 3 ตัว 0.5 เมื่อมีการใช้งาน Converter ตั้งแต่ 4 ตัวขึ้นไป

6. การปฏิบัติตามข้อกำหนดในขั้นตอนที่ 2 และ 3

6.1 วิธีการวัด

จำเป็นต้องมีการตรวจวัดฮาร์มอนิกก่อนที่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์เชิงเส้นไม่ว่าจะเป็นผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ หรือลูกค้าเดิมที่ต้องการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ซึ่งควรจะตรวจวัดขณะที่เกิดความเพี้ยนฮาร์มอนิกสูงสุด ส่วนใหญ่จะเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานต่ำสุดจากระบบไฟฟ้าโดยไม่มีการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ใช่ระบบ โดยแบ่งขั้นตอนการตรวจวัดดังนี้

- การตรวจวัดตามขั้นตอนที่ 2

1. ผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ ตรวจวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อร่วมไม่เกินร้อยละ 75 และพิจารณาผู้ใช้ไฟฟ้าตามขั้นตอนที่ 2

2. ผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม ตรวจวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันเหมือนข้อ 1 และตรวจวัดค่ากระแสฮาร์มอนิก เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับประมาณค่าอุปกรณ์ใหม่ ตามขั้นตอนที่ 2 วิธีการคำนวณตามข้อ 6.5

- การตรวจวัดตามขั้นตอนที่ 3

3. ผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ ตรวจวัดความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับประมาณค่าความเพี้ยนของแรงดันที่จะยอมรับได้ สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตัวใหม่ และอาจตรวจวัดค่ากระแสฮาร์มอนิก เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่าง ๆ ของค่ากระแสแต่ละเฟสในแต่ละวัน ของ Feeder ที่มีการขอใช้ไฟฟ้า (วิธีการคำนวณตามหัวข้อ 6.6.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม ตรวจวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสของ Feeder ผู้ใช้ไฟฟ้ารายดังกล่าว เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการประมาณค่าอุปกรณ์ที่จะติดต่อตั้งเพิ่ม (วิธีการคำนวณตามหัวข้อ 6.6.2)

6.2 ข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้าใช้ประกอบการพิจารณาตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 การขอใช้ไฟฟ้า ผู้ขอจะต้องให้ข้อมูลเกี่ยวกับโรงงาน และอุปกรณ์ที่มีการใช้งานในโรงงานซึ่งข้อมูลบางอย่างอาจขอได้จากผู้ผลิต

6.2.1 ผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่

ก. ประเภทและขนาดของโรงงานที่ต้องการไฟฟ้า

ข. ขนาดและจุดต่อร่วมของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุง Power Factor และอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก

ค. จำนวนพัลซ์ของ Converter, ชนิดของ A.C Regulator และรายละเอียดอื่นๆ เกี่ยวกับอุปกรณ์รวมทั้งวิธีการต่อหม้อแปลง ซึ่งอาจทำให้เกิด Phase Displacement ระหว่างอุปกรณ์ Converter แต่ละตัว

ง. ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยจะแสดงค่าสูงสุดแบบ R.M.S ของแต่ละอันดับฮาร์มอนิกที่เวลาใดๆ และจะวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกขณะที่มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสูงสุด ซึ่งเป็นขณะที่มีโหลดเต็มพิกัดของโรงงาน

จ. ชนิดและช่วงเวลาทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงาน โดยเฉพาะช่วงเวลาที่เกิดกระแสฮาร์มอนิกสูงสุด

ฉ. ข้อมูลขณะเกิดกระแสฮาร์มอนิกสูงผิดปกติ (พิจารณาตามหัวข้อของ Engineering Recommendation G.5/3 เรื่อง"Short Duration Harmonic")

6.2.2 ผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม

ใช้ข้อมูลเช่นเดียวกับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ตั้งแต่ ก.-ฉ. และ

ช. ความสัมพันธ์ของ Phase Displacement ของฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ หากไม่สามารถหาข้อมูลนี้ได้ ให้พิจารณาตามหัวข้อ 6.2 ของภาคผนวก ข. ตามตารางภาคผนวก ข. ที่ 5-1 หรือพิจารณาค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงสุด ที่เกิดจากผู้ใช้ไฟฟ้าหลังจากการติดตั้งสมบูรณ์แล้ว โดยจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1 ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดจริง

6.3 ข้อมูลสำหรับผู้ขอใช้ไฟฟ้า

6.3.1 ระดับของการลัดวงจรของระบบที่จุดต่อร่วม

6.3.2 รายละเอียดของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อร่วมที่มีอยู่แล้ว

6.3.3 หากพิจารณาตามขั้นตอนที่ 3 ผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่จะต้องการข้อมูลของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ยอมให้เกิดขึ้นที่จุดต่อร่วม ส่วนผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิมจะต้องการข้อมูลค่ากระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์มอนิกที่ยอมให้เกิดขึ้นที่จุดต่อร่วม ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพิ่มกับอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่

6.4 ค่าอิมพีแดนซ์ระบบ (System Impedance)

ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจ่ายไฟฟ้า เมื่อมองจากจุดต่อร่วม (PCC) จะขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสที่กำลังใช้งาน ค่าความต้านทาน ค่าอินดัคแดนซ์ (Inductance) และค่าคาปาซิแดนซ์ (Capacitance) ของระบบและของโหลดที่ต่ออยู่กับระบบ เมื่อพิจารณาถึงผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ผลิตโดยผู้ใช้ไฟฟ้าพบว่าเป็นไปได้ยากที่จะมีข้อมูลอย่างเพียงพอเกี่ยวกับระบบ และคุณสมบัติของโหลดเพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องและชัดเจน จุดประสงค์ของเอกสารเพื่อแนะนำใช้ในกรณีที่ข้อมูลมีไม่เพียงพอ โดยจะสมมติอิมพีแดนซ์ของระบบเป็นอินดัคทีฟ(Inductive) และแปรผันกับความถี่ และไม่มีผลของรีโซแนนซ์ (Resonance)

ที่ระดับแรงดัน 115 kV ควรจะมีข้อมูลอย่างเพียงพอเพื่อใช้ในการคำนวณโดยโซ้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่สูงขึ้น และอันดับที่เป็น 3 เท่า (Triplen) ควรสนใจเป็นพิเศษ ในกรณีที่กล่าวแล้ว การต่อขดลวดของหม้อแปลงจะเป็นสาเหตุหลักและต้องถูกแทนในการคำนวณอย่างระมัดระวัง

6.5 การประเมินกระแสฮาร์มอนิกสำหรับขั้นตอนที่ 2

กรณีที่ผู้ไฟฟ้าเดิมต้องการที่จะติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) เพิ่มภายในขั้นตอนที่ 2 การพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้มีความจำเป็นที่จะต้องทำร่วมกับผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อหาค่ากระแสฮาร์มอนิกใหม่ กับค่าของกระแสฮาร์มอนิกใหม่ ซึ่งเกินจากค่าที่อนุญาตในตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1 จากนั้นก็เป็นไปได้ที่ว่าผู้ใช้ไฟฟ้าหรือผู้ขายอุปกรณ์จะไปประมาณคุณสมบัติเกี่ยวกับฮาร์มอนิคของอุปกรณ์ให้ได้ตามที่กำหนด

การประมาณค่าถูกทำขึ้นโดยใช้ผลที่ได้จากการวัดยังสถานที่จริงดังที่วางไว้ในส่วนที่ 6.1(2) และอธิบายในส่วนที่ 7

สำหรับแต่ละฮาร์มอนิคกำหนดให้

Im = ค่ากระแสฮาร์มอนิคที่ได้จากการวัด (หัวข้อ (2) ของส่วน 6.1)

Ip = ค่ารวมของกระแสฮาร์มอนิคที่อนุญาตตามตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1

Ia = ค่าของกระแสฮาร์มอนิคจากโหลดที่ต่อใหม่ ซึ่งยอมรับได้ภายใต้ขั้นตอนที่ 2

Kl = ตัวคูณจากตาราง ผ-3 โดยพิจารณาทั้งผู้ใช้ไฟฟ้าเดิมและโหลดที่ต่อใหม่ ดังนี้

$$Ia = Ip/Kl - Im \quad A\ rms \qquad (6.1)$$

จากนั้นก็แนะนำต่อผู้ใช้ไฟฟ้าได้ว่า ถ้าการทำงานร่วมกันของโหลดเดิมกับโหลดที่ต่อเข้าไปใหม่จะเป็นที่ยอมรับ เมื่อโหลดที่ติดตั้งทั้งหมดไปทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิคเกินจาก Ip (ตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-1) ซึ่งได้ประมาณว่า Ia อาจถูกผลิตโดยโหลดที่ต่อเข้ามาใหม่ การวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควรจะถูกทำในระหว่างการทดสอบนำอุปกรณ์เข้าใช้งาน เพื่อมั่นใจว่าค่าของ Ip ไม่เกินจากที่กำหนด

ในการใช้วิธีที่กล่าวมาแล้ว คำนวณค่าของ Ia ไม่ให้เกินจากที่กำหนด จะต้องใช้ตัวประกอบการคูณ kI (Coincidence factor) ดังนั้นเป็นไปได้ว่าบางครั้งค่าของ Ip จะเกินจากที่กำหนด (ดู section 10.2 ของ Engineering recommendation G.5/3 เรื่อง Automatic Mains Harmonic Analyzer) เมื่อทำการวัดเพื่อหาค่าจริงของกระแสฮาร์มอนิคที่ถูกผลิตขึ้น ก็ควรตระหนักถึงเรื่องนี้ไว้ด้วย ซึ่งก็จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการหาวิธีการวัดแบบใหม่

6.6 การประมาณค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิคสำหรับขั้นตอนที่ 3

