

การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม  
เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า



นางสาวอัญชลี ประภัสสรพิทยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF WIND GENERATOR  
WITH POWER FLUCTUATION CONSIDERATION



Miss Anchalee Prapatsornpittaya

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิต  
ไฟฟ้าพลังงานลมเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

โดย

นางสาวอัญชลี ประภัสสรพิทยา

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษศ อุตมวงศ์เสรี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนირ์ววงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. บันฑิต เอื้ออารณ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษศ อุตมวงศ์เสรี)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ประดิษฐ์ เพ็องฟู)

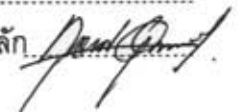
อัญชลี ประภัสสรพิทยา : การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้า  
พลังงานลม เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า . (DETERMINING OPTIMAL  
BATTERY CAPACITY OF WIND GENERATOR WITH POWER FLUCTUATION  
CONSIDERATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี, 87 หน้า.

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ ได้รับความสนใจในการนำมาผลิตไฟฟ้า แต่ปัญหา  
ใหญ่ที่พบจากการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม คือ กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความถี่ทางไฟฟ้าที่  
ได้จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากความไม่แน่นอนของความเร็วลม ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า  
และเสถียรภาพของไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย การติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบ  
ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการติดตั้งแบตเตอรี่ คือ ขนาดของ  
แบตเตอรี่จะต้องมีความเหมาะสมกับกำลังการผลิต ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่สามารถลดการแกว่งของ  
กำลังไฟฟ้า และช่วยควบคุมต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินความจำเป็น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอ วิธีการคำนวณ หาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อช่วย  
แก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ จะเริ่มจากการจำลอง ความเร็วลม  
ที่ผ่านกังหันในแต่ละชั่วโมงซึ่งรวมผลของความไม่แน่นอนด้วยแบบจำลองที่เหมาะสม และคำนวณ  
กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความถี่ทางไฟฟ้า ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิด  
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยความเร็วได้ โดยใช้วิธีการติดตามกำลังลมสูงสุด ในส่วน  
ของแบตเตอรี่นั้นจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว ร่วมกับวิธีการ  
เชิงเลขเพื่อคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยจะเลือกใช้ขนาดแบตเตอรี่จาก ข้อมูล  
จริงของบริษัทผู้ผลิต วิธีการที่นำเสนอนี้ได้ถูกทดสอบกับระบบทดสอบที่กำหนดขึ้น ซึ่งผลจากการ  
ทดสอบพบว่าเป็นที่น่าพอใจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
ปีการศึกษา.....2553.....

ลายมือชื่อนิสิต.....อ.อ. ภัทรมะณี.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....



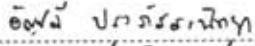

## 5270714521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR / LEAD-ACID BATTERY / BATTERY CAPACITY / VOLTAGE DEVIATION / FREQUENCY DEVIATION

ANCHALEE PRAPATSORNPITTAYA: DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF WIND GENERATOR WITH POWER FLUCTUATION CONSIDERATION. ADVISOR: ASST.PROF. KULYOS AUDOMVONGSEREE, Ph.D., 87 pp.

Wind has been widely used to generate electricity in recent years. However, it has some disadvantages, e.g. the generated power, comprising voltage magnitude and frequency are intermittent due to the variation of wind speed. Injection of such power into the utility grid affects the quality of electricity and system stability, in particular. Installing appropriate size of battery to the generation system could mitigate these difficulties. An optimal battery capacity could enable the total generation to meet the load demand, decrease fluctuation, and can limit total investment costs.

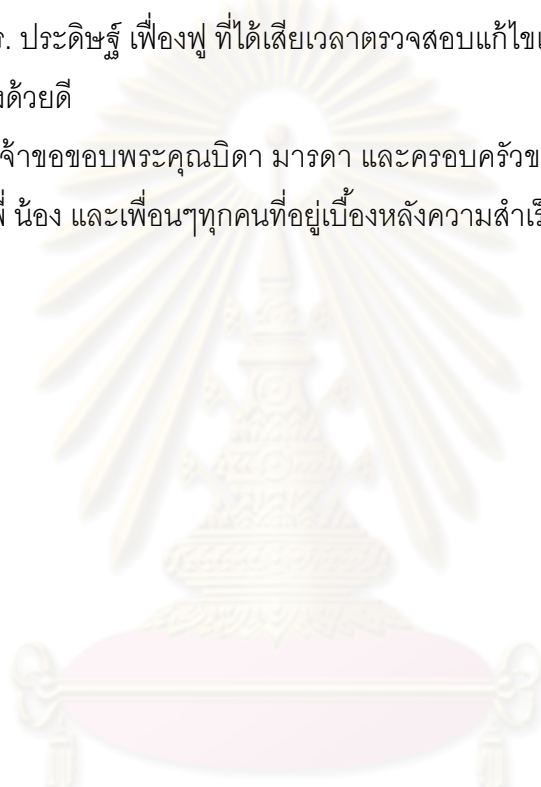
The purpose of this thesis is to determine the appropriate capacity of battery for the fluctuated output power elimination. Firstly, wind speed is simulated by a mathematical model considering uncertainty of the wind speed. Then the power output, voltage, and frequency can be computed based on Doubly-Fed Induction Generator. To determine an optimal battery capacity, the mathematical model of lead-acid battery is applied altogether with a numerical method. The battery's capacity will be chosen from actual manufacturer's data. This proposed algorithm has tested, and satisfactory results have been obtained.

Department : .....	Electrical Engineering .....	Student's Signature	
Field of Study : .....	Electrical Engineering .....	Advisor's Signature	
Academic Year : .....	2010 .....	Co-Advisor's Signature	.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี  
ยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้  
คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา  
รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบ  
วิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนบ  
บุญ หุนเจริญ และดร. ประดิษฐ์ เพ็องฟู ที่ได้เสียเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์  
ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทำยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ  
ตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนๆทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง.....	5
2.1 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม.....	5
2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้.....	6
2.3 ลักษณะกลศาสตร์การเคลื่อนไหวของอากาศ.....	8
2.4 แบบจำลองกังหันลม.....	9
2.5 แบบจำลองความเร็วลม.....	10
2.6 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG).....	13
2.6.1 แบบจำลองส่วนกลไฟฟ้า.....	14
2.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง.....	14
2.6.3 แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์.....	16
2.6.4 แบบจำลองของตัวควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง.....	18
2.6.4.1 แบบจำลองของตัวควบคุมทางกล.....	19
2.6.4.2 แบบจำลองของตัวควบคุมทางไฟฟ้า.....	19
2.6.4.2.1 การควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์.....	19

	หน้า
2.6.4.2.2 การควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งกริด.....	21
บทที่ 3 หลักการและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่และวงจรแปลงกำลัง.....	22
3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน.....	22
3.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่.....	25
3.3 ชนิดของแบตเตอรี่.....	26
3.4 การต่อชุดแบตเตอรี่.....	29
3.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม.....	29
3.4.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน.....	30
3.4.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน.....	31
3.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลัง.....	31
3.5.1 วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง.....	32
3.5.2 วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ.....	32
บทที่ 4 แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วและการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม.....	34
4.1 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว.....	34
4.2 แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว.....	35
4.2.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย.....	35
4.2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน.....	36
4.2.3 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเชิงเส้น.....	37
4.2.4 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบวงจรพลวัตลำดับที่สี่.....	37
4.2.5 แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่.....	38
4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว.....	39
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์.....	42
4.5 การหาความจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่.....	43
4.5.1 การปรับค่าตัวแปรให้สอดคล้องกับแบตเตอรี่ที่เลือกใช้.....	43
4.5.2 กำลังไฟฟ้าที่ผ่านคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์.....	45
4.5.3 การคำนวณความจุของแบตเตอรี่.....	46
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	51
5.1 ระบบทดสอบ.....	51
5.2 ผลการทดสอบ.....	52



5.2.1 ผลการทดสอบการสู่มความเร็วลม.....	52
5.2.2 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า แรงดัน ความเร็วโรเตอร์ เมื่อผ่านเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง และความถี่ของระบบ.....	56
5.2.3 ผลการหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม.....	59
5.2.3.1 กรณีที่ 1 เมื่อความต้องการทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 MW.....	61
5.2.3.2 กรณีที่ 2 เมื่อความต้องการทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.72 MW.....	64
5.2.4 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า แรงดัน ความเร็วโรเตอร์และความถี่ที่เข้าสู่ระบบ เมื่อหลังการติดตั้งแบตเตอรี่.....	68
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	73
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	84
ภาคผนวก ง.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ.....	28
ตารางที่ 5.1 สูตรค่า $\sigma$ ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการหาค่าความเร็วลม.....	53
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า.....	59
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุ.....	59
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่คายประจุ.....	60
ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณหาแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้.....	60
ตารางที่ 5.6 ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมขนาด 2 เมกะวัตต์	68
ตาราง ก.1 ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือนในปี 2005 วัดที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต...	79
ตาราง ก.2 ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละฤดู .....	79
ตาราง ก.3 ระดับความเร็วลมในการผลิตกำลังไฟฟ้า.....	80
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางและคอนเวอร์เตอร์.....	81
ตารางที่ ข.2 ค่าของตัวแปรในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง.....	81
ตารางที่ ข.3 ค่าเริ่มต้นของจุดทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม.....	82
ตารางที่ ข.4 ค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม.....	82
ตารางที่ ข.5 ตัวแปรที่ใช้ควบคุมมุมพิชของกังหันลม.....	82
ตารางที่ ข.6 ตัวแปรควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์.....	82
ตารางที่ ข.7 ตัวแปรควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	82
ตารางที่ ข.8 ตัวแปรควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์.....	83
ตารางที่ ข.9 ตัวแปรควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์.....	83
ตารางที่ ข.10 ตัวแปรควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กริด.....	83
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัลลของระบบ.....	84
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลสายส่งของระบบ.....	84
ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการอัดประจุของแบตเตอรี่ของบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM.....	85
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการคายประจุของแบตเตอรี่ของบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM.....	85
ตารางที่ ง.3 ค่าเริ่มต้นในการคำนวณความจุของแบตเตอรี่.....	86

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม.....	6
รูปที่ 2.2 การทำงานในโหมดชั่งชิงโครนัสและชูปเปอร์ชิงโครนัส.....	7
รูปที่ 2.3 ระดับความเร็วลมกับกังหันลม.....	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ ที่มุมพิช 0 องศา.....	10
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการกระจายของความเร็วลมในชั่วโมงที่ 4 ของทุกวันใน 1 ปี.....	11
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง.....	14
รูปที่ 2.7 แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ DFIG ในแกน $d - q$ .....	15
รูปที่ 2.8 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส.....	17
รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและขนาดแรงดัน .....	20
รูปที่ 3.1 ภาพร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้า.....	22
รูปที่ 3.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม.....	29
รูปที่ 3.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน.....	30
รูปที่ 3.4 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน.....	31
รูปที่ 4.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย.....	35
รูปที่ 4.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน.....	35
รูปที่ 4.3 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเชิงเส้น.....	37
รูปที่ 4.4 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบวงจรพลวัตลำดับที่สี่.....	38
รูปที่ 4.5 แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่.....	38
รูปที่ 4.6 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันชนิด 3 เฟส 6 พัลส์.....	42
รูปที่ 4.7 แผนผังขั้นตอนการคำนวณหาค่าความจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสม.....	50
รูปที่ 5.1 แผนภาพของระบบที่ใช้ทดสอบ.....	51
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการหาค่า $\sigma$ .....	52
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูหนาว.....	54
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูร้อน.....	54
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูฝน.....	55
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมทั้งปี.....	55
รูปที่ 5.7 กราฟความถี่ของการกระจายของความเร็วลมทั้งปี.....	56

รูปที่ 5.8 ตัวอย่างผลกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่	57
รูปที่ 5.9 ตัวอย่างผลขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่.....	57
รูปที่ 5.10 ตัวอย่างผลความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่.....	58
รูปที่ 5.11 ตัวอย่างผลความถี่ของระบบ ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่.....	58
รูปที่ 5.12 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูหนาว ในกรณีที่ 1.....	61
รูปที่ 5.13 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูร้อน ในกรณีที่ 1.....	62
รูปที่ 5.14 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูฝน ในกรณีที่ 1.....	62
รูปที่ 5.15 กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลลมความเร็วลม 1,000 ชุดข้อมูลในหนึ่งปี ในกรณีที่ 1.....	63
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูหนาว ในกรณีที่ 2.....	65
รูปที่ 5.17 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูร้อน ในกรณีที่ 2.....	65
รูปที่ 5.18 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูฝน ในกรณีที่ 2.....	66
รูปที่ 5.19 กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลลมความเร็วลม 1,000 ชุดข้อมูลในหนึ่งปี ในกรณีที่ 2.....	67
รูปที่ 5.20 ตัวอย่างผลการทดสอบกำลังไฟฟ้ารวมที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่.....	70
รูปที่ 5.21 ตัวอย่างขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบตเตอรี่.....	70
รูปที่ 5.22 ตัวอย่างความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังจากติดตั้งแบตเตอรี่.....	71
รูปที่ 5.23 ตัวอย่างความถี่ไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบหลังจากติดตั้งแบตเตอรี่.....	71
รูปที่ ๓.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาจากข้อมูลที่มีอยู่.....	86

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การเจริญเติบโตของเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้อัตราการการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนออกสู่บรรยากาศสูงขึ้น ประกอบกับในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ปริมาณเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลมีปริมาณลดลงอย่างมาก หลายประเทศเริ่มมีการตื่นตัวเกี่ยวกับปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการนำแหล่งพลังงานธรรมชาติมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล เนื่องจากแหล่งพลังงานธรรมชาติเป็นพลังงานที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ ไม่มีค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิง และเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันการใช้พลังงานลมในการผลิตไฟฟ้ามีสัดส่วนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ปัญหาหลักของการนำพลังงานลมมาใช้ก็คือ กำลังผลิต ขนาดของแรงดันไฟฟ้า และความถี่ที่ได้ จะมีค่าไม่สม่ำเสมอเนื่องจากความเร็วลมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศและสภาพพื้นที่ เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอไหลเข้าสู่ระบบ อาจส่งผลกระทบต่อระบบเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพและคุณภาพของไฟฟ้าได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมนั้นมีหลายชนิด แต่ชนิดที่นิยมใช้มากในปัจจุบันคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ (Variable Speed Doubly Fed Induction Generator; VS-DFIG) ที่มีคอนเวอร์เตอร์ต่อเชื่อมขดลวดโรเตอร์กับระบบไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีคือ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มีขนาดเล็ก เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่คอนเวอร์เตอร์มีค่าเพียง 25-30% ของกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการลงทุน สำหรับโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ DFIG นั้น ฝั่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อโดยตรงกับระบบไฟฟ้า ส่วนทางด้านโรเตอร์จะต่อกับระบบไฟฟ้าโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว การควบคุมในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG นี้ จะมีการควบคุม 2 ส่วน คือ การปรับมุมพิชของใบพัดของกังหันลม ซึ่งเป็นการควบคุมทางกล เพื่อป้องกันความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมมีค่าสูง และการควบคุมทางไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ซึ่งจะแยกเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟโดยใช้วิธีการควบคุมแบบติดตามกำลังลมสูงสุด (Maximum Wind Power Tracking; MPT) ลักษณะการติดตามนี้สามารถทำได้โดยการปรับความเร็วเชิงมุมของกังหันลม เพื่อที่จะให้ได้กำลังขาออกจากกังหันลมมีค่ามากที่สุด



ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพิ่มมากขึ้นในหลายประเทศ ซึ่งส่วนสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงคือ ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะปัญหาด้านเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้าเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ปัญหาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าที่กล่าวมานี้ สามารถถูกแก้ไขได้โดยการติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อช่วยเก็บกักกำลังไฟฟ้าเมื่อผลิตได้มากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการ หรือช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้าส่วนที่ขาดเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการ สิ่งที่สำคัญในการติดตั้งแบตเตอรี่ที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ การเลือกขนาดแบตเตอรี่ให้มีความเหมาะสมกับกำลังการผลิตซึ่งจะทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการของโหลด และลดขนาดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบซึ่งช่วยลดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพและคุณภาพของไฟฟ้าที่ผลิตได้ นอกจากนี้ ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมก็จะทำให้ต้นทุนการผลิตโดยรวมมีค่าไม่สูงเกินความจำเป็นอีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเพื่อช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ที่นำเสนอจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของความเร็วลม ต่อมาจะพิจารณากำลังลมที่ออกจากกังหันลมซึ่งค่านี้จะคำนวณได้จากกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของอากาศ จากนั้น เราจะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้า แรงดัน ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และความถี่ของระบบได้ โดยอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟขาออก และช่วยควบคุมแรงดันของระบบ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผ่านออกมาเข้าสู่ระบบส่งไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดตามวิธีการติดตามกำลังลมสูงสุด ถึงแม้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีค่ามากเพียงพอกับความต้องการของโหลดก็ตาม แต่กำลังไฟฟ้าที่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้ามืดค่าไม่คงที่ตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อกำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ดังกล่าวผ่านเข้าสู่ระบบส่งไฟฟ้าจะทำให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพจึงต้องมีการติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีขนาดที่เหมาะสมเข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถช่วยลดผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีแบตเตอรี่ติดตั้งอยู่ด้วย โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเบี่ยงเบนความเร็วได้
2. เพื่อศึกษาการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้วิธีการติดตามกำลังสูงสุด

3. เพื่อศึกษาการเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาระบบไฟฟ้าเป็นระบบสามเฟสสมดุล
2. ละเลยผลของสภาวะชั่วคราวทางด้านขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. กำหนดให้ความต้องการไฟฟ้าของโหลดมีค่าคงที่
4. กำหนดให้โครงสร้างของบัสบัสเป็นบัสที่มีแรงดัน มุมเฟส และความถี่คงที่
5. ไม่พิจารณาผลของฮาร์โมนิกส์ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าพลังงานลม
6. พิจารณาเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว
7. ไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อแบตเตอรี่

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยค้นคว้าจากหนังสือและวารสารทางวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาวิธีการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยใช้วิธีการติดตามกำลังสูงสุด
3. ศึกษาวิธีการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบเหนี่ยวนำสองทาง ชนิดปรับความเร็วได้
4. ศึกษาโครงสร้างและแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว
5. ศึกษาวิธีการคำนวณเพื่อเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับระบบ
6. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม แบตเตอรี่ และระบบที่จะใช้ทดสอบพร้อมทั้งเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง
7. ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม
8. ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพของโปรแกรมกับระบบทดสอบที่กำหนด
9. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
10. เรียบเรียงผลงานวิจัยเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. วิธีการคำนวณเพื่อเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่จะติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีการติดตั้งแบตเตอรี่

### 3. โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

#### 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอได้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมเป็นดังต่อไปนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานกับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้

บทที่ 3 ในเบื้องต้นจะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดต่างๆ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ ชนิดของแบตเตอรี่ ลักษณะทางสมรรถนะของแบตเตอรี่ การต่อชุดแบตเตอรี่ และในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลัง

บทที่ 4 ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วที่ใช้ในอดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองของแบตเตอรี่แต่ละชนิด แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึง ขั้นตอนในการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

บทที่ 5 จะกล่าวถึงผลการคำนวณความจุแบตเตอรี่ด้วยวิธีที่นำเสนอ โดยจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ (1) การทดสอบการสูมความเร็วลม (2) การทดสอบกำลังไฟฟ้าแรงดัน เมื่อผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง และความถี่ที่เข้าสู่ระบบ (3) การหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม และส่วนสุดท้ายคือ (4) การทดสอบกำลังไฟฟ้า แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และความถี่ที่เข้าสู่ระบบเมื่อใช้ขนาดแบตเตอรี่ตามที่คำนวณได้

บทที่ 6 จะกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

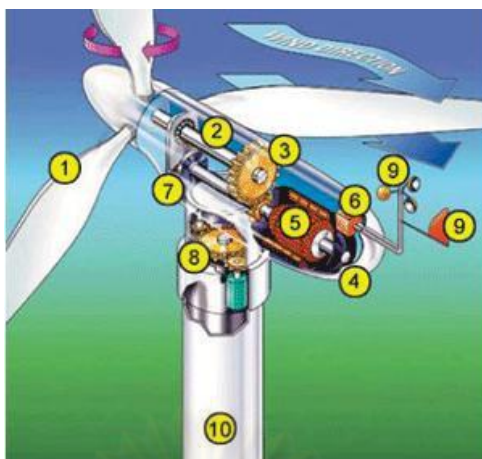
# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิด ปรับเปลี่ยนความเร็วได้

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้

### 2.1 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ส่วนประกอบสำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อาจแบ่งได้ดังนี้

1. **ใบพัด** เป็นตัวรับพลังลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล ซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน
2. **เพลาแกนหมุน** จะรับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านระบบกำลัง เพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. **ห้องส่งกำลัง** เป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุน ระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. **ห้องเครื่อง** ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม ใช้บรรจุระบบต่างๆ ของกังหันลม เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม
5. **เครื่องกำเนิดไฟฟ้า** ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
6. **ระบบควบคุมไฟฟ้า** เป็นตัวควบคุมการทำงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ
7. **ระบบเบรก** เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลม เกินความสามารถของกังหัน ที่จะรับได้ และในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา
8. **แกนคอกหมุนรับทิศทางลม** เป็นตัวควบคุมการหมุนห้องเครื่อง เพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลมโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่เชื่อมต่อให้มีความสัมพันธ์ กับหางเสือรับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง
9. **เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม** เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกอื่นๆ ได้ถูกต้อง
10. **เสากังหันลม** เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

## 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิยมใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในปัจจุบัน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดสามารถปรับความเร็วได้ (Variable Speed Induction Generator; VS-DFIG) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดพันที่มีคอนเวอเตอร์สองตัวต่อเชื่อมแบบหันหลังชนกัน (back-to-back) ผ่านวงจรไฟตรง ซึ่งคอนเวอเตอร์ดังกล่าวเชื่อมระหว่างขดลวดโรเตอร์และระบบไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางนี้จะทำงานใน 2 สถานะ คือ การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส เรียกว่า ซูเปอร์ซิงโครนัส (Super-synchronous) ซึ่งที่สถานะนี้ ค่าสลลิปจะมีค่าเป็นลบ ( $s > 0$ ) และการทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือเรียกว่า ซับซิงโครนัส (Sub-synchronous) ซึ่งที่สถานะนี้ ค่าสลลิปจะมีค่าเป็นบวก ( $s < 0$ ) โดยค่าสลลิปดังกล่าวสามารถนิยามได้ดังนี้ [2]

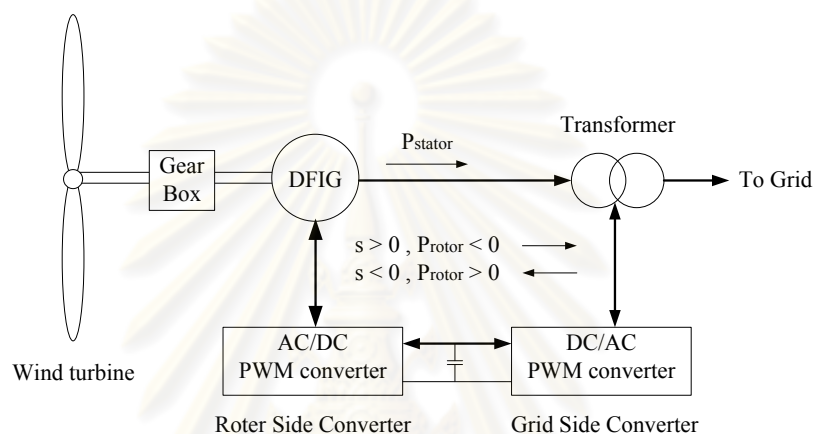
$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.1)$$

โดยที่

- $s$  คือ ค่าสลลิป (slip)
- $\omega_s$  คือ ค่าความเร็วซิงโครนัส
- $\omega_r$  คือ ค่าความเร็วโรเตอร์



การทำงานทั้งในช่วงซิปซิงโครนัสและซูปเปอร์ซิงโครนัสนั้น คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อเชื่อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องสามารถทำงานกับการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ทั้งสองทิศทาง กล่าวคือเมื่อละเลยค่ากำลังสูญเสียในขดลวดโรเตอร์และสเตเตอร์ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ซูปเปอร์ซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจริงจากขดลวดโรเตอร์จะไหลไปสู่ระบบไฟฟ้า ในทางกลับกัน ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ซิปซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดโรเตอร์ โดยทั้งสองโหมดการทำงาน กำลังไฟฟ้าจริงจากขดลวดสเตเตอร์จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า [2] การทำงานดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทำงานในโหมดซิปซิงโครนัสและซูปเปอร์ซิงโครนัส

กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$P_r \cong -sP_s \quad (2.2)$$

$$P_s \cong \frac{P_{grid}}{(1-s)} \quad (2.3)$$

โดยที่

$P_s$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากขดลวดสเตเตอร์

$P_r$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าหรือออกจากขดลวดโรเตอร์

$P_{grid}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

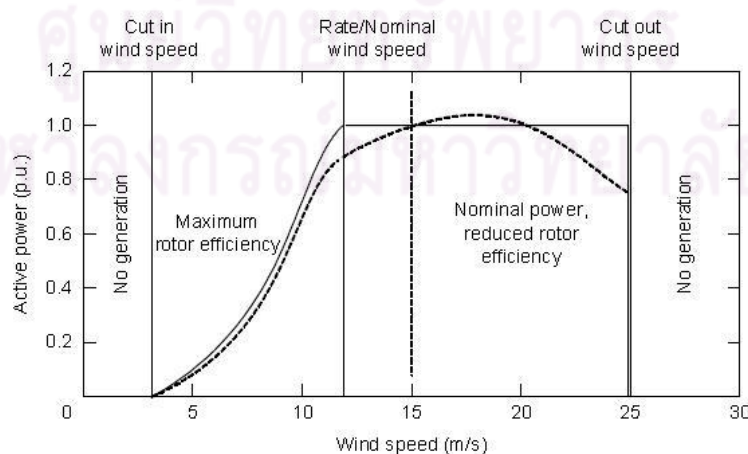
โดยปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานอยู่ในช่วงประมาณ  $\pm 30\%$  ของความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นค่าสลิปจะมีค่าประมาณอยู่ระหว่าง -0.3 ถึง 0.3 ซึ่งจะส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวที่ต่อเชื่อมอยู่มีขนาดกำลังพิกัดเพียงร้อยละ 25-30 ของกำลังพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะเห็น

ว่าการต่อคอนเวอร์เตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ สามารถลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ได้ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ได้

## 2.3 ลักษณะกลศาสตร์การเคลื่อนไหวของอากาศ

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าลมผิวพื้นซึ่งหมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน ระดับความเร็วลมกับกังหันลม [3] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

1. ความเร็วลมระดับที่กังหันลมสามารถเริ่มต้นทำงานและผลิตไฟฟ้าได้เรียกว่า ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in Wind Speed) มีความเร็วประมาณ 2.5-4 เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วระดับนี้อาจได้กำลังน้อยหรืออาจไม่ได้เลย ถ้าความเร็วลมต่ำกว่านี้ กังหันลมจะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้
2. ความเร็วลมที่มากกว่าความเร็วลมเข้าระบบแต่มีค่าน้อยกว่าความเร็วลมเต็มพิกัด จะเป็นความเร็วลมที่ทำให้กังหันลมทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum rotor efficiency) โดยกำลังที่ผลิตได้จะมีค่าขึ้นอยู่กับมุมพิชและอัตราส่วนความเร็วอด
3. ความเร็วลมระดับที่จ่ายกำลังได้เต็มพิกัดอย่างต่อเนื่องเรียกว่า ความเร็วลมเต็มพิกัด (Nominal or Rated Wind Speed) มีความเร็วประมาณ 12-15 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง
4. ความเร็วลมระดับสูงที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้จำเป็นต้องหยุดการทำงานเพื่อความปลอดภัยของระบบเรียกว่า ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind Speed) มีความเร็วประมาณ 25 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 2.3 ระดับความเร็วลมกับกังหันลม

## 2.4 แบบจำลองกังหันลม

เมื่อลมผ่านเข้ากังหันลมแล้ว กังหันลมจะเปลี่ยนจากกำลังงานจลน์จากความเร็วลมให้เป็นกำลังงานกล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.4) โดยกำลังลมนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากความไม่แน่นอนของความเร็วลม [4-5]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 v_w^3 \quad (2.4)$$

โดยที่

$P_w$  คือ กำลังลมที่ผ่านกังหันลมแล้ว (MW)

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง

$R$  คือ รัศมีของใบพัดของกังหัน (m)

$v_w$  คือ ความเร็วลม (m/s)

จากกฎพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของของไหลของเบทซ์ (Betz's law) จะพบว่ากังหันลมไม่สามารถแปลงกำลังทั้งหมดที่ผลิตได้เป็นกำลังกล ซึ่งค่าที่บ่งบอกว่ากังหันลมสามารถแปลงกำลังจลน์เป็นกำลังกลได้มากน้อยเพียงใด คือค่าสัมประสิทธิ์กำลัง  $C_p$  (Power Coefficient) โดยปกติค่านี้จะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 59.3%

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังนี้เป็นตัวแปรไม่เชิงเส้น มีค่าขึ้นกับมุมพิชของใบพัด (Blade pitch angle;  $\beta$ ) และอัตราส่วนความเร็วยอด (Tip Speed Ratio;  $\lambda$ ) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์กำลัง,  $C_p$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.5)

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.5)$$

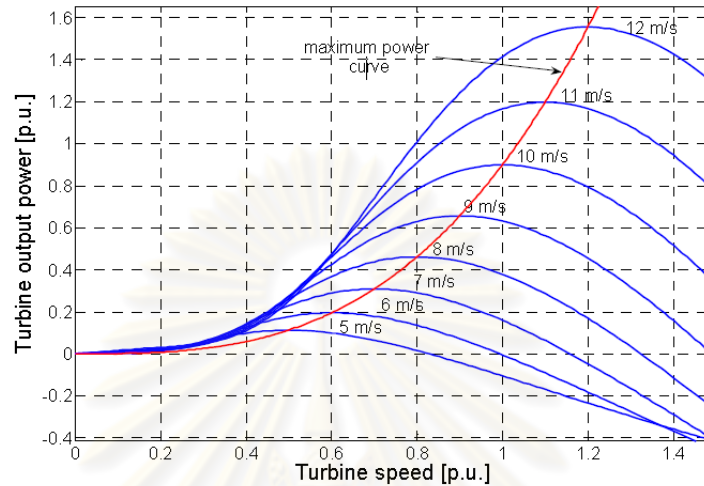
โดยที่

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

และ

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w}$$

เนื่องจากกราฟกำลังกลขาออกของกังหันลมที่ได้จากผู้ผลิตแต่ละรายมีลักษณะคล้ายกัน ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นค่า  $C_p$  จึงสามารถประมาณได้จากสมการข้างต้น โดยค่าสัมประสิทธิ์  $c_1 - c_6$  จะมีค่าดังนี้  $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$ ,  $c_6 = 0.0068$  [6]



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ ที่มุมพิช 0 องศา

## 2.5 แบบจำลองความเร็วลม

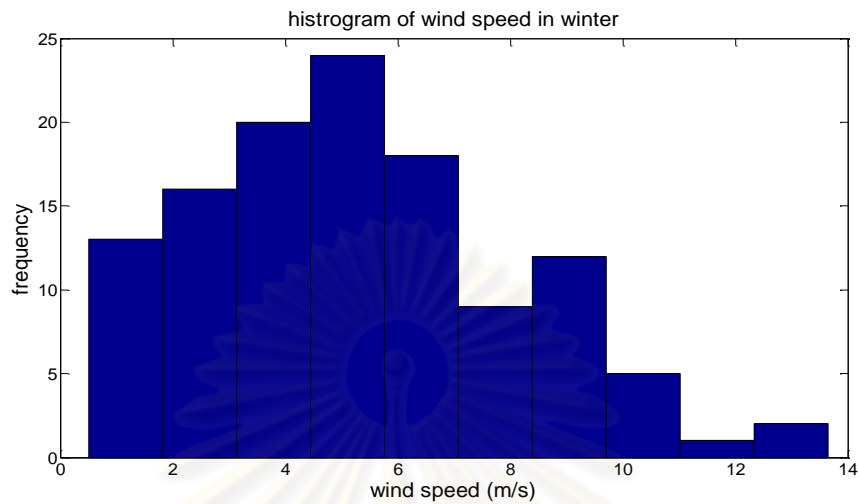
ความเร็วลมจะมีค่าขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพื้นที่ ในวิทยานิพนธ์นี้ จะจำลองความเร็วลม ( $v_{w,t}$ ) ออกเป็น 2 ส่วน คือ ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง ( $v_{trend,t}$ ) จะแทนการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามฤดูกาล และเวลา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ช้า จึงถือว่าความเร็วส่วนนี้มีค่าคงที่ได้ และในส่วนของความไม่แน่นอนของความเร็วลม ( $v_{noise,t}$ ) จะแทนการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วงเวลาสั้นๆ รอบค่าความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนแรก [7] ดังสมการที่ (2.6)

$$v_{w,t} = v_{trend,t} + v_{noise,t} \quad (2.6)$$

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้  $v_{trend,t}$  มีค่าคงที่ในแต่ละชั่วโมงที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ส่วนค่า  $v_{noise,t}$  จะเป็นค่าที่สุ่มจากกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Process)

ถ้านำความเร็วลมในแต่ละชั่วโมงของทุกวันมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ดังรูปที่ 2.5 จะพบว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นกราฟที่มีการกระจายแบบล็อกนออมอล (lognormal distribution)

โดยจะสามารถใช้ทฤษฎี Ito's Lemma ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันในกระบวนการเชิงสุ่มกับสมการ (2.6) เพื่อหาค่าความเร็วลมของช่วงเวลาที่สนใจได้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการกระจายของความเร็วลมในชั่วโมงที่ 4 ในฤดูหนาว

Ito's Lemma เป็นทฤษฎีที่ใช้เกี่ยวกับแคลคูลัสของกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Calculus) โดยหากกำหนดให้กระบวนการเชิงสุ่มของตัวแปรที่เราสนใจ  $S$  มีค่าขึ้นกับเวลาและค่าความไม่แน่นอนที่อธิบายได้ด้วยกระบวนการวีเนอร์ ( $W_t$ ) ดังสมการที่ (2.7)

$$dS = a(S, t)dt + b(S, t)dW_t \quad (2.7)$$

เมื่อใช้ Ito's Lemma แล้ว จะสามารถแสดงอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร  $S$  และ  $t$  หรือ  $f(S, t)$  ได้ดังนี้

$$df = \left( \frac{\partial f}{\partial t} + a \frac{\partial f}{\partial S} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \right) dt + b \frac{\partial f}{\partial S} dW \quad (2.8)$$

โดยที่

$f$  คือ ฟังก์ชันที่มีค่าขึ้นกับตัวแปร  $x$  และ  $t$

$W_t$  คือ กระบวนการสุ่มแบบวีเนอร์ (Wiener Process) ที่มีการกระจายแบบปกติ และมีความแปรปรวนแปรตามเวลา  $W_t \sim N(0, t)$



เราสามารถนำทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นมาปรับใช้กับสมการที่ (2.6) เพื่อสร้างสมการแบบจำลองความเร็วลมได้ โดยในขั้นตอนแรก เพื่อลดรูปในการเขียนสมการ จะกำหนดให้  $a = v_{trend,t}$  และ  $v = v_{noise,t}$  ซึ่งจากสมการที่ (2.6) เราจะหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน ได้ดังสมการ

$$dv_{w,t} = da + dv \quad (2.9)$$

ซึ่ง  $da$  จะมีค่าเป็น 0 เนื่องจาก  $v_{trend,t}$  เป็นค่าคงที่ ส่วน  $dv$  จะมีค่าตามกระบวนการเชิงสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนขึ้นกับความเร็วมุมและเปลี่ยนแปลงตามเวลา นั่นคือ  $dv \sim N(0, \sigma^2 \cdot v_w^2 dt)$  เมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (2.9) จะพบว่า

$$dv_{w,t} = dv = \sigma(a + v)dW \quad (2.10)$$

โดยที่

$dW$  คือ  $Z \cdot \sqrt{dt}$  และ  $Z$  คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ

สมการที่ (2.10) สามารถพิจารณาได้เป็นกระบวนการเชิงสุ่ม ที่ไม่ขึ้นกับเวลาดังนี้

$$dv = 0 dt + \sigma(a + v)dW \quad (2.11)$$

จาก Ito's Lemma ในสมการที่ (2.8) เราจะสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันใดๆซึ่งที่มีค่าขึ้นอยู่กับเวลา  $t$  และความไม่แน่นอนของความเร็วมุม  $v$  ตามกระบวนการใน (2.11) ได้ดังสมการ

$$df(v, t) = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{1}{2} \sigma^2 (a + v)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial v^2} dt + \frac{\partial f}{\partial v} \sigma (a + v) dW \quad (2.12)$$

หากกำหนดให้  $f(v, t) = \ln(a + v)$  จะได้ว่า

$$\frac{\partial f}{\partial v} = \frac{1}{(a + v)} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial v^2} = \frac{-1}{(a + v)^2} \quad (2.14)$$

เมื่อแทนสมการ (2.13) - (2.14) ลงในสมการ (2.12) แล้วจะได้ว่า

$$d\ln(a + v) = -\frac{1}{2}\sigma^2 dt + \sigma dW \quad (2.15)$$

จากนั้น เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (2.15) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น จนถึงเวลาที่สนใจ จะได้ว่า

$$\int_{v_0}^{v_t} d\ln(a + v) = \int_0^t \left(-\frac{1}{2}\sigma^2 dt + \sigma dW\right) \quad (2.16)$$

$$\frac{a + v_t}{a + v_0} = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma^2 t + \sigma W_t\right) \quad (2.17)$$

เมื่อแทนค่า  $a$  และ  $v$  กลับมา ก็จะได้สมการแบบจำลองความเร็วลมที่แต่ละช่วงเวลา ดังสมการ (2.18) ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วลมแต่ละชั่วโมงตามสมการดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบล็อกนอมนอลนั่นเอง

$$v_{w,t} = v_{trend,t-1} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma^2 t + \sigma Z\sqrt{t}\right) \quad (2.18)$$

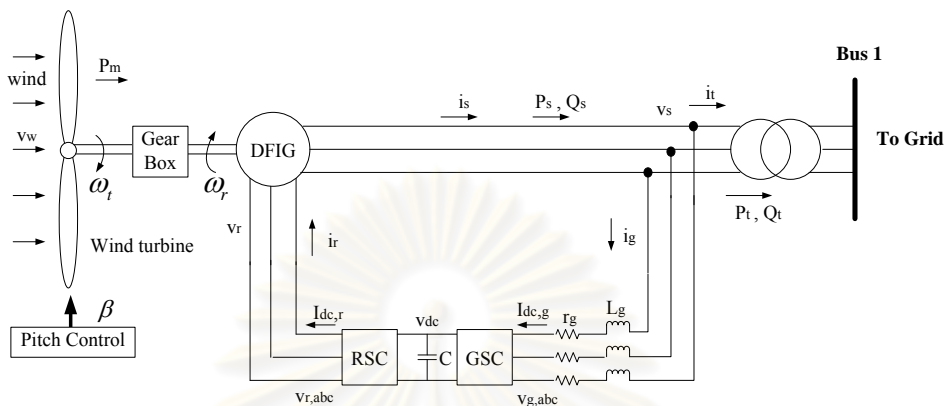
โดยที่

- $v_0$  คือ ความไม่แน่นอนของความเร็วลมที่เวลาเริ่มต้น ซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น 0
- $v_t$  คือ ความไม่แน่นอนของความเร็วลมที่เวลาที่สนใจ
- $v_{trend,t-1}$  คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วลมของชั่วโมงก่อนหน้าจากข้อมูลความเร็วลมจริงเฉลี่ยในแต่ละเดือน ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความเร็วเริ่มต้นของชั่วโมงที่สนใจ (เท่ากับ  $a + v_0$ )
- $\sigma$  คือ ค่าความแปรปรวนของความเร็วลม โดยค่า  $\sigma$  ที่เหมาะสม จะประมาณได้จากวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (Least square error)
- $t$  คือ จุดเวลาที่ต้องการพิจารณา

## 2.6 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG)

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 จากรูปจะพบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะถูกป้อนกระแสเข้าทั้ง 2 ทาง คือ ทั้งทางด้านขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยฝั่งสเตเตอร์จะต่อโดยตรงกับระบบไฟฟ้า แต่ทางด้านโรเตอร์จะต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว (Rotor-side converter และ grid-side converter) ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทั้ง

สองตัวจะต่อกันผ่านวงจรไฟตรง (DC-Link) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้สามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลเข้าหรือออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้น จึงสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าที่แรงดันค่อนข้างคงที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเมื่อความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์มีค่าไม่คงที่ได้ [8-9]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง

### 2.6.1 แบบจำลองส่วนกลไฟฟ้า

แบบจำลองส่วนนี้จะแสดงถึงสถานะของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ โดยส่วนทางกลนี้จะทำหน้าที่แปลงแรงบิดจากกำลังลมเป็นแรงบิดทางกลไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาโครงสร้างทางกลนี้เป็นแบบจำลองแบบมวลก้อนเดียว [8] ดังนั้น สมการพลวัตทางกลไฟฟ้า (Electromechanical dynamic) ของระบบส่วนนี้สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.19)

$$2H_m \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \tag{2.19}$$

โดยที่

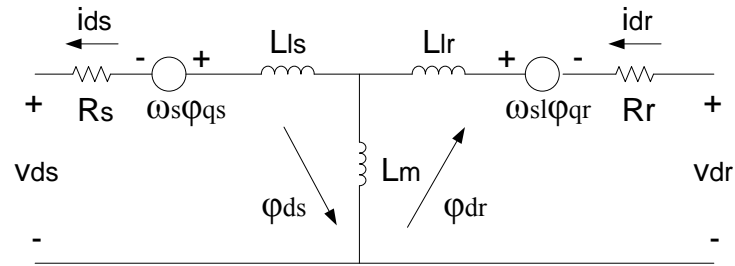
$T_m$  คือ แรงบิดทางกลที่ได้จากกำลังลมที่ผ่านกังหันลมเข้ามา

$T_e$  คือ แรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

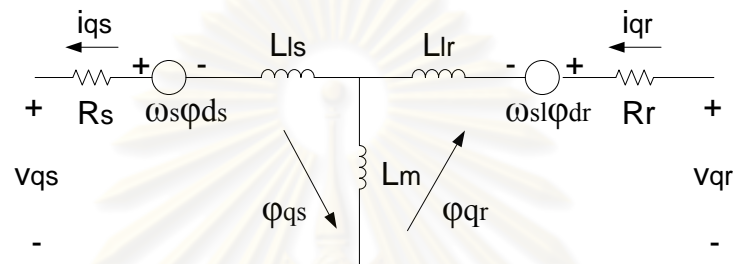
$H_m$  คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 2.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง

แบบจำลองที่ใช้นี้จะละเลยผลของสภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในสเตเตอร์ และจะสามารถแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง [10] ได้ดังรูปที่ 2.7



a) แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน  $d$



b) แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน  $q$

รูปที่ 2.7 แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน  $d - q$

จากรูปที่ 2.7 เราสามารถแสดงสมการของแรงดันและฟลักซ์ค้ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง [10-12] ในแกน  $d - q$  ได้ดังนี้

สมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ :

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \quad (2.20)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \quad (2.21)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_{base}} \rho \phi_{dr} - \omega_{sl} \phi_{qr} \quad (2.22)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_{base}} \rho \phi_{qr} + \omega_{sl} \phi_{dr} \quad (2.23)$$

สมการฟลักซ์ค้ำ :

$$\phi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.24)$$

$$\phi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.25)$$

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \quad (2.26)$$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \quad (2.27)$$

โดยที่

$v_{ds}, v_{qs}$	คือ	แรงดันของขดลวดสเตเตอร์ ในแกน $d, q$ ตามลำดับ
$v_{dr}, v_{qr}$	คือ	แรงดันของขดลวดโรเตอร์ ในแกน $d, q$ ตามลำดับ
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	คือ	ฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ ในแกน $d, q$ ตามลำดับ
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	คือ	ฟลักซ์ของขดลวดโรเตอร์ ในแกน $d, q$ ตามลำดับ
$i_{ds}, i_{qs}$	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ ในแกน $d, q$ ตามลำดับ
$i_{dr}, i_{qr}$	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ในแกน $d, q$ ตามลำดับ
$R_s, R_r$	คือ	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามลำดับ
$L_s, L_r$	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามลำดับ
$L_m$	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดระหว่างสเตเตอร์ และโรเตอร์
$\omega_{sl}$	คือ	ค่าความเร็วสลลิป คำนวณได้จาก $\omega_s - \omega_r$
$\omega_{base}$	คือ	ค่าความเร็วฐานของความเร็วโรเตอร์
$\rho$	คือ	ตัวดำเนินการอนุพันธ์เทียบกับเวลา $\frac{d}{dt}$

เมื่อทราบค่าแรงดันและกระแสของสเตเตอร์และโรเตอร์จากสมการข้างต้นแล้ว เราจะสามารถคำนวณค่าแรงบิดทางไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลออกจากฝั่งสเตเตอร์ ( $P_s, Q_s$ ) และกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่โรเตอร์ ( $P_r, Q_r$ ) ได้จาก

$$T_e = \varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds} \quad (2.28)$$

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (2.29)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (2.30)$$

$$P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (2.31)$$

$$Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \quad (2.32)$$

### 2.6.3 แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์

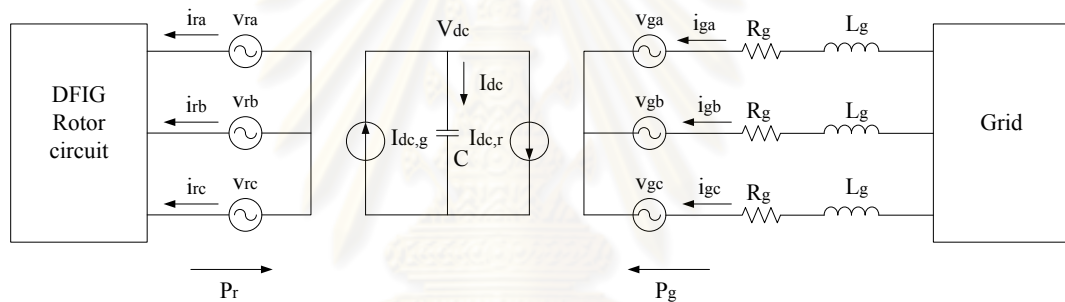
แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส (Current-controlled voltage source) ดังรูปที่ 2.8 คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลง

พลังงานไฟฟ้าสลับที่ความถี่หนึ่งไปเป็นอีกความถี่หนึ่ง โดยผ่านการเชื่อมโยงทางไฟตรง สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองของวงจรไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังนี้ [8-9]

$$I_{dc} = I_{dc,g} - I_{dc,r} = C\rho V_{dc} \quad (2.33)$$

โดยที่

- $I_{dc,g}$  คือ กระแสที่ไหลในวงจรไฟตรงฝั่งระบบไฟฟ้า
- $I_{dc,r}$  คือ กระแสที่ไหลในวงจรไฟตรงฝั่งขดลวดโรเตอร์
- $C$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรไฟตรง
- $\rho$  คือ ตัวดำเนินการอนุพันธ์เทียบกับเวลา  $\frac{d}{dt}$
- $V_{dc}$  คือ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.8 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส

ในสถานะอยู่ตัว  $I_{dc,g} = I_{dc,r}$  ดังนั้นแรงดันที่วงจรไฟตรง ( $V_{dc}$ ) จะมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดการรบกวน  $I_{dc} \neq 0$  จะทำให้  $V_{dc}$  มีค่าเปลี่ยนแปลงหรือแกว่งได้

ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรอง [13] จะสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ (2.34) - (2.35)

$$v_{ds} = R_g i_{dg} + \frac{1}{\omega_{base}} \cdot L_g \rho i_{dg} - \omega_s L_g i_{qg} + v_{dg} \quad (2.34)$$

$$v_{qs} = R_g i_{qg} + \frac{1}{\omega_{base}} \cdot L_g \rho i_{qg} - \omega_s L_g i_{dg} + v_{qg} \quad (2.35)$$

โดยที่

- $v_{dg}, v_{qg}$  คือ แรงดันของคอนเวอร์เตอร์ที่ฝั่งระบบไฟฟ้าในแกน  $d - q$



$i_{dg}, i_{qg}$	คือ	กระแสที่ไหลในวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้าในแกน $d - q$
$R_g$	คือ	ความต้านทานในวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า
$L_g$	คือ	ความเหนี่ยวนำในวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า

จากสมการต่างๆ ข้างต้น จะทำให้สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่วงจรกรองได้ดังสมการ (2.36) - (2.39)

$$P_c = v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg} \quad (2.36)$$

$$Q_c = v_{qg}i_{dg} - v_{dg}i_{qg} \quad (2.37)$$

$$P_g = v_{ds}i_{dg} + v_{qs}i_{qg} \quad (2.38)$$

$$Q_g = v_{qs}i_{dg} - v_{ds}i_{qg} \quad (2.39)$$

โดยที่

$P_c, Q_c$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า

$P_g, Q_g$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า

ส่วนการควบคุมแรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์ จะใช้ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index) ในการควบคุม [13] ดังสมการ (2.40)

$$v_{AC} = \frac{mV_{dc}}{2} \sin(\omega t) \quad (2.40)$$

โดยที่

$v_{AC}$  คือ แรงดันไฟสลับขาออกจากคอนเวอร์เตอร์

$m$  คือ ดัชนีการมอดูเลต

$\omega$  คือ ความถี่ไฟฟ้าขาออกจากคอนเวอร์เตอร์

#### 2.6.4 แบบจำลองของต้งควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง

การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชนิดเหนี่ยวนำสองทาง ประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ การควบคุมทางกล และการควบคุมทางไฟฟ้า

### 2.6.4.1 แบบจำลองของตัวควบคุมทางกล

การควบคุมทางกลจะควบคุมผ่านมุมพิชของใบพัดของกังหันลม โดยเมื่อความเร็วลมค่าสูงผ่านเข้ากังหันลม อาจทำให้กังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายได้ จึงต้องมีการควบคุมดังกล่าว ซึ่งกระทำโดยการปรับมุมพิช ( $\beta$ ) ให้กังหันลมรับพลังงานน้อยลงเมื่อความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงเกินกำหนด การควบคุมมุมพิชของกังหันลมสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.41) ซึ่งจะควบคุมด้วยอัตราความขยายที่แสดงในภาคผนวก ข. และจะมีการจำกัดค่ามุมพิชไม่ให้เกินค่ามุมพิชสูงสุด [6]

$$\beta = K_{\beta}(\omega_r - \omega_{r,max}) \quad (2.41)$$

### 2.6.4.2 แบบจำลองของตัวควบคุมทางไฟฟ้า

การควบคุมทางไฟฟ้าจะอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยแยกออกเป็นารควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์ผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์ (Rotor-side Converter: RSC) และการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า (Grid-side Converter: GSC)

#### 2.6.4.2.1 การควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์

จุดประสงค์ของการควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์ คือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์ รวมถึงเป็นการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการควบคุมกระแสที่ไหลภายในขดลวดโรเตอร์ [8-9, 14]

การควบคุมดังกล่าวนี้ ประกอบด้วยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟโดยใช้กรอบอ้างอิง Stator-flux oriented ซึ่งแกน  $d$  ของกรอบอ้างอิง  $d - q$  จะถูกจัดให้เป็นแนวเดียวกับกับเวกเตอร์ของฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ ( $\varphi_s$ ) นั่นคือ  $\varphi_{ds} = \varphi_s$  และ  $\varphi_{qs} = 0$  เมื่อแทนค่าฟลักซ์ดังกล่าวในสมการสมการแรงดัน (2.20) จะได้ว่า

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} \quad (2.42)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \quad (2.43)$$

และเมื่อแทนค่าในสมการฟลักซ์เชื่อมโยง (2.25) จะพบว่า

$$i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (2.44)$$

$$i_{ds} = \frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{1}{L_s} \varphi_{ds} \quad (2.45)$$

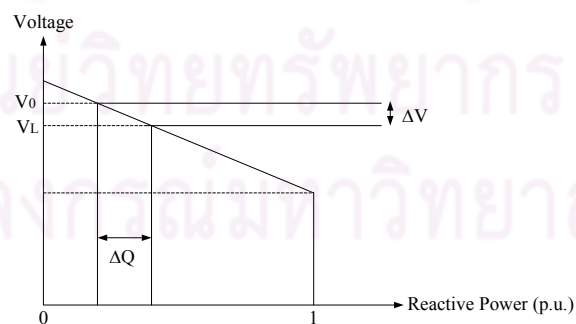
เมื่อละเลยค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s = 0$ ) และให้ความเร็วเชิงโคจร  $\omega_s = 1$  เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการกำลังไฟฟ้า (2.29) - (2.30) จะพบว่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟที่ออกจากสเตเตอร์จะถูกควบคุมด้วยกระแสในโรเตอร์ ดังสมการ (2.46) - (2.47)

$$P_s = \varphi_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (2.46)$$

$$Q_s = \varphi_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{1}{L_s} \varphi_{ds}^2 \quad (2.47)$$