จะมีปัญหา 2 แบบเกิดขึ้นในขั้นตอนที่3 ดังที่แสดงไว้ในส่วนที่ ผ.3.1(3)และ(4) เชื่อว่าการต่อเข้าระบบของผู้ใช้รายใหม่ หรือการพิจารณาถึงการติดตั้งอุปกรณ์ประเภทไม่เชิงเส้นเพิ่มสำหรับผู้ใช้รายเดิม ความจริงการพิจารณาการเพิ่มโหลดภายใต้ขั้นตอนที่ 3 นี้ บอกเป็นนัยว่ากระแสฮาร์มอนิคที่คาดว่าจะถูกผลิตออกมาจะมีค่ามากกว่าค่าที่แนะนำไว้ตามตารางที่ 5-1 หรือค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดัน (Voltage Distortion) ที่จุดต่อร่วม (PCC) เกินร้อยละ 75 ของค่าในตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-2 การประเมินผลกระทบจากโหลดที่เพิ่มเข้ามาในระบบนั้นควรทำโดยใช้ข้อมูลที่ดีที่สุดเท่าที่หาได้ และวิเคราะห์โดยพิจารณาคุณลักษณะที่แท้จริงของระบบ เช่น ค่าอิมพิแดนซ์(Impedance) และความถี่ อย่างไรก็ตามอาจเป็นไปได้ยากที่จะมีข้อมูลอย่างเพียงพอให้คำนวณได้อย่างจริงจัง และวิธีการประมาณต่อไปนี้ เป็นเสมือนข้อแนะนำ (Guide) สำหรับแต่ละฮาร์มอนิคให้

kV = แรงดันของระบบที่จุดต่อร่วม (PCC) หน่วย kV(เฟสต่อเฟส)

n = อันดับของฮาร์มอนิค

Vp = ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดันที่ยอมรับได้ตามตารางภาคผนวก ข. ที่ 2-2

Vm = ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดันที่วัดได้ ตามส่วนที่ 6.1(3), 6.1(4) และข้อ 7

Va = ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดันที่ควรจะเป็น ที่ยอมภายใต้ขั้นตอนที่ 3 เนื่องจากโหลดที่ต่อเข้าไปใหม่

$k2$ = ตัวประกอบการคูณจากตารางภาคผนวก ข. ที่ 5-1 โดยพิจารณาทั้งโหลดใหม่ และโหลดที่มีอยู่แล้วที่จุดต่อร่วม PCC

F = ระดับของการลัดวงจรของระบบที่จุดต่อ (System Short-Circuit Level) หน่วย MVA, ดูส่วน 6.3(1)

ดังนั้น

$$Va = \frac{Vp}{k2} - Vm \ \% \qquad (6.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6.1 ผู้ของใช้ไฟฟ้าใหม่

เริ่มแรกในกรณีของการเชื่อมต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ภายใต้ขั้นตอนที่ 3 ต้องประมาณค่าของกระแสฮาร์มอนิคที่ยอมรับได้ก่อน

ในกรณีที่ต้องเปลี่ยนค่า Va ไปเป็นกระแสฮาร์มอนิคให้ Ia = ค่ากระแสฮาร์มอนิคที่ควรจะเป็นที่ยอมรับได้ถ้าถูกสร้างขึ้นโดยโหลดที่ต่อใหม่
ดังนั้น

$$Ia = \frac{Va \times 10 \times F}{\sqrt{3} \times kV \times n} \quad \text{A rms} \qquad (6.3)$$

จากนั้นก็สามารถแนะนำกับผู้ใช้ไฟฟ้าได้ว่าโหลดที่จะต่อใหม่ยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งทำให้กระแสฮาร์มอนิคที่สร้างขึ้นไม่เกินค่าของ Ia ที่คำนวณได้ และจะทำการวัดหลังจากต่อโหลดเข้าใช้งาน เพื่อแสดงให้เห็นว่าค่าดังกล่าวไม่เกินจากที่กำหนด

6.6.2 ผู้ใช้ไฟฟ้าเดิม

ในรายการที่ 2 นี้ การต่อโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) เพิ่มเข้าไปโดยผู้ใช้ไฟฟ้าเดิมจำเป็นที่จะต้องประมาณค่ากระแสฮาร์มอนิค ที่สามารถยอมรับโดยพิจารณาทั้งโหลดที่มีอยู่เดิม และโหลดใหม่รวมกัน เริ่มแรกให้กำหนดตามส่วนที่ ผ.3.6 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดัน (Va) ซึ่งสามารถยอมรับได้ ภายใต้ขั้นตอนที่3 เนื่องจาก โหลดที่ต่อเข้าไปใหม่โดยผู้ใช้ไฟฟ้า สำหรับการคำนวณในส่วนนี้ ตัวประกอบการคูณที่จะได้จากตารางที่ ผ-3 จะต้องสัมพันธ์กับความแตกต่างในการติดตั้งอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้ารายที่พิจารณา และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นรอบจุดต่อร่วม(PCC) นั้นคือ k2 ของส่วน 6.6

สำหรับแต่ละฮาร์มอนิคกำหนดให้

Ic = กระแสฮาร์มอนิคที่ยอมรับได้จากการรวมกันของโหลดเดิมกับโหลดใหม่

Im = ค่าที่วัดได้ของกระแสฮาร์มอนิคที่มีอยู่เดิมที่จุด PCC (ดูข้อ (2) ของหัวข้อ 6.1)

Ia = ค่ากระแสฮาร์มอนิคที่ยอมรับได้ภายใต้ขั้นตอนที่ 3 จากโหลดที่ต่อใหม่

kl = ตัวประกอบการคูณร่วมระหว่างโหลดเดิมของผู้ใช้ไฟฟ้ากับโหลดที่ต่อใหม่

ดังนั้น

$$Ia = \frac{Va \times 10 \times F}{\sqrt{3} \times kV \times n} \quad \text{A rms} \qquad (6.4)$$

ซึ่ง Va ได้ถูกกำหนดนิยามไว้แล้วในข้อที่ผ.3.6 และ

$$Ic = kl(\text{Im} + Ia) \quad \text{A rms} \qquad (6.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นก็สามารถบอกกับผู้ใช้ไฟฟ้าได้ว่าการต่อโหลดเข้าใช้งานร่วมกัน ระหว่างโหลดเดิมกับโหลดใหม่จะเป็นที่ยอมรับได้ เมื่อไม่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิคเกินจากค่าของ *Ic* แล้ว ยังรวมถึงค่าฮาร์มอนิค *Ia* ที่มีผลต่อโหลดใหม่ ข้อตกลงนี้จะเป็นการจำกัดค่ากระแสฮาร์มอนิครวมที่ถูกผลิตออกมาจากโหลดที่ติดตั้งอยู่ทั้งหมดให้เป็นค่า *Ic* และการวัดควรจะถูกทำหลังจากต่อโหลดเข้าใช้งาน เพื่อให้แน่ใจว่ามีค่าไม่เกินจากที่กำหนด

ในทำนองเดียวกันการวัดค่าของ *Ia* และ *Ip* (ดูย่อหน้าสุดท้ายของส่วน 6.5) ก็มีโอกาสเป็นไปได้ที่ว่าบางครั้งจะมีค่าสูงกว่าค่าของ *Ic* ที่ได้จากการคำนวณ

7. หลักการของการวัด (Measurement Procedure)

โดยทั่วไปการวัดค่าระแสฮาร์มอนิค และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดัน เพื่อประเมินตามขีดจำกัดของข้อกำหนดนี้ จะต้องวัดค่าที่มีอยู่เดิม หรือบริเวณที่จะติดตั้งอุปกรณ์ใหม่ในอนาคต เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องจะต้องคำนึงถึง เครื่องวัด วิธีการวัด และจุดตรวจวัด ให้สอดคล้องกับชนิดของฮาร์มอนิคที่จะทำการวัด สิ่งที่ควรจะต้องให้ความสำคัญมีดังนี้

จุดตรวจวัด

จุดที่จะทำการวัดโดยทั่วไปแล้วจะดำเนินการที่จุดต่อร่วม (PCC) ซึ่งเป็นจุดที่ใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามอาจมีความจำเป็นที่จะต้องวัดที่จุดอื่นๆเพิ่มเติม เช่น จุดที่ต่อกับอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง เพื่อหาคุณลักษณะของฮาร์มอนิคที่เกิดขึ้น สำหรับนำมาประกอบในการพิจารณาประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น ในกรณีที่จุดต่อร่วมเป็นระบบแรงต่ำสามารถที่จะต่อวัดแรงดันได้โดยตรง สำหรับระดับแรงดันที่สูงขึ้นจุดต่อเครื่องวัดจะเป็นด้านแรงต่ำของหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer : VT) ส่วนจุดวัดกระแสจะต้องต่อผ่านหม้อแปลงกระแส (Current Transformer : CT) ดังนั้นคุณสมบัติของทั้งหม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแสจะต้องตอบสนองความถี่ได้ถูกต้องในช่วงกว้าง

ช่วงเวลาทำการวัด

ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการวัดขึ้นกับคุณลักษณะของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าฮาร์มอนิคมีลักษณะที่ค่อนข้างจะคงที่ (Steady) เวลาที่ใช้วัดเพียง 24 ชั่วโมงก็อาจจะเพียงพอ จุดสำคัญ คือ ช่วงเวลาทำการวัดต้องครบช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์หรือการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายนั้นๆ โดยทั่วไปแล้วช่วงเวลาสำหรับการวัดอย่างต่ำ 7 วัน

เวลาของการวัด

10วินาทีต่อการวัดฮาร์มอนิค 1 ครั้ง

การทำการวัดซ้ำ

ทำการวัดซ้ำทุกๆ 15 นาที หรือครบช่วงเวลาทำงาน

ฮาร์มอนิคที่จะวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดตั้งแต่อันดับที่2 ถึงอันดับที่ 19 ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิคตามที่ระบุในตารางขีดจำกัด นอกจากนี้ ให้ดูหมายเหตุข้อ4

หมายเหตุ

1. ค่านี้ระบุไว้ใน Engineering Recommendation G.5/3 อย่างไรก็ตามในการกำหนดค่าต่างๆ และวิธีการวัดที่เหมาะสม สามารถประยุกต์ใช้ตามข้อแนะนำการวัดฮาร์มอนิคใน IEC 1000-4-7

2. ในกรณีผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม ข้อมูลที่เกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิด และระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดันที่มีอยู่เดิม รวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับระบบใหม่ จะเป็นประโยชน์สำหรับการกำหนดช่วงเวลาของการวัดได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

3. ผลของความเพี้ยนฮาร์มอนิคของแรงดัน และสภาวะรีโซแนนซ์ ส่วนใหญ่จะแสดงให้เห็นในช่วง Light Load

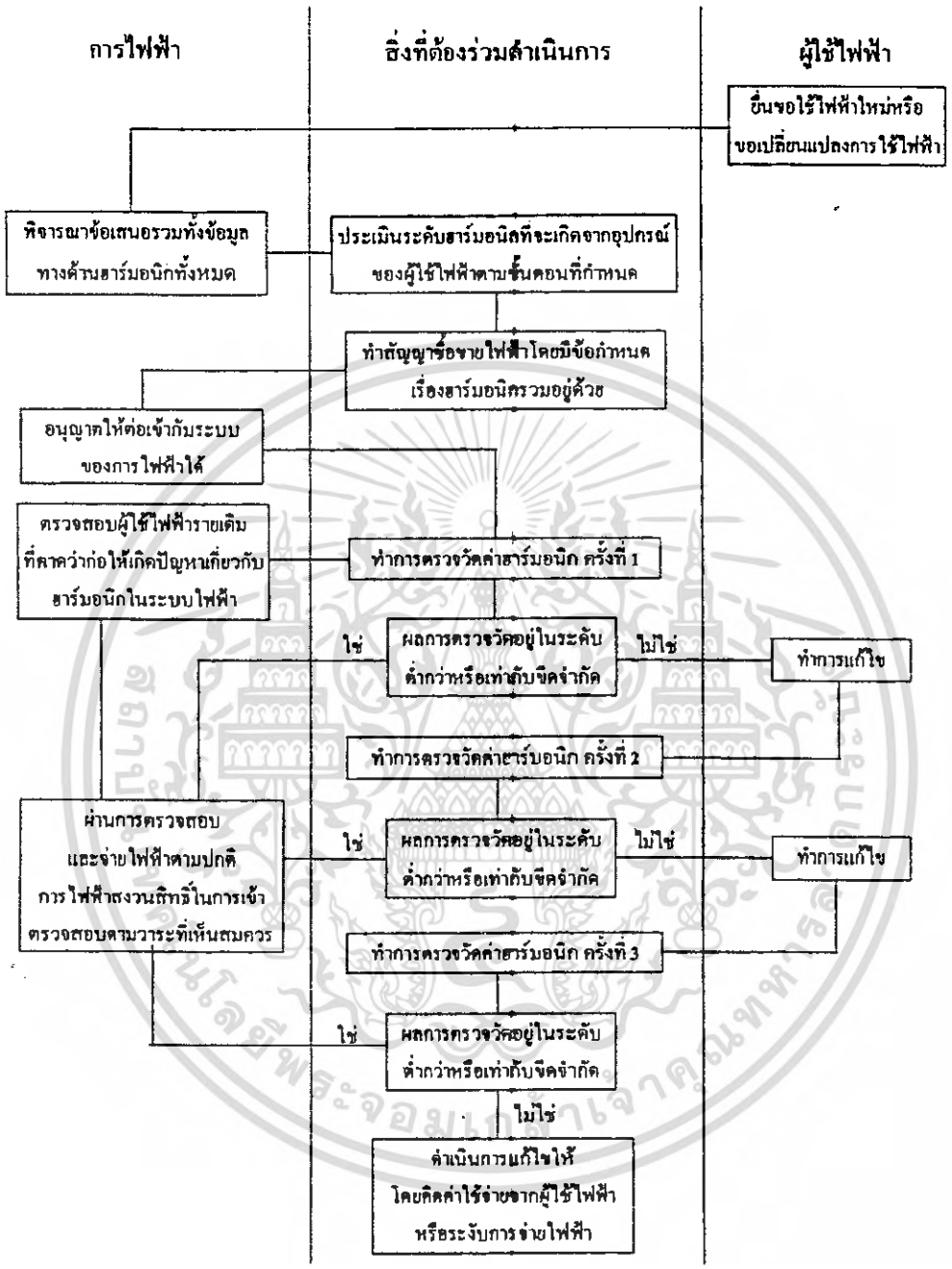
4. การบันทึกค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิค อาจเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลมีเพียงพอที่แสดงให้เห็นว่าฮาร์มอนิคไหนมีความสำคัญ การสุ่มวัดค่าอาจช่วยในการเลือกฮาร์มอนิคที่จะทำการบันทึก

5. ไม่ควรใช้ Capacitive Voltage Transformer (CVT) ในการตรวจวัดค่าฮาร์มอนิคเพราะว่าจะให้ผลที่อันดับสูงๆผิดเพี้ยนไปเนื่องจากการตอบสนองที่ความถี่สูงๆของCVT ไม่ดีเพียงพอ

6. สำหรับในกรณีที่มีการต่อคาปาซิเตอร์ทั้งจุดประสงค์เพื่อแก้ปัญหา Power Factor หรือระบบกรองฮาร์มอนิค (Harmonic Filter) อยู่ใกล้กับจุดตรวจวัด จะต้องทำการวัดหลายๆกรณี เพื่อให้สะท้อนและครอบคลุมถึงผลการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ทุกๆกรณีต่อระดับฮาร์มอนิคที่จุดต่อร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การบังคับใช้



รูปภาคผนวก ข. ที่ ข. ที่ 8.1 Flow Chart แสดงวิธีการบังคับใช้

8.1 ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่

ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่ต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์ และการคำนวณให้การไฟฟ้าตรวจสอบโดยแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแล้ว จะไม่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดฯ ข้างต้น การไฟฟ้าขอสงวนสิทธิ์ในการไม่จ่ายไฟฟ้า หากการต่อใช้ไฟฟ้าดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้า

ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้าจะต้องปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 8.1 โดยจะต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์และการคำนวณทั้งโหลดเดิมและโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงให้การไฟฟ้าตรวจสอบ

8.3 ผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม

ถ้าทางการไฟฟ้าตรวจสอบแล้วพบว่าการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิมนั้น ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดข้างต้น ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว หากผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ดำเนินการปรับปรุงแก้ไข การไฟฟ้าจะเข้าไปทำการปรับปรุงแก้ไขโดยคิดค่าใช้จ่ายจากผู้ใช้ไฟฟ้า หรืองดการจ่ายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. ข้อกำหนดเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-02/1998) ของ 3 การไฟฟ้า

1. นิยาม

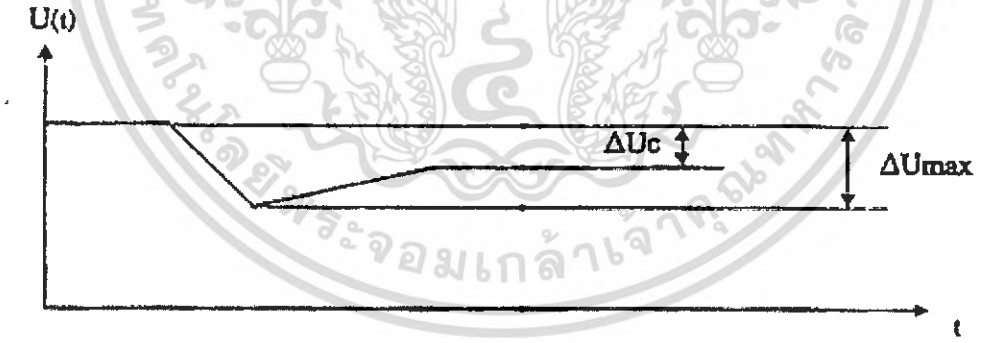
1.1 แรงดันเปลี่ยนแปลง (Voltage Change) การเปลี่ยนแปลงของค่า RMS (หรือค่า Peak) ของแรงดันระหว่างค่าระดับแรงดัน 2 ระดับใกล้กัน ซึ่งแต่ละระดับมีค่าคงที่ในระยะเวลาที่แน่นอนแต่ไม่กำหนดช่วงระยะเวลา

1.2 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) ชุดของแรงดันเปลี่ยนแปลง (Voltage Change) หรือการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดัน RMS

1.3 แรงดันดกชั่วขณะ (Voltage Sag or Voltage Dip) แรงดันลดลงตั้งแต่ร้อยละ 10 ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ครึ่งไซเคิลจนถึงไม่กี่วินาที โดยเกิดเนื่องจากการเดินเครื่องของมอเตอร์หรือโหลดขนาดใหญ่ หรือเกิดความพร่อง (Fault) ในระบบไฟฟ้า

1.4 แรงดันเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Maximum Voltage Change, Δ Umax) ความแตกต่างระหว่างค่า RMS สูงสุดต่ำสุดของลักษณะแรงดันเปลี่ยนแปลง U (t) (พิจารณารูปที่ 1-1)

1.5 แรงดันเปลี่ยนแปลงสภาวะคงที่ (Steady-State Voltage Change, Δ Uc) ความแตกต่างระหว่างแรงดันภาวะคงที่ 2 ค่าที่อยู่ใกล้กันแบ่งแยกโดยแรงดันเปลี่ยนแปลงอย่างน้อย 1 ชุด (พิจารณารูปภาคผนวก ค. ที่ 1.1)



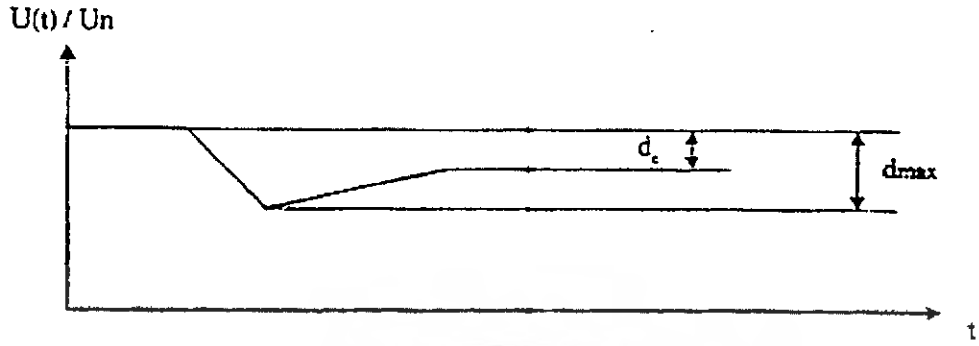
รูปภาคผนวก ค. ที่ 1.1 แสดงแรงดันเปลี่ยนแปลงแบบต่างๆ

1.6 แรงดันเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์สูงสุด (Maximum Relative Voltage Change, d_{max}) อัตราส่วนระหว่างแรงดันเปลี่ยนแปลงสูงสุด Δ Umax กับแรงดัน Nominal ของระบบ, Δ Un (พิจารณารูปภาคผนวก ค. ที่ 1.2)

1.7 แรงเปลี่ยนแปลงภาวะคงที่สัมพัทธ์ (Relative Steady-State Voltage Change, d_c) อัตราส่วนระหว่างแรงดันเปลี่ยนแปลงสภาวะคงที่ Δ Uc กับแรงดัน Nominal ของระบบ, Un

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(พิจารณารูปภาคผนวก ค. ที่ 1.2)



รูปภาคผนวก ค. ที่ 1.2 แสดงแรงดันเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์แบบต่างๆ

1.8 ไฟกะพริบ (Flicker) ความรู้สึกในการมองที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการกระตุ้นจากระดับของแสงสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามเวลา โดยเกิดจากการป้องแรงดันกระเพื่อมให้กับหลอด Coiled-Coil Filament 230 V / 60 W