ที่ค่าความเร็วเชิงมุมค่าหนึ่งๆ กำลังไฟฟ้าจริง ( $P_s$ ) จะถูกควบคุมให้ได้ค่าสูงสุด ซึ่งเมื่อความเร็วลมที่เข้ามามีค่าต่ำจนไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ที่ความเร็วค่านั้นกำลังไฟฟ้าจริงจะถูกควบคุมให้มีค่าเป็น 0 p.u. และเมื่อความเร็วลมที่เข้ามามีค่าสูงเกินพิกัดกำลังไฟฟ้าจริงจะถูกควบคุมให้มีค่าเป็น 1 p.u. ซึ่งเป็นค่าพิกัด

ในส่วนของ การควบคุมกำลังรีแอกทีฟนั้น จะมีผลต่อแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งทำให้เราไม่สามารถควบคุมทั้งกำลังรีแอกทีฟและแรงดันพร้อมกันได้ กล่าวคือ ถ้ามีความต้องการกำลังรีแอกทีฟเพิ่มขึ้น แรงดันจะถูกควบคุมให้มีค่าสูงเพื่อช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟ แต่ถ้าความต้องการกำลังรีแอกทีฟลดลง แรงดันจะถูกควบคุมให้มีค่าต่ำลงเพื่อช่วยดูดซับกำลังรีแอกทีฟโดยถ้าต้องการควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ การควบคุมจะทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน  $d$  และการควบคุมจะเป็นไปตามกราฟลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟและแรงดันตามรูปที่ 2.9 ซึ่งมีลักษณะเป็นดรู๊ป (Droop) [2]



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟและขนาดแรงดัน

### 2.6.4.2.2 การควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า

จุดประสงค์ของการควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า คือ เพื่อรักษาแรงดันที่ตกคร่อมวงจรถูกไฟตรงให้มีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนเวอร์เตอร์ และควบคุมการไหลของกำลังรีแอกทีฟที่เข้าวงจรรองที่ระบบไฟฟ้า โดยผ่านการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรองฝั่งระบบไฟฟ้า [8-9,14]

การควบคุมดังกล่าวนี้ ประกอบด้วย การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ โดยใช้กรอบอ้างอิง Stator-voltage oriented ซึ่งแกน  $d$  ของกรอบอ้างอิง  $d-q$  จะถูกจัดให้เป็นแนวเดียวกันกับเวกเตอร์แรงดันของระบบไฟฟ้า ( $v_s$ ) ดังนั้น  $v_s = v_{ds}$  และ  $v_{qs} = 0$  เมื่อแทนค่าแรงดันดังกล่าวในสมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่จรรอง (2.38) - (2.39) จะได้ว่า

$$P_g = v_{ds} i_{dg} \quad (2.48)$$

$$Q_g = -v_{ds} i_{qg} \quad (2.49)$$

จากสมการ (2.33) เมื่อกำหนดให้  $P_{gc} = V_{dc} I_{dc,g}$  และ  $P_{gr} = V_{dc} I_{dc,g}$  จะได้ว่า

$$\rho V_{dc} = \frac{1}{CV_{dc}} (P_g - P_{gr}) \quad (2.50)$$

หากละเลยกำลังสูญเสียในวงจรรองที่ระบบไฟฟ้า จะทำให้  $P_{gc} = P_g$  ดังนั้น

$$\rho V_{dc} = \frac{1}{CV_{dc}} (P_g - P_{gr}) = \frac{1}{CV_{dc}} (S_{base} v_{ds} i_{dg} - P_{gr}) \quad (2.51)$$

โดยที่

$S_{base}$

คือ ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

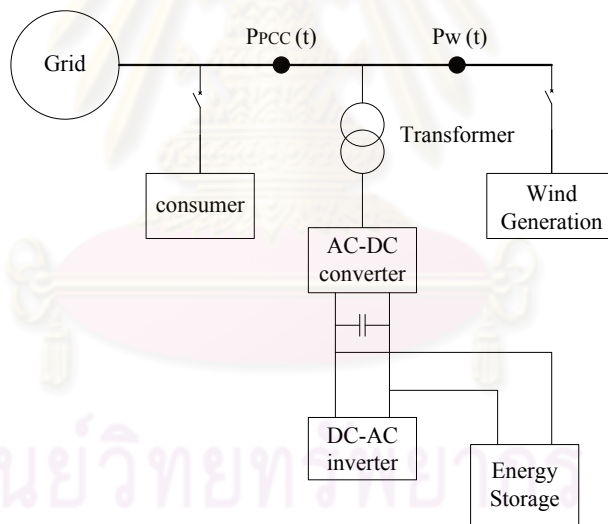
### บทที่ 3

## หลักการและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่และวงจรแปลงกำลัง

บทนี้กล่าวถึงในเบื้องต้นจะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดต่างๆ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ ชนิดของแบตเตอรี่ ลักษณะทางสมรรถนะของแบตเตอรี่ การต่อชุดแบตเตอรี่ และในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลัง

### 3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากการใช้พลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้านั้นจะมีค่าไม่คงที่ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพื่อช่วยให้กำลังการผลิตเพียงพอต่อความต้องการของโหลด ซึ่งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจะต่อขนานอยู่ระหว่างบัสและอุปกรณ์แปลงกำลัง (AC-DC คอนเวอร์เตอร์และ DC-AC อินเวอร์เตอร์) [15,17] ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานสามารถจำแนกออกได้ตามชนิดพลังงานที่เก็บสะสมในอุปกรณ์ ซึ่งสามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้ [15-17]

1. **แบตเตอรี่ (Battery)** แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่เป็นที่นิยมในการใช้กักเก็บพลังงาน แบตเตอรี่จะเก็บพลังงานอยู่ในรูปของเคมีไฟฟ้า โดยปกติแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพในการแปลง

พลังงานด้านเดียวประมาณร้อยละ 85-90 แบตเตอรี่สามารถจำแนกตามการแปลงพลังงานออกได้ เป็น 2 ประเภท คือ

**1.1 แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary battery)** แบตเตอรี่ชนิดนี้จะแปลงพลังงานเคมีใน แบตเตอรี่เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีนี้ไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้ ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่ คายประจุออกหมดแล้ว แบตเตอรี่ก็จะนำไปใช้ไม่ได้อีก แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงนำไปประยุกต์ใช้กับงาน ที่ต้องการพลังงานสูงในช่วงเวลาเดียว

**1.2 แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary battery)** แบตเตอรี่ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุไฟใหม่ได้ ปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเกิดย้อนกลับได้ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุออกไปหมด จะสามารถอัดประจุกลับซ้ำใหม่อีกครั้ง โดยการจ่าย กระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกเข้าแบตเตอรี่ ในขณะที่เกิดการคายประจุ แบตเตอรี่จะแปลง พลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า และเมื่อเกิดการอัดประจุ แบตเตอรี่จะแปลงพลังงานไฟฟ้ากลับ เป็นพลังงานเคมี ขณะเวลาที่แบตเตอรี่อัดประจุหรือคายประจุนั้นจะมีพลังงานเล็กน้อยที่แปลงไป เป็นความร้อน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไปกลับลดลงอยู่ที่ประมาณร้อยละ 70- 80

ในแบตเตอรี่ 1 ตัว จะประกอบไปด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้าจำนวนมากต่อแบบอนุกรมผสมแบบ ขนานเพื่อให้ได้แรงดันและกระแสตามที่ต้องการ ค่าพิกัดของแบตเตอรี่จะบอกอยู่ในรูปของ แรงดันเฉลี่ยเมื่อแบตเตอรี่คายประจุ และความจุในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมงที่แบตเตอรี่จ่ายได้ก่อนที่ แรงดันจะตกลงถึงค่าที่จำกัดไว้ ผลคูณของแรงดันและความจุดังกล่าวจะอยู่ในรูปของค่าพิกัด พลังงาน มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกสู่โหลดได้จาก สภาวะที่แบตเตอรี่อัดประจุเต็ม สถานะการอัด/คายประจุ (State-Of-Charge; SOC) ของ แบตเตอรี่ที่แต่ละช่วงเวลา สามารถนิยามได้ดังสมการที่ 3.1

$$SOC = \frac{\text{ความจุของแบตเตอรี่ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง ที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่}}{\text{ค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง}} \quad (3.1)$$

**2. ล้อช่วยแรง (Flywheel)** อุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดนี้ จะเก็บพลังงานไว้ในรูปของ พลังงานจลน์ โดยผ่านการหมุนของก้านเพลลา ทำให้เกิดพลังงานจากแรงหมุนที่คล้ายกับ เครื่องยนต์ลูกสูบที่ชักขึ้น-ลง ไปหมุนวงล้อเพื่อทำให้เกิดโมเมนตัม โดยพลังงานที่สะสมในล้อช่วย แรงนี้จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)



$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (3.2)$$

โดยที่

$J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งแปรผันตามมวลและรัศมีของวงล้อ

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของการหมุนของวงล้อ

ล้อช่วยแรงดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ล้อช่วยแรงแนวแกนตั้ง และล้อช่วยแรงแนวแกนนอน แต่เนื่องจากการหมุนในแนวแกนตั้ง สามารถสร้างปริมาณพลังงาน จลน์ได้มากกว่าชนิดแกนนอน จึงทำให้เกิดการนำล้อช่วยแรงชนิดแนวแกนตั้ง ไปประยุกต์ใช้เพื่อ ตอบสนองความต้องการในการบริโภคพลังงานมากกว่าชนิดแกนนอน

**3. การอัดอากาศ (Compressed air storage)** อุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดนี้จะเก็บ พลังงานในรูปของพลังงานนิวเมติก (Pneumatical energy) โดยการอัดอากาศลงในถังขนาดใหญ่ ใต้พื้นดิน โครงสร้างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดนี้จะประกอบไปด้วย ชุดอัดอากาศ เครื่อง กำเนิดไฟฟ้า ชุดกังหัน เครื่องกู้สภาพ (Recuperator) และถังขนาดใหญ่ใต้ดิน ซึ่งหลักการทำงานของ อุปกรณ์ชนิดนี้ คือ การนำพลังงานไฟฟ้าที่เหลือใช้จากการบริโภคมาใช้ในการขับเคลื่อน มอเตอร์ไฟฟ้า เพื่ออัดอากาศด้วยความดันสูงเข้าสู่ถังใต้พื้นดิน เมื่ออากาศถูกอัดด้วยแรงดันสูงจึง ทำให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ถ้าต้องการนำเอาอากาศร้อนที่สะสมอยู่มาใช้ ก็สามารถทำได้ โดยการอุ่นอากาศด้วยเครื่องกู้สภาพและนำขึ้นสู่พื้นดินด้วยเครื่องอัดไอ อากาศร้อนจะถูกนำมา เจือกับน้ำมันหรือแก๊สเพื่อทำให้เกิดการจุดติดไฟที่ง่ายขึ้น ซึ่งความร้อนที่ได้จากกระบวนการ ดังกล่าว จะถูกนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในช่วงเวลาที่มีความต้องการบริโภคพลังงานสูง

**4. ระบบสูบน้ำกลับ (Pumped Storage)** มีหลักการคล้ายกับการอัดอากาศ กล่าวคือ ระบบสูบน้ำกลับนี้จะกักเก็บพลังงานไว้ในรูปของพลังงานนิวเมติก โดยการนำพลังงานไฟฟ้าที่เกิน จากการผลิต มาใช้ในการทำงานของปั๊มและมอเตอร์เพื่อสูบน้ำในอ่างเก็บน้ำไปเก็บไว้บนบริเวณที่สูง กว่า จึงทำให้พลังงานศักย์ของน้ำที่สูบขึ้นไปเก็บไว้เพิ่มขึ้น เมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงเกิน กว่าที่จะผลิตได้ จะมีการปล่อยน้ำที่เก็บไว้นั้นลงมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยผ่านกังหันและ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วนำกลับมากำใช้ในการผลิตไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานลม เนื่องจากแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ใช้อย่างแพร่หลาย มีบริษัทผู้ผลิต

หลายราย ทำให้สามารถจัดหาได้โดยง่าย มีหลายชนิดและราคาถูก และที่สำคัญ คือ มีโครงสร้างแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถนำมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ได้ง่าย

### 3.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่สามารถจำแนกได้ด้วยคุณสมบัติหลายประการ เช่น คุณสมบัติทางเคมี, แรงดัน, ขนาด, พลังงานจำเพาะ หรือความจุของแบตเตอรี่, กำลังจำเพาะ (กำลังที่จ่ายออกไปจากแบตเตอรี่) ฯลฯ ซึ่งแบตเตอรี่ต่างชนิด [17] ก็จะมีคุณสมบัติเหล่านี้แตกต่างกันไปด้วย

#### 1. คุณสมบัติทางเคมี

วัสดุทางเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่มีหลายชนิด แต่ชนิดที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย ได้แก่ ตะกั่ว, นิกเกิล และลิเทียม ซึ่งความแตกต่างของวัสดุนี้เอง ทำให้ลักษณะคุณสมบัติของแบตเตอรี่มีความแตกต่างกัน และวิธีการอัดประจุและคายประจุก็มีความแตกต่างกันด้วย

#### 2. แรงดัน

แรงดันในที่นี้หมายถึงแรงดันที่เปิดวงจร ซึ่งค่าแรงดันนี้จะแปรตามวัสดุทางเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่และจำนวนของเซลล์แบตเตอรี่ที่นำมาต่ออนุกรมกัน เมื่อนำแบตเตอรี่ไปต่อกับเครื่องอัดประจุไฟฟ้าหรือโหลด จะต้องคำนึงให้ค่าแรงดันเปิดวงจรนี้ด้วย

#### 3. ความจุของแบตเตอรี่ (Capacity)

ความจุของแบตเตอรี่แสดงถึงค่าพลังงานจำเพาะในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-hour; Ah) ในความเป็นจริงผู้ผลิตแบตเตอรี่จะกำหนดค่าความจุแบตเตอรี่ที่เกินจริง แบตเตอรี่ที่บอกค่าพิกัดค่าๆ หนึ่ง เมื่อนำไปใช้งาน สามารถใช้ในงานที่ต้องการความจุของแบตเตอรี่แตกต่างกันไปจากพิกัดได้ แต่ต้องไม่เกินค่าพิกัด และใช้กับแรงดันที่กำหนดให้ถูกต้อง

#### 4. พลังงานจำเพาะและความหนาแน่นของพลังงาน (Specific energy and energy density)

พลังงานจำเพาะ หมายถึง ความจุของแบตเตอรี่ต่อหน่วยน้ำหนักของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (Wh/kg) ส่วนความหนาแน่นของพลังงาน หมายถึง ความจุของแบตเตอรี่ต่อหน่วยปริมาตรของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อลิตร แบตเตอรี่อาจมีพลังงานจำเพาะสูง แต่อาจจะมีกำลังจำเพาะ (ความสามารถในการจ่ายโหลด) ต่ำ เช่น แบตเตอรี่อัลคาไลน์ เป็นต้น ในทางกลับกัน แบตเตอรี่อาจมีพลังงานจำเพาะต่ำ แต่อาจจะมีกำลังจำเพาะสูง เช่น

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) เป็นต้น พลังงานจำเพาะนี้มีความหมายเหมือนกันกับความจุของแบตเตอรี่

### 5. กำลังจำเพาะ (Specific power)

กำลังจำเพาะ หมายถึง ความสามารถในการจ่ายโหลด หรือปริมาณกระแสที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกไปได้ ซึ่งแสดงถึงความต้านทานภายในมีค่าต่ำ แบตเตอรี่ที่ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ามักจะมีค่ากำลังจำเพาะสูง ในขณะที่มีค่าพลังงานจำเพาะหรือความจุแบตเตอรี่ต่ำ

### 6. ซี-เรต (C-rates)

ซี-เรตจะเป็นค่าที่กำหนดกระแสอัดประจุหรือกระแสดคายประจุ ตัวอย่างเช่น ที่ 1C แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสคายประจุในปริมาณที่เท่ากับค่าพิกัดของความจุแบตเตอรี่ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง หรือ ที่ 0.5C แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสลดลงครึ่งหนึ่ง และที่ 0.1C แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสเป็น  $\frac{1}{10}$  เท่าของค่าพิกัด เป็นต้น ในขณะที่ถ้าเป็นการอัดประจุ 1C จะหมายถึง แบตเตอรี่จะอัดประจุเต็มใน 1 ชั่วโมง และ 0.5C จะบอกว่า การอัดประจุต้องใช้เวลา 2 ชั่วโมง เป็นต้น

### 7. โหลด (Load)

โหลดหรือที่เรียกว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force; EMF) โหลดนี้จะเป็นตัวดึงพลังงานจากแบตเตอรี่ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ควรมีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร แต่เนื่องจากภายในแบตเตอรี่มีความต้านทานภายใน เมื่อจ่ายกระแสออกจะทำให้เกิดแรงดันตก

## 3.3 ชนิดของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่สามารถอัดกระแสไฟใหม่ได้ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด แต่ชนิดที่นิยมใช้มี 5 ชนิด [17-18] ได้แก่

### 1. แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว (Lead-acid battery: Pb-acid)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากอัตราส่วนของประสิทธิภาพต่อราคามีค่าสูง แม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วนี้จะมีความหนาแน่นของพลังงานต่อน้ำหนักและปริมาตรของแบตเตอรี่ต่ำ

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีหลายรุ่น ได้แก่ ชนิดรอบการคายประจุตื้น (Shallow cycle) จะใช้ในเครื่องยนต์ที่ต้องการพลังงานจำนวนมากในเวลาสั้นๆ และ ชนิดที่ออกแบบให้สามารถใช้งานจนมีประจุภายในต่ำกว่า 80% ได้ดี หรือมีรอบการคายประจุที่ลึก (Deep cycle) ซึ่งเหมาะสำหรับบริการ

ประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการการอัดกระแสไฟและคายกระแสช้าอย่างเต็มที่ เช่นในการใช้งานประเภทการกักเก็บพลังงาน

## 2. แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium battery: NiCd)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมนี้มีข้อได้เปรียบเหนือแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วหลายประการ เช่น น้ำหนักเบากว่า มีรอบการคายประจุลึกได้นานกว่า และสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า เป็นต้น จึงได้มีการนำแบตเตอรี่ไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ กล้องวีดีโอ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพง และในปัจจุบัน สารแคดเมียมนั้นถูกจำกัดในการนำไปใช้งาน เนื่องจากเป็นสารเมื่อปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีฝังกลบได้ นอกจากนี้ แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับผลกระทบทางความจำ (memory effect) กล่าวคือ เป็นกรณีที่แบตเตอรี่ถูกใช้ไฟไม่หมดประจุแล้วนำไปชาร์จไฟใหม่อยู่บ่อย ๆ ทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถจำค่าสูงสุดที่เคยเก็บไว้ได้ เป็นสาเหตุให้แบตเตอรี่ค่อย ๆ เสื่อมลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลทำให้ความจุมีค่าลดลง เมื่อไม่ได้นำแบตเตอรี่ไปใช้งานเป็นเวลานาน ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดอื่นมาใช้แทน

## 3. แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-โลหะไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride battery: NiMH)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกพัฒนาต่อจากแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม ซึ่งเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานในแบตเตอรี่ และข้ออาโนดที่ใช้โลหะไฮไดรด์แทนแคดเมียมยังช่วยลดปัญหาสารพิษปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีข้อได้เปรียบแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมตรงที่สามารถลดปัญหาเกี่ยวกับผลกระทบทางความจำได้ แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ประเภทไฮบริดจ์ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้ อยู่ที่ความสามารถในการส่งกำลังที่ค่ายอดของกำลังได้น้อย, มีค่าอัตรา self-discharge ที่สูง, ไวต่อการถูกทำลายถ้ามีการอัดประจุมากเกินไป และยังมีราคาแพงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม

## 4. แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-Ion battery : Li-ion)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วถึง 3 เท่า และยังมีค่าแรงดันที่สูงถึง 3.5 โวลต์ต่อเซลล์ ดังนั้นในการติดตั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงใช้จำนวนแบตเตอรี่น้อยในการต่ออนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิต แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องใช้แผ่นขั้วไฟฟ้าที่มีความหนา ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตมีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพง นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไวต่อการถูกทำลาย ถ้ามีการอัดประจุที่มากเกินไป

## 5. แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-โพลีเมอร์ (Lithium-Polymer battery : Li-poly)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีลิเทียมเป็นขั้วไฟฟ้าและใช้โพลีเมอร์ที่เป็นของแข็งเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอิเล็กโทรไลต์ดังกล่าวนี้จะช่วยเพิ่มค่าพลังงานจำเพาะให้แก่เซลล์ของแบตเตอรี่

จากชนิดของชนิดแบตเตอรี่ดังกล่าว เรายังสามารถแยกชนิดของแบตเตอรี่ออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ निकิลเป็นขั้วไฟฟ้า (Nickel-based batteries) และแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ลิเทียมเป็นขั้วไฟฟ้า (lithium-based batteries) ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ทั้ง 3 ประเภท สามารถสรุปและเปรียบเทียบได้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ

ประเภทของแบตเตอรี่	ข้อดี	ข้อเสีย
ชนิดกรดตะกั่ว	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาถูกและง่ายในการผลิต</li> <li>- ราคาต่อวัตต์ต่อชั่วโมง มีค่าไม่สูง</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย มีหลายบริษัทผู้ผลิต และมีขนาดให้เลือกหลากหลาย</li> <li>- มีการคายประจุด้วยตัวเองต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุใหม่ได้ชนิดอื่น</li> <li>- มีค่าพลังงานจำเพาะสูง</li> <li>- ปลดปล่อยกระแสไฟค่าสูงในช่วงคายประจุ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าอัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนักต่ำ</li> <li>- ใช้เวลาในการอัดประจุให้เต็มนาน</li> <li>- มีรอบการคายประจุและอัดประจุจำกัด</li> </ul>
ชนิดใช้นิกเกิลเป็นขั้วไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เวลาในการอัดประจุเต็ม น้อยถึงแม้ว่าจะไม่ใช่แบตเตอรี่เป็นเวลานาน</li> <li>- มีจำนวนวัฏจักรการอัดประจุและคายประจุสูง</li> <li>- มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน และสามารถเก็บไว้ในสภาวะที่แบตเตอรี่คายประจุหมดได้</li> <li>- สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ โดยที่ประสิทธิภาพยังดีอยู่</li> <li>- มีให้เลือกหลากหลายขนาดและประสิทธิภาพ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าพลังงานจำเพาะต่ำ</li> <li>- มีผลจากภาวะผลกระทบทางความจำ</li> <li>- มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ถ้าใช้แคดเมียมเป็นส่วนประกอบ</li> <li>- มีการคายประจุด้วยตัวเองสูง</li> <li>- เกิดความร้อนเมื่ออัดประจุอย่างรวดเร็ว และคายประจุค่าสูง</li> <li>- ประสิทธิภาพลดลงถ้าเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิสูง</li> </ul>



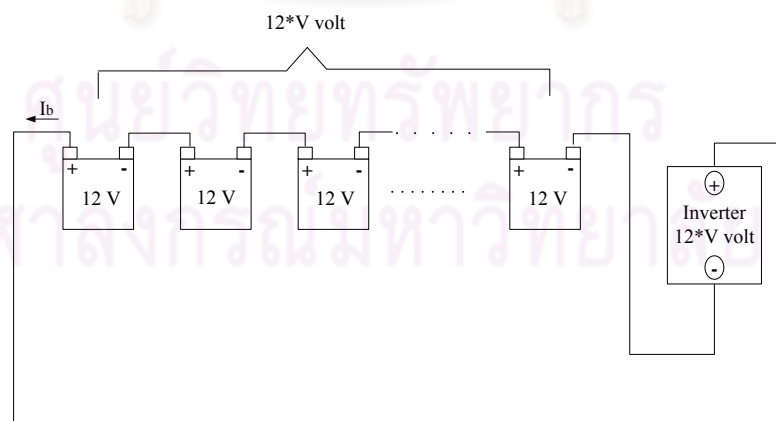
ประเภทของแบตเตอรี่	ข้อดี	ข้อเสีย
ชนิดใช้ลิเทียมเป็นขั้วไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความหนาแน่นของพลังงานมีค่าสูง</li> <li>- มีค่าการคายประจุด้วยตัวเองต่ำเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้นิกเกิลเป็นขั้วไฟฟ้า</li> <li>- ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย</li> <li>- ต้องมีการปล่อยประจุออกจากแบตเตอรี่เป็นระยะๆ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องใช้วงจรการป้องกันเพื่อจำกัดแรงดันและกระแส</li> <li>- มีข้อจำกัดในการขนส่ง โดยเฉพาะถ้าขนส่งในปริมาณมาก</li> </ul>

### 3.4 การต่อชุดแบตเตอรี่

การต่อชุดแบตเตอรี่ หมายถึง การต่อแบตเตอรี่ในการใช้งานเพื่อให้ได้แรงดันและความจุของแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ การต่อชุดแบตเตอรี่นั้นสามารถทำได้ 3 วิธีด้วยกัน [19] ได้แก่

#### 3.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม

การต่อชุดแบตเตอรี่แบบนี้ เป็นการต่อเพื่อเพิ่มแรงดันให้เพียงพอและเหมาะสมกับการใช้งาน โดยที่ความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าเท่าเดิม การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมนี้ ขั้วบขของแบตเตอรี่แต่ละตัวจะเชื่อมกับขั้วลขของแบตเตอรี่ตัวถัดไป ซึ่งขนาดแรงดันที่ได้จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันของแบตเตอรี่ทุกตัวที่นำมาต่อ ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 3.2 ถ้าแบตเตอรี่แต่ละตัวมีแรงดันขนาด 12 โวลต์ และนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน  $x$  ตัว จะได้คำนวณแรงดันได้ตามสมการที่ (3.3)



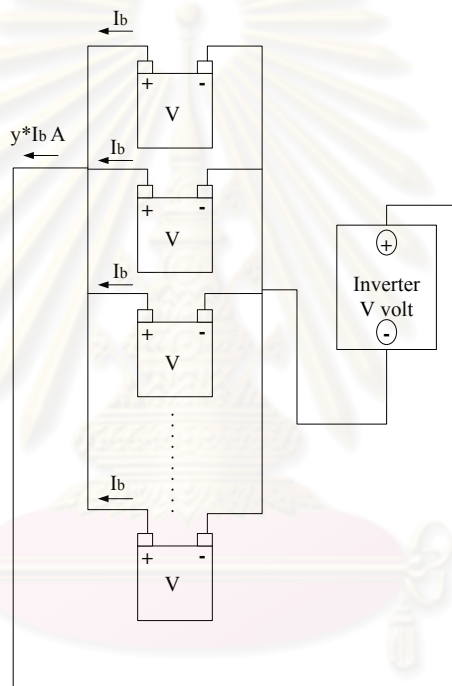
รูปที่ 3.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม

$$V_{total} = x \times 12 \quad (3.3)$$



### 3.4.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน

การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนานเป็นการต่อชุดแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มความจุของชุดแบตเตอรี่ให้เพียงพอและเหมาะสมกับการใช้งาน หรือเพิ่มระยะเวลาที่ต้องการสำรองไฟฟ้าไว้ใช้งาน โดยที่แรงดันยังมีขนาดเท่าเดิม การต่อชุดแบตเตอรี่แบบนี้ขั้วบวกของแบตเตอรี่แต่ละตัวจะต่อขนานกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ตัวถัดไป และขั้วลบของแบตเตอรี่แต่ละตัวก็จะต่อขนานกับขั้วลบของแบตเตอรี่ตัวถัดไป ความจุของชุดแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความจุของแบตเตอรี่แต่ละตัวที่นำมาต่อ ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 3.3 ถ้าแบตเตอรี่แต่ละตัวมีขนาดความจุ 290 แอมแปร์-ชั่วโมง และนำแบตเตอรี่มาต่อขนานกัน  $y$  ตัว จะได้คำนวณความจุแบตเตอรี่รวมได้ตามสมการที่ (3.4)