1.9 เครื่องวัดไฟกระพริบ (Flickermeter) เครื่องมือที่ออกแบบสำหรับใช้วัดปริมาณที่เกี่ยวข้องกับไฟกระพริบ (โดยปกติใช้วัดค่า P_{st} และ P_{lt})

1.10 ดรรชนีไฟกระพริบระยะสั้น (Short-Term Severity Values, P_{st}) ค่าที่ใช้ประเมินความรุนแรงของไฟกระพริบในช่วงเวลาสั้นๆ (10นาที)

1.11 ดรรชนีไฟกระพริบระยะยาว (Long-Term) ค่าที่ใช้ประเมินความรุนแรงของไฟกระพริบในระยะยาว (2-3 ชั่วโมง) โดยหาได้จาสูตร P_{st} ตามสูตร

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{j=n} Pst^3} \qquad (1.1)$$

n = จำนวนของค่า P_{st} ในช่วงระยะเวลาที่หาค่า P_{lt}

ช่วงระยะเวลาที่แนะนำ คือ 2 ชั่วโมง ดังนั้น n = 12

1.12 จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling , PCC) ตำแหน่งในระบบของการไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่สุด ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นอาจต่อร่วมได้

1.13 เครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้ (Portable Tool) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถยกหรือจับถือได้ในช่วงเวลาการทำงานปกติ และใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น (2-3 นาที)

1.14 อุปกรณ์สามเฟสสมดุล (Balanced Three - Phase Equipment) อุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสในสายไฟ (Line) ของแต่ละเฟสต่างกันไม่เกินร้อยละ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขีดจำกัดแรงดันกระเพื่อม

ในการประเมินแรงดันกระเพื่อม แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนตามขนาดของโหลดในส่วนที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อม ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1

โหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อม คิดเป็น เควีเอ. น้อยกว่า 0.002 เท่าของพิกัดเควีเอ. ลัดวงจรที่จุดต่อร่วม จะยินยอมให้ต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้เลย โดยไม่ต้องผ่านการตรวจสอบค่าแรงดันกระเพื่อม

- ขั้นตอนที่ 2

ถ้าโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อม คิดเป็นเควีเอ. อยู่ระหว่าง 0.002-0.003 เท่าของพิกัด เควีเอ. ลัดวงจรที่จุดต่อร่วม จะยินยอมให้ต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้โดยมีข้อจำกัดดังนี้

ก.) ขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลง (Magnitude and Rate of Occurrence of Voltage Change) ของอุปกรณ์แต่ละตัว (Individual Load) จะต้องไม่เกินเส้นกราฟขีดจำกัดหมายเลข 1 ในรูปที่ 2-1

ข.) สำหรับอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ที่มีรูปแบบไม่แน่นอน ค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะสั้น (Short-Term Severity Values, P_{st}) ของอุปกรณ์จะต้องไม่เกิน 0.5

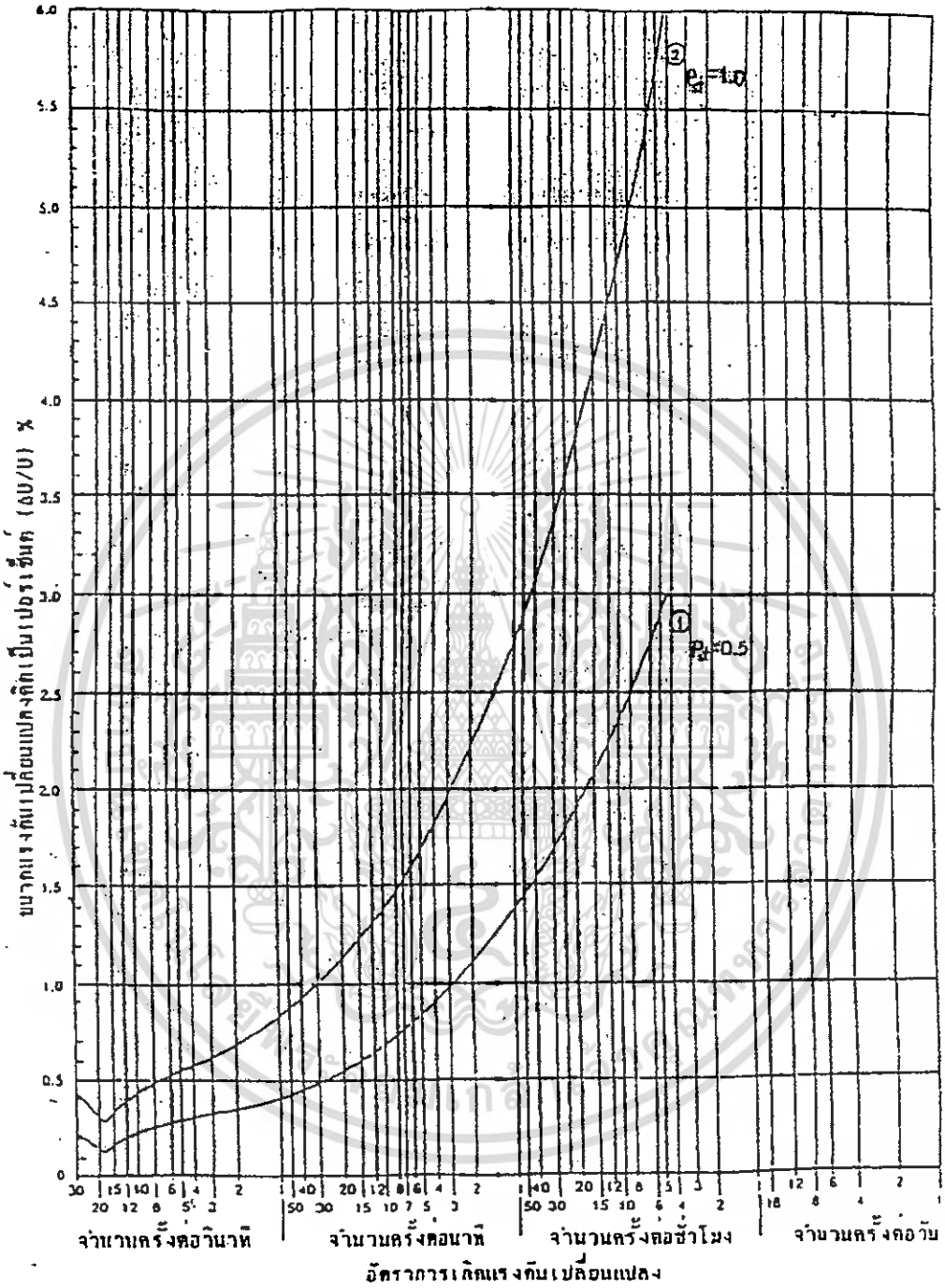
- ขั้นตอนที่ 3

ถ้าโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้า ในส่วนที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อมมีค่าเกินขีดจำกัดในดอนที่ 2 จะต้องมาดำเนินการตรวจสอบในขั้นตอนที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก.) ตรวจสอบระบบเดิม (Background) ว่ามีขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใดหรือถ้าขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงของระบบเดิม เป็นแบบไม่แน่นอนก็ให้ใช้วิธีตรวจวัดค่า P_{st}

ข.) นำผลการตรวจสอบขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลง หรือผลการตรวจวัดค่า P_{st} ในระบบเดิมมารวมกับขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงค่าหรือ P_{st} ของอุปกรณ์ที่จะนำมาต่อเข้ากับระบบผลลัพธ์ที่ได้ จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ในการรวมระดับแรงดันกระเพื่อมที่เกิดมาจากหลายๆ แหล่งกำเนิดตามข้อ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1 รูปกราฟขีดจำกัดขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ข้อกำหนดในการรวมระดับแรงดันกระเพื่อมที่เกิดมาจากหลาย ๆแหล่งกำเนิด

การรวมระดับแรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากหลายแหล่ง สามารถนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการคำนวณหาค่าระดับแรงดันกระเพื่อมได้ดังนี้

3.1 กรณีที่สามารถรู้ขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงที่แน่นอน

3.1.1 ถ้าขนาดของแรงดันเปลี่ยนแปลงของระบบเดิม และอุปกรณ์ตัวใหม่ที่จะนำมาต่อเข้ากับระบบมีขนาดเท่ากัน แต่เกิดขึ้นไม่พร้อมกัน หรือมีวงจรอินเตอร์ล็อค ป้องกันมิให้เกิดขึ้นพร้อมกันค่าอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงรวม จะเท่ากับผลรวมของอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงของระบบเดิมและอุปกรณ์ตัวใหม่

3.1.2 ถ้าแรงดันเปลี่ยนแปลงของระบบเดิม และอุปกรณ์ตัวใหม่ที่จะนำมาต่อเข้ากับระบบเกิดขึ้นพร้อมกันขนาดของแรงดันเปลี่ยนแปลงรวมจะเท่ากับผลรวมของขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงของระบบเดิมและอุปกรณ์ตัวใหม่

3.1.3 ถ้าขนาดของแรงดันเปลี่ยนแปลงของระบบเดิม และอุปกรณ์ตัวใหม่ที่จะนำมาต่อเข้ากับระบบอันใดอันหนึ่งมีขนาดน้อยมาให้ตัดทิ้งได้ไม่ต้องนำมาคิด

ขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลง ที่หามาได้ใหม่ตามที่กล่าวมาทั้ง 3 ข้อ เมื่อนำมาพิจารณากับรูปกราฟขีดจำกัดหมายเลข 2 ในรูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1 จึงยอมให้ต่ออุปกรณ์ตัวใหม่เข้ากับระบบของไฟฟ้าได้

3.1.4 ถ้าขนาดของแรงดันเปลี่ยนแปลงของระบบเดิม และอุปกรณ์ตัวใหม่ที่จะนำมาต่อเข้ากับระบบไม่สามารถรวมกันได้ตามหลักเกณฑ์ในทั้ง 3 ข้อดังกล่าวแล้ว ให้ใช้วิธีการประเมินดังนี้

ขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงหลายค่า ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเดียวหรือหลายแหล่งกำเนิด สามารถประยุกต์ใช้ได้กับกราฟในรูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1โดยค่า $\sqrt[m]{R_1^{\,m} + R_2^{\,m} + \ldots + R_N^{\,m}}$ ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 จึงจะยอมให้อุปกรณ์ตัวใหม่ต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้

เมื่อ R_i คือ อัตราส่วนของขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงสูงสุด ตามเส้นกราฟหมายเลข 2 ในรูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1ที่อัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงเดียวกัน และใช้ค่า m เท่ากับ 2