รูปที่ 3.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน

$$C_{total} = y \times 290$$

(3.4)

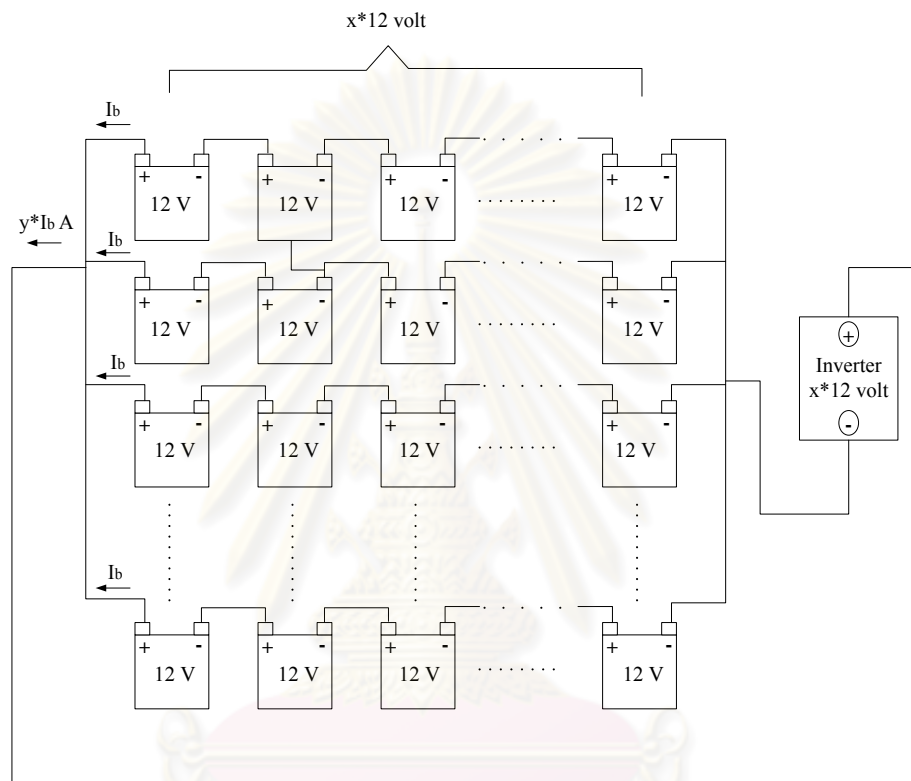
โดยที่

$V$  คือ แรงดันของแบตเตอรี่

$C$  คือ ความจุของแบตเตอรี่

### 3.4.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน

การต่อแบตเตอรี่แบบนี้เป็นการต่อเพื่อเพิ่มแรงดันและความจุของชุดแบตเตอรี่ให้เพียงพอและเหมาะสมกับการใช้งาน การต่อชุดแบตเตอรี่แบบผสมนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยแรงดันรวมของชุดแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันของแบตเตอรี่ทุกตัวที่นำมาต่อ และความจุของชุดแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความจุของแบตเตอรี่แต่ละตัวที่นำมาต่อ



รูปที่ 3.4 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน

### 3.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลัง

วงจรแปลงกำลังมีหลายชนิดแบ่งได้ตามลักษณะการแปลงกำลัง ได้แก่ วงจรแปลงไฟตรง-ไฟตรง วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง และวงจรแปลงไฟสลับ-ไฟสลับ แต่วงจรแปลงที่ใช้ร่วมกับแบตเตอรี่จะใช้ วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ เพื่อแปลงแรงดันไฟสลับจากระบบส่งเป็นแรงดันไฟตรงเข้าสู่แบตเตอรี่ และวงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง เพื่อแปลงแรงดันไฟตรงกลับเป็นแรงดันไฟสลับเพื่อจ่ายแรงดันกลับเข้าสู่ระบบส่ง [20-21]

### 3.5.1 วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง

วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง หรือเรียกว่าวงจรเรียงกระแส หรือ AC-DC คอนเวอร์เตอร์ (AC-DC Converter) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นไฟตรง โดยวงจรเรียงกระแสจะใช้ไดโอดเป็น สวิตช์ หรือถ้าใช้ SCR ก็จะใช้วงจรวจรเรียงกระแสควบคุม (controlled rectifier) สวิตช์เหล่านี้ให้ กระแสไหลในทิศทางเดียว กระแสไหลดจึงมีทิศทางเดียว วงจรแปลงกำลังอุดมคติประกอบด้วย สวิตช์ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลง องค์ประกอบอุดมคติไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นกำลัง เฉลี่ยด้านเข้าจึงเท่ากับกำลังเฉลี่ยด้านออก

วงจรเรียงกระแสมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เริ่มตั้งแต่กำลังต่ำๆ เช่น ในแหล่งจ่าย กำลังไฟตรงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไปจนถึงแหล่งจ่ายกำลังเพื่อการทำอิเล็กทรอนิกส์ใน อุตสาหกรรมเคมี หรือเพื่อการส่งกำลังผ่านสายส่งแรงสูง และมีการใช้ที่แพร่หลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรง และเพื่อสะสมประจุในแบตเตอรี่

### 3.5.2 วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ

วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ หรือที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นวงจรที่จ่ายกำลังไฟ สลับให้แก่โหลดโดยสามารถจ่ายกำลังที่แรงดันที่แปรค่าได้และความถี่ที่แปรค่าได้

แหล่งจ่ายแรงดันด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์อาจเป็นแบตเตอรี่ เซลล์แสงอาทิตย์ ฯลฯ ปริมาณด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นปริมาณไฟสลับ ซึ่งอาจเป็นปริมาณ 1 เฟส หรือเป็น ปริมาณ 3 เฟส ตัวอย่างการใช้อินเวอร์เตอร์ เช่น แหล่งจ่ายไฟสลับสำรอง แหล่งจ่ายไฟที่ไม่ขาด ตอน (Uninterruptible Power Supplies: UPS) วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟสลับแบบปรับความเร็ว ได้ เป็นต้น

วงจรแปลงกำลังอิเล็กทรอนิกส์ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามชนิดของ แหล่งจ่ายไฟตรงว่าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันหรือแหล่งจ่ายกระแส ดังนี้

1. **คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน** (Voltage-Source Converters: VSCs และ Voltage-Source Inverters: VSIs) วงจรแปลงชนิดนี้จะมี แหล่งจ่ายไฟตรงเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน และกระแสที่ไหลผ่านสามารถมีค่าเป็นบวกหรือลบ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างด้านไฟตรงและไฟสลับไหลได้สองทิศทาง (bidirectional) ตามทิศทางของกระแส

2. คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current-Source Converters: CSCs และ Current-Source Inverters: CSIs) วงจรแปลงชนิดนี้จะมีแหล่งจ่ายไฟตรงเป็นแหล่งจ่ายกระแส และแรงดันของคอนเวอร์เตอร์นี้จะมีค่าเป็นบวกหรือลบ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างด้านไฟตรงและไฟสลับไหลได้สองทิศทาง (bidirectional) ตามทิศทางของแรงดัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วและ การคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วเป็นแบบจำลอง เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงมีหลายขนาดและหลายชนิดให้เลือกได้ตรงกับความต้องการ มีความทนทานและไม่ต้องการบำรุงรักษามาก ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วที่ใช้ในอดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองของแบตเตอรี่แต่ละชนิด แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ และในส่วนตัวสุดท้ายจะกล่าวถึงขั้นตอนในการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

#### 4.1 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุซ้ำได้ชนิดแรกที่ทำออกมาเพื่อการค้า และในปัจจุบันยังมีการใช้งานกันอยู่อย่างแพร่หลาย โดยมักจะทำเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูงๆ ที่ง่ายกระแสน้ำได้มาก เนื่องจากมีต้นทุนในการเก็บพลังงานถูกกว่าแบตเตอรี่อัดประจุซ้ำได้ชนิดอื่น ๆ [18]

แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วนี้สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ ได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบตเตอรี่แบบแห้งและแบตเตอรี่แบบน้ำ (Flooded Type หรือ Wet Type) แต่การใช้งานแบตเตอรี่แบบน้ำนั้นไม่สะดวก จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม ในที่นี้จะกล่าวถึงแบตเตอรี่แบบแห้งเท่านั้น

แบตเตอรี่แบบแห้งยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบตเตอรี่แบบเจล (Gel Cell) ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้เจลเป็นวัสดุดูดซับกรด และแบตเตอรี่ AGM (Absorbed Glass Mat Battery) ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้แผ่นซิลิกาไฟเบอร์เป็นตัวดูดซับกรด

ความแตกต่างของแบตเตอรี่แบบเจลและแบบ AGM คือ ถ้าเปลือกนอกของแบตเตอรี่แบบเจลแตก จะไม่มีน้ำกรดซึมออกมา แต่ถ้าเปลือกนอกของแบตเตอรี่แบบ AGM แตก จะมีน้ำกรดไหลซึมออกมา เนื่องจากแบตเตอรี่แบบเจลสามารถดูดซับน้ำกรดได้ดีกว่า แต่แบตเตอรี่แบบเจลนั้น เมื่ออยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง เจลจะเกิดการละลาย และถ้ามีการอัดประจุมากเกินไป (overcharge) เจลจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปวอยด์ (void) ซึ่งจะไปเกาะติดอยู่ที่แผ่นขั้วไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง ดังนั้นในปัจจุบัน จึงนิยมใช้แบตเตอรี่ชนิด AGM มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดเจล

แบตเตอรี่ทั้ง 2 ประเภท คือ แบบเจลและแบบ AGM สามารถแบ่งออกได้เป็น แบตเตอรี่กรดตะกั่วแบบปิดผนึก (Sealed Lead Acid; SLA) และแบบปิดผนึกที่มีวาล์วระบายแรงดัน

(Valve Regulator Lead Acid; VRLA) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดหลังนี้จะมีการติดตั้งเซฟตี้วาล์ว (Safety Valve) เพื่อระบายแก๊สในกรณีที่ความดันในเซลล์สูงเกินไป

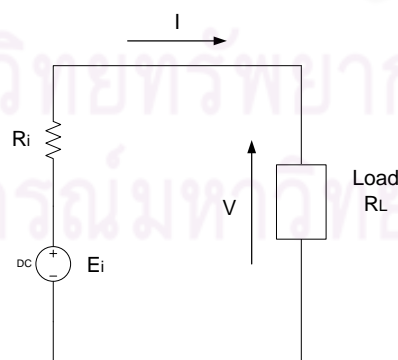
การอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ทั้งแบบ SLA และ VRLA จะต้องไม่อัดประจุเร็วหรือมากเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สภายในที่สูงเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณอิเล็กโทรไลต์ และส่งผลให้แบตเตอรี่สูญเสียความสามารถในการเก็บพลังงาน ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่หลังการอัดประจุไม่สูงเท่าที่ควรจะเป็น และถ้าเกิดเหตุการณ์แบบนี้ซ้ำบ่อยๆ จะทำให้แบตเตอรี่ใช้งานไม่ได้อีกต่อไป

## 4.2 แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีความพยายามในการจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่รวมถึงการหาค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองของแบตเตอรี่ เพื่อให้แบบจำลองนั้นมีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริง เพื่อที่จะสามารถนำแบบจำลองแบตเตอรี่ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นต่อไป ซึ่งแบบจำลองของแบตเตอรี่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมีหลากหลายรูปแบบ ในที่นี้จะยกตัวอย่างแบบจำลองแบตเตอรี่ที่เป็นที่รู้จักเพียง 5 แบบ

### 4.2.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย

แบบจำลองแบบนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่าย โดยในวงจรสมมูลนี้ประกอบด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออนุกรมอยู่กับความต้านทานภายใน 1 ตัว ดังรูปที่ 4.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้า  $E_i$  และความต้านทานภายใน  $R_i$  นี้จะมีค่าแปรผันโดยตรงกับประจุของแบตเตอรี่ที่คายออกไป ดังสมการ (4.1) - (4.2) [17-18]



รูปที่ 4.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย

$$E_i = E_0 - K_1 Q_d \quad (4.1)$$

$$R_i = R_0 + K_2 Q_d \quad (4.2)$$



โดยที่

$E_0$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสถานะที่ถูกอัดประจุเต็ม

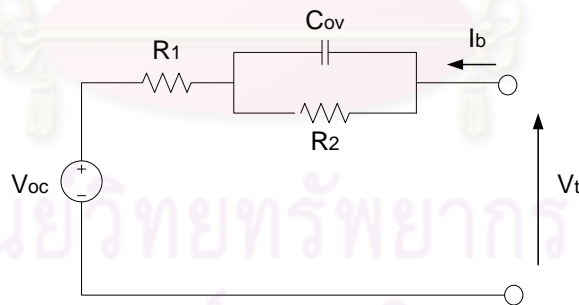
$R_0$  คือ ความต้านทานภายในเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสถานะที่ถูกอัดประจุเต็ม

$K_1, K_2$  คือ ค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากการประมาณกราฟจากข้อมูลการทดสอบแบตเตอรี่

ข้อดีของแบบจำลองแบบนี้ คือ เป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจและการคำนวณ แต่ข้อเสียคือ ค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงค่าเหล่านี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสถานะการอัด/คายประจุ (State of charge; SOC) ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุณหภูมิการใช้งาน เป็นต้น แบบจำลองนี้จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง และนำไปใช้ได้เฉพาะกรณีที่สมมติว่าพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายออกมีค่าไม่จำกัด และไม่คำนึงถึงสถานะการอัด/คายประจุ

#### 4.2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน

แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin equivalent circuit) ดังรูปที่ 4.2 ในวงจรสมมูลเทวินินจะประกอบด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด  $V_{oc}$  ความต้านทานภายใน  $R_1$  และส่วนประกอบที่แทนแรงดันเกิน (overvoltage) นั่นคือ ตัวเก็บประจุ  $C$  ที่ต่อขนานอยู่กับความต้านทาน  $R_2$  [22-23]

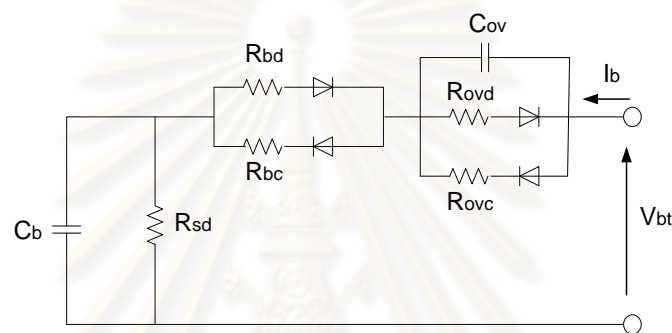


รูปที่ 4.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้วงจรสมมูลของเทวินิน

ข้อดีของแบบจำลองชนิดนี้คือ เป็นแบบจำลองที่เข้าใจง่าย และมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย แต่ข้อเสียคือ ค่าตัวแปรต่างๆ ในวงจรยังคงมีค่าคงที่ ซึ่งไม่ตรงกับความเป็นจริงที่ว่าตัวแปรที่มีค่าขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ ภายในแบตเตอรี่

#### 4.2.3 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเชิงเส้น

ต่อมาได้มีการพัฒนาแบบจำลองแบตเตอรี่จากวงจรสมมูลเทวินินให้เป็นวงจรสมมูลแบบเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.3 วงจรสมมูลเชิงเส้นนี้ประกอบด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่หาได้จากแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{oc}$  ความต้านทาน  $R_{sd}$  ซึ่งแทนการสูญเสียจากการคายประจุด้วยตัวเอง ความต้านทาน  $R_{bc}$  และ  $R_{ovc}$  ซึ่งแทนความต้านทานจากการสูญเสียเมื่อมีกระแสไหลและความต้านทานที่เกิดจากแรงดันเกินเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ และส่วนประกอบสุดท้าย คือ ความต้านทาน  $R_{bd}$  และ  $R_{ovd}$  ซึ่งแทนความต้านทานจากการสูญเสียเมื่อมีกระแสไหลและความต้านทานที่เกิดจากแรงดันเกินเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุ [22]

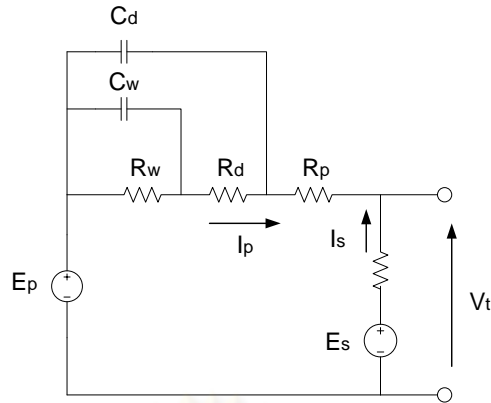


รูปที่ 4.3 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเชิงเส้น

ข้อดีของแบบจำลองแบบนี้คือ เป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองไม่ได้มีค่าคงที่แต่จะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า แต่ข้อเสียของแบบจำลองแบบนี้ คือ การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะต้องใช้เทคนิคการประมาณกราฟซึ่งเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก และบางครั้งข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตอาจไม่เพียงพอที่จะสามารถสร้างสมการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ นอกจากนี้แบบจำลองนี้ยังไม่สะท้อนถึงอัตราการอัดประจุหรือคายประจุของแบตเตอรี่อีกด้วย

#### 4.2.4 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบวงจรพลวัตลำดับที่สี่ (Forth Order Dynamic Model)

แบบจำลองแบบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ในแบบจำลองนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่กระแส  $I_p$  ไหลผ่าน ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลต์  $R_p$  ความต้านทาน  $R_d$  และตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดการรั่วไหล  $C_d$  และ  $C_w$  และความต้านทานรั่วไหล  $R_w$  ส่วนที่สอง คือ ส่วนที่กระแส  $I_s$  ไหลผ่าน ได้แก่ ความต้านทานของการคายประจุด้วยตัวเอง  $R_s$  [23]

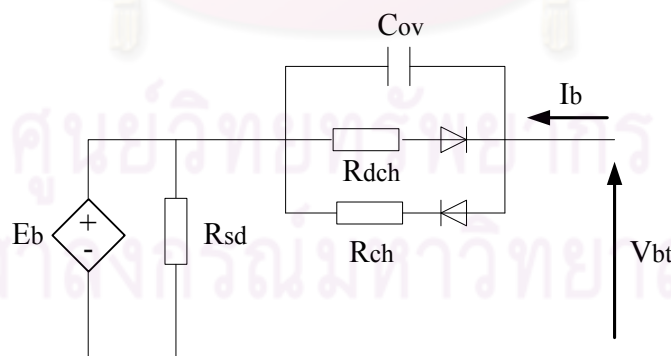


รูปที่ 4.4 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบวงจรผลวัตลำดับที่สี่

ถึงแม้ว่าแบบจำลองแบบนี้จะค่อนข้างมีความถูกต้อง แต่ก็ยังมีข้อเสียเปรียบบางประการ เช่น การคำนวณที่ยุ่งยาก และอาจจะต้องใช้เวลามากในการคำนวณ เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ลำดับที่สี่ และขั้นตอนของการสร้างสมการก็ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากจะต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากที่ได้จากการทดสอบแบตเตอรี่ เป็นต้น

#### 4.2.5 แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบบจำลองของแบตเตอรี่ให้มีความถูกต้องมากขึ้น คือแบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งแบบจำลองนี้ได้รับการยอมรับว่าเป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการเข้าใจและมีลักษณะที่ตรงกับความต้องการที่ต้องมีในแบตเตอรี่ที่ดี [23-25]



รูปที่ 4.5 แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่

ในแบบจำลองนี้ ค่าต่างๆ ภายในแบตเตอรี่จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีค่าขึ้นอยู่กับ SOC และลักษณะดังกล่าวสามารถแสดงได้ทั้งในช่วงที่มีการอัดประจุและคายประจุ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ความต้านทานคายประจุด้วยตัวเอง,  $R_{sd}$  เป็นความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของน้ำที่แรงดันสูง และยังเกี่ยวข้องกับการรั่วไหลอย่างช้าๆ ซ้ำมั่วซ้ำแบบเตอริที่แรงดันต่ำ ความต้านทานคายประจุด้วยตัวเองนี้เป็นฟังก์ชันของแรงดันเปิดวงจร
2. ความต้านทานในช่วงการอัดประจุและคายประจุ,  $R_{ch}$  และ  $R_{dch}$  เป็นความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งความต้านทานนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปในช่วงอัดประจุและคายประจุ
3. ค่าความจุไฟฟ้า,  $C_{ov}$  เมื่อแบตเตอรี่รับหรือจ่ายพลังงาน แบตเตอรี่จะประพฤติตัวเหมือนเป็นตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้านี้จะเกี่ยวข้องกับเวลาในการตอบสนองของแรงดันเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุหรือคายประจุ
4. แรงเคลื่อนไฟฟ้า,  $E_b$  เป็นแหล่งจ่ายไม้อิสระมีค่าแปรผันแบบเชิงเส้นตามค่า SOC

จะเห็นว่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองชนิดนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า SOC ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับค่า SOC นี้ สามารถหาได้จากข้อมูลการวัดของผู้ผลิต ดังนั้นแบบจำลองแบบนี้จะมีความถูกต้องสูง และเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้

#### 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วร่วมกับแบบจำลองพลวัตแบบใหม่ของแบตเตอรี่ที่กล่าวในหัวข้อ 4.2.5 [24] ในส่วนนี้จะนำเสนอ สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดนี้ โดยใช้ตัวอย่างข้อมูลของแบตเตอรี่ Yuasa NP4-12 เป็นต้นแบบ ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีค่าความจุขนาดที่กำหนด 4 แอมแปร์-ชั่วโมงและใช้กับค่าแรงดันที่กำหนด 12 โวลต์ อย่างไรก็ตามหากในการใช้งานจริง มีการเลือกใช้แบตเตอรี่ที่มีค่าความจุแตกต่างไปจากแบตเตอรี่ต้นแบบ หรือมียี่ห้อต่างกัน ก็จะมีวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ซึ่งจะอธิบายต่อไป

ค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองจะมีค่าขึ้นกับค่า SOC ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$SOC = SOC_0 - \left( \frac{1}{C_n} \int_0^t I_b d\tau \right) \times 100 \quad (4.3)$$

โดยที่

$SOC$  คือ ค่า SOC มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

$SOC_0$  คือ ค่าเริ่มต้นของ SOC

$C_n$  คือ ค่าความจุที่กำหนด มีหน่วยเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง

$I_b$  คือ กระแสแบตเตอรี่ โดยจะมีค่าเป็นบวกในช่วงคายประจุ และจะมีค่าเป็นลบ ในช่วงเก็บประจุ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

โดย SOC คือ ค่าประจุที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่เทียบกับขนาดพิกัดของแบตเตอรี่ ค่านี้จะชี้วัดว่าแบตเตอรี่จะสามารถจ่ายพลังงานได้เท่าไรก่อนที่ประจุจะหมด หรือสามารถรับพลังงานได้อีกเท่าไรก่อนที่แบตเตอรี่จะเต็ม ค่า SOC จะมีค่าอยู่ในช่วง  $[0,100]$

การสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในแบบจำลองพลวัตกับค่า SOC จะอาศัยการประมาณกราฟของข้อมูลการทดสอบแบตเตอรี่จากผู้ผลิต ในสมการ (4.4) - (4.11) จะแสดงสมการของตัวแปรต่างๆ ในแบตเตอรี่ที่ได้จากการประมาณกราฟของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว Yuasa NP4-12

### 1. แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่

$$E_b = 0.01375(SOC) + 11.5 \quad (4.4)$$

### 2. ตัวต้านทานการคายประจุด้วยตัวเอง

$$R_{sd} = -0.039(SOC)^2 + 4.27(SOC) - 19.23 \quad (4.5)$$

### 3. ตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุ

$$R_{dch} = R_{bdi} + R_{bd} \quad (4.6)$$

ซึ่ง

$$R_{bdi} = 1.01 \cdot \exp(-2.21 \cdot |I_b|) + 0.24 \cdot \exp(-0.06 \cdot |I_b|) \quad (4.7)$$

$$R_{bd} = 2.926 \cdot \exp(-0.042 \cdot SOC) \quad (4.8)$$

โดยที่

$R_{bdi}$  คือ ความต้านทานที่ทำให้ค่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งค่านี้จะมีค่าขึ้นกับกระแสคายประจุ

$R_{bd}$  คือ ความต้านทานที่แทนการเปลี่ยนแปลงของ  $R_{dch}$  ตามค่า SOC

### 4. ตัวเก็บประจุ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ค่า  $C_{OV} = 40 F$

## 5. ตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ

$$R_{ch} = R_{bci} + R_{bc} \quad (4.9)$$

ซึ่ง

$$R_{bci} = 1.5 \Omega \quad (4.10)$$

$$R_{bc} = 9.32 \times 10^{-5} \cdot (SOC)^2 + 0.01 \cdot (SOC) + 0.028 \quad (4.11)$$

โดยที่

$R_{bci}$  คือ ความต้านทานที่ทำให้ค่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งค่านี้จะมีค่าขึ้นกับกระแสอัดประจุ

$R_{bc}$  คือ ความต้านทานที่แทนการเปลี่ยนแปลงของ  $R_{ch}$  ตามค่า SOC

## 6. แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ (Terminal Voltage)

เมื่อทราบค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองแล้ว เราสามารถคำนวณค่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ได้ โดยสมการของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่สามารถพิสูจน์ได้จากแบบจำลองพลวัตที่ใช้

ช่วงการคายประจุ:

$$V_{bt} = E_b - I_b R_{ach} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_{ach} C_{ov}}\right) \right] \quad (4.12)$$

ช่วงการเก็บประจุ:

$$V_{bt} = E_b + I_b R_{ch} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_{ch} C_{ov}}\right) \right] \quad (4.13)$$