3.2 กรณีที่ไม่สามารถรู้ค่าขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงที่แน่นอน

3.2.1 ตรวจวัดค่าแรงดันกระเพื่อมของระบบเดิม และของอุปกรณ์ตัวใหม่ที่จะนำมาต่อเข้ากับระบบโดยใช้ Flickermeter ตรวจวัดค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะสั้น (Short-Term Severity Values, P_{st})

3.2.2 นำค่า P_{st} มารวมกันตามสูตรดังนี้ โดยค่า P_{st} ที่คำนวณได้จะต้องมีค่าไม่เกินในตารางภาคผนวก ค. ที่ 3.1

$$Pst_t = \sqrt[m]{(Pst_1)^m + (Pst_2)^m + \ldots + (Pst_n)^m} \qquad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ m ขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งกำเนิดแรงดันกระเพื่อม โดยมีข้อแนะนำดังนี้

m = 4 ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทเตาหลอม (Arc Furnace) ที่มีการทำงานในช่วงการหลอมละลายไม่พร้อมกัน

m = 3 ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อมเกือบทุกประเภท โดยคาดว่าโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันมีน้อย หากไม่แน่ใจว่าโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันมีมากน้อยเพียงใดก็ให้ใช้ค่านี้ได้

m = 2 ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีโอกาสจะเกิดการทำงานพร้อมกันบ่อยครั้ง

m = 1 ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานพร้อมกัน

3.2.3 นำค่า P_{st} ที่ได้มาคำนวณหาค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะยาว (Long-Term Severity Values, P_{lt}) ตามสมการ

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{j=n}(Pst)^3} \qquad (3.2)$$

เมื่อ n คือจำนวน P_{st} ในช่วงเวลาที่ตรวจวัด ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้ ปกติประมาณ 2 ชั่วโมง ดังนั้นค่า n จึงเท่ากับ 12 ค่า P_{lt} ที่คำนวณได้จะต้องไม่เกินค่าในตารางภาคผนวก ค. ที่ 3.1

ถ้าผลการตรวจเช็คหรือตรวจวัดเกินข้อกำหนดในขั้นที่ 3 จะดำเนินการปรับปรุงแก้ไขเพื่อมิให้ค่าแรงดันกระเพื่อมเกินข้อกำหนดดังกล่าวแล้ว โดยอาจจะใช้วิธีการต่างๆ ดังนี้

ก.) ปรับปรุงระบบไฟฟ้า โดยอาจจะก่อสร้างวงจรเฉพาะ

ข.) ปรับปรุงวิธีการเดินเครื่องจักรโดยไม่ให้เดินเครื่องจักรหลายๆ เครื่องพร้อมกัน หรืออาจจะใช้วิธีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันให้เป็นแบบลาดเอียง (Ramp Change)

ค.) ปรับปรุงคุณลักษณะของโหลด

ง.) ติดตั้งอุปกรณ์จำกัดแรงดันกระเพื่อม

จ.) จำกัดเวลาเดินเครื่องจักรบางประเภท

ฉ.) ปรับปรุงเพื่อเพิ่ม Fault Level ของระบบ

<u>หมายเหตุ</u> ทั้งนี้ข้อกำหนดดังกล่าวแล้วทั้งหมด มิได้รับประกันน่าจะไม่เกิดผลกระทบกับผู้ใช้ไฟข้างเคียงหากเป็นแต่เพียงมาตรการเพื่อควบคุมมิให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงเท่านั้น ดังนั้นหลังจากการติดตั้งใช้งานจริงแล้วหากพบว่ายังไม่ผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟข้างเคียงอยู่อีก ก็จะต้องปรับปรุงแก้ไขจนเป็นที่ยอมรับกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวก ค. ที่ 3.1 ขีดจำกัดสำหรับค่าความรุนแรงของไฟกระพริบระยะสั้น (P_{st}) และค่าความรุนแรงของไฟกะพริบระยะยาว (P_{lt}) เมื่อรวมแหล่งกำเนิดแรงดันกระเพื่อมทั้งหมดที่มีผลต่อระบบไฟฟ้า ณ จุดใดๆ

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวม	P_{st}	P_{lt}
115 kV หรือต่ำกว่า	1.0	0.8
มากกว่า 115 kV	0.8	0.6

- การพิจารณา

กรณีที่ 1 ระบบเดิมไม่มีอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อม จากกราฟในรูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1 หมายเลข 2 ค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ยอมรับได้ที่อัตราการเกิด 15 ครั้งต่อชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 4.2 ดังนั้นจึงยินยอมให้ต่อมอเตอร์ชุดนี้เข้าระบบของการไฟฟ้าได้

กรณีที่ 2 หากระบบเดิมมีอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อมอยู่แล้ว โดยมีค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงสูงสุดร้อยละ 2 และมีอัตราการเกิด 12 ครั้งต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1 หมายเลข 2 ค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ยอมรับได้ที่อัตราการเกิด 15 ครั้งและ 12 ครั้งต่อชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 4.2 และร้อยละ 4.5 ตามลำดับ

อัตราส่วนของขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง ต่อขนาดของค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงสูงสุดตามเส้นกราฟหมายเลข 2 ในรูปภาคผนวก ค. ที่ 2.1 ที่อัตราการเกิด 15 ครั้ง และ 12 ครั้งต่อชั่วโมง มีค่า เท่ากับ (2.92/4.2) = 0.69 และ (2/4.5) =0.44 ตามลำดับ

จากข้อกำหนดค่า $\sqrt[m]{R_1^m + R_2^m + ... + R_n^m}$ ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 (โดยที่ m =2)

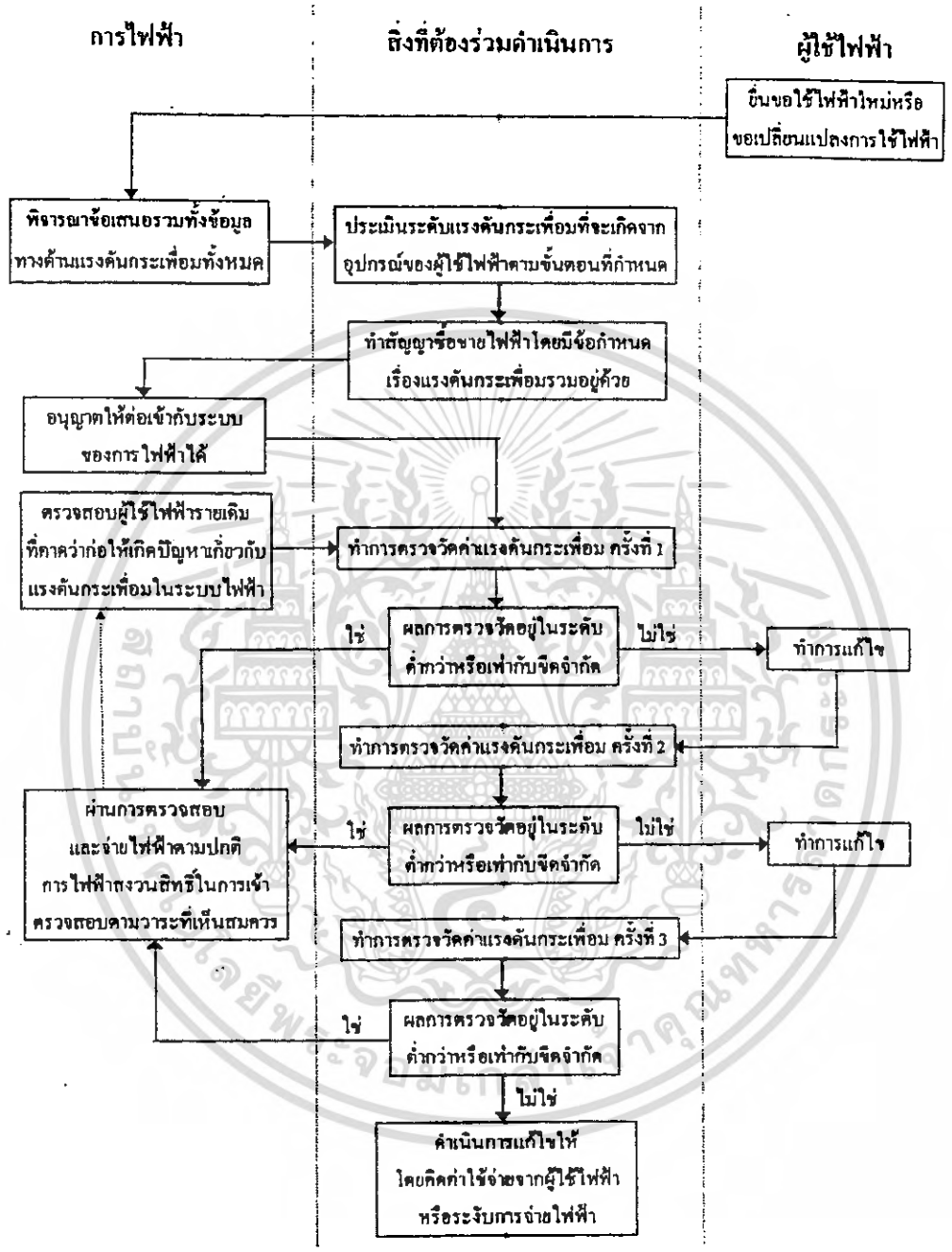
ดังนั้น $\sqrt[m]{R_1^2 + R_2^2 + ... + R_n^2} = \sqrt{0.69^2 + 0.44^2}$

$= 0.81$

จากผลการตรวจสอบดังกล่าวจึงสามารถยินยอมให้ต่อมอเตอร์ชุดนี้เข้าระบบของการไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การบังคับใช้



รูปภาคผนวก ค. ที่ 4.1 Flow Chart แสดงวิธีการบังคับใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่

ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่ต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์ และการคำนวณให้การไฟฟ้าตรวจสอบโดยแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแล้ว จะไม่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อมเกินขีดจำกัดฯ ข้างต้น การไฟฟ้าขอสงวนสิทธิ์ในการไม่จ่ายไฟฟ้า หากการต่อใช้ไฟฟ้าดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่น

4.2 ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้า

ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้าจะต้องปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 4.1 โดยจะต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์และการคำนวณทั้งโหลดเดิมและโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงให้การไฟฟ้าตรวจสอบ