โดยที่

$\Delta t$  คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา

ถ้าความจุของแบตเตอรี่มีค่าแตกต่างไปจากความจุที่ใช้ในการหาสมการของตัวแปรต่างๆข้างต้น จะต้องมีการปรับค่าตัวแปรให้สอดคล้องกับความจุของแบตเตอรี่ที่ต้องการ ซึ่งแบตเตอรี่ดังกล่าวจะต้องมีลักษณะการคายประจุเหมือนกับแบตเตอรี่ต้นแบบ จึงจะสามารถประมาณค่า



ความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุเป็นอัตราส่วนกับค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุของแบบเตอริ์ต้นแบบได้ดังสมการ (4.14) – (4.15)

$$[R \text{ at } C_{n2}] = \frac{C_{n1}}{C_{n2}} \cdot [R \text{ at } C_{n1}] \quad (4.14)$$

$$[C_{ov} \text{ at } C_{n2}] = \frac{C_{n2}}{C_{n1}} \cdot [C_{ov} \text{ at } C_{n1}] \quad (4.15)$$

โดยที่

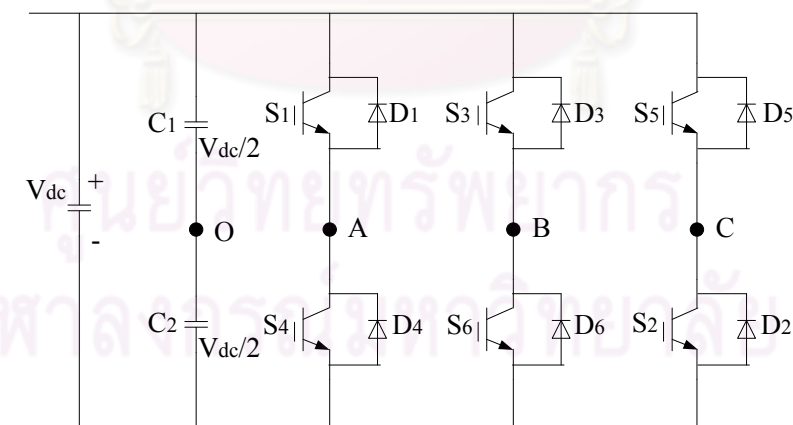
$R$  คือ  $R_{sd}$ ,  $R_{dch}$ ,  $R_{ch}$

$C_{n1}$  คือ ค่าความจุที่กำหนดของแบบเตอริ์ต้นแบบ ในที่นี้ คือ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง

$C_{n2}$  คือ ค่าความจุที่กำหนดของแบบเตอริ์ที่ต้องการใช้

#### 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของ AC-DC คอนเวอร์เตอร์และ DC-AC อินเวอร์เตอร์เป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 6 พัลส์ (3 phase 6 step voltage source converter และ voltage source inverter) [20-21] ซึ่งแบบจำลองของทั้งคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์จะเหมือนกันและสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันชนิด 3 เฟส 6 พัลส์  
สมการของแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$\hat{V}_{A0} = \hat{V}_{B0} = \hat{V}_{C0} = \frac{4V_{DC}}{2\pi} \quad (4.16)$$

หรือ

$$\hat{V}_{AB} = \frac{2\sqrt{3}V_{DC}}{\pi} \quad (4.17)$$

หรือ

$$V_{AB,rms} = \frac{2\sqrt{3}V_{DC}}{\sqrt{2\pi}} \quad (4.18)$$

โดยที่

$V_{A0}, V_{B0}, V_{C0}$  คือ ขนาดแรงดันสายถึงเฟส (line to neutral)

$V_{AB}$  คือ ขนาดแรงดันสายถึงสาย (line to line)

$V_{AB,rms}$  คือ แรงดัน rms ของแรงดันสายถึงสาย

$V_{DC}$  คือ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์

#### 4.5 การหาความจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

จุดประสงค์ของการติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ก็เพื่อที่จะช่วยแก้ปัญหาการแกว่งกำลังไฟฟ้า ความถี่ และแรงดันที่เข้าสู่ระบบ โดยแบตเตอรี่จะพยายามชดเชยให้ระบบผลิตสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด และช่วยลดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากเทียบเท่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิง

เพื่อที่จะให้การติดตั้งแบตเตอรี่ช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกความจุของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เนื่องจากถ้าเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ติดตั้งน้อยเกินไป อาจทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถเก็บหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลให้ช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่ถ้าเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่สูงเกินไป ก็อาจจะส่งผลถึงค่าลงทุนที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดของแบตเตอรี่เพื่อใช้ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมให้มีความเหมาะสม

##### 4.5.1 การปรับค่าตัวแปรให้สอดคล้องกับแบตเตอรี่ที่เลือกใช้

หากแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีกราฟลักษณะการอัด/คายประจุเหมือนกับแบตเตอรี่ต้นแบบซึ่งในที่นี้คือ Yuasa NP4-12 ก็ไม่ต้องทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในสมการที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรของแบตเตอรี่ แต่ถ้าแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบตเตอรี่ของผู้ผลิตคนละรายกับแบตเตอรี่ต้นแบบซึ่งอาจจะมีลักษณะการอัด/คายประจุไม่เหมือนกัน จะต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ อีกครั้งโดยคงรูปแบบของสมการไว้ ค่าตัวแปรที่จะต้องปรับค่า ได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าและตัวต้านทานเมื่อ

แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ และคายประจุ ส่วนค่าตัวเก็บประจุจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นอัตราส่วนกับค่าตัวเก็บประจุในแบตเตอรี่ต้นแบบ

### 1. แรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$E_b = \alpha_e(SOC) + \beta_e \quad (4.19)$$

### 2. ความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ

$$R_{dch} = \alpha_{dch} + \beta_{dch} \cdot (SOC) + \gamma_{dch} \cdot (SOC)^2 \quad (4.20)$$

### 3. ความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุ

$$R_{ch} = \alpha_{ch} \cdot \exp(a \cdot |I_b|) + \beta_{ch} \cdot \exp(b \cdot |I_b|) + \gamma_{dch} \cdot \exp(c \cdot SOC) \quad (4.21)$$

### 4. ค่าตัวเก็บประจุ

$$C_{ov} = \frac{C_{n2}}{4} \cdot 40 = 10 \cdot C_{n2} \quad (4.22)$$

โดยที่

$\alpha_e, \beta_e$  คือ ค่าคงที่ในสมการแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้

$\alpha_{dch}, \beta_{dch}, \gamma_{dch}$  คือ ค่าคงที่ในสมการความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะคายประจุของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้

$\alpha_{ch}, \beta_{ch}, \gamma_{ch}, a, b, c$  คือ ค่าคงที่ในสมการความต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้

ถึงแม้ค่าสัมประสิทธิ์ของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้จะเปลี่ยนแปลงไป แต่สมการหาแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ยังเป็นสมการเดิม เนื่องจากเป็นสมการที่พิสูจน์มาจากแบบจำลอง ซึ่งถ้าเราทราบค่าข้อมูลแรงดันและกระแสในขณะอัดประจุหรือคายประจุที่แต่ละช่วงเวลาได้ ก็จะสามารถใช้วิธีการเชิงเลขในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ (4.19) - (4.22) ได้ และถ้าความจุของแบตเตอรี่มีค่าไม่เท่ากับ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ก็จะต้องมีการปรับค่าความต้านทานเหมือนในสมการที่ (4.14)

#### 4.5.2 กำลังไฟฟ้าที่ผ่านคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์มีกำลังสูญเสียร้อยละ 2 ของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าคอนเวอร์เตอร์และเข้าสู่แบตเตอรี่นั้น จะเป็นกำลังไฟฟ้าที่อัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากแบตเตอรี่ออกสู่อินเวอร์เตอร์และเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะเป็นกำลังไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่คายประจุ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าจริงอัดประจุเมื่อผ่านคอนเวอร์เตอร์,  $P_{con,ch}$  จะมีค่าดังสมการ (4.23)

$$P_{con,ch} = 0.98 \cdot P_{dc,ch} \quad (4.23)$$

และกำลังไฟฟ้าจริงคายประจุเมื่อผ่านอินเวอร์เตอร์,  $P_{inv,dch}$  จะมีค่าดังสมการ (4.24)

$$P_{inv,dch} = 0.98 \cdot P_{b,dch} \quad (4.24)$$

โดยที่

$P_{dc,ch}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อผ่านหม้อแปลงแปลงแรงดันลงแล้ว

$P_{b,dch}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงจากแบตเตอรี่เมื่อแบตเตอรี่คายประจุ

เมื่อทราบความต้องการของระบบไฟฟ้าหรือโหลด ( $P_{set}$ ) กำลังไฟฟ้าจริงที่แบตเตอรี่จะรับหรือจ่าย ( $P_b$ ) จะแยกคำนวณออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่แบตเตอรี่อัดประจุและช่วงที่แบตเตอรี่คายประจุ โดยกำลังไฟฟ้าจริงที่อัดประจุให้แก่แบตเตอรี่สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.25)

$$P_{b,ch} = P_{set} - P_{con,ch} \quad (4.25)$$

และกำลังไฟฟ้าจริงแบตเตอรี่คายประจุ เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.26)

$$P_{b,dch} = P_{set} - P_{con,dch} \quad (4.26)$$

โดย  $P_{b,dch}$  จะมีค่าเป็นบวก นั่นคือ แบตเตอรี่กำลังคายประจุและจ่ายกระแสออกสู่ระบบไฟฟ้า (Discharge) และค่า  $P_{b,ch}$  จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึง แบตเตอรี่กำลังรับกระแสเข้าแบตเตอรี่และแบตเตอรี่จะอยู่ในสถานะอัดประจุ (Charge)

#### 4.5.3 การคำนวณความจุของแบตเตอรี่

จากสมการของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ในสมการที่ (4.12) - (4.13) เมื่อคุณกระแสอัดประจุหรือคายประจุตลอดทั้งสมการ จะได้ว่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่คุณกับกระแสอัดประจุหรือคายประจุจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่แบตเตอรี่รับหรือจ่ายออก ดังแสดงในสมการ (4.27) - (4.28)

ช่วงการเก็บประจุ:

$$P_{b,ch} = V_{bt}I_b = E_b + I_b^2 R_{ch} [1 - \exp(\frac{-\Delta t}{R_{ch}C_{ov}})] \quad (4.27)$$

ช่วงการคายประจุ:

$$P_{b,dch} = V_{bt}I_b = E_b - I_b^2 R_{dch} [1 - \exp(\frac{-\Delta t}{R_{dch}C_{ov}})] \quad (4.28)$$

จากสมการดังกล่าว เราสามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของความจุของแบตเตอรี่ ( $C_n$ ) ในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่อัดประจุจะกำหนดให้ค่า  $SOC = 100$  และในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่คายประจุจะกำหนดให้ค่า  $SOC = 0$  การกำหนดค่า SOC ในลักษณะนี้ก็เพื่อที่จะหาค่าสูงสุดของความจุของแบตเตอรี่ที่แบตเตอรี่จะสามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้อย่างเต็มที่ในแต่ละช่วงเวลา

เมื่อแทนค่า SOC ที่กำหนดไว้ในสมการ (4.3) แล้ว จะสามารถจัดรูปกระแสอัดประจุหรือคายประจุให้อยู่ในรูปความจุของแบตเตอรี่ได้ และเมื่อแทนค่ากระแสอัดประจุนี้ในสมการที่ (4.27) - (4.28) ก็จะได้สมการของกำลังไฟฟ้าจริงที่แบตเตอรี่รับหรือจ่ายออก ที่เป็นฟังก์ชันของความจุของแบตเตอรี่ สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ในสมการ (4.29) - (4.30)

ช่วงการเก็บประจุ:

กำหนด  $SOC = 100$

จะได้  $I_b = \frac{-(100 - SOC_0) \cdot C_n}{100}$

$$P_{b,ch} = E_b + \left( \frac{-(100 - SOC_0) \cdot C_n}{100} \right)^2 R_{ch} [1 - \exp(\frac{-\Delta t}{R_{ch}C_{ov}})] \quad (4.29)$$

ช่วงการคายประจุ:

กำหนด  $SOC = 0$

$$\text{จะได้ } I_b = \frac{SOC_0 \cdot C_n}{100}$$

$$P_{b,dch} = E_b - \left( \frac{SOC_0 \cdot C_n}{100} \right)^2 R_{dch} \left[ 1 - \exp \left( \frac{-\Delta t}{R_{dch} C_{ov}} \right) \right] \quad (4.30)$$

เมื่อแทนค่า SOC และกระแสอัดประจุหรือคายประจุดังกล่าวในสมการของตัวแปรต่างๆ ภายในแบตเตอรี่ จะพบว่าสมการ (4.29) - (4.30) จะมีเพียงค่าเดียวที่ไม่รู้ค่าคือค่าความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะต้องแก้สมการเพื่อหาค่าความจุของแบตเตอรี่ แต่เนื่องจากสมการข้างต้นเป็นสมการไม่เชิงเส้น จึงต้องใช้วิธีการเชิงเลขในการแก้ปัญหา ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธีเชิงเลขนิวตัน-ราฟสัน ในการแก้สมการหาค่าความจุของแบตเตอรี่

ถ้าแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีความจุของแบตเตอรี่ไม่เท่ากับความจุของแบตเตอรี่ต้นแบบ จะต้องมีการปรับค่าตัวเก็บประจุและความต้านทานดังในสมการ (4.14) - (4.15)

ช่วงการเก็บประจุ:

$$f_{ch} = E_b + \frac{C_{n1}}{C_{n2}} \cdot \left( \frac{-(100 - SOC_0) \cdot C_{n2}}{100} \right)^2 \cdot R_{ch,b} \left[ 1 - \exp \left( \frac{-\Delta t}{40R_{ch,b}} \right) \right] - P_{b,ch} \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial f_{ch}}{\partial C_n} = 0$$

ช่วงการคายประจุ:

$$f_{dch} = E_b - \frac{C_{n1}}{C_{n2}} \cdot \left( \frac{SOC_0 \cdot C_n}{100} \right)^2 R_{dch,b} \cdot \left[ 1 - \exp \left( \frac{-\Delta t}{40R_{dch,b}} \right) \right] - P_{b,dch} \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial f_{dch}}{\partial C_n} = 0$$

โดยที่

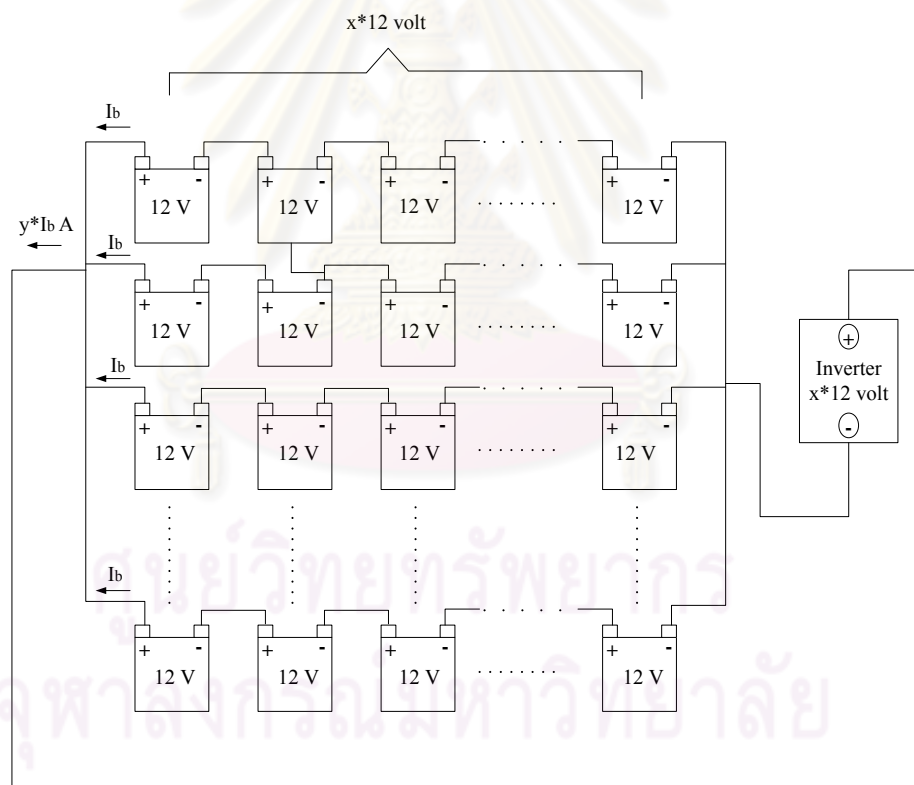
$R_{ch,b}$  คือ ความต้านทานของแบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุ 4 แอมแปร์- ชั่วโมง ในช่วงที่แบตเตอรี่อัดประจุ



$R_{ach,b}$  คือ ความต้านทานของแบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุ 4 แอมแปร์- ชั่วโมง ในช่วงที่แบตเตอรี่คายประจุ

เมื่อคำนวณขนาดความจุของแบตเตอรี่ที่ทุกช่วงเวลาได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะนำขนาดแบตเตอรี่นั้นมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ โดยขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมควรมีขนาดใหญ่พอที่จะรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด หลังจากได้ขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมแล้ว ขนาดแบตเตอรี่ดังกล่าวอาจมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดแบตเตอรี่ที่มีในท้องตลาดได้ ดังนั้นจะต้องคำนึงถึงการต่อแบตเตอรี่หลายลูกเข้าด้วยกันเป็นชุดแบตเตอรี่ด้วย

ในทางปฏิบัติ เราจะทราบความจุของแบตเตอรี่ 1 ตัว ซึ่งสามารถเลือกได้จากข้อมูลของผู้ผลิต แต่เพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความจุแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ จึงต้องมีการนำแบตเตอรี่หลายๆ ตัวมาต่อแบบอนุกรมผสมขนานเป็นชุดแบตเตอรี่ เพื่อต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม



รูปที่ 4.7 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมผสมกับแบบขนาน

จากรูปจะพบว่าจะต้องใช้แบตเตอรี่จำนวน  $x$  คอลัมน์ต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันที่ต้องการ และใช้แบตเตอรี่จำนวน  $y$  แถว ต่อแบบขนานเพื่อให้ได้ความจุของแบตเตอรี่ตามต้องการ ซึ่งเราสามารถรู้ค่า  $x$  ได้จากแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงและขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่

เลือกใช้ และทราบค่า  $y$  โดยการนำความจุแบตเตอรี่ที่ได้จากคำนวณหารด้วยความจุแบตเตอรี่ของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ดังสมการ

$$y = \frac{C_{n2}}{C_{ns}} \quad (4.33)$$

โดยที่

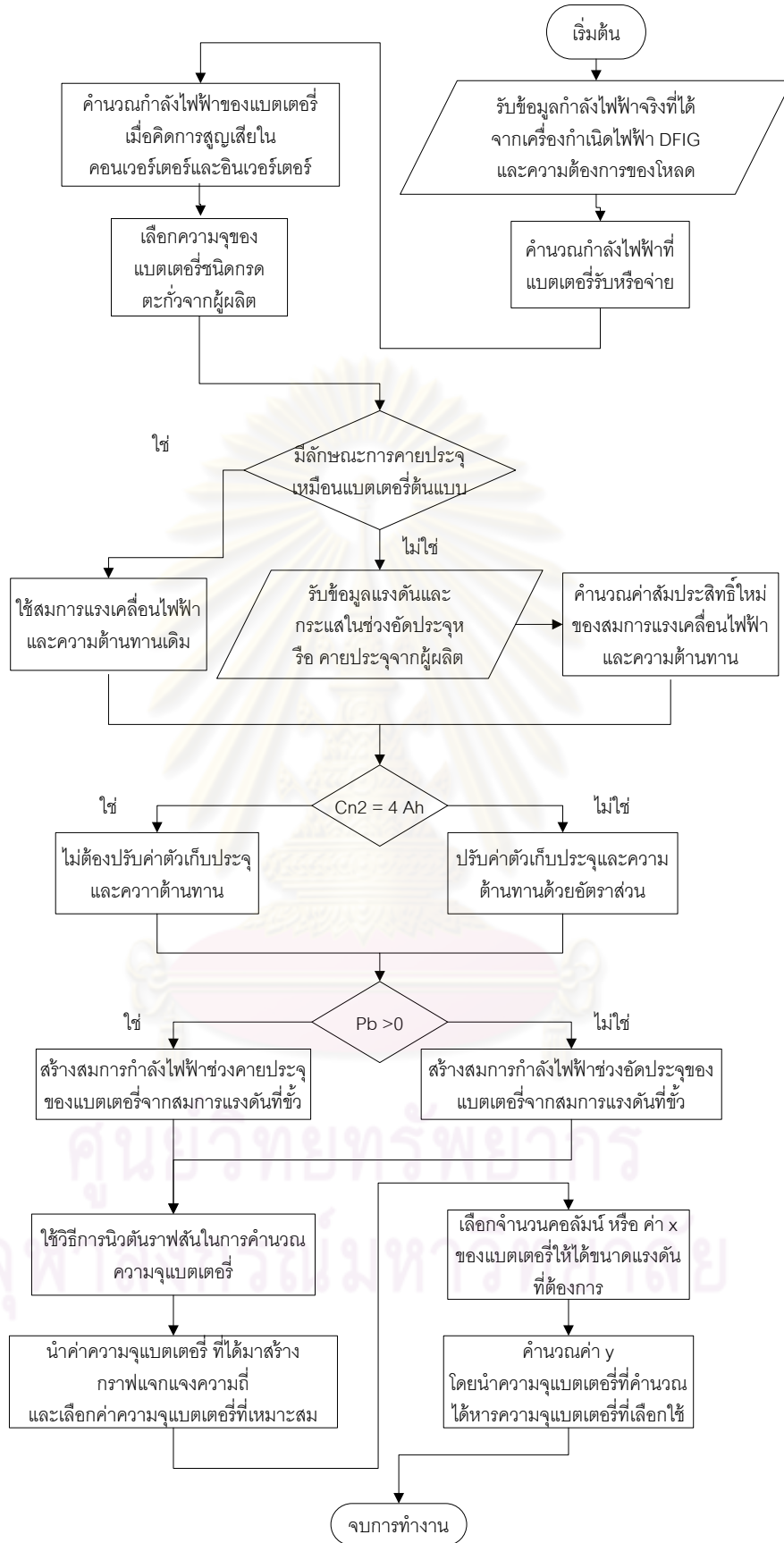
$C_{n2}$  คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่ได้จากการคำนวณ (Ah)

$C_{ns}$  คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ (Ah)

ขั้นตอนในการคำนวณค่าความจุของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมนี้ สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 4.8



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 แผนผังขั้นตอนการคำนวณหาค่าความจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

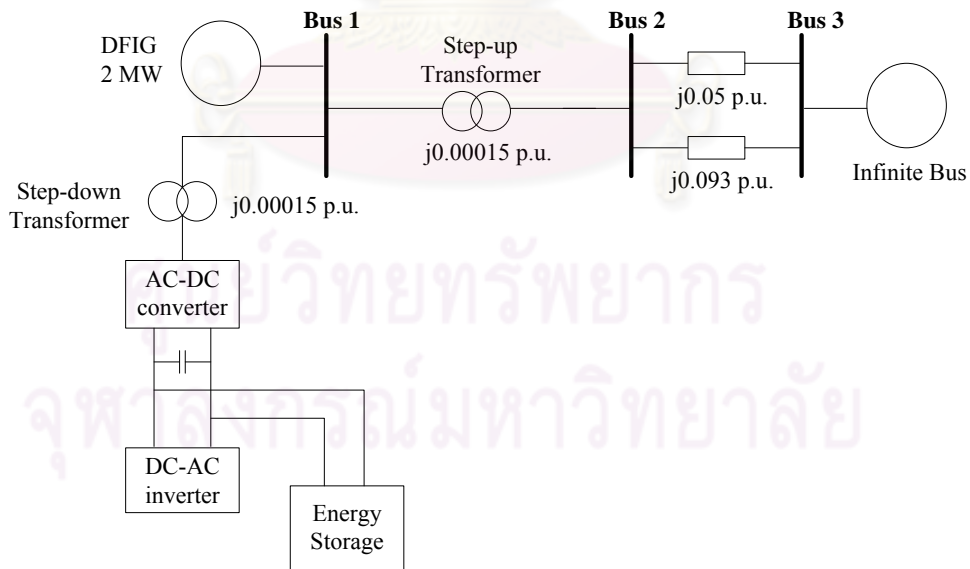
## บทที่ 5

### การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการคำนวณเพื่อหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งหัวข้อการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อ คือ ระบบทดสอบที่ใช้ และผลการทดสอบ ซึ่งใน ส่วนของผลการทดสอบจะแบ่งเป็น 5 การทดสอบ ได้แก่ (1) การทดสอบการสูญเสียความเร็วม (2) การทดสอบกำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ของระบบ (3) การหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม และสุดท้ายคือ (4) การทดสอบหาลำดับกำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ที่เข้าสู่ระบบเมื่อใช้ขนาด แบตเตอรี่ตามที่คำนวณได้

#### 5.1 ระบบทดสอบ

ในการทดสอบเราจะใช้ระบบทดสอบตามที่กำหนด ดังรูปที่ 5.1 โดยระบบทดสอบนี้จะ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางที่ต่ออยู่กับแบตเตอรี่ในบัสที่ 1 และมีหม้อแปลง แปลงแรงดันขึ้นต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 2 โดยบัสที่ 2 จะเป็นโหลดบัส และมีอิมพีแดนซ์ต่อ อยู่ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3 ซึ่งบัสที่ 3 จะเป็นบัสอนันต์



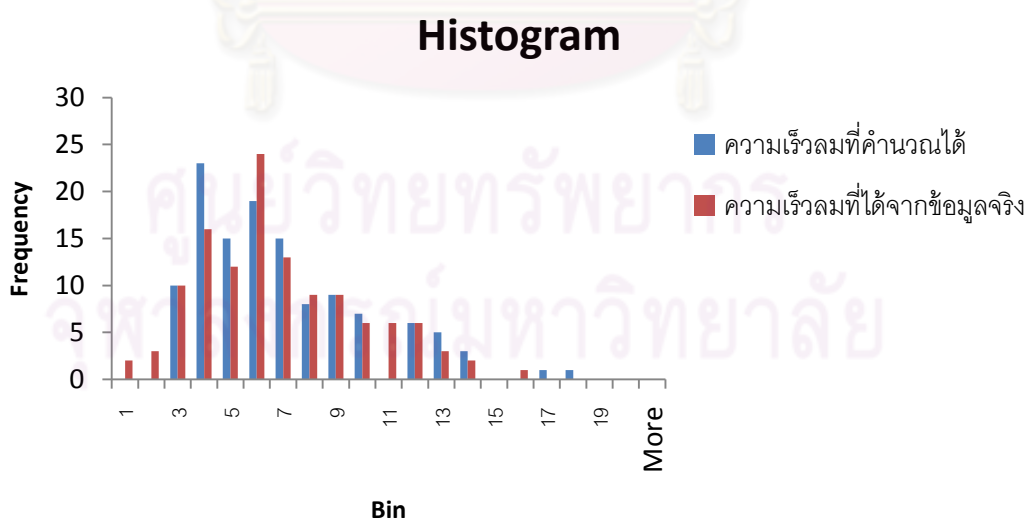
รูปที่ 5.1 แผนภาพของระบบที่ใช้ทดสอบ

## 5.2 ผลการทดสอบ

### 5.2.1 ผลการทดสอบการสุ่มความเร็วลม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ได้จากข้อมูลความเร็วลมที่วัดได้ในปี 2005 ดังแสดงในภาคผนวก ก.1 ซึ่งข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ฤดูร้อน คือช่วงเดือน มีนาคมถึงเดือนมิถุนายน ฤดูฝน คือช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนตุลาคม และฤดูหนาว คือ ช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ โดยข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยนี้จะแสดงในภาคผนวก ก.2