4.3 ผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม

ถ้าทางการไฟฟ้าตรวจสอบแล้วพบว่าการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิมนั้น ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อมเกินขีดจำกัดฯ ข้างต้น ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวหากผู้ใช้ไฟฟ้า ไม่ดำเนินการปรับปรุงแก้ไข การไฟฟ้าจะเข้าไปทำการปรับปรุงแก้ไขโดยคิดค่าใช้จ่ายจากผู้ใช้ไฟฟ้า หรืองดการจ่ายไฟฟ้า

5. ข้อแนะนำในการวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันกระเพื่อม

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันกระเพื่อม

ก. Flickermeter ตามมาตรฐาน IEC 868

ข. Disturbance Recorder

5.2 วิธีการวัด

ก. วัดโดยตรงใช้ Flickermeter ไปตรวจวัดค่าความรุนแรงของไฟกะพริบระยะสั้น (Pst) และค่าความรุนแรงของไฟกะพริบระยะยาว (Plt) ที่จุด PCC (Point of Common Coupling)

ข. วัดทางอ้อม Disturbance Recorder ไปตรวจวัดค่าแรงดันแปลี่ยนแปลงที่จุด PCC แล้วนำผลที่ได้ไปตรวจสอบกับรูปกราฟขีดจำกัดขนาดและอัตราการเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลง

5.3 ข้อกำหนดในการวัด

ก. อุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งเพิ่มของผู้ใช้ไฟเดิม หรืออุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งของผู้ใช้ไฟรายใหม่ ถ้าผลการพิจารณาในเบื้องต้นก่อนการติดตั้งใช้งานปรากฏว่าเกินข้อจำกัด (Limit) ในขั้นตอนที่ 2 (Stage 2) แต่ยอมรับได้ในขั้นตอนที่ 3 (Stage 3) ควรจะต้องไปตรวจวัดหลังการติดตั้งใช้งานไปแล้ว 3 ถึง 6 เดือน

ข. การวัดจะไม่รวมเหตุการณ์ผิดปกติ เช่น กรณีเกิดฟอลต์ในระบบสายส่งหรือสายจำหน่าย หรือระบบการผลิตขัดข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ระยะเวลาในการวัดต้องนานพอจนครบวงรอบ หรือคาบเวลาการเดินเครื่องจักร ปกติ 1 วัน หรือ 1 อาทิตย์ในกรณีที่เป็นโหลดเตาหลอมไฟฟ้า

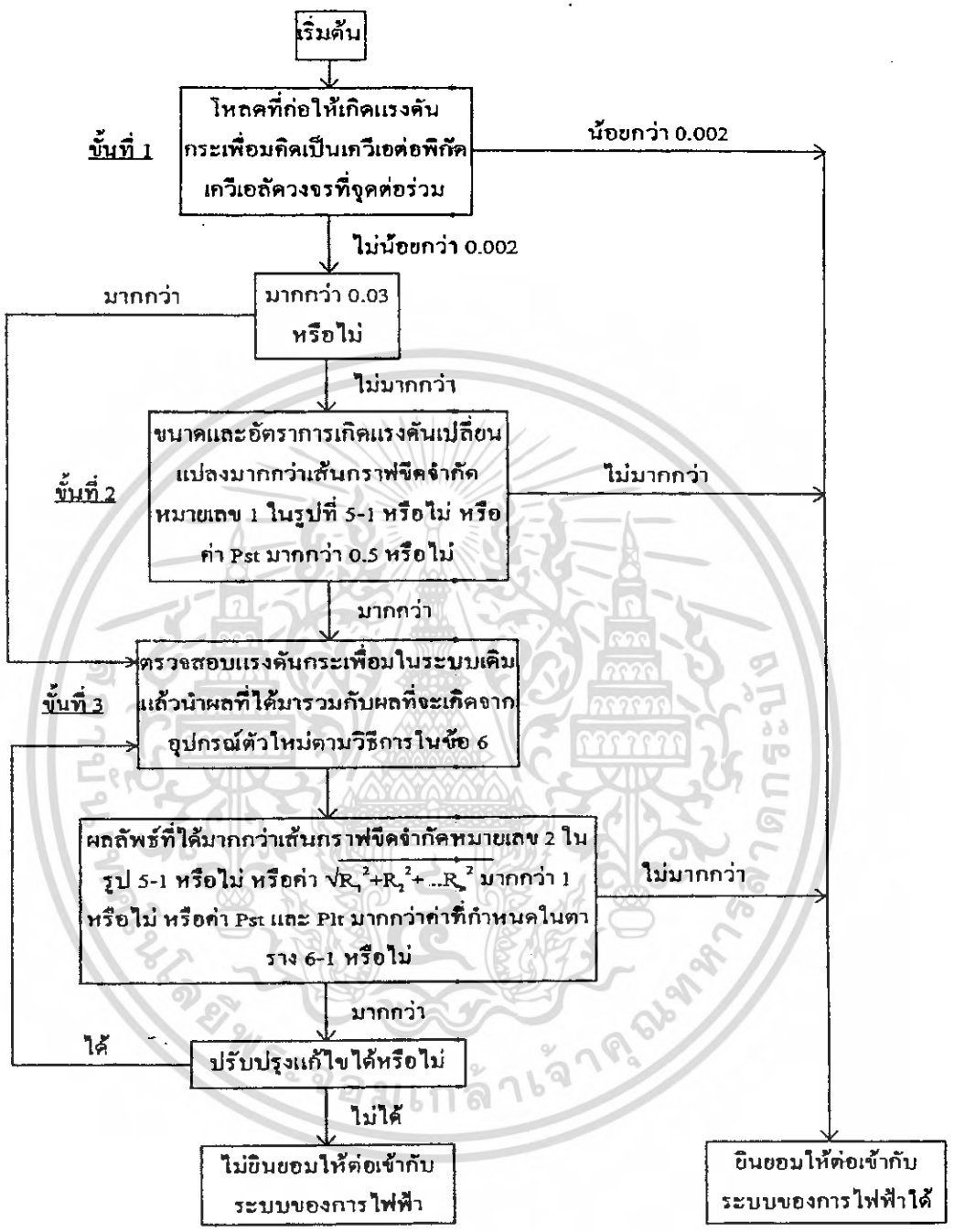
ง. ต้องวัดให้ครบทุกเฟส เพื่อจะได้ทราบว่าเฟสไหนมีความรุนแรงต่างกันอย่างไร

จ.การวัดในระบบแรงดันสูงผ่านอุปกรณ์แปลงแรงดัน มีความจำเป็นต้องตระหนักถึงความสัมพันธ์ของเฟสที่จะวัดว่าสอดคล้องกับเฟสเทียบกับจุดนิวตรอลในระบบแรงดันต่ำหรือไม่ เพราะผลกระทบที่แท้จริงจะเกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทแสงสว่าง ซึ่งจะต่ออยู่ระหว่างสายเฟสกับสายนิวตรอล ดังนั้นในการวัดให้วัดแรงดันระหว่างเฟสกับนิวตรอล

5.4 แผนผังลำดับขั้นตอนในการตรวจสอบ

ขั้นตอนการตรวจสอบเบื้องต้นจนกระทั่งการตรวจสอบด้วยวิธีการตรวจวัดแสดงเป็นแผนผังลำดับขั้นตอนการตรวจสอบ (Flow Diagram) ได้ดังรูปภาคผนวก ค. ที่ 5.1

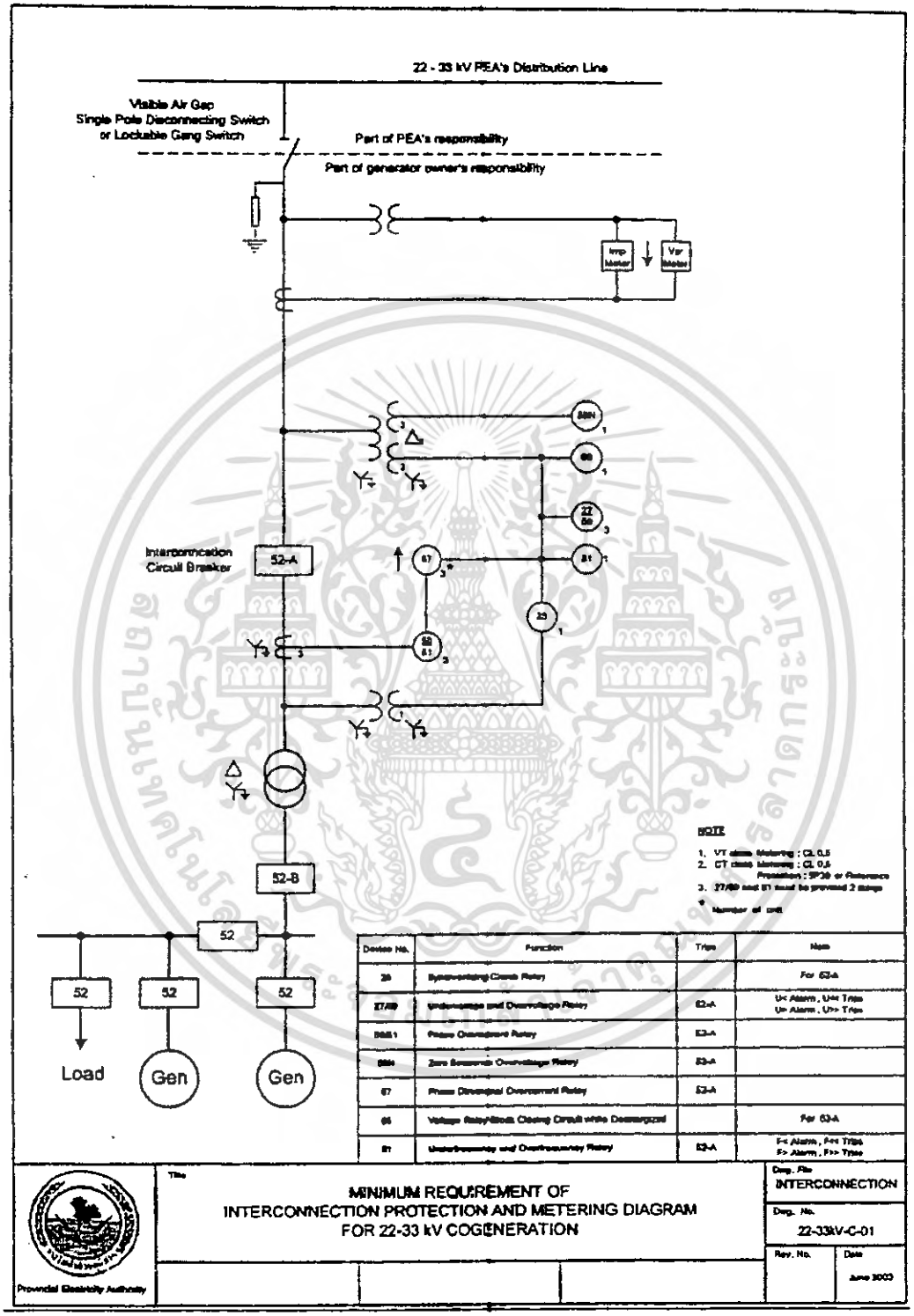
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาคผนวก ค. ที่ 5.1 แผนผังลำดับขั้นตอนการตรวจสอบโหลดที่ก่อให้เกิดแรงดันกระเพื่อม

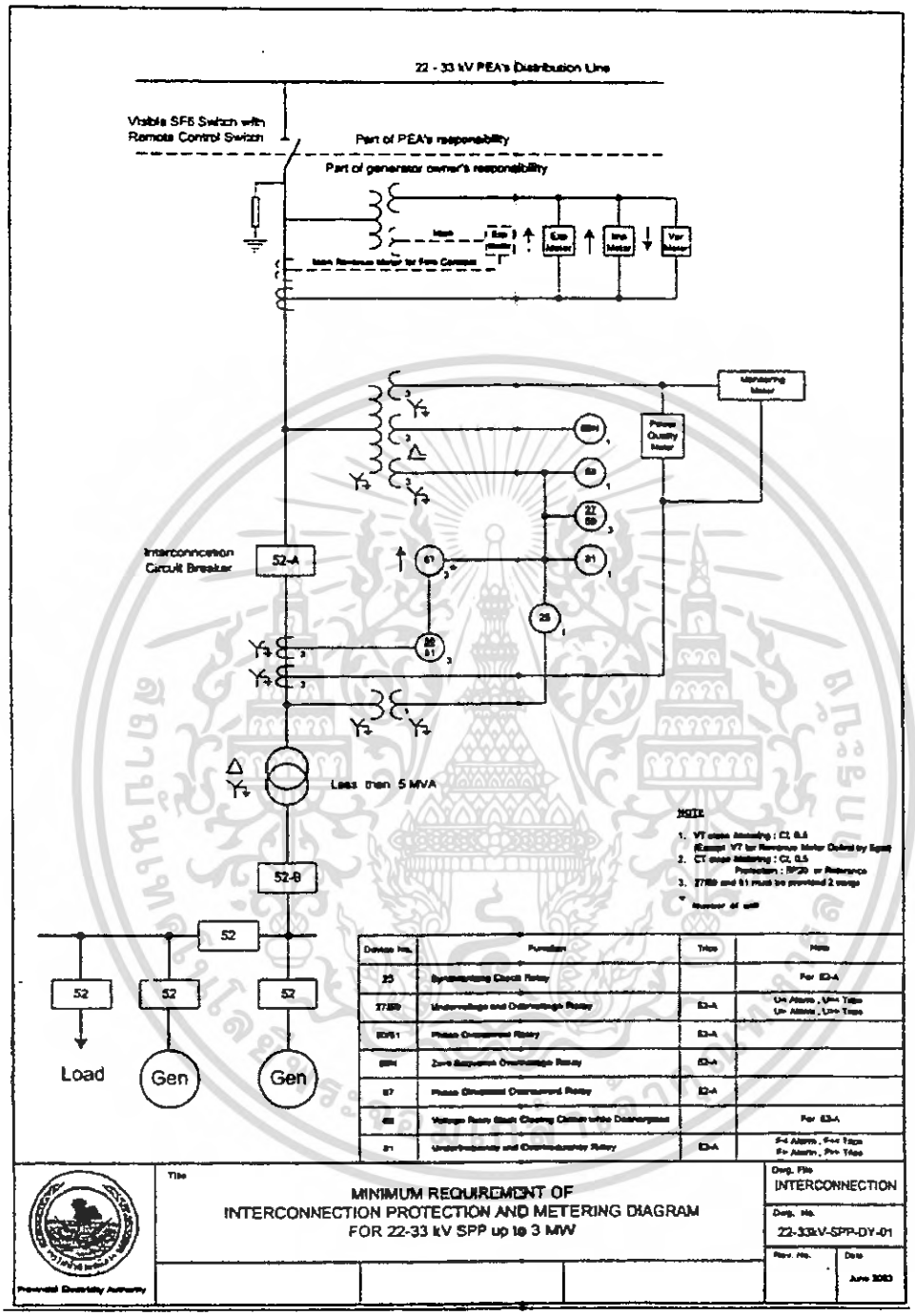
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง. รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ และอุปกรณ์ป้องกัน



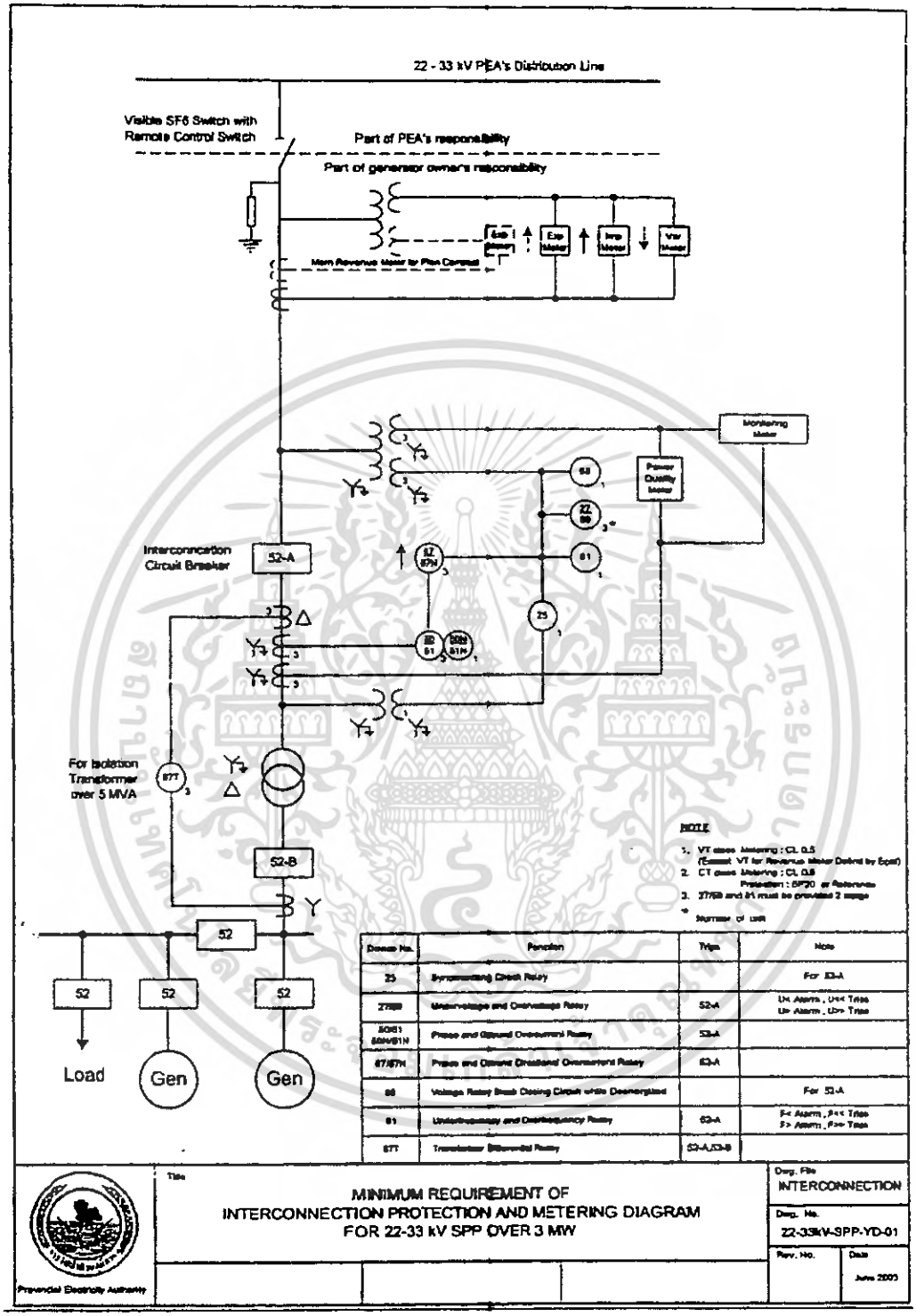
รูปภาคผนวก ง. ที่ 1 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับลูกค้าระบบ 22 – 33 kV (Dwg. No. 22-33kV-C-01) จำนวน 1 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



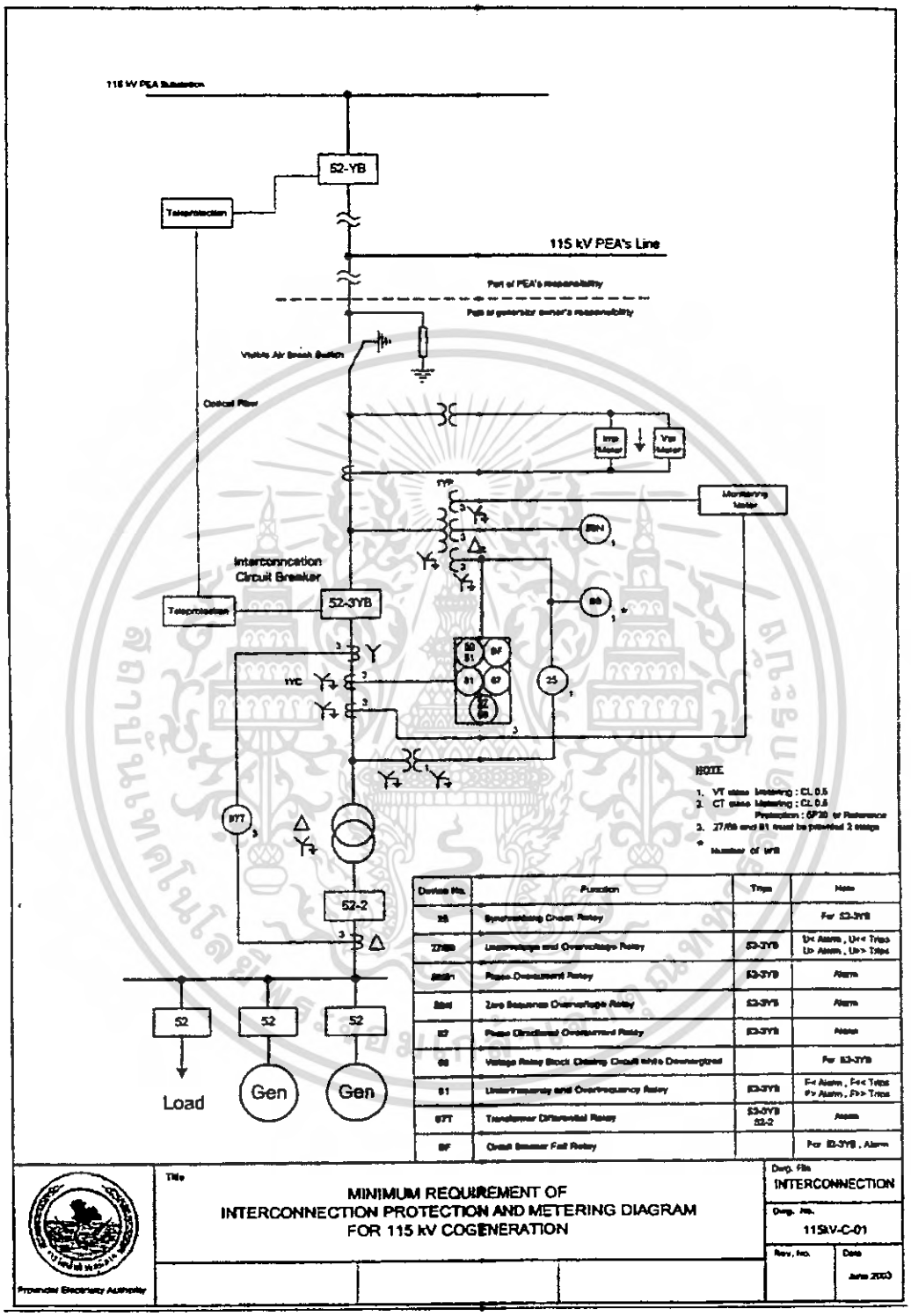
รูปภาคผนวก ง. ที่ 2 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 22 – 33 kV ปริมาณไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบไม่เกิน 3 MW หรือ SPP รายเก่าที่ต่อสัญญาและมิได้แก้ไขขนาด หรือประเภทสัญญา Non-Firm (Dwg. No. 22-33kV-SPP-DY-01) จำนวน 1 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