เมื่อได้ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงหรือ  $v_{trend,t}$  แล้ว ก็จะนำมาสร้างแบบจำลองของความเร็วลมได้ดังแสดงในสมการที่ (2.7) แต่ยังมีตัวแปรที่ไม่รู้ค่า คือค่าความแปรปรวนของความเร็วลม หรือ  $\sigma$  ซึ่งค่านี้จะสามารถคำนวณได้โดยวิธีความผิดพลาดแบบกำลังสองน้อยสุด (Least square error) กล่าวคือ จะทำการคำนวณความเร็วลมของแต่ละชั่วโมงตามสมการ (2.18) โดยตั้งค่าตัวเลขการสุ่มแบบปกติ  $Z$  ไว้หนึ่งชุด และใช้ค่า  $v_{trend}$  ของชั่วโมงก่อนหน้า เช่น เมื่อคำนวณความเร็วลมของชั่วโมงที่ 14 จะต้องใช้ค่า  $v_{trend}$  ของชั่วโมงที่ 13 จากนั้นจะปรับค่า  $\sigma$  จนกระทั่งข้อมูลความเร็วลมแต่ละชั่วโมงที่ในแต่ละฤดูกาลที่คำนวณได้จากสมการ (2.18) มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงจากข้อมูลจริง โดย ค่า  $\sigma$  จะมีค่าแตกต่างกันไปตามความเร็วลมในแต่ละชั่วโมงและฤดูกาล ตัวอย่างการคำนวณหาค่า  $\sigma$  จะแสดงได้ในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นการคำนวณหาค่า  $\sigma$  ในชั่วโมงที่ 6 ในฤดูฝน ซึ่งจะได้ค่า  $\sigma = 0.4398$



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการหาค่า  $\sigma$

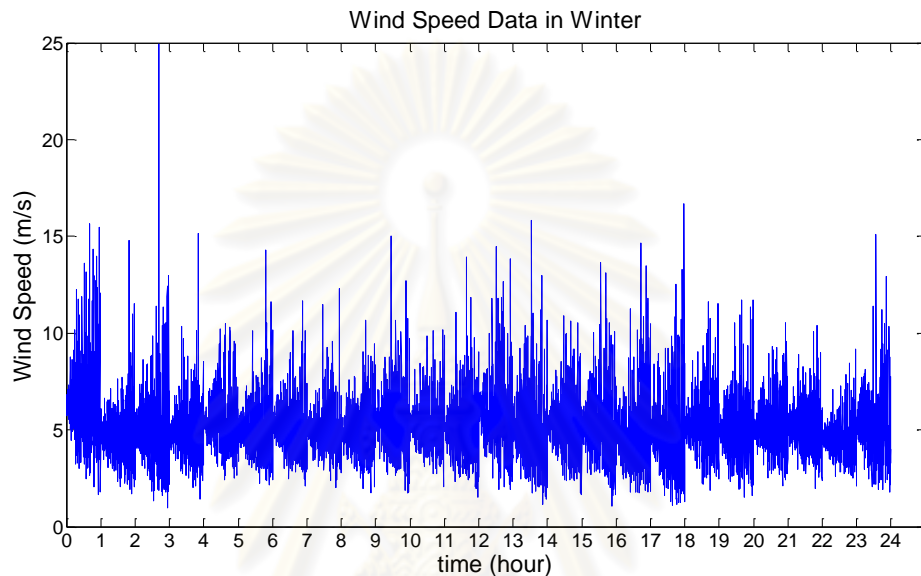
จากรูปจะพบว่าค่า  $\sigma$  ที่คำนวณได้จะทำให้ข้อมูลความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณและข้อมูลความเร็วลมที่ได้จากความเร็วลมจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และค่า  $\sigma$  ที่หาได้ในแต่ละชั่วโมงในแต่ละฤดูกาล โดยวิธีข้างต้น สามารถสรุปเป็นตารางที่ 5.1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 สรุปค่า  $\sigma$  ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการหาค่าความเร็วลม

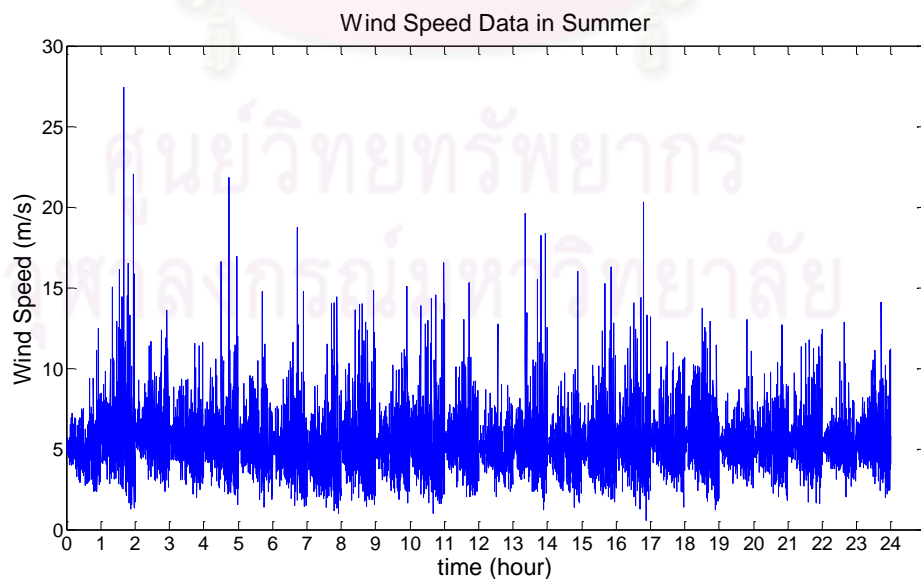
ชั่วโมง	ค่า $\sigma$		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
1	0.4897	0.3848	0.4146
2	0.4383	0.6100	0.3080
3	0.5660	0.4014	0.7183
4	0.3901	0.4270	0.3830
5	0.3637	0.5427	0.4772
6	0.3878	0.4755	0.3912
7	0.3592	0.5085	0.4656
8	0.3467	0.6257	0.6816
9	0.3730	0.6010	0.4750
10	0.4434	0.4117	0.5054
11	0.3493	0.6001	0.4955
12	0.4023	0.4127	0.4614
13	0.4813	0.3702	0.4942
14	0.6104	0.5100	0.4396
15	0.4114	0.4248	0.3482
16	0.4757	0.5020	0.5979
17	0.5290	0.5447	0.4980
18	0.6145	0.3896	0.5367
19	0.4470	0.5317	0.4762
20	0.4488	0.3183	0.4649
21	0.3591	0.4012	0.4854
22	0.3625	0.4062	0.4509
23	0.3127	0.3101	0.4903
24	0.5269	0.4359	0.4398



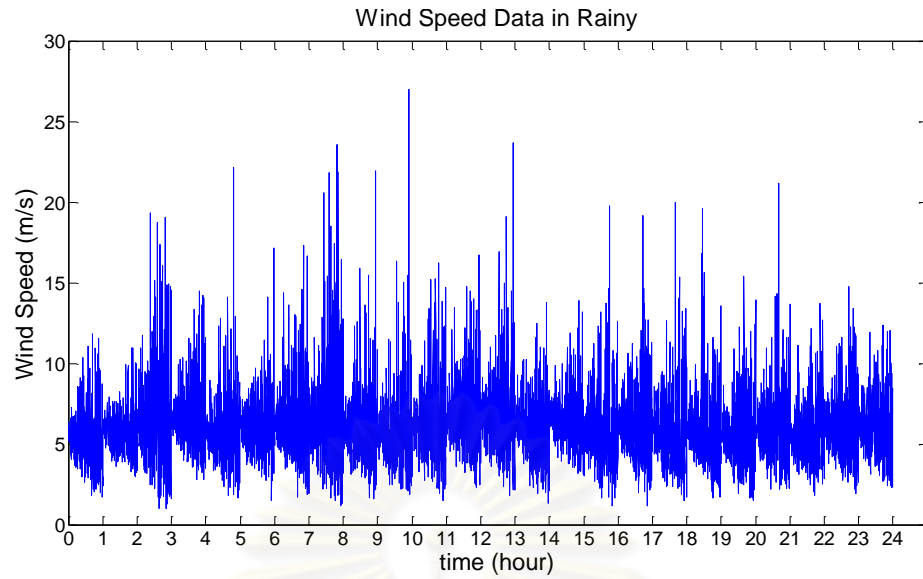
เมื่อทราบค่า  $\sigma$  ในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูแล้ว เราจะสามารถคำนวณความเร็วลมตามสมการ (2.18) ได้ โดยกำหนดให้ในหนึ่งชั่วโมงต้องการทำการสุ่มความเร็วลม 360 ค่า กล่าวคือความเร็วลมจะมีค่าเปลี่ยนไปทุกๆ 10 วินาทีนั่นเอง ดังนั้นค่าจุดเวลาที่ใช้คือ  $t = \frac{1}{360}, \frac{2}{360}, \frac{3}{360}, \dots, 1$  ดังนั้นใน 1 วัน จะมีความเร็วลมที่เปลี่ยนไปทั้งหมด 8,640 ค่า โดยตัวอย่างของค่าความเร็วลมที่ได้จากการสุ่มในแต่ละฤดูกาลสามารถแสดงได้รูปที่ 5.3-5.5



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูหนาว

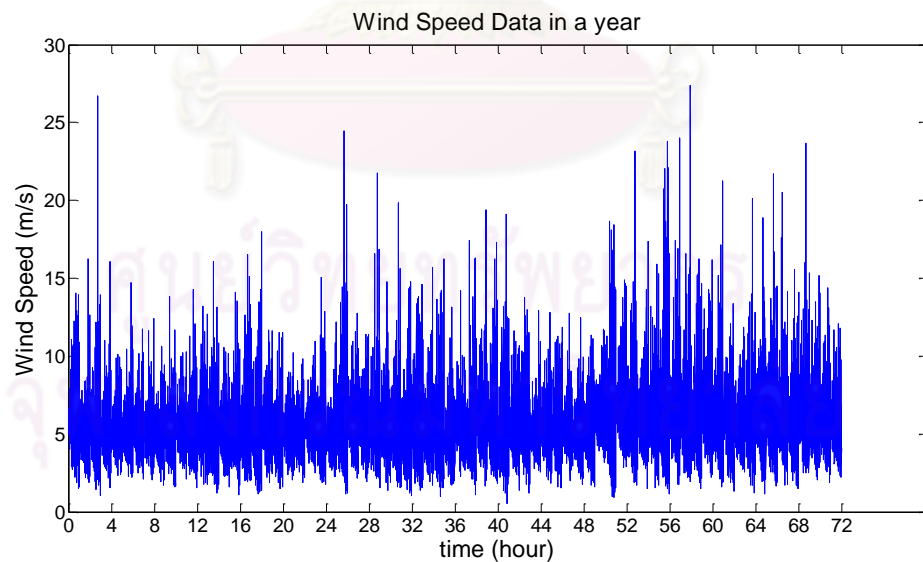


รูปที่ 5.4 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูร้อน



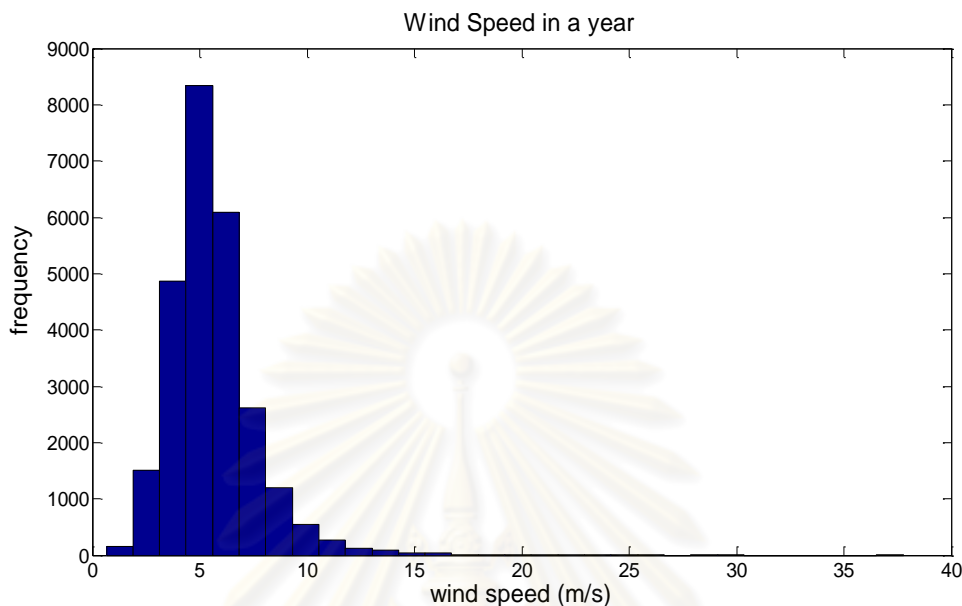
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูฝน

จะสามารถใช้ข้อมูลความเร็วลม 1 วัน ของทุกฤดู มาใช้เป็นตัวแทนความเร็วลมทั้งปี เนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยของทุกชั่วโมงในแต่ละฤดูที่นำมาใช้ในแบบจำลองความเร็วลมจะมีค่าเท่ากัน โดยตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมทั้งปี จะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมทั้งปี

จากความเร็วลมทั้งปีที่สามารถได้จากแบบจำลองความเร็วลมที่กำหนด จะสามารถแสดงกราฟความถี่ของการกระจายของความเร็วลมทั้งปีได้ดังรูปที่ 5.7



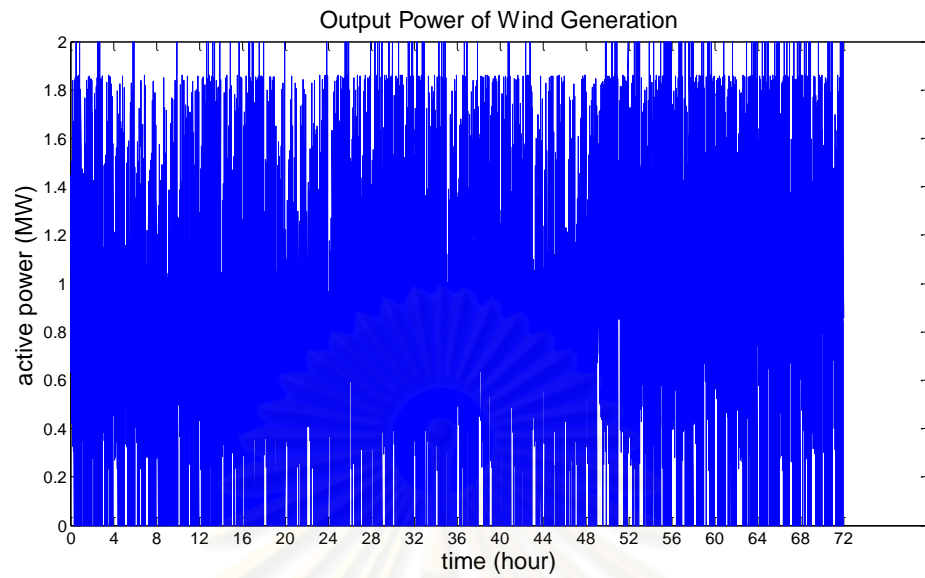
รูปที่ 5.7 กราฟความถี่ของการกระจายของความเร็วลมทั้งปี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in speed) มีค่าเท่ากับ 3.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งจากรูปที่ 5.7 จะพบว่าความเร็วลมส่วนใหญ่ที่สามารถได้จากแบบจำลองจะมีค่ากระจายอยู่รอบๆ ความเร็วลมเข้าระบบ

## 5.2.2 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า แรงดัน ความเร็วโรเตอร์ เมื่อผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง และความถี่ของระบบ

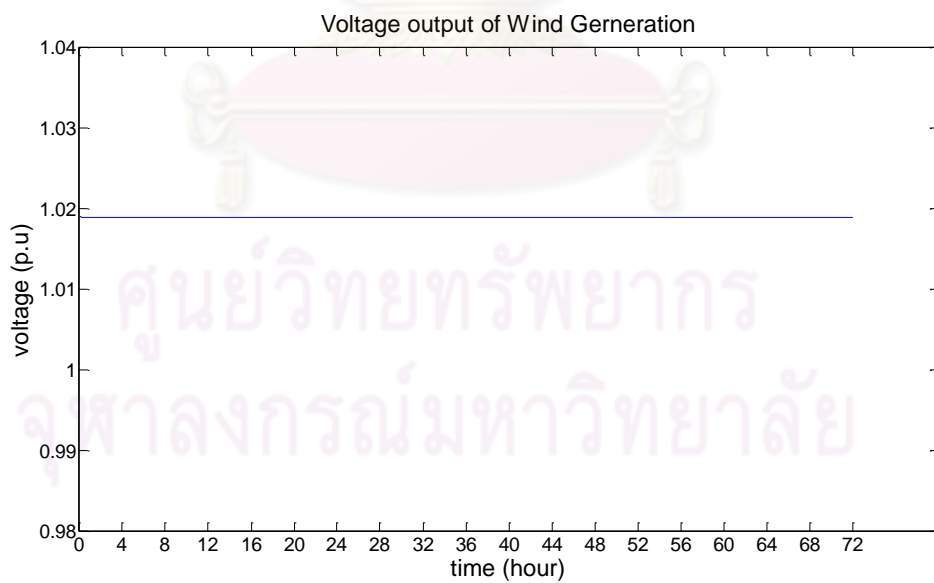
เมื่อทราบค่าความเร็วลมในแต่ละช่วงเวลาแล้ว เราจะสามารถคำนวณกำลังลมเมื่อความเร็วลมผ่านกั้นหันลมได้จากแบบจำลองของกั้นหันลม ตามสมการที่ (2.4) – (2.5) และ เมื่อลมผ่านจากกั้นหันลมแล้วจะเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะแปลงกำลังลมให้เป็นกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน ความเร็วโรเตอร์ และความถี่ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG จะใช้การควบคุมด้วยวิธีที่กล่าวในบทที่ 2 ตามสมการ (2.19) – (2.51) ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) และใช้ตัวควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller) โดยตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมนั้นจะแสดงในภาคผนวก ข. ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริง แรงดัน ความเร็วโรเตอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG และความถี่ของระบบ โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมทั้งปีที่สามารถได้จากแบบจำลองความเร็วลมทั้งปีได้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.8-5.11 ตามลำดับ

### ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG



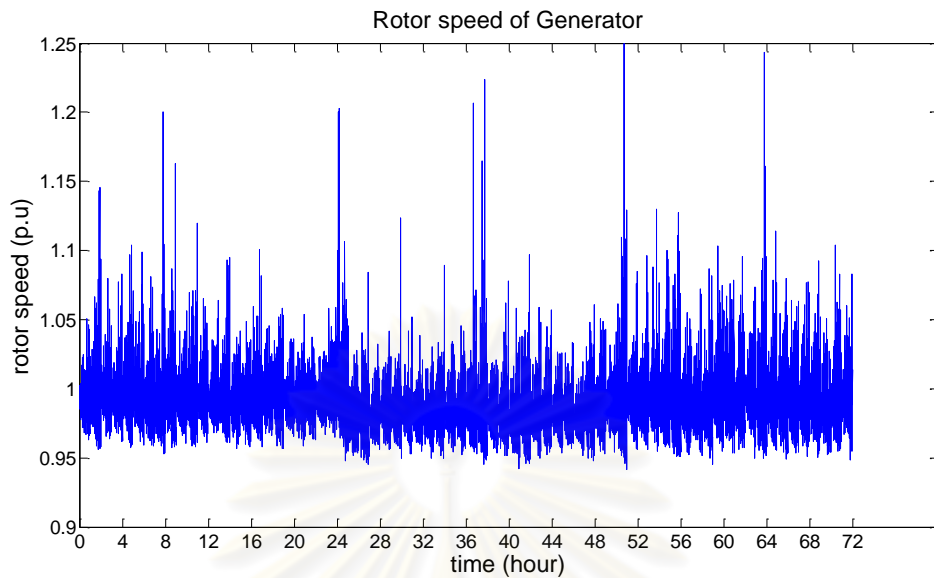
รูปที่ 5.8 ตัวอย่างผลกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

### ผลการทดสอบแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG



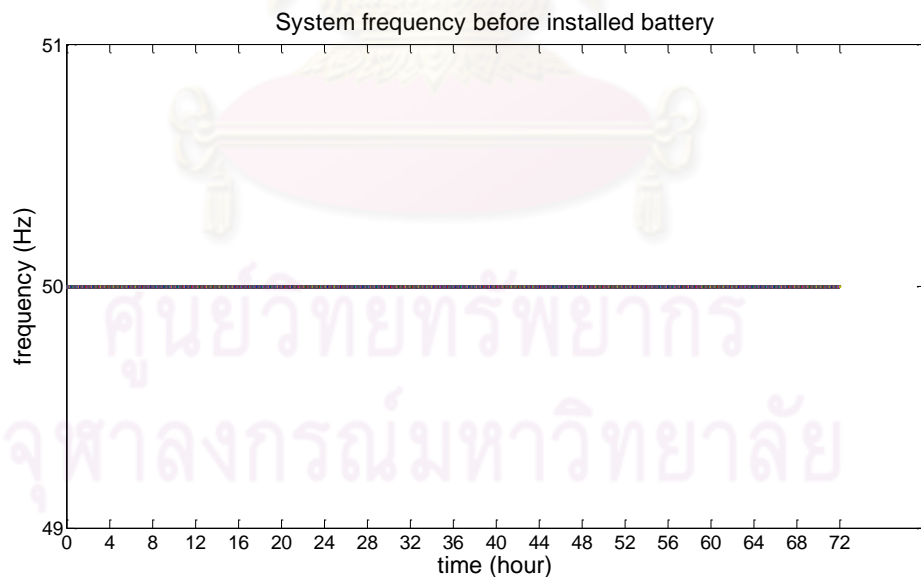
รูปที่ 5.9 ตัวอย่างผลขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

### ผลการทดสอบความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างผลความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

### ผลการทดสอบความถี่ไฟฟ้าของระบบ



รูปที่ 5.11 ตัวอย่างผลความถี่ของระบบ ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริง จะเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ตามความเร็วมวลที่เปลี่ยนไปตามฤดูกาล ส่วนความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วมวลที่เข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ในส่วนของแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าคงที่

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ แม้ว่าความเร็วโรเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงก็ตาม และความถี่ไฟฟ้าของระบบจะมีค่าคงที่ที่ 50 เฮิร์ต ซึ่งเป็นผลจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG ต่ออยู่กับบัสบาร์ที่มีแรงดันและมุมของแรงดันคงที่ และเนื่องจากในระบบทดสอบที่กำหนดผลเฉลยของทรานเซียนส์ทางด้านสเตเตอร์ จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าต่อระบบ

### 5.2.3 ผลการหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

เมื่อได้ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง ตามหัวข้อ 5.2.2 แล้ว จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่รับหรือจ่าย โดยคำนึงถึงกำลังสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ ตามสมการ (4.23) – (4.26)

จากนั้นจะเลือกแบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ ในที่นี้จะเลือกแบตเตอรี่กรดตะกั่วชนิด AGM ของบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM [27] ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุที่กำหนดเท่ากับ 290 แอมแปร์-ชั่วโมง และมีแรงดันขนาดที่กำหนด คือ 12 โวลต์ จะเห็นว่าแบตเตอรี่ที่เลือกมานี้เป็นชนิดระจุนและมีขนาดความจุแตกต่างกับแบตเตอรี่ต้นแบบที่กล่าวถึงในบทที่ 4 ซึ่งมีกราฟลักษณะการคายประจุที่แตกต่างไปจากแบตเตอรี่ต้นแบบ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองของแบตเตอรี่ตามสมการ (4.19) – (4.22) ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ของตัวแปรในแบบจำลองของแบตเตอรี่จะใช้วิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (Least square error) โดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะต้องทำให้แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (4.12) – (4.13) มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ตามกราฟข้อมูลจริง ซึ่งผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว สามารถแสดงได้ในตารางที่ 5.2 – 5.5

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์
$\alpha_e$	10.3298
$\beta_e$	0.043646

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุ

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์
$\alpha_{ch}$	-0.4241
$\beta_{ch}$	-0.62935
$\gamma_{ch}$	0.009654



ตารางที่ 5.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวต้านทานเมื่อแบตเตอรี่คายประจุ

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์
$\alpha_{dch}$	1.245598
$a$	-0.00402
$\beta_{dch}$	1.245598
$b$	-0.00402
$\gamma_{dch}$	-5.18296
$c$	-0.5893

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณหาแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้

ช่วงเวลา	$V_{bt}$ ของข้อมูลจริง	$V_{bt}$ ที่คำนวณได้	ค่าความผิดพลาดกำลังสอง
อัดประจุ	10.2	10.1830672	0.000287
อัดประจุ	10.5	10.0916449	0.166754
อัดประจุ	10.5	11.1731201	0.453091
อัดประจุ	10.5	10.5220368	0.000486
อัดประจุ	13.6	13.3671286	0.054229
คายประจุ	9.6	9.59891042	1.19E-06
คายประจุ	9.6	9.59543478	2.08E-05
คายประจุ	10.2	10.2355747	0.001266
คายประจุ	10.5	10.4408132	0.003503
คายประจุ	10.5	10.6247829	0.015571
คายประจุ	10.5	10.3594609	0.019751

จากตารางที่ 5.5 จะพบว่าความผิดพลาดกำลังสองของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ของข้อมูลจริงกับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ที่คำนวณได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในสมการของตัวแปรต่างๆ ของแบตเตอรี่

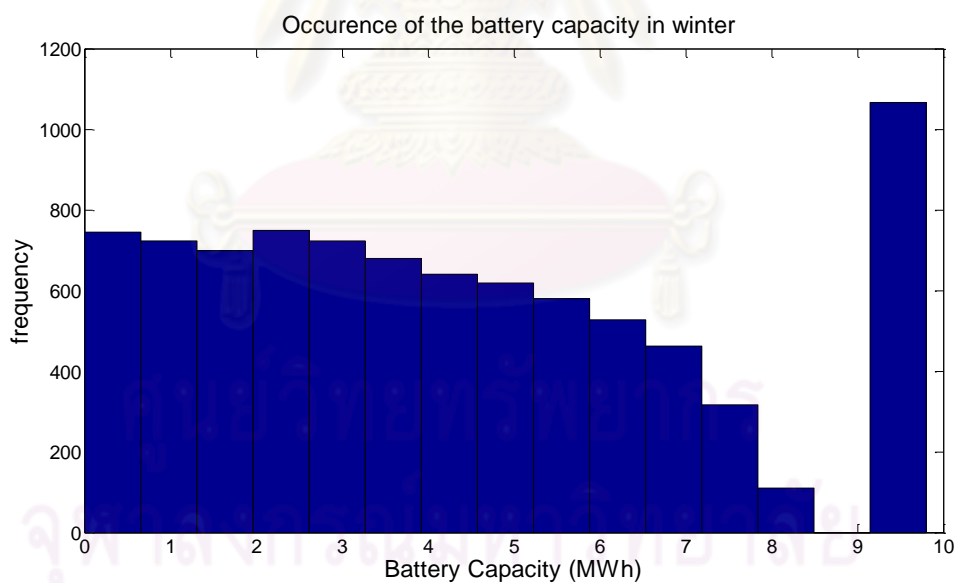
เมื่อเราทราบข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จะรับหรือจ่ายและได้สมการของตัวแปรต่างๆ ในแบตเตอรี่ที่มีการปรับค่าให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่ที่เลือกมาใช้แล้ว ก็จะสามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมได้ตามสมการที่ (4.27) – (4.32) ค่าเริ่มต้นต่างๆ ในการคำนวณจะแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

ตัวแปรอีกหนึ่งตัวที่มีผลต่อการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่คือ ค่าความต้องการทางไฟฟ้า หรือโหลด ( $P_{set}$ ) ซึ่งถ้าความต้องการทางไฟฟ้ามีค่าแตกต่างจากกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตได้มาก ก็จะทำให้ต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จะต้องชดเชยมีค่าสูง

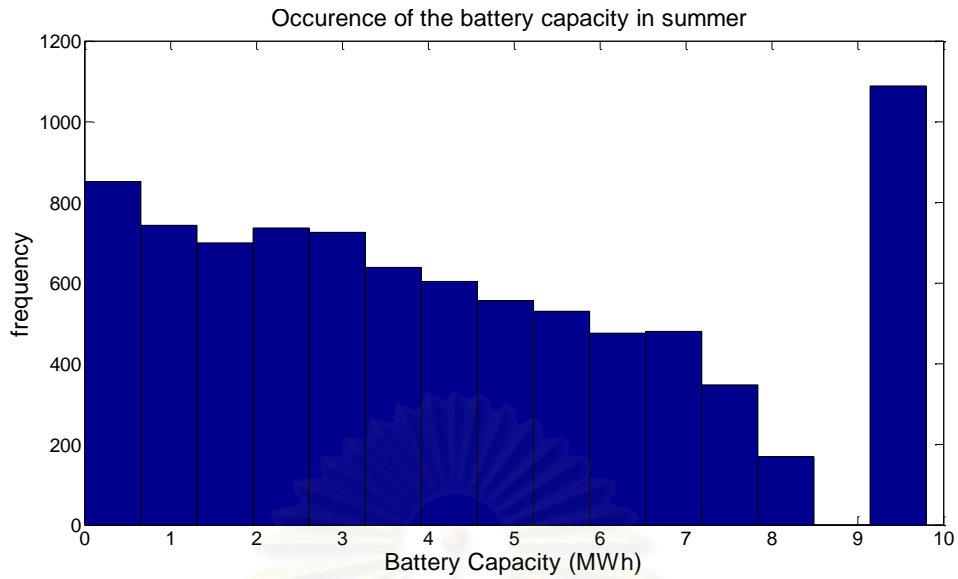
ผลการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมจะใช้ข้อมูลของความเร็วลมใน 1 วันของแต่ละฤดูเป็นตัวแทนความเร็วลมทั้งฤดู โดยผลการทดสอบหาขนาดของแบตเตอรี่จะสามารถแสดงได้ในรูปของกราฟแจกแจงความถี่ และจะแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณี  $P_{set} = 1 \text{ MW}$  และกรณีที่  $P_{set} = 0.72 \text{ MW}$

### 5.2.3.1 กรณีที่ 1 เมื่อความต้องการทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 MW

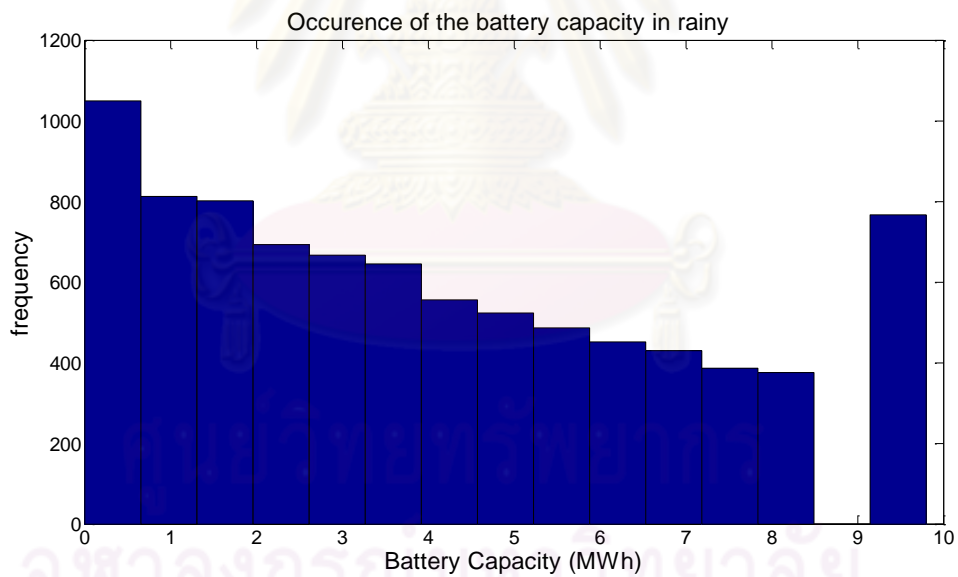
ในกรณีนี้จะกำหนดให้ค่าความต้องการทางไฟฟ้าเท่ากับ 1 MW หรือ  $P_{set} = 1 \text{ MW}$  โดยความต้องการทางไฟฟ้านี้จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ ผลการทดสอบหาขนาดของแบตเตอรี่จากข้อมูลความเร็วลมในแต่ละฤดูสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12-5.14 ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูหนาว ในกรณีที่ 1



รูปที่ 5.13 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูร้อน ในกรณีที่ 1

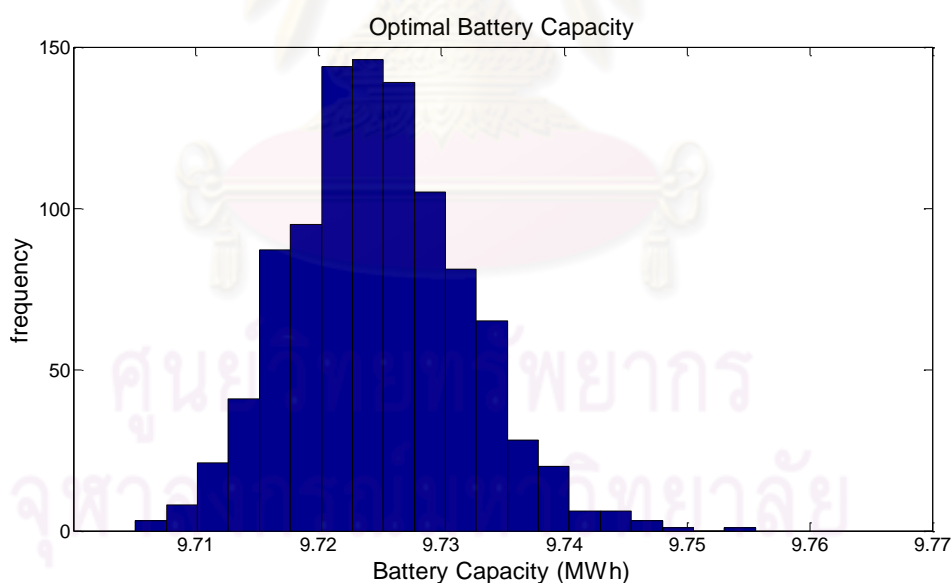


รูปที่ 5.14 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูฝน ในกรณีที่ 1

ในการเลือกขนาดของแบตเตอรี่ เราควรเลือกให้แบตเตอรี่สามารถรับหรือจ่ายกำลังชดเชยได้มากเพียงพอ แต่หากเลือกขนาดที่ใหญ่เกินไปก็จะทำให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบมีค่าสูงเกินความจำเป็น ดังนั้น ควรเลือกขนาดของแบตเตอรี่ให้เพียงพอที่จะสามารถชดเชยกำลังส่วน

ใหญ่ได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอให้เลือกแบตเตอรี่ให้มีขนาดครอบคลุม 95% ของเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น ในที่นี้ผลการคำนวณหาค่าขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาข้อมูลความเร็วลมของฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูฝนที่สุ่มได้ใน 1 วัน คือ 9.6861 MWh , 9.6811 MWh และ 9.7356 MWh ตามลำดับ

อย่างไรก็ดี ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมดังกล่าวเป็นเพียงคำตอบที่สอดคล้องกับข้อมูลความเร็วลมที่สุ่มได้ใน 1 วันเพียง 1 กรณีเท่านั้นซึ่งยังไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้น เราทำการสุ่มความเร็วลม 1 วันของทุกฤดู หรือความเร็วลมทั้งปี เป็นจำนวน 1,000 เหตุการณ์ โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงชุดเดิมรวมกับความเบี่ยงเบนความเร็วลมที่สุ่มได้ในแต่ละเหตุการณ์ไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าที่ต้องรับหรือจ่ายจากแบตเตอรี่ แล้วทำการคำนวณหาค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการเดิม เราจะได้ค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม 1,000 ค่า ซึ่งแต่ละค่าเป็นค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลความเร็วลมแต่ละชุด เราสามารถแสดงกราฟแจกแจงความถี่ซึ่งเป็นตัวแทนของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ของขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมตามความเร็วลมทั้งปีได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลสุ่มความเร็วลม 1,000 ชุดข้อมูลในหนึ่งปี ในกรณีที่ 1

จากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังกล่าว ด้วยความเชื่อมั่น 95% เราสามารถสรุปได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของข้อมูลความเร็วลมทั้งปีจะอยู่ในช่วง 9,713,417 Wh ถึง 9,746,828 Wh

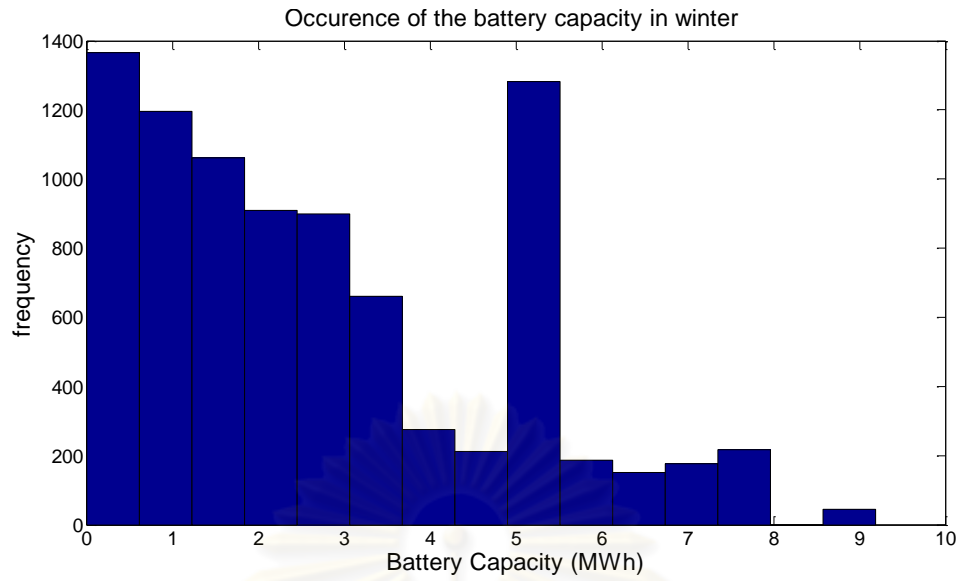
สิ่งที่จะต้องคำนวณต่อไป คือ จำนวนของแบตเตอรี่ที่จะต้องนำมาต่อขนานและอนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันและความจุตามที่ต้องการ ซึ่งค่าแรงดันนี้รู้ได้จากขนาดแรงดันของหม้อแปลงแปลงแรงดันลงฝั่งทุติยภูมิ โดยขนาดหม้อแปลงที่เลือกใช้มีขนาดพิกัด คือ 22 กิโลโวลต์ – 400/230 โวลต์ ถ้าคำนวณตามสมการที่ (4.18) แล้วจะได้ว่า  $V_{DC} = 513$  โวลต์ โดยแบตเตอรี่ 1 ตัวมีแรงดันพิกัดที่ขั้วแบตเตอรี่ 12 โวลต์ หรือ ดังนั้นจะได้ว่า  $x = 43$  หรือจะต้องใช้แบตเตอรี่ต่ออนุกรมกันแถวละประมาณ 43 ตัว ซึ่งจะได้แรงดันไฟตรงพิกัด 516 โวลต์

เมื่อทราบจำนวนแถวของแบตเตอรี่แล้ว จะสามารถคำนวณหาจำนวนตัวของแบตเตอรี่ที่จะใช้ต่อขนานได้ โดยคำนวณจากขนาดแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ เพื่อให้จำนวนตัวของแบตเตอรี่เป็นเลขลงตัว ในที่นี้จะเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม คือ 9,726,600 Wh ซึ่งจะสามารถคำนวณความจุของชุดแบตเตอรี่ได้เท่ากับ 18,850 Ah ซึ่งหมายความว่า จะต้องใช้แบตเตอรี่จำนวน 65 ตัว ต่อขนานกันในแต่ละแถว เพื่อให้ได้ความจุของชุดแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ จากการคำนวณดังกล่าวสรุปได้ว่า จะต้องใช้แบตเตอรี่ต่ออนุกรมและขนานเป็น 1 ชุดแบตเตอรี่ทั้งหมด 2,795 ตัว

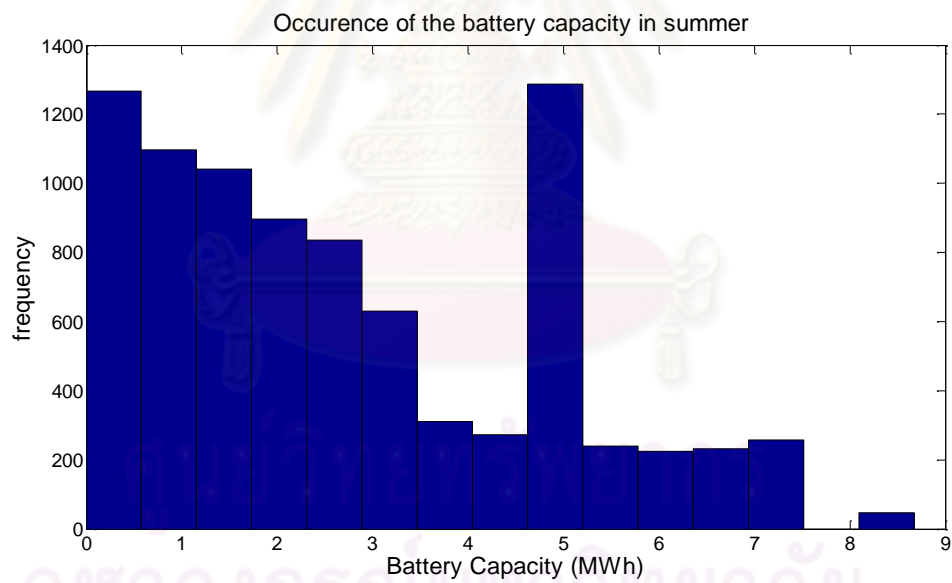
### 5.2.3.2 กรณีที่ 2 เมื่อความต้องการทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.72 MW

ในกรณีนี้จะกำหนดให้ค่าความต้องการทางไฟฟ้าเท่ากับ 0.72 MW หรือ  $P_{set} = 0.72$  MW โดยค่านี้เลือกมาจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่ความเร็วลม 5 m/s ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมส่วนใหญ่ที่สุ่มได้ตามกราฟแจกแจงการกระจายของความเร็วลมทั้งปี ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งจะเห็นว่าความต้องการทางไฟฟ้าที่กำหนดนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ ผลการทดสอบหาขนาดของแบตเตอรี่จากข้อมูลความเร็วลมในแต่ละฤดูสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16-5.18 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

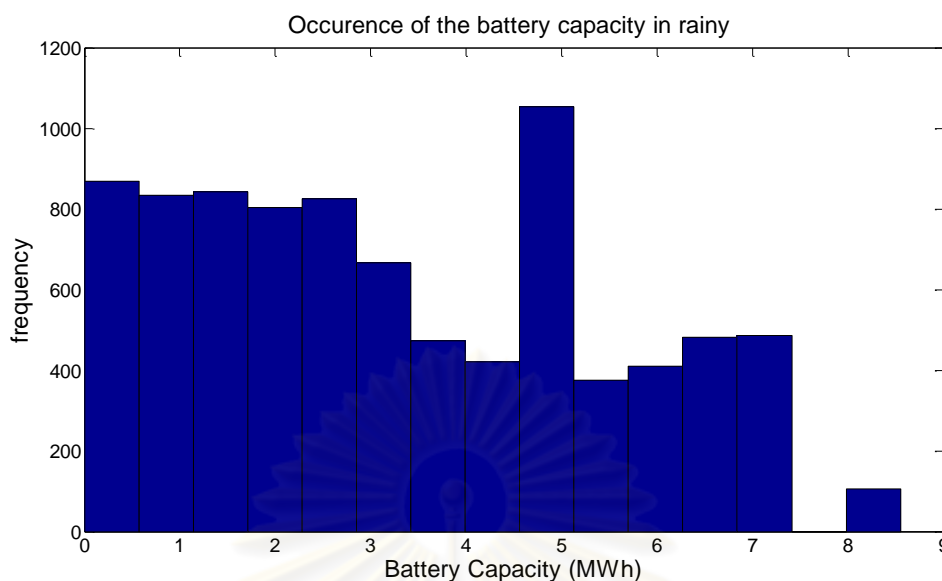


รูปที่ 5.16 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ  
1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูหนาว ในกรณีที่ 2



รูปที่ 5.17 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ  
1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูร้อน ในกรณีที่ 2



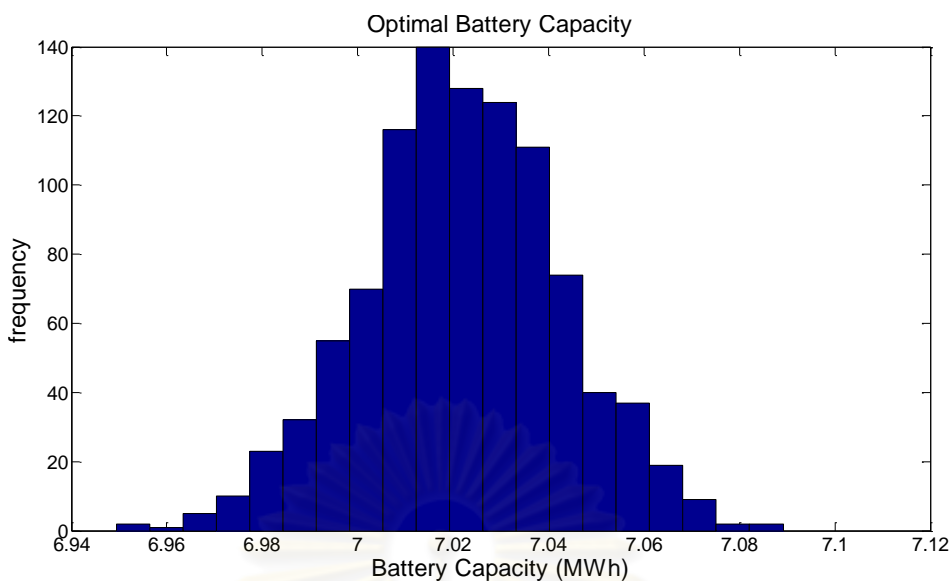


รูปที่ 5.18 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ  
1 ชุดข้อมูลความเร็วลมใน 1 วันของฤดูฝน ในกรณีที่ 2

การเลือกขนาดแบตเตอรี่จะเลือกให้มีขนาดครอบคลุม 95% ของเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเช่นเดิม โดยในที่นี้ผลการคำนวณหาค่าขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาข้อมูลความเร็วลมของฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูฝนที่สุ่มได้ภายใน 1 วัน คือ 6.6486 MWh, 6.7095 MWh และ 7.0139 MWh ตามลำดับ

เมื่อสุ่มความเร็วลมทั้งปี เป็นจำนวน 1,000 เหตุการณ์ แล้วทำการคำนวณหาค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการเดิม เราจะได้ค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม 1,000 ค่า ซึ่งจะสามารถแสดงกราฟแจกแจงความถี่ซึ่งเป็นตัวแทนของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมตามความเร็วลมทั้งปีได้ดังรูปที่ 5.19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.19 กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้  
จากข้อมูลสุ่มความเร็วลม 1,000 ชุดข้อมูลในหนึ่งปี ในกรณีที่ 2

จากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังกล่าว ด้วยความเชื่อมั่น 95% เราสามารถสรุปได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของข้อมูลความเร็วลมทั้งปีจะอยู่ในช่วง 6,987,243 Wh ถึง 7,048,253 Wh

จากนั้นจะสามารถคำนวณหาจำนวนตัวของแบตเตอรี่ที่จะใช้ต่อชานานได้ ในที่นี้จะเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม คือ 7,033,080 Wh ซึ่งจะสามารถคำนวณความจุของชุดแบตเตอรี่ได้เท่ากับ 13,630 Ah ซึ่งหมายความว่า จะต้องใช้แบตเตอรี่จำนวน 47 ตัว ต่อชานานกันในแต่ละแถว เพื่อให้ได้ความจุของชุดแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ จากการคำนวณดังกล่าว สรุปได้ว่า จะต้องใช้แบตเตอรี่ต่ออนุกรมและชานานเป็น 1 ชุดแบตเตอรี่ทั้งหมด 2,021 ตัว

จากผลการทดสอบหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมทั้งสองกรณี จะพบว่าถ้าความต้องการไฟฟ้าของโหลดมีค่าสูงหรือต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มาก จะทำให้ต้องใช้ชุดแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ไม่เพียงพอต่อโหลด

นอกจากนี้ในการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ทั้ง 2 กรณี จะสามารถพิจารณาในส่วนของค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพื่อติดตั้งแบตเตอรี่ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.6 โดยในที่นี้จะใช้ค่าการลงทุนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมที่ลำตะคอง อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา ซึ่งใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้าจำนวน 2 ต้น แต่ละต้นมีกำลังการผลิต 1.25 เมกะวัตต์ หรือมีกำลังการผลิตรวม 2.5 เมกะวัตต์ เป็นค่าการลงทุนฐาน

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมขนาด 2 เมกะวัตต์

อุปกรณ์	กรณี	จำนวนที่ใช้	ค่าใช้จ่ายต่อยูนิต (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวม (ล้านบาท)
กังหันลมผลิต ไฟฟ้า	พิจารณาเหมือนกัน ทั้ง 2 กรณี	2 ต้น	72.5 ล้าน	145
อินเวอร์เตอร์		1 ตัว	2.3 ล้าน	2.3
คอนเวอร์เตอร์		1 ตัว	2.3 ล้าน	2.3
แบตเตอรี่	กรณีที่ 1	2,795 ตัว	19,134	53.48
แบตเตอรี่	กรณีที่ 2	2,021 ตัว	(630 ดอลลาร์ สหรัฐ)	38.67

จากตารางที่ 5.6 จะพบว่าค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ในกรณีที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 36.88 ของค่าใช้จ่ายกังหันลมผลิตไฟฟ้า และในกรณีที่ 2 ค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่จะคิดเป็นร้อยละ 26.67 เมื่อรวมค่าใช้จ่ายของอินเวอร์เตอร์และคอนเวอร์เตอร์เข้าไปด้วย จะได้ว่าค่าใช้จ่ายที่ต้องลงทุนเพิ่มขึ้นในกรณีที่ 1 คิดเป็นจำนวนเงินประมาณ 58.08 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 40.055 ของค่าใช้จ่ายของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และในกรณีที่ 2 คิดเป็นจำนวนเงินประมาณ 43.27 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 29.84 ของค่าใช้จ่ายของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

จากผลการหาค่าใช้จ่ายในการลงทุนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ จะพบว่า ในกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีที่ความต้องการของโหลดมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งขนาดของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้จะมีขนาดเล็กกว่าในกรณีแรก หรือใช้จำนวนแบตเตอรี่ที่น้อยกว่า และส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแบตเตอรี่มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม นอกจากชนิดของแบตเตอรี่ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบตเตอรี่แล้ว ความต้องการไฟฟ้าของโหลดก็เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้ขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ซึ่งถ้าความต้องการไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ นั่นคือในช่วงความเร็วลมส่วนใหญ่ที่เข้าระบบ ก็จะทำให้ขนาดของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ไม่ใหญ่เกินไป และทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนมีค่าไม่สูงเกินความจำเป็น

#### 5.2.4 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า แรงดัน ความเร็วโรเตอร์และความถี่ที่เข้าสู่ระบบเมื่อหลังการติดตั้งแบตเตอรี่

ในการทดสอบนี้จะทำการสุ่มข้อมูลความเร็วลมแต่ละฤดูมาใหม่ 1 ชุด และกำหนดให้ความต้องการของระบบมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ นั่นคือ  $P_{set} = 0.72 \text{ MW}$  เพื่อทดสอบว่าขนาดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้จริง เมื่อ

ทราบข้อมูลความเร็วลมเราก็จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทราบกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จะช่วยชดเชยได้ และจะสามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้ารวมที่เข้าสู่ระบบได้จากสมการที่ 5.1

$$P_{total} = P_g + P_b \quad (5.1)$$

โดยที่

$P_g$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง

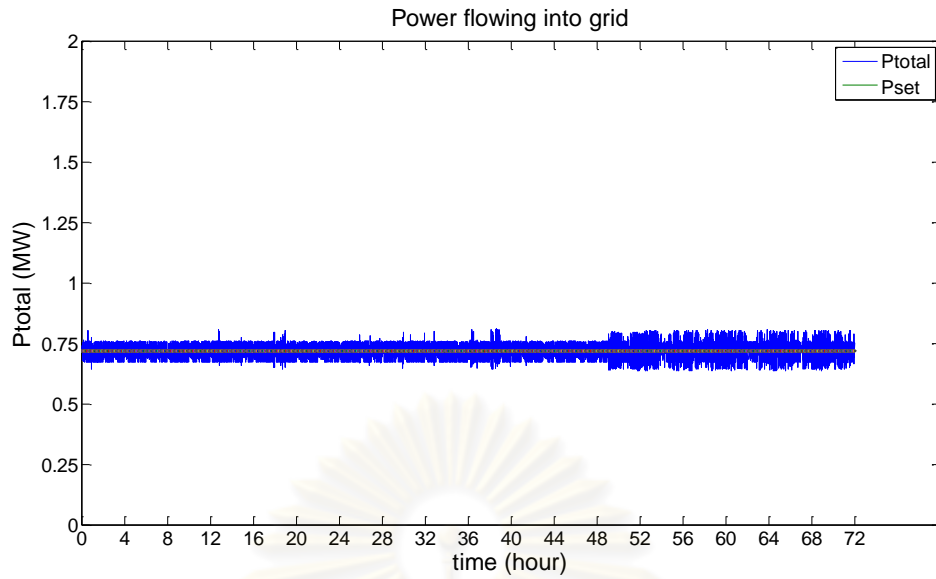
$P_b$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่แบตเตอรี่รับหรือจ่าย