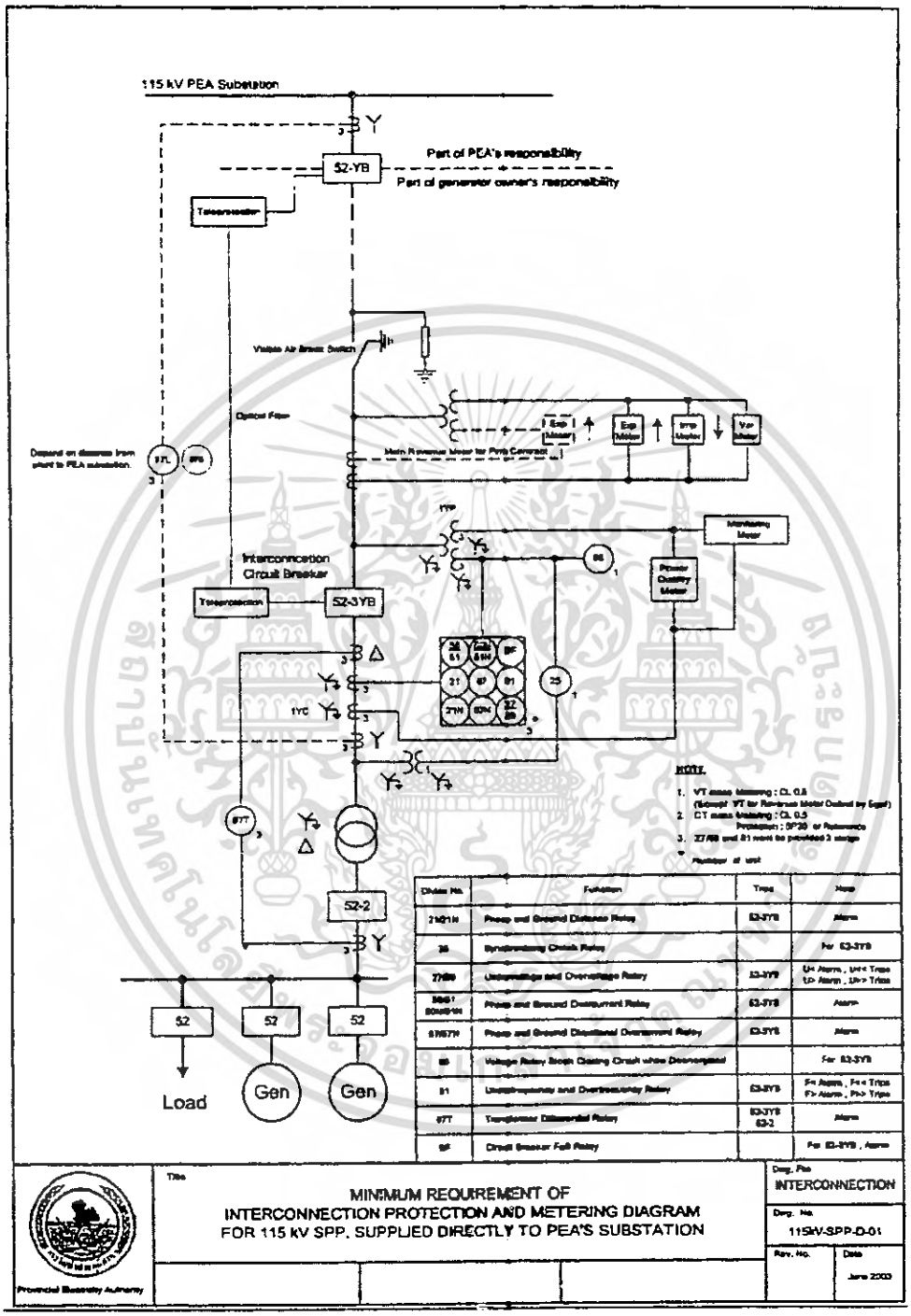
รูปภาคผนวก ง. ที่ 3 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 22 – 33 kV ปริมาณไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบเกิน 3 MW หรือประเภทสัญญา Firm (Dwg. No. 22-33kV-SPP-YD-01) จำนวน 1 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



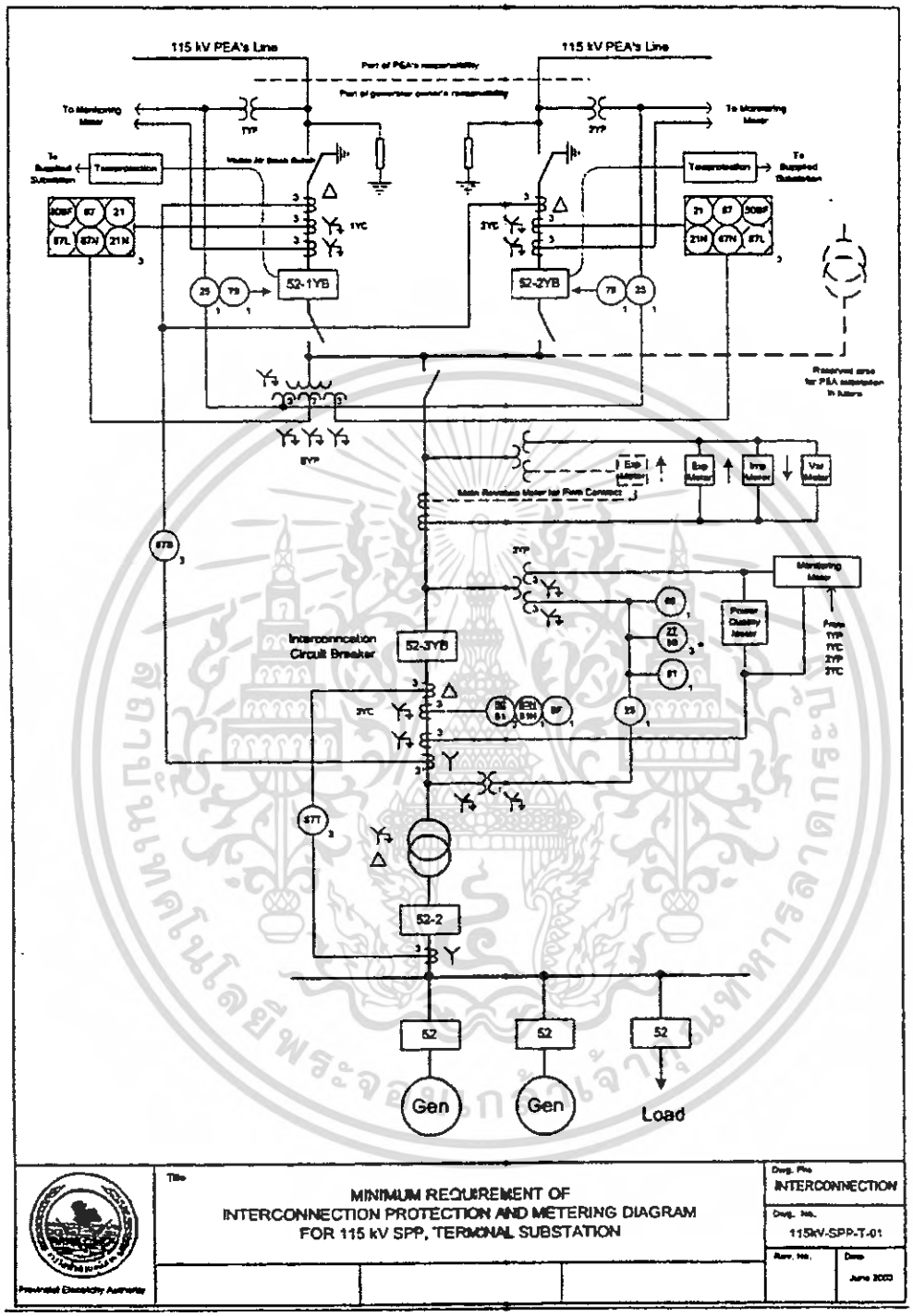
รูปภาคผนวก ง. ที่ 4 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับลูกค้าระบบ 69 – 115 kV (Dwg. No. 115kV-C-01) จำนวน 1 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาคผนวก ง. ที่ 5 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 69 – 115 kV จ่ายตรงไปที่สถานีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Dwg. No. 115kV-SPP-01) จำนวน 1 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาคผนวก ง. ที่ 6 รูปแบบการเชื่อมโยงระบบ สำหรับ SPP ระบบ 69 – 115 kV แบบ Terminal Substation (Dwg. No. 115kV-SPP-T-01,115kV-SPP-T-02) จำนวน 2 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้