ผลการทดสอบต่างๆ จะได้จากความเร็วลมที่สู่มมาทั้งปี โดยผลกำลังไฟฟ้ารวมที่เข้าสู่ระบบ แรงดันที่บัสติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และความถี่ไฟฟ้าของระบบ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.20-5.23 ตามลำดับ

#### ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้ารวมที่เข้าสู่ระบบ หลังการติดตั้งแบตเตอรี่

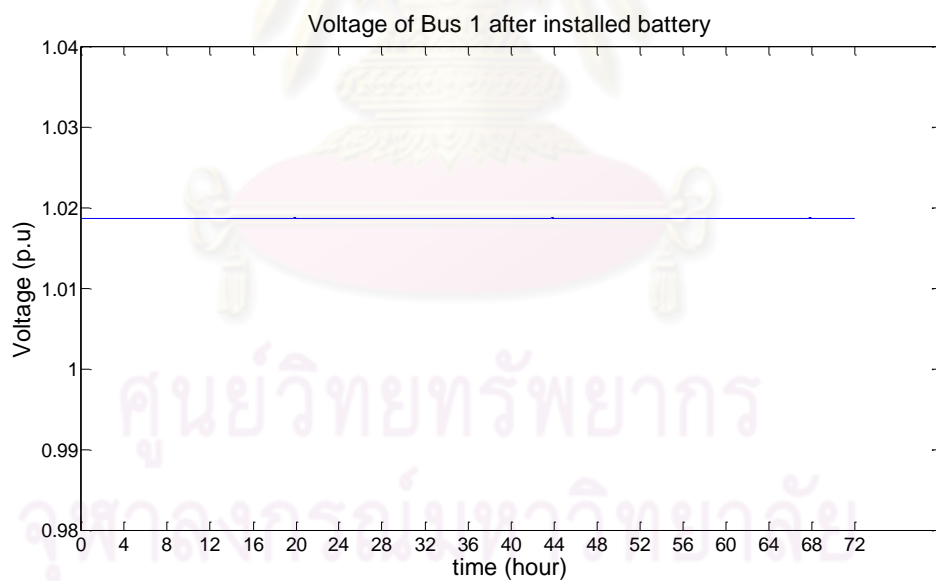
ในที่นี้จะกำหนดให้แบตเตอรี่สามารถอัดประจุเต็มได้ แต่ไม่สามารถคายประจุออกได้หมด นั่นคือ แบตเตอรี่จะต้องเมื่อคายประจุออกในแต่ละช่วงเวลาจะยังต้องเหลือประจุค้างอยู่ในแบตเตอรี่ส่วนหนึ่ง ดังนั้นกำหนดให้ค่า SOC ของแบตเตอรี่เมื่อคายประจุจะต้องไม่ลดต่ำกว่า 30% ของพิกัดแบตเตอรี่

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



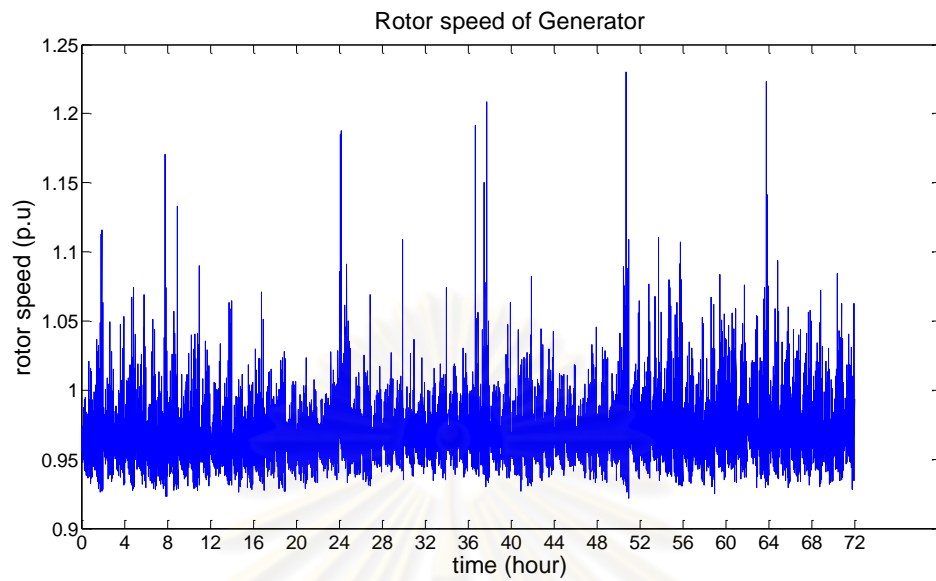
รูปที่ 5.20 ตัวอย่างผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าวรวมที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่

#### ผลการทดสอบขนาดแรงดันที่บัสติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบตเตอรี่



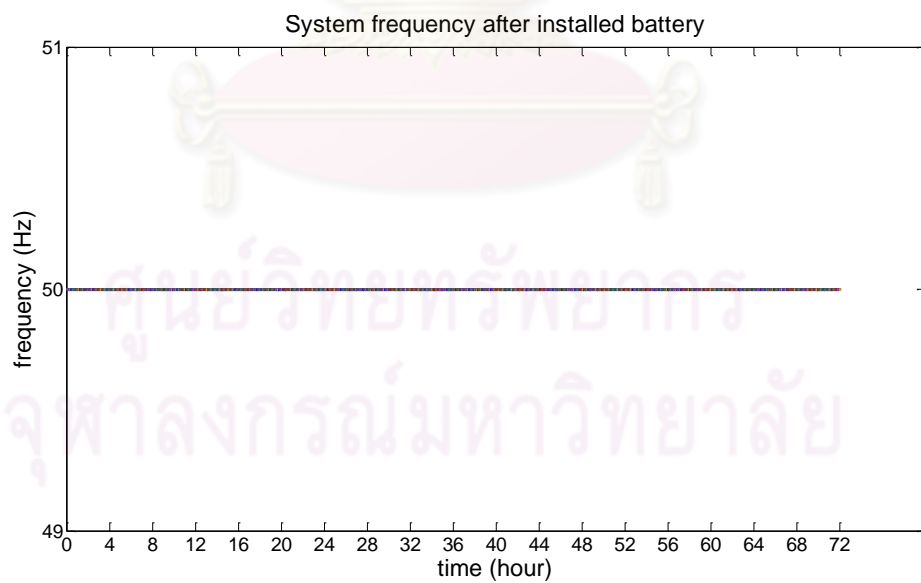
รูปที่ 5.21 ตัวอย่างขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบตเตอรี่

ผลการทดสอบความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังการติดตั้งแบตเตอรี่



รูปที่ 5.22 ตัวอย่างความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังจากติดตั้งแบตเตอรี่

ผลการทดสอบความถี่ไฟฟ้าของระบบ หลังการติดตั้งแบตเตอรี่



รูปที่ 5.23 ตัวอย่างความถี่ไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบหลังจากติดตั้งแบตเตอรี่



จากผลการทดสอบที่ได้จะพบว่า กำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะมีการแกว่งที่น้อยลง ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกชดเชยด้วยแบตเตอรี่ที่ได้ก็มีค่าเข้าใกล้ค่าความต้องการของระบบมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในส่วนของความเร็วโรเตอร์จะไม่มีเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่เข้าระบบ ในส่วนของแรงดันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการควบคุมจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG และความถี่ของระบบจะมีค่าคงที่ที่ 50 เฮิร์ต เนื่องจากการละเลยผลของทรานเซียนส์ทางด้านสเตเตอร์ และการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG กับบัสบนันต์ที่มีแรงดัน มุมเฟส และความถี่คงที่



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าไม่คงที่แปรเปลี่ยนไปตามความเร็วลมซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและสภาพพื้นที่ กำลังไฟฟ้าที่มีการแกว่งนี้จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้ามืดค่าไม่คงที่ตามไปด้วย หากกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมนี้ผ่านเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างเช่นแบตเตอรี่แล้ว จะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดปัญหาในด้านเสถียรภาพและคุณภาพของไฟฟ้าได้ ดังนั้น จึงต้องมีการติดตั้งแบตเตอรี่เพื่อช่วยเก็บกักกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกินจากการผลิต และช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ซึ่งจะเห็นว่าการติดตั้งแบตเตอรี่นั้นมีประโยชน์ต่อการผลิตไฟฟ้าให้ได้คุณภาพและมีเสถียรภาพ แต่สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาก็คือ ขนาดความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะบ่งบอกขนาดกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถรับหรือจ่ายได้ โดยถ้าเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ติดตั้งน้อยเกินไป อาจทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถช่วยเก็บหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะส่งผลให้ช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าไม่เต็มที่ แต่ถ้าเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่ใหญ่เกินไปก็อาจจะส่งผลถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดของแบตเตอรี่เพื่อใช้ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมให้มีความเหมาะสม

ในส่วนของการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม จะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของความเร็วลม ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงและความไม่แน่นอนของความเร็วลม โดยในส่วนของความไม่แน่นอนของความเร็วลมนี้จะได้จากกระบวนการเชิงสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและมีความแปรปรวนแปรตามเวลา จากนั้นความเร็วลมดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นกำลังลมโดยกังหันลม และจากนั้นกำลังลมนี้จะเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นกำลังไฟฟ้าต่อไป ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทางที่สามารถปรับความเร็วได้ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้มีขนาดเล็ก สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายภายนอก และสามารถชดเชยความแตกต่างระหว่างความถี่ทางกลและความถี่ทางไฟฟ้าได้ การคำนวณกำลังไฟฟ้าแรงดัน และความถี่ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถทำได้โดยอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟขาออก และช่วยควบคุมแรงดัน ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผ่านออกมาเข้าสู่ระบบส่งไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดตามวิธีการติดตามกำลังลมสูงสุด

กำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงมีปัญหาอยู่ เนื่องจากกำลังไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงต้องมีการติดตั้งแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก มีให้เลือกหลายขนาด มีความทนทานและสามารถหาซื้อได้ง่าย และในการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ จะคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ ซึ่งในที่นี้จะใช้แบบจำลองพลวัตแบบใหม่ร่วมกับข้อมูลของแบตเตอรี่จากบริษัทผู้ผลิต เพื่อนำมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการประมาณกราฟการทดสอบของผู้ผลิต แต่การใช้แบตเตอรี่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าจะต้องใช้แบตเตอรี่จำนวนหลายตัวมาต่ออนุกรมผสมขนานเป็นชุดแบตเตอรี่เพื่อให้ได้ขนาดแรงดันและความจุของชุดแบตเตอรี่ที่ต้องการ การคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่จะใช้วิธีการเชิงเลขในการคำนวณ เนื่องจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้อยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ซึ่งวิธีที่เลือกใช้คือ วิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำ ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และง่ายต่อการทำความเข้าใจ นอกจากนี้ ความต้องการไฟฟ้าหรือโหลด จะมีผลในการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ โดยถ้าความต้องการทางไฟฟ้ามีค่าแตกต่างไปจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มาก จะทำให้ต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จะต้องชดเชยมีค่าสูง

ต่อจากนั้น เมื่อทราบขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมแล้ว ก็จะสามารถคำนวณจำนวนตัวของแบตเตอรี่ที่ต้องนำมาต่อเป็นชุดแบตเตอรี่ได้ และจากนั้นจะนำขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ไปทดสอบกับระบบไฟฟ้าที่กำหนดขึ้น เพื่อดูผลของแบตเตอรี่ที่มีต่อกำลังไฟฟ้า ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจาก เมื่อติดตั้งชุดแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้จะช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความถี่ของระบบมีค่าคงที่ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ เนื่องจากการละเลยผลทรานเซียนส์ของสเตเตอร์ ทำให้ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าต่อความถี่ของระบบได้

ศูนย์วิจัยเพื่อพัฒนาระบบ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] ฝ่ายพัฒนาและแผนงานโครงการ (อพผ.). [Online]. Available from: [http://www2.egat.co.th/re/egat\\_wind](http://www2.egat.co.th/re/egat_wind). การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [2011, Jan 6]
- [2] Zang, T.C. Initial Study of Using Rechargeable Batteries in Wind Power Generation with Variable Speed Induction Generators. IET Renewable Power Generation, 2, 2 (July 2007): 89-101.
- [3] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์. เทคโนโลยีพลังงานลม. Naresuan University Journal (2004): 57-73.
- [4] Qi, W., Xiao-hu, C., Wan-min, F. and Yan-chao, J. Study of Brushless Doubly-fed Control for VSCF Wind Power Generation System Connected to Grid. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (April 2008): 2453 – 2458.
- [5] Song, L.P. and Li, H. Simulation for Strategy of Maximal Wind Energy Capture of Doubly Fed Induction Generators. Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC) (August 2010), 4 : 2154 - 2158
- [6] The MathWorks, Inc. MATLAB & Simulink [Online]. 2010. Available from: <http://www.mathworks.com> [2010, December 12]
- [7] Chirapongsananurak, P. and Hoonchareon, N. Design of a Controller for DFIG-Based Wind Power Generation Using Model Predictive Control. Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (May 2010 ) : 833 – 837.
- [8] Jiang,Z. ,and Yu X. Modeling and Control of an Integrated Wind Power Generation and Energy Storage System. Power & Energy Society Generation Meeting, IEEE (July 2009): 1 – 8.
- [9] Wu,F., Zhang, X.P., Godfrey, K., and Ju, P. Modeling and Control of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator. Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES (November 2006): 1404 – 1409.
- [10] Kundur, P. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [11] Ackermann, T. Wind power in power system. Chichester: John Wiley & Sons,

- 2005.
- [12] Ong, C. Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB/Simulink. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [13] Mohan, N., Undeland, T. M., and Roobins, W. P. Power electronics: Converters, applications, and design. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [14] Bhadra, S. N., Kस्था, D., and Banerjee, S. Wind electrical systems. New Delhi: Oxford University Press, 2005.
- [15] Bingchang Ni ,and Constantinos Sourkounis .Control Strategies for Energy Storage to Smooth Power Fluctuations of Wind Parks. MELECON, IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (April 2010): 973 – 978.
- [16] วัฒนพงษ์ รัชวีเชียร และ นิพนธ์ เกตุจ้อย (2549) เอกสารประกอบรายวิชาการระบบสะสมพลังงาน, วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- [17] Mukund, R. Patel. Wind and Solar Power Systems. United States of America: CRC Press LLC, 2000.
- [18] Isidor Buchmann.[Online]. Available from: <http://www.batteryuniversity.com>, [2010 November 13].
- [19] ชันติ ปานขลิบ. กัณฑ์ลมผลิตไฟฟ้าสำหรับบ้านพักอาศัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สหมิตรเครื่องกล, 2551.
- [20] รศ.ดร.โคทมอารียา. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1-2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544.
- [21] Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O., and Miller, T.J.E. Power Electronic Control in Electrical Systems. Oxford: Newnes, 2002.
- [22] Chan, H.L., and Sutanto, D. A New Battery Model for use with Battery Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 1 (January 2000): 470 – 475.
- [23] Ziyad, M., Salameh Margaret, A. and Casacca William A. Lynch. A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries. IEEE Transactions on Energy Conversion (March 1992) : 93 – 98.
- [24] Margaret A. Casacca and Ziyad M. Salameh. Determination of Lead-Acid Battery Capacity Via Mathematical Modeling Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion (September 1992): 442 – 446.
- [25] Janthanramin, N., and Zhang, L. A New Dynamic Model for Lead-Acid Batteries.

Power Electronics, Machines and Drives, IET (April 2008): 86-90.

- [26] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สถาบันวิจัยพลังงาน). รายงานฉบับที่ 3 โครงการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าระยะที่ 3 เสนอ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ตุลาคม 2552).
- [27] Rolls UK & Europe is a division of Barden UK Ltd. [Online]. Available from: <http://www.rolls-battery.com/pdf/S12-290AGM.pdf> [2011 February 14 ]



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ก**  
**ข้อมูลความเร็วลม**

ตาราง ก.1 ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือนในปี 2005 วัดที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต

เดือน	ความเร็วลม (m/s)	เดือน	ความเร็วลม (m/s)
มกราคม	6.03	กรกฎาคม	7.38
กุมภาพันธ์	4.80	สิงหาคม	6.39
มีนาคม	5.22	กันยายน	6.48
เมษายน	4.00	ตุลาคม	4.74
พฤษภาคม	5.24	พฤศจิกายน	4.21
มิถุนายน	7.08	ธันวาคม	5.64

ตาราง ก.2 ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละฤดู

ชั่วโมง	ความเร็วลมในแต่ละฤดู (m/s)		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
1	5.023097	5.361823	6.114633
2	5.333031	5.107254	6.230987
3	5.021410	5.380161	5.665252
4	5.191660	5.411383	6.046494
5	5.002902	5.040668	6.354089
6	5.235122	5.393733	6.280955
7	5.291449	5.528281	6.035546
8	5.085919	5.365979	6.286418
9	5.652379	5.101217	6.325065
10	4.775389	5.56653	6.429313
11	5.317346	5.255554	6.083991
12	5.075287	5.178833	6.753120
13	5.273727	5.328746	6.135622
14	5.708895	5.183230	6.521348

ชั่วโมง	ความเร็วลมในแต่ละฤดู (m/s)		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
15	5.356315	5.382313	6.146731
16	5.289101	5.634856	6.340065
17	5.087979	5.004967	6.417576
18	5.130245	5.495877	5.953362
19	5.069434	5.347554	6.536653
20	5.235235	5.169870	5.987508
21	5.197467	5.354199	6.219599
22	4.733282	5.349153	6.357155
23	5.177131	5.494930	6.298403
24	4.965493	5.367475	6.398169

ตาราง ก.3 ระดับความเร็วลมในการผลิตกำลังไฟฟ้า

ระดับความเร็วลม	ความเร็วลม (m/s)
ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in Speed)	3.5
ความเร็วลมเต็มพิกัด (Nominal or Rated Wind Speed)	13
ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind Speed)	25

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง และตัวควบคุมที่ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยข้อมูลค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางและคอนเวอร์เตอร์มีค่าตามตาราง ข.1 ส่วนค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางจะแสดงในตารางที่ ข.2

ในส่วนของค่าเริ่มต้นของจุดทำงานและค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจะมีค่าตามตาราง ข.3 และ ข.4 ตามลำดับ สุดท้ายคือค่าตัวแปรควบคุมต่างๆ ได้แก่ ตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกรองที่กริด จะแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.10 ตามลำดับ

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางและคอนเวอร์เตอร์

กำลังไฟฟ้าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	2 MVA
แรงดันพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	22 kV
ความถี่ของจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	50 Hz
กำลังไฟฟ้าพิกัดของคอนเวอร์เตอร์	1 MVA

ตารางที่ ข.2 ค่าของตัวแปรในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง

ตัวแปรในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$R_s$	0.00706	p.u
$L_s$	3.071	p.u
$R_r$	0.005	p.u
$L_s$	3.056	p.u
$R_g$	0.0015	p.u
$L_g$	0.15	p.u
$L_m$	2.9	p.u

ตัวแปรในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$H_m$	5.04	s
$C$	10	mF

ตารางที่ ข.3 ค่าเริ่มต้นของจุดทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

จุดทำงาน	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$\omega_{r,0}$	1	p.u
$V_{dc,0}$	1200	V

ตารางที่ ข.4 ค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ค่าสัญญาณอ้างอิง	ตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม
$V_{dc,ref}$	1200 V
$i_{qg,ref}$	0 p.u

ตารางที่ ข.5 ตัวแปรที่ใช้ควบคุมมุมพิชของกังหันลม

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$K_\beta$	500	p.u
$\beta_{max}$	45	degree
$\omega_{r,max}$	1.5	p.u

ตารางที่ ข.6 ตัวแปรควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$K_{p,P_s}$	1	p.u
$K_{i,P_s}$	100	p.u

ตารางที่ ข.7 ตัวแปรควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$K_{p,V_s}$	1.25	p.u
$K_{i,V_s}$	300	p.u
$X_s$	0.02	p.u

ตารางที่ ข.8 ตัวแปรควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$K_{p,I_r}$	0.3	p.u
$K_{i,I_r}$	8	p.u

ตารางที่ ข.9 ตัวแปรควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$K_{p,V_{dc}}$	10	p.u
$K_{i,V_{dc}}$	100	p.u

ตารางที่ ข.10 ตัวแปรควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรรองที่กริด

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$K_{p,I_g}$	1	p.u
$K_{i,I_g}$	100	p.u



## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลของระบบทดสอบ

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูลระบบทดสอบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมที่มีแบตเตอรี่ติดตั้งอยู่

#### ค.1 ข้อมูลบัสของระบบ

ข้อมูลบัสซึ่งเป็นจุดทำงานเริ่มต้นของการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัสของระบบ

บัส	ประเภท	ความต้องการกำลังไฟฟ้า		อุปกรณ์ตัวต่อแบบขนาน		แรงดันสูงสุด (p.u.)	แรงดันต่ำสุด (p.u.)
		P(MW)	Q(MVAr)	$G_s$ (MW)	$B_s$ (MVAr)		
1	บัสควบคุมแรงดัน	2	0	0	0	1.05	0.95
2	โหลดบัส	1	0	0	1	1.05	0.95
3	บัสควบคุมแรงดัน	0	0	0	0	1.05	0.95

#### ค.2 ข้อมูลหม้อแปลง

หม้อแปลงทุกตัวมีค่ารีแอกแตนซ์ 0.00015 pu โดยหม้อแปลงแปลงแรงดันขึ้นที่ต่อระหว่างบัส 1 และ 2 จะมีค่าพิกัดคือ 50 kVA และ 22/230 kV ส่วนหม้อแปลงแปลงแรงดันลงที่ต่ออยู่ระหว่างบัส 1 และคอนเวอร์เตอร์ มีค่าพิกัด 30 kVA และ 22 kV/400 V

#### ค.3 ข้อมูลสายส่ง

ค่าฐานคือ 100 MVA และ 22 kV

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ

สายส่ง	ไปบัส	จากบัส	ความต้านทาน (p.u)	รีแอกแตนซ์ (p.u)
1	1	2	0	0.00015
2	2	3	0	0.05
3	2	3	0	0.093

## ภาคผนวก ง

### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความจุแบตเตอรี่

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณความจุแบตเตอรี่ โดยในตาราง ง.1 และ ง.2 จะแสดงข้อมูลการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ของบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM ตามลำดับ และจะมีการประมาณกราฟเพื่อหาสมการเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ห่มของตัวแปรต่างๆ ในแบตเตอรี่ และสุดท้ายในตาราง ง.3 จะแสดงค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ

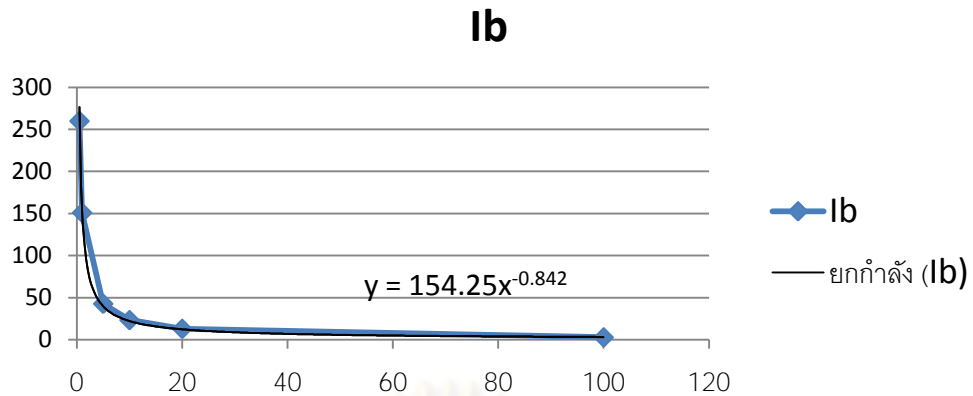
ตาราง ง.1 ข้อมูลการอัดประจุของแบตเตอรี่ของบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM

เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ (โวลต์)	ประจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)	กระแสอัดประจุ (แอมแปร์)
5	10.2	214	42.8
10	10.5	234	23.4
20	10.5	260	13
100	13.6	290	2.9

ตาราง ง.2 ข้อมูลการคายประจุของแบตเตอรี่ของบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM

เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ (โวลต์)	ประจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)	กระแสคายประจุ (แอมแปร์)
0.5	9.6	130	260
1	9.6	151	151
5	10.2	214	42.8
10	10.5	234	23.4
20	10.5	260	13
100	13.6	290	2.9

แต่เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่มีอยู่น้อยกว่าจำนวนตัวแปรที่ต้องการหา จึงต้องมีการกำหนดจุดเพิ่ม โดยนำกระแสอัดหรือคายประจุ และเวลาที่ใช้อัดหรือคายประจุมาสร้างกราฟ และประมาณสมการ เพื่อประมาณจุดเวลาและค่ากระแสเพิ่ม ดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาจากข้อมูลที่มีอยู่

จะเห็นว่าสามารถประมาณกราฟได้เป็นกราฟยกกำลังมีสมการดังนี้

$$I_b = 154.25 \times t^{-0.842} \quad (\text{ง.1})$$

โดยที่

$I_b$  คือ กระแสอัดหรือคายประจุ

$t$  คือ เวลาในการอัดหรือคายประจุ มีหน่วยเป็นชั่วโมง

โดยในที่นี้จะสมมติจุดที่เวลา 15 ชั่วโมง ซึ่งจะใช้ได้ทั้งในช่วงการอัดประจุและคายประจุ ซึ่งเท่ากับได้จุดเพิ่มอีก 2 จุด ส่งผลให้การประมาณจุดเพิ่มนี้จะทำให้ได้จำนวนข้อมูลเท่ากับจำนวนตัวแปรพอดี

ตาราง ง.3 ค่าเริ่มต้นในการคำนวณความจุของแบตเตอรี่

ตัวแปรเริ่มต้น	ค่าที่ใช้	หน่วย
$C_{n,0}$	100	Ah
$SOC_{0,ch}$	0	%
$SOC_{0,dch}$	100	%
$SOC_{min}$	30	%
$SOC_{max}$	100	%

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอัญชลี ประภัสสรพิทยา เกิดวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย