

การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
เมื่อพิจารณาถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่

นายชุตติม์ อากาศิพัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF WIND POWER GENERATION SYSTEM
WITH POWER AND FREQUENCY FLUCTUATION CONSIDERATION

Mr. Chutitham Apapipat

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 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่
ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อพิจารณาถึง
การแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่

โดย

นายชุตติธัม อาภาพิพัฒน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุศลศ อุดมวงศ์เสรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุศลศ อุดมวงศ์เสรี)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สมภาพ อัมมมงคล)

ชุตติธัม อภาพิพัฒน์ : การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เมื่อพิจารณาถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่. (DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF WIND POWER GENERATION SYSTEM WITH POWER AND FREQUENCY FLUCTUATION CONSIDERATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี, 90 หน้า.

พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนธรรมชาติที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน แต่เนื่องจากความไม่แน่นอนของความเร็วลม จึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นไม่มีความสม่ำเสมอ และทำให้ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดของแรงดันของระบบในบริเวณที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมนั้นเกิดการแกว่ง ซึ่งนำไปสู่ปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น การติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถบรรเทาปัญหาลงได้ และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการติดตั้งแบตเตอรี่ คือ ขนาดของแบตเตอรี่จะต้องมีความเหมาะสมกับกำลังการผลิต ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และช่วยควบคุมต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินความจำเป็น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเริ่มจากพิจารณาแบบจำลองของความเร็วลม จากนั้นนำความเร็วลมที่ได้มาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยอาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ชนิดสองทาง และทำการจำลองระบบไฟฟ้าส่วนที่ต่ออยู่ด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ผลลัพธ์ของการคำนวณจะถูกนำมาใช้ในการหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด วิธีการที่นำเสนอถูกทดสอบกับระบบทดสอบที่กำหนดขึ้น ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าเป็นที่น่าพอใจ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5470481421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : POWER FLUCTUATION / DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR / LEAD-ACID BATTERY / OPTIMAL BATTERY CAPACITY

CHUTITHAM APAPIPAT : DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF WIND POWER GENERATION SYSTEM WITH POWER AND FREQUENCY FLUCTUATION CONSIDERATION. ADVISOR: ASST.PROF. KULYOS AUDOMVONGSEREE, Ph.D., 90 pp.

Wind, one of the natural resources, has been widely used to generate the electricity in recent years. However, using the wind energy has a major disadvantage that must be taken into account, i.e. the generated output power, voltage magnitude, and electrical frequency are intermittent. They fluctuate due to the unsteady wind speed. Dispatching these amounts of inconstant power to the utility grid will affect the quality of electricity and particularly stability of the network. Installation of battery to the wind power generation system could alleviate 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 battery capacity to cope with these problems. The proposed algorithm begins with wind speed model. The output power can be calculated based on Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) dynamic model. The rest of the interconnected power system is modeled as a synchronous generator. An optimal battery capacity can be determined by lead-acid battery dynamic model. The proposed algorithm has been tested with a constructed test system. Satisfactory results were obtained.

Department :Electrical Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study :Electrical Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ และดร. สมภพ อัมภมมงคล ที่ได้สละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้

บทที่ 3 หลักการและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่	25
3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	25
3.1.1 แบตเตอรี่ (Battery)	25
3.1.1.1 แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary battery)	26
3.1.1.2 แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary battery)	26
3.1.2 ล้อช่วยแรง (Flywheel)	27
3.1.3 การอัดอากาศ (Compressed air storage)	27
3.1.4 ระบบสูบน้ำกลับ (Pumped Storage)	28
3.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่	28
3.2.1 คุณสมบัติทางเคมี	28
3.2.2 แรงดัน	28
3.2.3 ความจุของแบตเตอรี่	29
3.2.4 พลังงานจำเพาะและความหนาแน่นของพลังงาน	29
3.2.5 กำลังจำเพาะ	29
3.2.6 ซี-เรต (C-rates)	29
3.3 ชนิดของแบตเตอรี่	29
3.3.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid battery; Pb-acid)	30
3.3.2 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ निकิลเป็นวัสดุ (Nickel-based batteries)	30
3.3.2.1 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium battery; NiCd)	30
3.3.2.2 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-โลหะไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride battery; NiMH)	31
3.3.3 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ลิเทียมเป็นวัสดุ (Lithium-based batteries)	31
3.3.3.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-Ion battery; Li-ion)	31
3.3.3.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-โพลีเมอร์ (Lithium-Polymer battery; Li-poly)	31
3.4 การต่อชุดแบตเตอรี่	33
3.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม	33
3.4.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน	34
3.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมร่วมกับแบบขนาน	35
3.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลัง	35
3.5.1 วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ	36
3.5.2 วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง	36
บทที่ 4 แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดและ การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่	38

4.1	ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	38
4.1.1	แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบน้ำ (Flooded Type หรือ Wet Type)	38
4.1.2	แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบปิดผนึก (Sealed).....	38
4.1.3	แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบ AGM (Absorbent Glass Mat)	39
4.1.4	แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบเจล (Gel).....	39
4.1.5	แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบ VRLA (Valve - Regulated Lead Acid).....	39
4.2	แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	39
4.2.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	40
4.2.2	การคำนวณตัวแปรของแบบจำลองจากข้อมูลจริงของแบตเตอรี่	42
4.3	การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่	45
4.3.1	การคำนวณกำลังไฟฟ้ที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่รับหรือจ่าย	45
4.3.2	การคำนวณกำลังไฟฟ้ที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับหรือจ่าย	46
4.3.2.1	กรณีที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้หรือคายประจุ	46
4.3.2.2	กรณีที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้หรืออัดประจุ	47
4.3.3	การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น.....	47
4.3.4	การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของควมถ้ทางไฟฟ้และขนาดแรงดันของระบบ	49
บทที่ 5	การทดสอบและวิเคราะห์ผล	53
5.1	ระบบทดสอบ	53
5.1.1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ซิงโครนัส (SG).....	53
5.1.2	ความต้องการกำลังไฟฟ้ (Load)	54
5.2	ผลการทดสอบ	54
5.2.1	ผลการทดสอบการสุมความเร็วลม	54
5.2.2	ผลการทดสอบการสุมความต้องการกำลังไฟฟ้	57
5.2.3	ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้ ความถ้ทางไฟฟ้และขนาดแรงดันของระบบ	60
5.2.4	ผลการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น	62
5.2.5	ผลการทดสอบหาลังไฟฟ้ ความถ้ทางไฟฟ้และขนาดแรงดันของระบบเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้ในเบื้องต้น	67
5.2.6	ผลการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของควมถ้ทางไฟฟ้และขนาดแรงดันของระบบ	69
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย	73
	รายการอ้างอิง	75
	ภาคผนวก.....	78
	ภาคผนวก ก ข้อมูลควมเร็วลม.....	79

ภาคผนวก ข ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและการควบคุม เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำชนิดสองทาง	82
ภาคผนวก ค ข้อมูลระบบทดสอบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	85
ภาคผนวก ง ข้อมูลแบตเตอรี่	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	90

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	32
ตารางที่ 5.1	62
ตารางที่ 5.2	66
ตารางที่ 5.3	70
ตารางที่ 5.4	70
ตารางที่ ก.1	79
ตารางที่ ก.2	79
ตารางที่ ก.3	80
ตารางที่ ก.4	81
ตารางที่ ข.1	82
ตารางที่ ข.2	82
ตารางที่ ข.3	83
ตารางที่ ข.4	83
ตารางที่ ข.5	83
ตารางที่ ข.6	83
ตารางที่ ข.7	83
ตารางที่ ข.8	83
ตารางที่ ข.9	84
ตารางที่ ข.10	84
ตารางที่ ค.1	85
ตารางที่ ค.2	85
ตารางที่ ค.3	86
ตารางที่ ค.4	87
ตารางที่ ค.5	87
ตารางที่ ค.6	87
ตารางที่ ค.7	88
ตารางที่ ง.1	89

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	ส่วนประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม.....	7
ภาพที่ 2.2	การทำงานในโหมดซิงโครนัสและซูปเปอร์ซิงโครนัส	8
ภาพที่ 2.3	ตัวอย่างการกระจายของความเร็วลมในชั่วโมงที่ 4 ในฤดูหนาว.....	9
ภาพที่ 2.4	โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง	13
ภาพที่ 2.5	วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางในแกน $d - q$	15
ภาพที่ 2.6	แบบจำลองวงจรไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์	17
ภาพที่ 2.7	ลักษณะสมบัติของกระแสที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและขนาดแรงดันอ้างอิง.....	20
ภาพที่ 2.8	แผนภาพการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์	20
ภาพที่ 2.9	แผนภาพการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า.....	22
ภาพที่ 2.10	แผนภาพแสดงการคำนวณสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	24
ภาพที่ 3.1	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้า.....	25
ภาพที่ 3.2	การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม	33
ภาพที่ 3.3	การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน.....	34
ภาพที่ 3.4	การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมร่วมกับแบบขนาน	35
ภาพที่ 4.1	แนวคิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด.....	40
ภาพที่ 4.2	กราฟลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่	43
ภาพที่ 4.3	การติดตั้งระบบแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม	45
ภาพที่ 4.4	ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อชุดแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้า	46
ภาพที่ 4.5	ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อชุดแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้า	47
ภาพที่ 4.6	การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมร่วมกับแบบขนาน	48
ภาพที่ 4.7	แผนผังขั้นตอนการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่.....	52
ภาพที่ 5.1	ระบบทดสอบ.....	53
ภาพที่ 5.2	ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูหนาว	55
ภาพที่ 5.3	ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูร้อน	55
ภาพที่ 5.4	ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูฝน	56
ภาพที่ 5.5	ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมทั้งปี.....	56
ภาพที่ 5.6	การกระจายตัวของความเร็วลมทั้งปี.....	57
ภาพที่ 5.7	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าในฤดูหนาว	58
ภาพที่ 5.8	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าในฤดูร้อน	58
ภาพที่ 5.9	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าในฤดูฝน	59
ภาพที่ 5.10	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าทั้งปี	59
ภาพที่ 5.11	ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง	60
ภาพที่ 5.12	ตัวอย่างความถี่ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่	61
ภาพที่ 5.13	ตัวอย่างขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่	61

ภาพที่ 5.14 ตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดแบตเตอรี่จาก 1 เหตุการณ์ในฤดูหนาว.....	63
ภาพที่ 5.15 ตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดแบตเตอรี่จาก 1 เหตุการณ์ในฤดูร้อน.....	63
ภาพที่ 5.16 ตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดแบตเตอรี่จาก 1 เหตุการณ์ในฤดูฝน.....	64
ภาพที่ 5.17 การกระจายตัวของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับฤดูหนาว.....	65
ภาพที่ 5.18 การกระจายตัวของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับฤดูร้อน.....	65
ภาพที่ 5.19 การกระจายตัวของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับฤดูฝน.....	66
ภาพที่ 5.20 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่ คำนวณได้ในเบื้องต้น.....	68
ภาพที่ 5.21 ตัวอย่างความถี่ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเบื้องต้น.....	68
ภาพที่ 5.22 ตัวอย่างขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ใน เบื้องต้น.....	69
ภาพที่ 5.23 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่ คำนวณได้.....	71
ภาพที่ 5.24 ตัวอย่างความถี่ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้.....	71
ภาพที่ 5.25 ตัวอย่างขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้.....	72

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานไฟฟ้า แต่ด้วยสาเหตุที่การผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันนั้น นิยมใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป และมีแนวโน้มของการขาดแคลน และมีราคาเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา รวมถึงเชื้อเพลิงประเภทนี้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศซึ่งถือเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดเป็นแรงผลักดันให้มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนธรรมชาติซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่มีต้นทุนทางเชื้อเพลิงและเป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม

พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนธรรมชาติที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน แต่เนื่องจากความเร็วลมมีความไม่แน่นอนสูง จึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นไม่มีความสม่ำเสมอและทำให้ขนาดของแรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าของระบบในบริเวณที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานลมนั้นเกิดการแกว่ง ซึ่งนำไปสู่ปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ กังหันลม กลไกทางเครื่องกล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานจลน์จากลมจะถูกแปลงเป็นพลังงานกลโดยกังหันลม จากนั้นส่งผ่านพลังงานกลนี้ไปสู่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเพลลาและระบบเกียร์ และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนสุดท้าย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาใช้ในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้มีข้อดีคือ สามารถควบคุมความถี่ทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ขณะที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วไม่สอดคล้องกับความถี่ขณะนั้นได้ อีกทั้งยังสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหรือมีความสามารถในการควบคุมแรงดันได้ สำหรับโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้นั้น ทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเชื่อมต่อโดยตรงกับระบบไฟฟ้า ส่วนทางด้านโรเตอร์จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านทางคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้จะทำการควบคุม 2 ส่วน คือ การปรับมุมพิชของใบพัดของกังหันลม ซึ่งเป็นการควบคุมทางกล เพื่อป้องกันความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมมีค่าสูง และการควบคุมทางไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ซึ่งจะแยกเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟโดยใช้วิธีการควบคุมแบบติดตามกำลังลมสูงสุด (Maximum Wind Power Tracking; MPT) ลักษณะการติดตามนี้สามารถทำได้โดยการปรับความเร็วเชิงมุมของกังหันลม เพื่อที่จะให้ได้กำลังขาออกจากกังหันลมมีค่ามากที่สุด

จากปัญหาของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมที่กล่าวไปข้างต้น การติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถบรรเทาปัญหาดังกล่าวได้ โดยเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตไฟฟ้าได้สูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการ แบตเตอรี่จะทำหน้าที่กักเก็บพลังงานส่วนเกินนั้นไว้ และในทางกลับกันเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตไฟฟ้าได้ต่ำกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการ แบตเตอรี่ก็จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าแทนในส่วนที่ขาดได้ อย่างไรก็ตาม หากมีการเลือกใช้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ต่ำเกินไป จะส่งผลให้แบตเตอรี่นั้นไม่สามารถช่วยรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนต่างได้เพียงพอ และในทางตรงกันข้าม หากมีการเลือกใช้ขนาดของแบตเตอรี่ที่สูงเกินไป จะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนเกินความจำเป็น ด้วยสาเหตุที่กล่าวมานี้ การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จึงถือเป็นประเด็นที่ควรให้ความสำคัญในการวางแผนการใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

1.2 แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น โดยเริ่มจากพิจารณาแบบจำลองของความเร็วม ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการสุ่มจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ของความเร็วม เช่น การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) การแจกแจงเรย์ลี (Rayleigh distribution) การแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล (Lognormal Distribution) เป็นต้น [1], [2] ส่วนการสุ่มความเร็วมในอีกลักษณะหนึ่งจะแบ่งความเร็วมออกเป็น 2 ส่วน คือ ความเร็วมเฉลี่ยรายชั่วโมง และความไม่แน่นอนของความเร็วม โดยความเร็วมเฉลี่ยรายชั่วโมงถือเป็นตัวแทนความเร็วมเฉลี่ยที่แปรตามฤดูกาลและเวลา ในขณะที่ความไม่แน่นอนของความเร็วมถือเป็นตัวแทนการเปลี่ยนแปลงความเร็วมในช่วงเวลาสั้นๆ รอบความเร็วมเฉลี่ยโดยอาศัยการแจกแจงแบบปกติ [3] อย่างไรก็ตาม การสุ่มความเร็วมดังกล่าวมานี้ ยังไม่พิจารณาผลของกระบวนการสุ่มที่ขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการสุ่มความเร็วมที่พิจารณาผลดังกล่าว โดยอาศัยแนวคิดการแบ่งความเร็วมออกเป็น 2 ส่วนข้างต้นร่วมกับแคลคูลัสของอิโต (Ito's Calculus) ซึ่งทำให้ความเร็วมที่สุ่มได้มีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

หลังจากสุ่มความเร็วมจากแบบจำลองความเร็วมที่นำเสนอเรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อมาจึงนำความเร็วมที่สุ่มได้มาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยอาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง ซึ่งควบคุมด้วยวิธีการติดตามกำลังลมสูงสุด (Maximum Wind Power Tracking; MPT) และทำการจำลองระบบไฟฟ้าบริเวณที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมต่ออยู่ด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ทั้งนี้ แนวคิดในการจำลองระบบไฟฟ้าบริเวณที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมต่ออยู่ด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนั้น ถือเป็น การปรับปรุงแนวคิดจากงานวิจัยในอดีตที่จำลองระบบไฟฟ้าในส่วนนี้ด้วยบัสอนันต์ (Infinite bus) [4] ซึ่งมีความถี่ทางไฟฟ้าและแรงดันของระบบไม่แปรเปลี่ยนตามสภาวะการทำงานของระบบ จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ความถี่และแรงดันของระบบร่วมกันได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงปรับปรุง

แบบจำลองในส่วนดังกล่าวให้กลายเป็นแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อใช้เป็นตัวแทนการแกว่งของความถี่และแรงดันของระบบไฟฟ้าบริเวณดังกล่าว ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ของการจำลองสถานะต่างๆ ในระบบทดสอบใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น และสามารถพิจารณาเงื่อนไขการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ความถี่และแรงดันของระบบในการหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ได้

ผลลัพธ์ของการคำนวณสถานะต่างๆ ในระบบจะถูกนำมาใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่โดยอาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ซึ่งแบบจำลองเชิงพลวัตของแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะหลัก โดยลักษณะแรกคือ แบบจำลองเชิงวงจรไฟฟ้า ซึ่งทำการจำลองสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ออกมาในรูปของวงจรไฟฟ้าสมมูลที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และไดโอด เชื่อมต่อกันในลักษณะต่างๆ ตามระดับความซับซ้อนของแบบจำลอง [5] ส่วนแบบจำลองในลักษณะที่สองคือ แบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมี ซึ่งทำการจำลองสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ผ่านทางกระแสไฟฟ้าและสถานะประจุของแบตเตอรี่ [6]-[8] โดยแบบจำลองในรูปแบบที่สองนี้เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่มากกว่ารูปแบบแรก เนื่องจากสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองไม่ซับซ้อนมากนัก จึงสามารถทำการคำนวณสถานะการทำงานได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังมีข้อดีที่สามารถคำนวณตัวแปรของแบบจำลองจากข้อมูลจริงของแบตเตอรี่ได้ง่ายด้วย ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมีเป็นตัวแทนของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

เมื่อทราบถึงแบบจำลองที่จำเป็นสำหรับจำลองสถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและแบตเตอรี่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจึงทำการศึกษาดัชนีที่ใช้ในการวัดการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและแรงดันของระบบซึ่งจะนำมาใช้เป็นเงื่อนไขในการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ โดยดัชนีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 2 ดัชนี ได้แก่ ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation) [9] ซึ่งดัชนีที่กล่าวมานี้เป็นส่วนหนึ่งของดัชนีที่สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (สกพ.) ใช้สำหรับประเมินมาตรฐานคุณภาพบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางที่มีแบตเตอรี่ติดตั้งอยู่
2. เพื่อศึกษาการเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ได้

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาระบบไฟฟ้าขนาด 3 บัส แบบสามเฟสสมดุลที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่เป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าหลัก (Main grid) ผ่านทางหม้อแปลงและระบบสายส่ง
2. ละเอียดผลของสภาวะชั่วคราวทางด้านขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. กำหนดให้ความต้องการไฟฟ้าของโหลดเป็นแบบกำลังคงที่
4. ไม่พิจารณาผลของฮาร์โมนิกส์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
5. พิจารณาเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว
6. ไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อแบตเตอรี่

1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยค้นคว้าจากหนังสือและวารสารทางวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาวิธีการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยใช้วิธีการติดตามกำลังสูงสุด
3. ศึกษาวิธีการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง
4. ศึกษาโครงสร้างและแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด
5. ศึกษาวิธีการคำนวณเพื่อเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
6. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม แบตเตอรี่ และระบบที่จะใช้ทดสอบพร้อมทั้งเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง
7. ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม
8. ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพของโปรแกรมกับระบบทดสอบที่กำหนด
9. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
10. เรียบเรียงผลงานวิจัยเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิธีการวิเคราะห์เพื่อเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่
2. โปรแกรมที่ใช้จำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีการติดตั้งแบตเตอรี่
3. โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอได้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมดังต่อไปนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

บทที่ 3 จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปแบบต่างๆ จากนั้นจึงกล่าวถึงแบตเตอรี่ซึ่งเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติของแบตเตอรี่ ชนิดของแบตเตอรี่ และการต่อชุดแบตเตอรี่ รวมถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลังที่ใช้งานกับแบตเตอรี่ด้วย

บทที่ 4 จะกล่าวถึงแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ และขั้นตอนในการคำนวณหาค่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

บทที่ 5 จะกล่าวถึงผลการคำนวณเพื่อหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งหัวข้อการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อ คือ ระบบทดสอบ และผลการทดสอบ ซึ่งในส่วนของผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 6 การทดสอบ ประกอบด้วย (1) การทดสอบการสูมความร้อน (2) ผลการทดสอบการสูมความต้องการกำลังไฟฟ้า (3) การทดสอบกำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ (4) การคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น (5) การทดสอบหา กำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้ในเบื้องต้น และสุดท้ายคือ (6) การคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ

บทที่ 6 จะกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

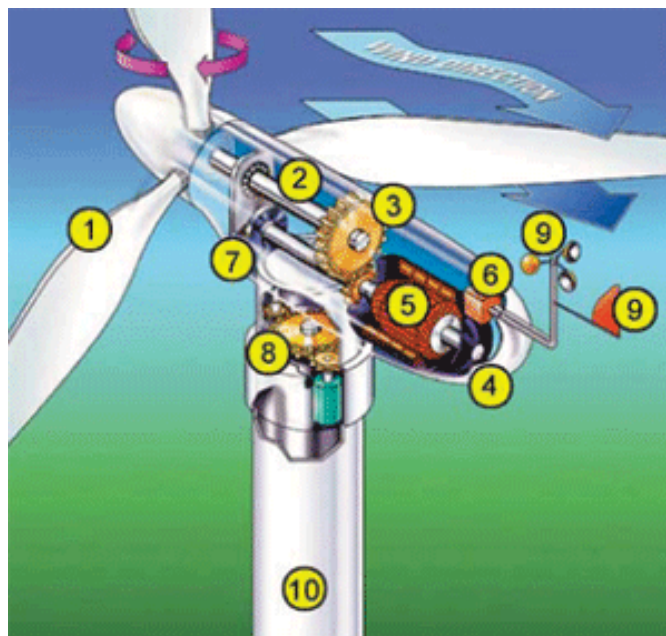
หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

2.1 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ส่วนประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม [10] สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.1 โดยแบ่งออกเป็นแต่ละส่วนได้ดังต่อไปนี้

1. **ใบพัด** ทำหน้าที่รับพลังงานลมและเปลี่ยนเป็นพลังงานกล โดยยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน
2. **เพลาแกนหมุน** ทำหน้าที่รับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านระบบกำลังเพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. **ห้องส่งกำลัง** ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุนระหว่างเพลาแกนหมุนและเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. **ห้องเครื่อง** มีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม เนื่องจากใช้บรรจุระบบต่างๆของกังหันลม เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม
5. **เครื่องกำเนิดไฟฟ้า** ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
6. **ระบบควบคุมไฟฟ้า** ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ โดยอาศัยระบบคอมพิวเตอร์สั่งการ
7. **ระบบเบรก** เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลมเกินความสามารถที่จะทนได้ของกังหัน รวมถึงในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา
8. **แกนคอกหมุนรับทิศทางลม** ทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของห้องเครื่อง โดยอาศัยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลมให้มีความสัมพันธ์กับหางเสือที่เชื่อมต่อสำหรับรับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง
9. **เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม** เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางลมให้คอมพิวเตอร์สามารถควบคุมกลไกอื่นได้ถูกต้อง
10. **เสากังหันลม** ทำหน้าที่แบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิยมใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมในปัจจุบัน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดพันที่มีคอนเวอร์เตอร์สองตัวต่อเชื่อมแบบ back-to-back ผ่านวงจรไฟตรง ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวทำหน้าที่เชื่อมระหว่างขดลวดโรเตอร์และระบบไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางนี้สามารถทำงานได้ 2 สถานะ คือ การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส เรียกว่า ซุปเปอร์ซิงโครนัส (Super-synchronous) ซึ่งที่สถานะนี้ ค่าสลิปจะมีค่าเป็นลบ ($s < 0$) และการทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือเรียกว่า ซับซิงโครนัส (Sub-synchronous) ซึ่งที่สถานะนี้ ค่าสลิปจะมีค่าเป็นบวก ($s > 0$) โดยค่าสลิปดังกล่าว สามารถนิยามได้ดังนี้ [11]

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

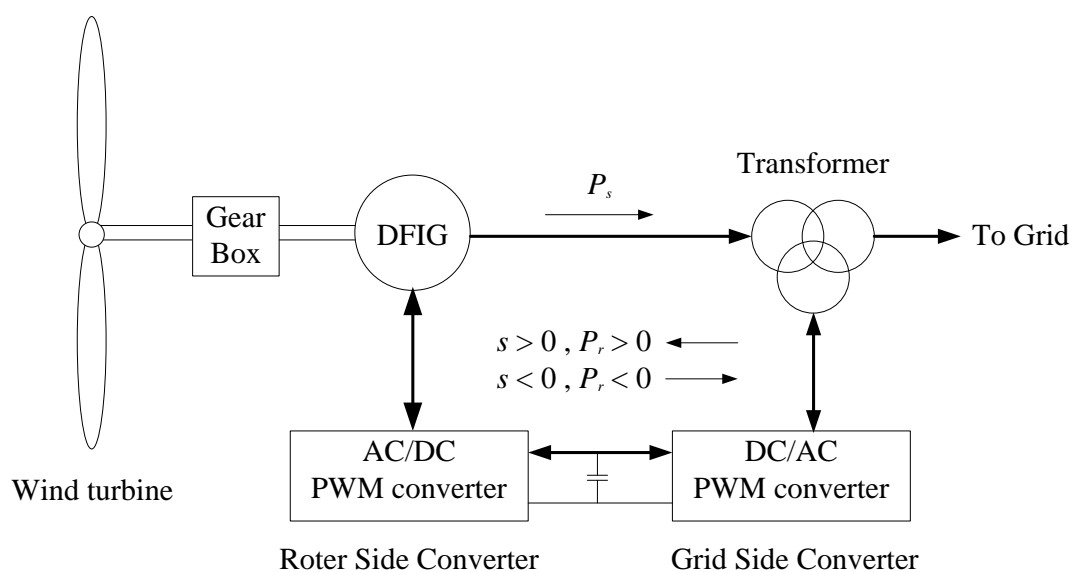
โดย

s คือ ค่าสลิป (slip)

ω_s คือ ค่าความเร็วซิงโครนัส

ω_r คือ ค่าความเร็วโรเตอร์

คอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องสามารถทำงานได้กับการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้งสองทิศทาง เพราะหากเลยค่ากำลังสูญเสียในขดลวดโรเตอร์และสเตเตอร์แล้ว เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในย่านซูปเปอร์ซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจริงจากขดลวดโรเตอร์จะไหลไปสู่ระบบไฟฟ้า ในทางกลับกัน ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในย่านซับซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดโรเตอร์ อย่างไรก็ตาม ในทั้งสองโหมดการทำงาน กำลังไฟฟ้าจริงจากขดลวดสเตเตอร์จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเท่านั้น การทำงานดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งแสดงการทำงานในโหมดซับซิงโครนัสและซูปเปอร์ซิงโครนัส



ภาพที่ 2.2 การทำงานในโหมดซับซิงโครนัสและซูปเปอร์ซิงโครนัส

กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ สามารถนิยามได้ดังนี้

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

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

โดย

P_s คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากขดลวดสเตเตอร์

P_r คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่ขดลวดโรเตอร์

P_{grid} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

โดยปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานอยู่ในช่วงความเร็วประมาณ $\pm 30\%$ ของความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นค่าสลิปจะมีค่าประมาณอยู่ระหว่าง -0.3 ถึง 0.3 ซึ่งส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวที่เชื่อมต่อยุ่มีขนาดกำลังพิกัดเพียงร้อยละ 25-30 ของกำลังพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่า ขนาดของคอนเวอร์เตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะมีขนาดเล็กซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ได้

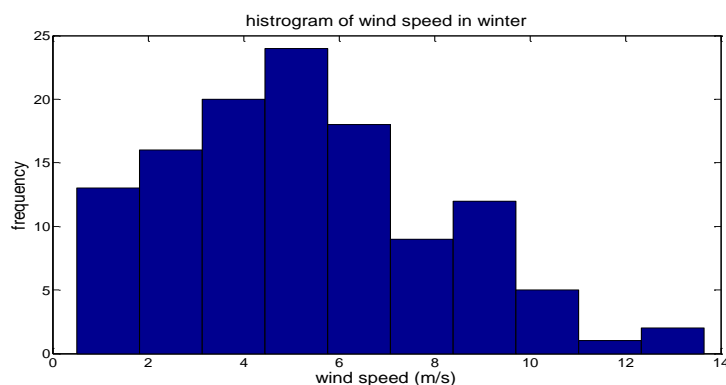
2.3 แบบจำลองความเร็วลม

ความเร็วลมเป็นปริมาณที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพื้นที่ โดยวิทยานิพนธ์นี้จำลองความเร็วลม ($v_{k,t}$) เป็น 2 ส่วนดังแสดงในสมการที่ (2.4) โดยส่วนแรกคือความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง ชั่วโมงที่ k ($v_{trend,k}$) ซึ่งใช้แทนความเร็วลมเฉลี่ยที่แปรตามฤดูกาลและเวลา ความเร็วลมในส่วนนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยช้า จึงถือว่าความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนนี้มีค่าประมาณคงที่ ส่วนต่อมาคือ ตัวแทนความไม่แน่นอนของความเร็วลม ($v_{noise,t}$) ที่ใช้แทนการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วงเวลาสั้นๆ รอบความเร็วลมเฉลี่ย [12], Error! Reference source not found.]

$$v_{k,t} = v_{trend,k} + v_{noise,t} \quad (2.4)$$

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $v_{trend,k}$ มีค่าคงที่ในแต่ละชั่วโมงแต่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ส่วนค่า $v_{noise,t}$ จะเป็นค่าที่สุ่มได้จากกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Process)

หากนำความเร็วลมในแต่ละชั่วโมงของทุกวันมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะการกระจายตัวแบบล็อกนอร์มอล (Lognormal distribution) โดยตัวอย่างการกระจายตัวนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.3 จากลักษณะการกระจายตัวนี้สามารถประยุกต์ใช้แคลคูลัสของอิโต (Ito's Calculus) ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันในกระบวนการเชิงสุ่มร่วมกับสมการที่ (2.4) เพื่อหาค่าความเร็วลมในช่วงเวลาที่สนใจได้



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างการกระจายของความเร็วมในชั่วโมงที่ 4 ในฤดูหนาว

แคลคูลัสของอิโตเป็นรูปแบบหนึ่งของแคลคูลัสของกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Calculus) โดยหากกำหนดให้กระบวนการเชิงสุ่มของตัวแปรที่เราสนใจ (S) มีค่าขึ้นกับเวลา (t) และค่าความไม่แน่นอนที่อธิบายได้ด้วยกระบวนการวีเนอร์ (Weiner Process; W_t) ดังสมการที่ (2.5)

$$dS = a(S, t)dt + b(S, t)dW_t \quad (2.5)$$

เมื่อประยุกต์ใช้ Ito's lemma ร่วมกับสมการข้างต้นแล้ว จะสามารถแสดงอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร S และ t หรือ $f(S, t)$ ได้ดังนี้

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial t} + a \frac{\partial f}{\partial S} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \right) dt + b \frac{\partial f}{\partial S} dW_t \quad (2.6)$$

โดย

f คือ ฟังก์ชันที่มีค่าขึ้นกับตัวแปร S และ t

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

เมื่อนำ Ito's lemma ที่กล่าวข้างต้นมาปรับใช้ร่วมกับสมการที่ (2.4) เพื่อสร้างสมการแบบจำลองความเร็วลม โดยเริ่มจากกำหนดให้ $a = v_{trend,k}$ และ $v = v_{noise,t}$ เพื่อลดรูปในการเขียนสมการ [4] จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ (2.4) จะสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันได้ดังสมการต่อไปนี้

$$dv_{k,t} = da + dv \quad (2.7)$$

เนื่องจาก $v_{trend,k}$ เป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วลมแต่ละชั่วโมงซึ่งเป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$da = 0 \quad (2.8)$$

ส่วน dv อธิบายได้ด้วยกระบวนการเชิงสุ่มแบบวีเนอร์ ซึ่งเป็นการกระจายแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนขึ้นกับความเร็วลม ณ ขณะนั้นและมีความไม่แน่นอนเพิ่มขึ้นตามเวลา นั่นคือ $dv \sim N(0, \sigma_k^2 \cdot v_{k,t}^2 dt)$ ดังนั้น

$$dv = \sigma_k(a + v)dW_t \quad (2.9)$$

โดย

dW คือ กระบวนการสุ่มแบบวีเนอร์ (Wiener Process) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $Z \cdot \sqrt{dt}$

Z คือ จำนวนที่สุ่มมาจากการกระจายแบบปกติมาตรฐาน (standard normal distribution)

จากเหตุผลที่กล่าวไว้ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) ทำให้สามารถพิจารณาสมการที่ (2.7) เป็นกระบวนการเชิงสุ่มได้ดังนี้

$$dv_{k,t} = dv = 0 dt + \sigma_k(a + v)dW_t \quad (2.10)$$

ประยุกต์ใช้ Ito's lemma ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ร่วมกับสมการที่ (2.10) จะสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันใดๆที่มีค่าขึ้นอยู่กับเวลา (t) และความไม่แน่นอนของความเร็วลม (v) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$df(v, t) = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{1}{2} \sigma_k^2 (a + v)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial v^2} dt + \frac{\partial f}{\partial v} \sigma_k (a + v) dW_t \quad (2.11)$$

กำหนดให้ $f(v, t) = \ln(a + v)$ เพื่อแก้สมการข้างต้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

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

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

แทนค่าสมการที่ (2.12) - (2.14) ลงในสมการที่ (2.11) จะได้

$$\int_{v_0}^{v_t} d \ln(a + v) = \int_0^t \left(-\frac{1}{2} \sigma_k^2 dt + \sigma_k dW_t \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{a + v_t}{a + v_0} = \exp \left(-\frac{1}{2} \sigma_k^2 t + \sigma_k W_t \right) \quad (2.16)$$

โดย

v_0 คือ ความไม่แน่นอนของความเร็วลมที่เวลาเริ่มต้น ซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น 0

v_t คือ ความไม่แน่นอนของความเร็วลมที่เวลาที่สนใจ

เมื่อแทนค่า $a = v_{trend,k}$ และ $v = v_{noise,t}$ กลับมา จะได้สมการแบบจำลองความเร็วลมที่แต่ละช่วงเวลา ดังสมการ (2.17) ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วลมแต่ละชั่วโมงตามสมการดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบลือกอนมอลนั่นเอง

$$v_{k,t} = v_{trend,k} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_k^2 t + \sigma_k Z\sqrt{t}\right) \quad (2.17)$$

โดย

$v_{trend,k}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงของชั่วโมงที่ k จากข้อมูลความเร็วลมจริงเฉลี่ยในแต่ละเดือน ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความเร็วเริ่มต้นของชั่วโมงที่สนใจ

σ_k คือ ค่าความแปรปรวนของความเร็วลมในชั่วโมงที่ k

t คือ จุดเวลาที่ต้องการพิจารณานับจากต้นชั่วโมงที่ k

2.4 แบบจำลองกังหันลม

กังหันลมทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังจลน์ในลมให้เป็นกำลังทางกลเพื่อเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังทางกลที่ถูกกังหันลมแปลงมาสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ [13]

$$P_w = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 \quad (2.18)$$

โดย

P_w คือ กำลังทางกลที่ได้จากกังหันลม (MW)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

C_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง

R คือ รัศมีของใบพัดของกังหัน (m)

v_w คือ ความเร็วลม (m/s)

จากกฎพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของของไหลของเบทซ์ (Betz's law) จะพบว่ากังหันลมไม่สามารถแปลงกำลังจลน์ในลมทั้งหมดเป็นกำลังกลได้ ในสมการที่ (2.18) ค่าที่บ่งบอกว่ากังหันลมสามารถแปลงกำลังจลน์ในลมเป็นกำลังกลได้มากน้อยเพียงใดนั้น คือค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient; C_p) โดยปกติค่านี้จะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 59.3% [14]

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังนี้เป็นตัวแปรไม่เชิงเส้น มีค่าขึ้นกับมุมพิชของใบพัด (Blade pitch angle; β) และอัตราส่วนความเร็วยอด (Tip Speed Ratio; λ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad (2.19)$$

โดย

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

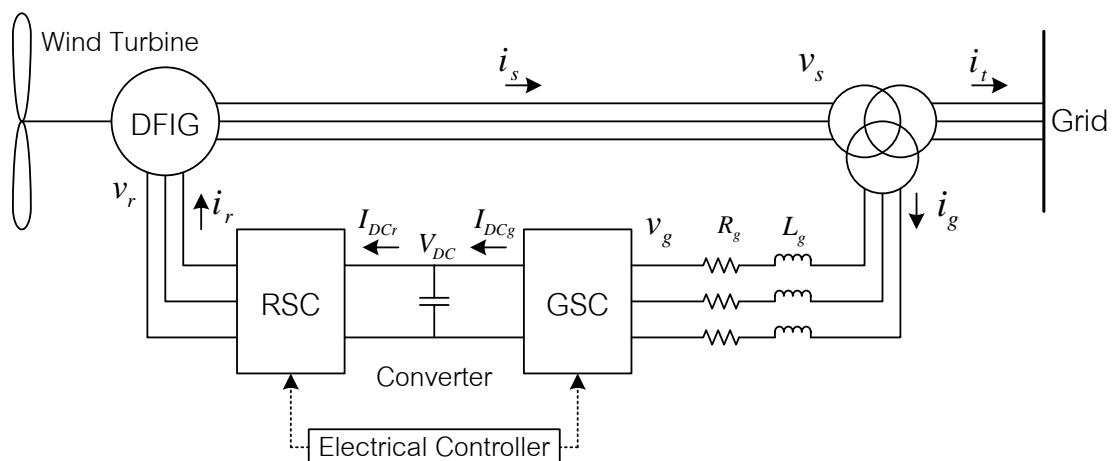
และ

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

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ $c_1 - c_6$ มีค่าดังนี้ $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ และ $c_6 = 0.0068$ [15]

2.5 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง (DFIG) ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังทางกลที่ได้จากกังหันลมให้เป็นกำลังทางไฟฟ้าเพื่อจ่ายออกสู่ระบบไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้จะถูกป้อนกระแสเข้าทั้ง 2 ทาง คือ ทางด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2.4 โดยด้านสเตเตอร์จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรง ส่วนด้านโรเตอร์จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านทางคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว ซึ่งประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor-side converter: RSC) และคอนเวอร์เตอร์ด้านระบบไฟฟ้า (Grid-side converter: GSC) คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองนี้ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าขาออกและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อกันผ่านทางวงจรถูกตรง (DC-Link) [16], [17]



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

2.5.1 แบบจำลองส่วนกลไฟฟ้า

แบบจำลองส่วนนี้แสดงถึงสถานะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ โดยส่วนกลไฟฟ้านี้ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังทางกลเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาโครงสร้างทางกลเป็นแบบจำลองแบบมวลก้อนเดียว [18] สมการพลวัตทางกลไฟฟ้าจึงสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$2H_m \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (2.20)$$

โดย

T_m คือ แรงบิดทางกลที่กักหันลมแปลงมาจากกำลังจลน์ในลม

T_e คือ แรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

H_m คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ละเลยผลของสถานะชั่วคราวทางไฟฟ้าในสเตเตอร์ โดยสามารถแสดงเป็นสมการแรงดันและฟลักซ์เชื่อมโยงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยได้ดังนี้ [18]

- สมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

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

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \quad (2.22)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \varphi_{qr} \quad (2.23)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_{sl} \varphi_{dr} \quad (2.24)$$

- สมการฟลักซ์เชื่อมโยง

$$\varphi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.25)$$

$$\varphi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.26)$$

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \quad (2.27)$$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \quad (2.28)$$

โดย

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 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

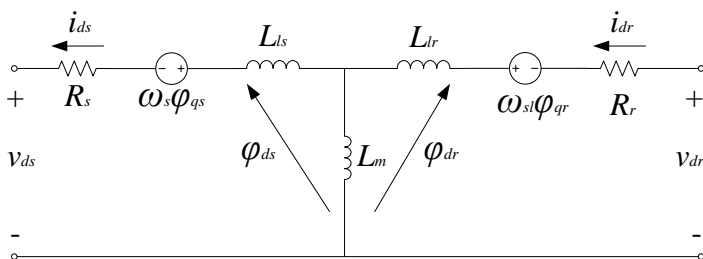
L_s, L_r คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

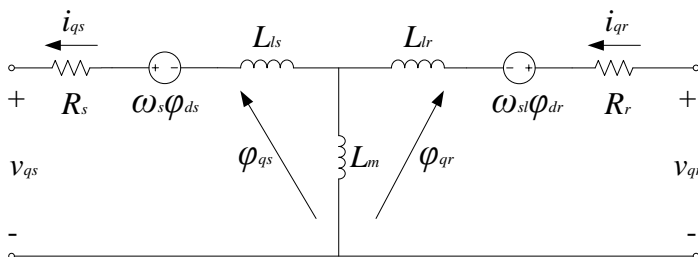
ω_{sl} คือ ค่าความเร็วสลลิป คำนวณได้จาก $\omega_s - \omega_r$

ω_{base} คือ ค่าความเร็วฐานของความเร็วโรเตอร์

จากสมการ (2.21) ถึง (2.28) สามารถเขียนวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางได้ดังภาพที่ 2.5



a) แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน d



b) แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน q

ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางในแกน $d - q$

หลังจากคำนวณค่าแรงดันและกระแสของสเตเตอร์และโรเตอร์จากสมการข้างต้นแล้ว ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_e) รวมถึงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์ (P_s, Q_s) และกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่โรเตอร์ (P_r, Q_r) สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_e = \varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds} \quad (2.29)$$

$$P_s = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \quad (2.30)$$

$$Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \quad (2.31)$$

$$P_r = v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} \quad (2.32)$$

$$Q_r = v_{qr}i_{dr} - v_{dr}i_{qr} \quad (2.33)$$

2.5.3 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ตามที่ต้องการแล้วป้อนให้กับโรเตอร์ การควบคุมแรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์จะอาศัยดัชนีการมอดูเลต (Modulation Index) ดังสมการต่อไปนี้ [19]

$$V_{AC} = \frac{mV_{DC}}{2\sqrt{2}} \quad (2.34)$$

โดย

V_{AC} คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสไฟสลับขาออกของคอนเวอร์เตอร์

V_{DC} คือ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

m คือ ดัชนีการมอดูเลตซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ส่วนแบบจำลองของวงจรไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.6 และแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

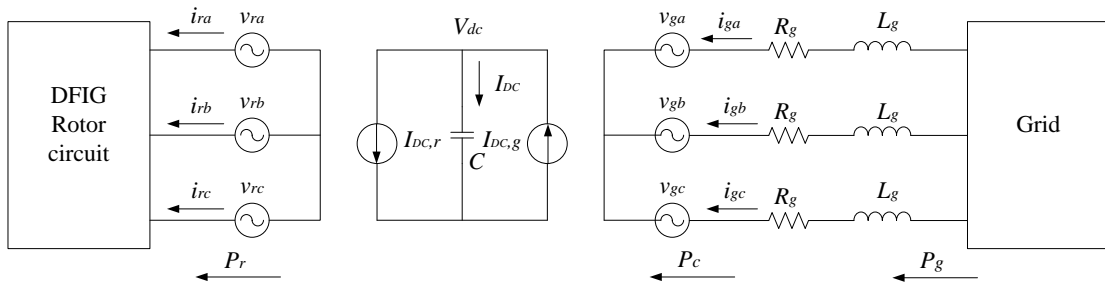
$$I_{DC} = I_{DC,g} - I_{DC,r} = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (2.35)$$

โดย

$I_{DC,g}$ คือ กระแสที่ไหลในวงจรไฟตรงฝั่งระบบไฟฟ้า

$I_{DC,r}$ คือ กระแสที่ไหลในวงจรไฟตรงฝั่งขดลวดโรเตอร์

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรไฟตรง



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองวงจรไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

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

คอนเวอร์เตอร์ด้านระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านทางวงจรกรองดังภาพที่ 2.6 โดยสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_{ds} = R_g i_{dg} + \frac{1}{\omega_{base}} \cdot L_g \frac{di_{dg}}{dt} - \omega_s L_g i_{qg} + v_{dg} \quad (2.36)$$

$$v_{qs} = R_g i_{qg} + \frac{1}{\omega_{base}} \cdot L_g \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_g i_{dg} + v_{qg} \quad (2.37)$$

โดย

v_{dg}, v_{qg} คือ แรงดันของคอนเวอร์เตอร์ด้านระบบไฟฟ้าในแกน d, q ตามลำดับ

i_{dg}, i_{qg} คือ กระแสที่ไหลในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าในแกน d, q ตามลำดับ

R_g คือ ความต้านทานในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้า

L_g คือ ความเหนี่ยวนำในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้า

หลังจากคำนวณค่าแรงดันและกระแสของคอนเวอร์เตอร์และวงจรกรองจากสมการข้างต้นแล้ว ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ด้านสเตเตอร์ (P_c, Q_c) และกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่วงจรกรอง (P_g, Q_g) สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_c = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} \quad (2.38)$$

$$Q_c = v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg} \quad (2.39)$$

$$P_g = v_{ds} i_{dg} + v_{qs} i_{qg} \quad (2.40)$$

$$Q_g = v_{qs} i_{dg} - v_{ds} i_{qg} \quad (2.41)$$

2.5.4 แบบจำลองตัวควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักได้แก่ การควบคุมทางกล และการควบคุมทางไฟฟ้า ดังนี้

2.5.4.1 แบบจำลองตัวควบคุมทางกล

เนื่องจากความเร็วลมและมุมพิชของใบพัดกังหันลม (β) มีผลต่อความเร็วในการหมุนของใบพัดกังหันลมหรือโรเตอร์ (ω_r) เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้โรเตอร์หมุนเร็วขึ้นตามไปด้วย เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้โรเตอร์หมุนเร็วเกินไปจนเกิดความเสียหายต่อกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมทางกลมาทำหน้าที่ควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม เพราะการปรับมุมพิชของใบพัดกังหันลมสามารถเพิ่มหรือลดความสามารถในการรับพลังงานจากลมได้ โรเตอร์จึงรักษาความเร็วให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ ดังนั้นการควบคุมทางกลจะทำงานเมื่อความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าที่กำหนดไว้ ($\omega_{r,max}$) และอาศัยอัตราการขยาย (K_β) ในการปรับค่าดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\beta = K_\beta(\omega_r - \omega_{r,max}) \quad (2.42)$$

โดย β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง β_{max} ซึ่งคือค่ามุมพิชสูงสุดนั่นเอง

2.5.4.2 แบบจำลองตัวควบคุมทางไฟฟ้า

การควบคุมทางไฟฟ้าอาศัยหลักการควบคุมเวกเตอร์ (Vector Control) โดยทำการควบคุมผ่านทางคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัว คอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor-side converter: RSC) ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าออกจากสเตเตอร์และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนคอนเวอร์เตอร์ด้านระบบไฟฟ้า (Grid-side converter: GSC) จะทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันของวงจรไฟตรงที่อยู่ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัว [13], [20]

2.5.4.2.1 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์มีจุดประสงค์เพื่อ ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากสเตเตอร์ และควบคุมกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์หรือควบคุมขนาดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยอาศัยการควบคุมผ่านทางกระแสที่ไหลอยู่ภายในขดลวดโรเตอร์

การควบคุมนี้ประกอบด้วย การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟโดยอาศัยการหมุนรอบอ้างอิง $d-q$ ให้แกน d มาอยู่ในแนวเดียวกันกับเวกเตอร์ของฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์ (φ_s) นั่นคือ $\varphi_{ds} = \varphi_s$ และ $\varphi_{qs} = 0$ เมื่อแทนค่าฟลักซ์เหล่านี้ลงในสมการแรงดัน (2.21) และ (2.22) จะได้ว่า

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} \quad (2.43)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \quad (2.44)$$

และเมื่อแทนค่าในสมการฟลักซ์เชื่อมโยง (2.25) และ (2.26) จะได้ว่า

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

$$i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (2.46)$$

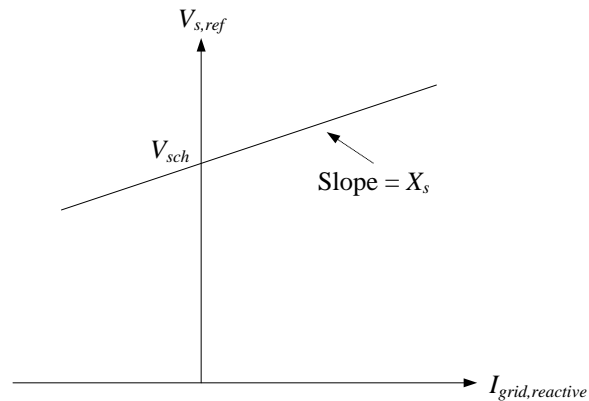
หากละเลยค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ($R_s \approx 0$) และให้ความเร็วเชิงโคโรนัส (ω_s) มีค่าเท่ากับ 1 แล้ว เมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการกำลังไฟฟ้า (2.30) และ (2.31) จะพบว่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์จะถูกควบคุมด้วยกระแสในโรเตอร์ ดังสมการต่อไปนี้

$$P_s = \varphi_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (2.47)$$

$$Q_s = \varphi_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{1}{L_s} \varphi_{ds}^2 \quad (2.48)$$

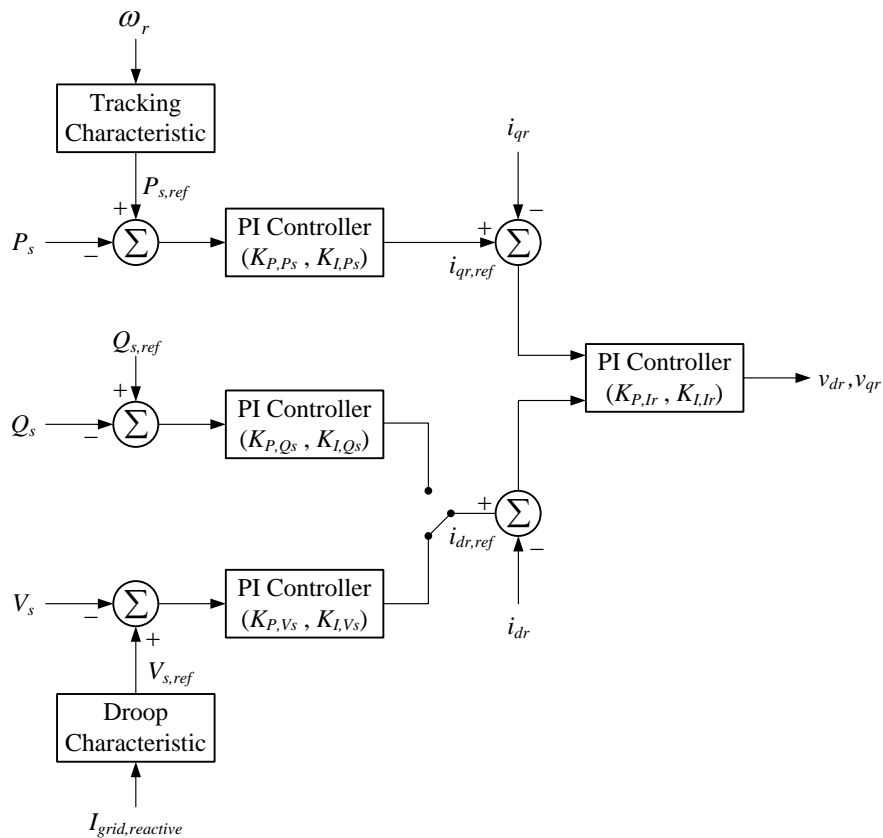
ที่ค่าความเร็วโรเตอร์ค่าหนึ่ง กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากสเตเตอร์ (P_s) จะถูกควบคุมให้ได้ค่าสูงสุดสำหรับความเร็วโรเตอร์ค่านั้น โดยอาศัยการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน q หากความเร็วลมมีค่าน้อยจนกระทั่งโรเตอร์ไม่สามารถหมุนและผลิตกำลังไฟฟ้าได้ กำลังไฟฟ้าจริงจะถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 0 p.u. ในทางกลับกัน หากความเร็วลมสูงจนกระทั่งโรเตอร์หมุนเร็วและผลิตไฟฟ้าได้สูงกว่าค่าพิกัด กำลังไฟฟ้าจริงจะถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 1 p.u. ซึ่งเป็นค่าพิกัดนั่นเอง

ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟนั้น จะมีผลต่อขนาดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมทั้งกำลังไฟฟารีแอกทีฟและขนาดแรงดันที่ขั้วได้พร้อมกัน กล่าวคือ ถ้าความต้องการกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันที่ขั้วจะถูกควบคุมให้มีค่าสูงขึ้นตามด้วยเพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ แต่ถ้าความต้องการกำลังไฟฟารีแอกทีฟลดลง ขนาดแรงดันที่ขั้วจะถูกควบคุมให้มีค่าต่ำลงเพื่อช่วยรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟนั้น ดังนั้นการควบคุมขนาดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงอาศัยการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d โดยควบคุมให้เป็นไปตามกราฟลักษณะสมบัติของกระแสที่จ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟและขนาดแรงดันอ้างอิงซึ่งมีลักษณะเป็นรูป (Droop) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะสมบัติของกระแสที่จ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟและขนาดแรงดันอ้างอิง

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากสเตเตอร์และกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน q รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์หรือขนาดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d ดังกล่าวข้างต้น การควบคุมกระแสและแรงดันที่ไหลอยู่ในขดลวดโรเตอร์สามารถทำได้โดยประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI (Proportional Integral Controller) ดังแสดงในแผนภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2.8 แผนภาพการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

2.5.4.2.2 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อรักษาขนาดแรงดันที่ตกคร่อมวงจรไฟตรงให้มีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านคอนเวอร์เตอร์ และเพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่เข้าวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าโดยอาศัยการควบคุมผ่านทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้า

การควบคุมนี้ประกอบด้วย การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟโดยอาศัยการหมุนรอบอ้างอิง $d - q$ ให้แกน d มาอยู่ในแนวเดียวกันกับเวกเตอร์แรงดันของระบบไฟฟ้า (v_s) นั่นคือ $v_{ds} = v_s$ และ $v_{qs} = 0$ เมื่อแทนค่าแรงดันเหล่านี้ลงในสมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่วงจรกรอง (2.40) และ (2.41) จะได้ว่า

$$P_g = v_{ds} i_{dg} \quad (2.49)$$

$$Q_g = -v_{ds} i_{qg} \quad (2.50)$$

จากสมการ (2.35) เมื่อกำหนดให้ $P_{DC,g} = V_{DC} I_{DC,g}$ และ $P_{DC,r} = V_{DC} I_{DC,r}$ จะได้ว่า

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{CV_{DC}} (P_{DC,g} - P_{DC,r}) \quad (2.51)$$

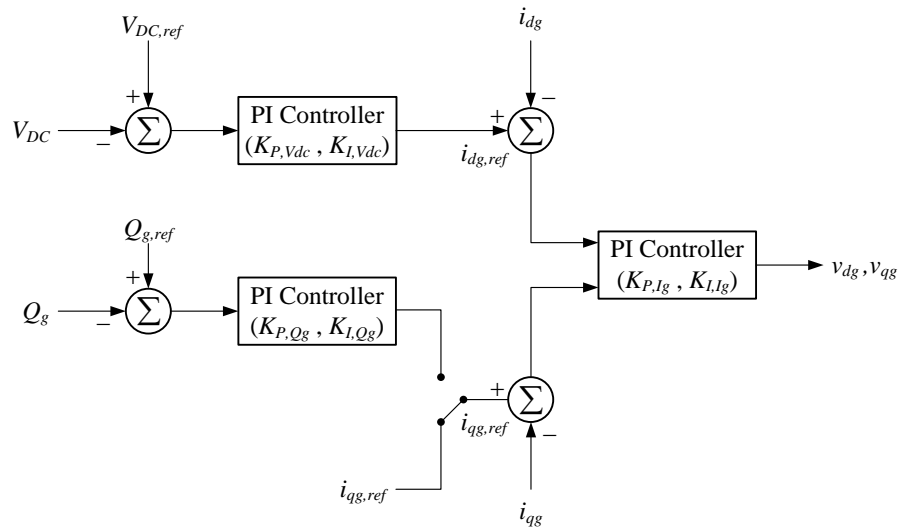
เนื่องจาก $P_{DC,r} = P_r$ และเมื่อละเลยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้า ($R_g \approx 0$) จะได้ $P_{DC,g} = P_g$ ดังนั้นสมการที่ (2.51) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{CV_{DC}} (P_g - P_r) = \frac{1}{CV_{DC}} (S_{base} v_{ds} i_{dg} - P_r) \quad (2.52)$$

โดย S_{base} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าตลอดเวลา ดังนั้น แรงดันที่คร่อมขดลวดด้านสเตเตอร์หรือแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงค่อนข้างมีค่าคงที่ การควบคุมระดับแรงดันไฟตรงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าจึงสามารถทำได้โดยอาศัยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าในแกน d และแกน q ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงและกระแสที่ไหลในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าในแกน d รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าและกระแสที่ไหลในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าในแกน q ดังกล่าวข้างต้น การควบคุมกระแสและแรงดันที่ไหลอยู่ภายในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าสามารถทำได้โดยประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI (Proportional Integral Controller) ดังแสดงในแผนภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2.9 แผนภาพการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

2.5.5 แนวทางในการพัฒนาโปรแกรมจากแบบจำลองที่นำเสนอ

หลังจากทราบถึงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงทำการจัดรูปสมการดังกล่าวข้างต้นให้อยู่ในรูปของสมการสถานะ สำหรับประยุกต์ใช้กับ ODE23 solver ในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณสภาวะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมต่อไป โดยสมการสถานะทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.5.5.1 สมการสถานะของฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์

สมการสถานะของฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์เริ่มจากการจัดรูปสมการที่ (2.27) และ (2.28) ซึ่งเป็นสมการฟลักซ์เชื่อมโยงในขดลวดโรเตอร์ให้อยู่ในรูปของกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ดังนี้

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \quad (2.53)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} + \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (2.54)$$

จากนั้นแทนค่าสมการที่ (2.53) และ (2.54) ลงในสมการที่ (2.23) และ (2.24) ซึ่งเป็นสมการแรงดันของขดลวดโรเตอร์และจัดให้อยู่ในรูปสมการสถานะของฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์ดังนี้

$$\frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + \omega_{sl} \varphi_{qr} + v_{dr} - \frac{R_r L_m}{L_r} i_{ds} \quad (2.55)$$

$$\frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \varphi_{qr} - \omega_{sl} \varphi_{dr} + v_{qr} - \frac{R_r L_m}{L_r} i_{qs} \quad (2.56)$$

2.5.5.2 สมการสถานะของกระแสที่ไหลในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้า

สมการสถานะของกระแสที่ไหลในวงจรกรองด้านระบบไฟฟ้าสามารถแสดงได้โดยจัดรูปสมการที่ (2.36) และ (2.37) ดังนี้

$$\frac{1}{\omega_{base}} \frac{di_{dg}}{dt} = -\frac{R_g}{L_g} i_{dg} + \omega_s i_{qg} + \frac{1}{L_g} v_{ds} - \frac{1}{L_g} v_{dg} \quad (2.57)$$

$$\frac{1}{\omega_{base}} \frac{di_{qg}}{dt} = -\frac{R_g}{L_g} i_{qg} - \omega_s i_{dg} + \frac{1}{L_g} v_{qs} - \frac{1}{L_g} v_{qg} \quad (2.58)$$

2.5.5.3 สมการสถานะของความเร็วโรเตอร์

สมการสถานะของความเร็วโรเตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.20) โดยแรงบิดทางกลที่กักกันลมแปลงมาจากกำลังจลน์ในลม (T_m) สามารถแสดงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกลที่ได้จากกักกันลม (P_w) ในสมการที่ (2.18) และความเร็วโรเตอร์ได้ดังนี้

$$T_m = \frac{P_w}{\omega_r} \quad (2.59)$$

ส่วนแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (T_e) สามารถแสดงได้โดยแทนสมการที่ (2.25) และ (2.26) ซึ่งเป็นฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ ในสมการที่ (2.29) และทำการจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$T_e = \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (2.60)$$

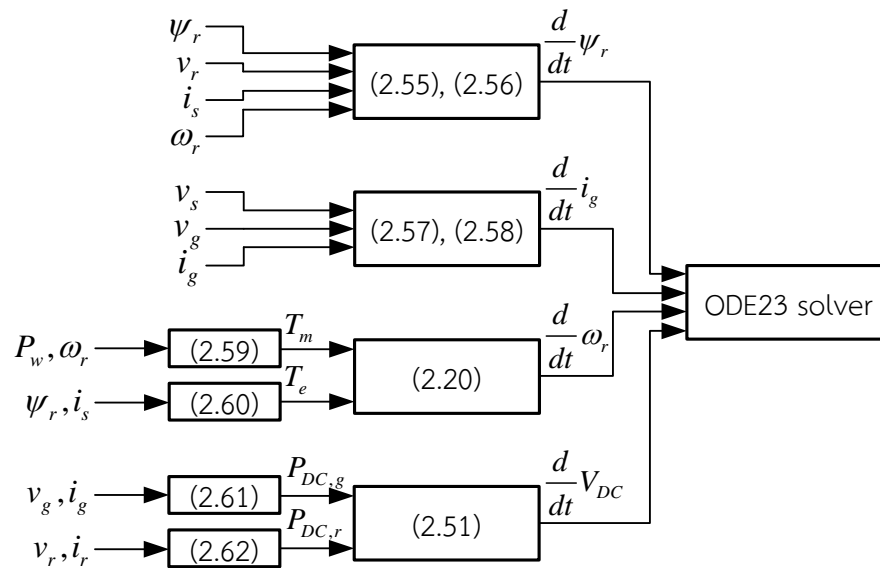
2.5.5.4 สมการสถานะของแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

สมการสถานะของแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.51) โดยกำลังไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟตรงด้านระบบไฟฟ้า ($P_{DC,g}$) และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟตรงด้านโรเตอร์ ($P_{DC,r}$) มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ด้านสเตเตอร์ (P_c) และกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่โรเตอร์ (P_r) ตามลำดับ ดังนี้

$$P_{DC,g} = S_{base} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}) \quad (2.61)$$

$$P_{DC,r} = S_{base} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \quad (2.62)$$

เมื่อจัดรูปสมการสถานะทั้งหมดของแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจึงทำการสร้างฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่าของ $\frac{d\psi_r}{dt}$, $\frac{d\phi_{qr}}{dt}$, $\frac{di_{dg}}{dt}$, $\frac{di_{qg}}{dt}$, $\frac{d\omega_r}{dt}$ และ $\frac{dV_{DC}}{dt}$ จากสมการที่ (2.55), (2.56), (2.57), (2.58), (2.20) และ (2.51) โดยค่าที่คำนวณได้เหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลขาเข้าของ ODE23 solver ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งขั้นตอนการคำนวณสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังนี้



ภาพที่ 2.10 แผนภาพแสดงการคำนวณสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

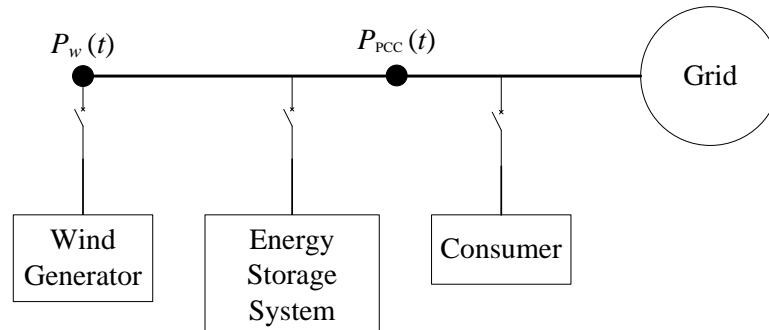
บทที่ 3

หลักการและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปแบบต่างๆ จากนั้นจึงกล่าวถึงแบตเตอรี่ซึ่งเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติของแบตเตอรี่ ชนิดของแบตเตอรี่ และการต่อชุดแบตเตอรี่ รวมถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลังที่ใช้งานกับแบตเตอรี่ด้วย

3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

เนื่องจากปัญหาความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนโดยเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยกักเก็บพลังงานให้กับระบบผลิตไฟฟ้าเหล่านี้ เพื่อช่วยให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกไปมีความเหมาะสมกับความต้องการไฟฟ้าหรือโหลดของระบบ โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะติดตั้งในลักษณะขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าก่อนเข้าสู่จุดต่อร่วม (Point of common coupling: PCC) ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานสามารถจำแนกออกได้เป็นหลายชนิดตามลักษณะหรือรูปแบบของพลังงานที่เก็บสะสม โดยสามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้ [21], [22]

3.1.1 แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้าเคมีที่เป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยทั่วไป แบตเตอรี่จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานด้านเดียวประมาณ 85% - 90% และแบตเตอรี่สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิดตามความสามารถในการแปลงพลังงาน ดังนี้

3.1.1.1 แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้จะอาศัยการทำปฏิกิริยาทางเคมีภายในแบตเตอรี่เพื่อแปลงพลังงานเคมีออกมาเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่ปฏิกิริยาทางเคมีของแบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้ ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่ชนิดนี้ทำปฏิกิริยาทางเคมีจนกระทั่งคายประจุออกมาทั้งหมดแล้ว จะไม่สามารถนำกลับมาอัดประจุได้ใหม่หรือไม่สามารถใช้งานได้อีก แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้พลังงานภายในช่วงเวลาเดียว

3.1.1.2 แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุไฟใหม่ได้ (Rechargeable battery) เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเกิดย้อนกลับได้ ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่ชนิดนี้ทำปฏิกิริยาทางเคมีจนกระทั่งคายประจุออกมาทั้งหมดแล้ว จะสามารถอัดประจุใหม่ได้อีก โดยอาศัยแหล่งพลังงานภายนอกจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแบตเตอรี่

ในขณะที่ทำการอัดและคายประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้จะแปลงพลังงานจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเคมีตามลำดับ ซึ่งระหว่างที่เกิดการแปลงพลังงานนี้ พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน เนื่องจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไปกลับของแบตเตอรี่ชนิดนี้ลดลงไปอยู่ที่ประมาณ 70% - 80%

ภายในแบตเตอรี่ 1 ลูก จะประกอบไปด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีต่อกันทั้งอนุกรมและขนานเพื่อให้ได้พิกัดของแรงดันและความจุตามที่ต้องการ โดยค่าพิกัดของแรงดันแบตเตอรี่จะกำหนดมาในรูปของแรงดันเฉลี่ยในขณะที่แบตเตอรี่คายประจุ ส่วนค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่นั้น จะบอกในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-hours; Ah) ซึ่งเป็นความจุที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ก่อนที่แรงดันจะลดลงจนถึงค่าที่กำหนดไว้ ส่วนผลคูณระหว่างแรงดันและค่าความจุดังกล่าวจะเป็นค่าพิกัดพลังงานของแบตเตอรี่ ซึ่งคือ ค่าพลังงานทั้งหมดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายให้กับโหลดได้ นับตั้งแต่แบตเตอรี่อัดประจุเต็ม โดยมีหน่วย วัตต์-ชั่วโมง (Watt-hours; Wh)

สถานะของประจุ (State-Of-Charge; SOC) ของแบตเตอรี่ที่แต่ละช่วงเวลา คือ อัตราส่วนระหว่างประจุที่เหลืออยู่จากการอัดหรือคายประจุของแบตเตอรี่และค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ลูกนั้น โดยสามารถนิยามได้ดังสมการต่อไปนี้

$$SOC = \frac{\text{ความจุที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ (แอมแปร์ - ชั่วโมง)}}{\text{ค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์ - ชั่วโมง)}} \quad (3.1)$$

3.1.2 ล้อช่วยแรง (Flywheel)

ล้อช่วยแรง (Flywheel) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปของพลังงานจลน์ผ่านทาง การหมุนของเพลลาที่พยายามรักษาความเฉื่อยไว้ โดยพลังงานที่สะสมไว้ในล้อช่วยแรงนี้ อาจเป็นพลังงานที่ผลิตเกินความต้องการหรือเป็นพลังงานที่เหลือจากการใช้งานในบางรูปแบบ เช่น การใช้ล้อช่วยแรงเก็บพลังงานส่วนเกินจากการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้าไม่มากนัก และเมื่อถึงเวลาที่ความต้องการกำลังไฟฟ้ามีค่าสูง จึงนำพลังงานที่สะสมไว้ในล้อช่วยแรงมาช่วยเสริมกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการได้ [23] พลังงานจลน์ (E) ที่ล้อช่วยแรงสามารถกักเก็บไว้ได้ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

โดย

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งแปรผันตามมวลและรัศมีของวงล้อ

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของการหมุนของวงล้อ

ล้อช่วยแรงนี้สามารถแบ่งตามแกนการหมุนออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ล้อช่วยแรงแกนแนวตั้ง และล้อช่วยแรงแกนแนวนอน แต่เนื่องด้วยล้อช่วยแรงแกนแนวตั้งสามารถกักเก็บพลังงานจลน์ได้ดีกว่าชนิดแกนนอน ดังนั้นล้อช่วยแรงแกนแนวตั้งจึงถูกประยุกต์ใช้ในแง่ของการสะสมพลังงานมากกว่าชนิดแกนนอน

3.1.3 การอัดอากาศ (Compressed air storage)

การกักเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศนี้เป็นการเก็บพลังงานในรูปของพลังงานนิวเมติก (Pneumatic energy) ซึ่งอาศัยการอัดอากาศลงไปใถ้ำขนาดใหญ่ใต้พื้นดิน โดยโครงสร้างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดนี้ประกอบด้วย 5 อุปกรณ์หลัก ได้แก่ ชุดอัดอากาศ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดกังหัน เครื่องกู้สภาพ (Recuperator) และถ้ำขนาดใหญ่ใต้ดิน

การทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้ เริ่มต้นจากการนำพลังงานไฟฟ้าที่เหลือใช้จากการบริโภคมาขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่ออัดอากาศด้วยความดันสูงลงไปสู่ถ้ำใต้พื้นดิน และเมื่ออากาศถูกอัดด้วยแรงดันสูง จะส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากต้องการนำอากาศร้อนที่กักเก็บไว้ในถ้ำใต้ดินมาใช้ จึงสามารถทำได้โดยการอุ่นอากาศด้วยเครื่องกู้สภาพแล้วนำขึ้นสู่พื้นดินด้วยเครื่องอัดอากาศร้อนเหล่านี้จะถูกผสมกับน้ำมันหรือก๊าซ เพื่อให้สามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น ซึ่งความร้อนที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวนี้ จะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าต่อไป

3.1.4 ระบบสูบน้ำกลับ (Pumped Storage)

การกักเก็บพลังงานโดยระบบสูบน้ำกลับ คือการสูบน้ำไปเก็บไว้บนแหล่งเก็บน้ำที่สูง แล้วนำน้ำจากแหล่งเก็บน้ำนั้นมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยโครงสร้างหรือส่วนประกอบของระบบสูบน้ำกลับนี้ประกอบไปด้วย 4 อุปกรณ์หลัก ได้แก่ เครื่องสูบน้ำ มอเตอร์ ชุดกังหัน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้ เริ่มต้นจากการนำพลังงานไฟฟ้าที่ส่วนเกินหรือเหลือจากความต้องการมาจ่ายให้แก่เครื่องสูบน้ำและมอเตอร์เพื่อสูบน้ำจากเขื่อนหรือแหล่งเก็บน้ำขึ้นไปเก็บไว้บนแหล่งเก็บน้ำที่สูงกว่า น้ำที่สูบขึ้นไปจึงมีค่าพลังงานศักย์สูงขึ้น และเมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าจากระบบสูบน้ำกลับนี้จึงทำการปล่อยน้ำที่เก็บไว้นั้นลงมาเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าผ่านทางชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เนื่องจากแบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย [22] มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงสามารถเลือกชนิดและรุ่นของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานได้รวมถึงมีราคาไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป และสามารถพัฒนาโปรแกรมคำนวณสถานะการทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมได้

3.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

โดยทั่วไปแบตเตอรี่สามารถจำแนกได้ด้วยคุณสมบัติหลายประการ เช่น คุณสมบัติทางเคมี แรงดัน ขนาด พลังงานจำเพาะหรือความจุของแบตเตอรี่ กำลังจำเพาะ (กำลังที่จ่ายออกไปจากแบตเตอรี่) เป็นต้น แบตเตอรี่ต่างชนิดกันก็จะมีคุณสมบัติเหล่านี้แตกต่างกันด้วย [24], [25]

3.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

วัสดุทางเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่มีหลายชนิดแต่ชนิดที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และลิเทียม ซึ่งความแตกต่างของวัสดุทางเคมีนี้เอง ทำให้ลักษณะคุณสมบัติของแบตเตอรี่มีความแตกต่างกันไปรวมถึงวิธีการอัดประจุด้วย

3.2.2 แรงดัน

แรงดันในที่นี้หมายถึงแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (Terminal battery voltage) ซึ่งค่าแรงดันนี้จะแปรตามวัสดุทางเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่และจำนวนของเซลล์แบตเตอรี่ที่นำมาต่ออนุกรมกัน โดยแรงดันที่ขั้วขณะเปิดวงจรจะมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ระบุ (Nominal battery voltage) เล็กน้อย ส่วนแรงดันที่ขั้วขณะครบวงจร นั่นคือ ขณะต่อโหลดหรืออัดประจุ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะการใช้งาน ณ ขณะนั้น

3.2.3 ความจุของแบตเตอรี่

ความจุของแบตเตอรี่ (Capacity) แสดงถึงค่าพลังงานจำเพาะในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-hour; Ah) โดยทั่วไปผู้ผลิตแบตเตอรี่จะกำหนดค่าความจุแบตเตอรี่สูงกว่าขนาดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้ แบตเตอรี่ที่บอกค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ค่าหนึ่งสามารถถูกใช้ในงานที่ต้องการความจุของแบตเตอรี่แตกต่างกันไปจากพิกัดนั้นได้ แต่ต้องไม่เกินค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ลูกนั้น และต้องใช้กับแรงดันที่ถูกต้องตามที่แบตเตอรี่ลูกนั้นกำหนด

3.2.4 พลังงานจำเพาะและความหนาแน่นของพลังงาน

พลังงานจำเพาะ (Specific energy) หมายถึง ความจุของแบตเตอรี่ต่อหน่วยน้ำหนักของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (Wh/kg) ส่วนความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) หมายถึง ความจุของแบตเตอรี่ต่อหน่วยปริมาตรของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อลิตร (Wh/l)

3.2.5 กำลังจำเพาะ

กำลังจำเพาะ (Specific power) หมายถึง ความสามารถในการจ่ายโหลด หรือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ กล่าวคือ หากกำลังจำเพาะสูง ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จะมีค่าน้อย แต่ในทางตรงกันข้าม หากกำลังจำเพาะต่ำ ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จะมีค่ามากด้วย

3.2.6 ซี-เรต (C-rates)

ซี-เรตเป็นค่าที่บอกอัตราส่วนระหว่างกระแสคายประจุเทียบกับขนาดความจุของแบตเตอรี่ ตัวอย่างเช่น ที่ 1C แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสคายประจุในปริมาณที่เท่ากับค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ได้นานติดต่อกันได้ 1 ชั่วโมง หรือที่ 0.5C แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสลดลงครึ่งหนึ่ง และที่ 0.1C แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสเป็น 0.1 เท่าของค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ เป็นต้น ในขณะที่ถ้าเป็นการอัดประจุแล้ว 1C จะหมายถึง แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุเต็มได้ภายใน 1 ชั่วโมง และ 0.5C หมายถึง การอัดประจุจนเต็มจะต้องใช้เวลา 2 ชั่วโมง เป็นต้น

3.3 ชนิดของแบตเตอรี่

โดยทั่วไปแบตเตอรี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ และแบตเตอรี่ชนิดอัดประจุไฟฟ้าใหม่ไม่ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดอัดประจุ

ไฟฟ้าใหม่ได้ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมจำเป็นต้องทำหน้าที่ทั้งรับและจ่ายพลังงานได้ โดยแบตเตอรี่ชนิดอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของวัสดุทางเคมีได้ดังนี้ [26]

3.3.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid battery; Pb-acid)

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนี้เป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ และเนื่องด้วยแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการพัฒนามาก่อนแบตเตอรี่ชนิดอื่น ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน และอีกสาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้คือ อัตราส่วนของประสิทธิภาพต่อราคามีค่าค่อนข้างสูง แม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนี้จะมีความหนาแน่นของพลังงานต่อน้ำหนักและปริมาตรของแบตเตอรี่ต่ำก็ตาม ส่วนข้อเสียหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือน้ำหนักที่สูงกว่าและความทนทานต่ำกว่าแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ निकเกิลและลิเทียมเป็นวัสดุ

3.3.2 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้นิกเกิลเป็นวัสดุ (Nickel-based batteries)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบไปด้วย 2 ชนิดหลักได้แก่ ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium battery: NiCd) และชนิดนิกเกิล-โลหะไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride battery: NiMH) ดังนี้

3.3.2.1 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium battery; NiCd)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมนี้มีข้อได้เปรียบเหนือแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดหลายประการ เช่น น้ำหนักเบากว่า มีรอบการคายประจุลึกมากกว่า และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้มากกว่า เป็นต้น จึงมีการนำแบตเตอรี่ชนิดนี้ไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ และในกล้องวิดีโอ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพง และในปัจจุบัน สารแคดเมียมนั้นถูกจำกัดการนำไปใช้งานเนื่องจากเป็นสารเคมีที่เมื่อปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีฝังกลบได้ นอกจากนี้ แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับผลกระทบทางความจำ (Memory effect) กล่าวคือ เมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้ประจุไฟฟ้าจนกระทั่งแรงดันที่ขั้วลดลงจนถึงค่าหนึ่ง แล้วไม่ได้ใช้เป็นระยะเวลาเวลานาน จะทำให้แบตเตอรี่จำแรงดันค่านั้นเป็นแรงดันสูงสุดแทน และประพุดิตัวเหมือนแรงดัน ณ จุดนั้นเป็นค่าแรงดันขณะที่อัดประจุเต็ม ส่งผลให้ความจุของแบตเตอรี่มีค่าลดลงตามไปด้วย ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดอื่นมาใช้แทน

3.3.2.2 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-โลหะไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride battery; NiMH)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกพัฒนาต่อจากแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม ซึ่งเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานในแบตเตอรี่ และขั้วแอโนดที่ใช้โลหะไฮไดรด์แทนแคดเมียมยังช่วยลดปัญหาสารพิษปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีข้อได้เปรียบแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมตรงที่สามารถลดปัญหาเกี่ยวกับผลกระทบต่อความจำได้ แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ประเภทไฮบริดจ์ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อย มีอัตราการคายประจุเอง (self-discharge) สูง ไวต่อความเสียหายเมื่ออัดประจุมากเกินไป และยังมีราคาแพงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม

3.3.3 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ลิเทียมเป็นวัสดุ (Lithium-based batteries)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบไปด้วย 2 ชนิดหลักได้แก่ ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-Ion battery; Li-ion) และชนิดลิเทียม-โพลีเมอร์ (Lithium-Polymer battery; Li-poly) ดังนี้

3.3.3.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-Ion battery; Li-ion)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดถึง 3 เท่า และยังมีค่าแรงดันที่สูงถึง 3.5 โวลต์ต่อเซลล์ ดังนั้นในการติดตั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงใช้จำนวนแบตเตอรี่น้อยในการต่ออนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องใช้แผ่นขั้วไฟฟ้าที่มีความหนา ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยรวมมีค่าสูง นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไวต่อความเสียหายถ้ามีการอัดประจุที่มากเกินไปอีกด้วย

3.3.3.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-โพลีเมอร์ (Lithium-Polymer battery; Li-poly)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีลิเทียมเป็นขั้วไฟฟ้าและนำโพลีเมอร์ที่อยู่ในรูปของแข็งมาทำเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอิเล็กโทรไลต์ดังกล่าวนี้จะช่วยเพิ่มค่าพลังงานจำเพาะให้แก่เซลล์ของแบตเตอรี่

จากชนิดของแบตเตอรี่ดังที่กล่าวไปข้างต้นทั้ง 3 ชนิด สามารถเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่แต่ละชนิดได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ

ประเภทของแบตเตอรี่	ข้อดี	ข้อเสีย
ชนิดตะกั่วกรด	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาถูกและง่ายในการผลิต - ราคาต่อความจุ มีค่าไม่สูง - เป็นเทคโนโลยีที่รู้จักแพร่หลาย มีหลากหลายขนาดและบริษัทผู้ผลิต - มีอัตราการคายประจุเองต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น - ปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าได้สูงในช่วงคายประจุ - สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงและต่ำได้ โดยที่ประสิทธิภาพยังดีอยู่ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าอัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนักต่ำ - ใช้เวลาในการอัดประจุให้เต็มนาน - มีจำนวนวัฏจักรการอัดและคายประจุจำกัด
ชนิดใช้นิกเกิลเป็นวัสดุ	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เวลาในการอัดประจุเต็มน้อย ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่แบตเตอรี่เป็นเวลานาน - มีจำนวนวัฏจักรการอัดและคายประจุสูง - มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน และสามารถเก็บไว้ในสภาวะที่แบตเตอรี่คายประจุหมดได้ - มีให้เลือกหลากหลายขนาดและประสิทธิภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าพลังงานจำเพาะต่ำ - มีผลจากภาวะผลกระทบทางความจำ - มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ถ้าใช้แคดเมียมเป็นส่วนประกอบ - มีอัตราการคายประจุเองสูง - เกิดความร้อนเมื่ออัดประจุอย่างรวดเร็ว และคายประจุค่าสูง
ชนิดใช้ลิเทียมเป็นวัสดุ	<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นของพลังงานมีค่าสูง - มีอัตราการคายประจุเองต่ำเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้นิกเกิลเป็นวัสดุ - ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย - ไม่มีผลของผลกระทบทางความจำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องใช้วงจรการป้องกันเพื่อจำกัดแรงดันและกระแส

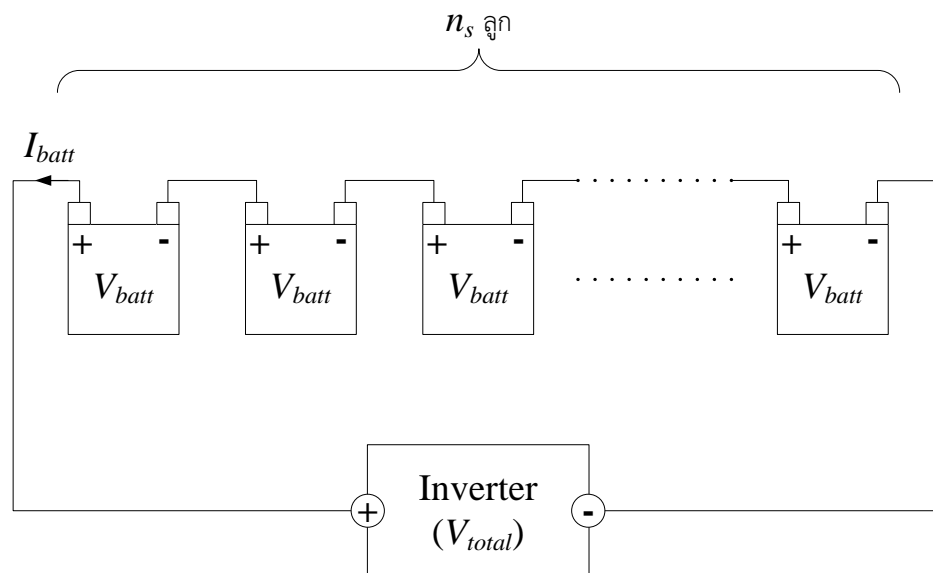
3.4 การต่อชุดแบตเตอรี่

การต่อชุดแบตเตอรี่ คือ การนำแบตเตอรี่มาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้แรงดันและความจุรวมของชุดแบตเตอรี่เป็นไปตามที่ต้องการ การต่อชุดแบตเตอรี่สามารถทำได้ 3 รูปแบบ [27] ดังต่อไปนี้

3.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม

การต่อชุดแบตเตอรี่ในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มแรงดันให้เพียงพอหรือเหมาะสมกับความต้องการในการใช้งาน ในขณะที่ความจุของแบตเตอรี่ในหน่วยแอมป์-ชั่วโมง (Ampere-hour; Ah) จะยังคงมีค่าเท่าเดิม โดยการต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมนี้จะนำขั้วบวกของแบตเตอรี่ลูกหนึ่งเชื่อมต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ลูกถัดไปในลักษณะดังภาพที่ 3.2 จนกระทั่งได้แรงดันรวมของชุดแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ ซึ่งแรงดันรวมในนี้มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งหมดที่นำมาต่ออนุกรมกัน นั่นคือ หากนำแบตเตอรี่ที่มีขนาดแรงดันเท่ากับ V_{batt} มาเชื่อมต่อแบบอนุกรมกันทั้งสิ้น n_s ลูก จะสามารถคำนวณแรงดันรวม (V_{total}) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{total} = n_s \times V_{batt} \quad (3.3)$$

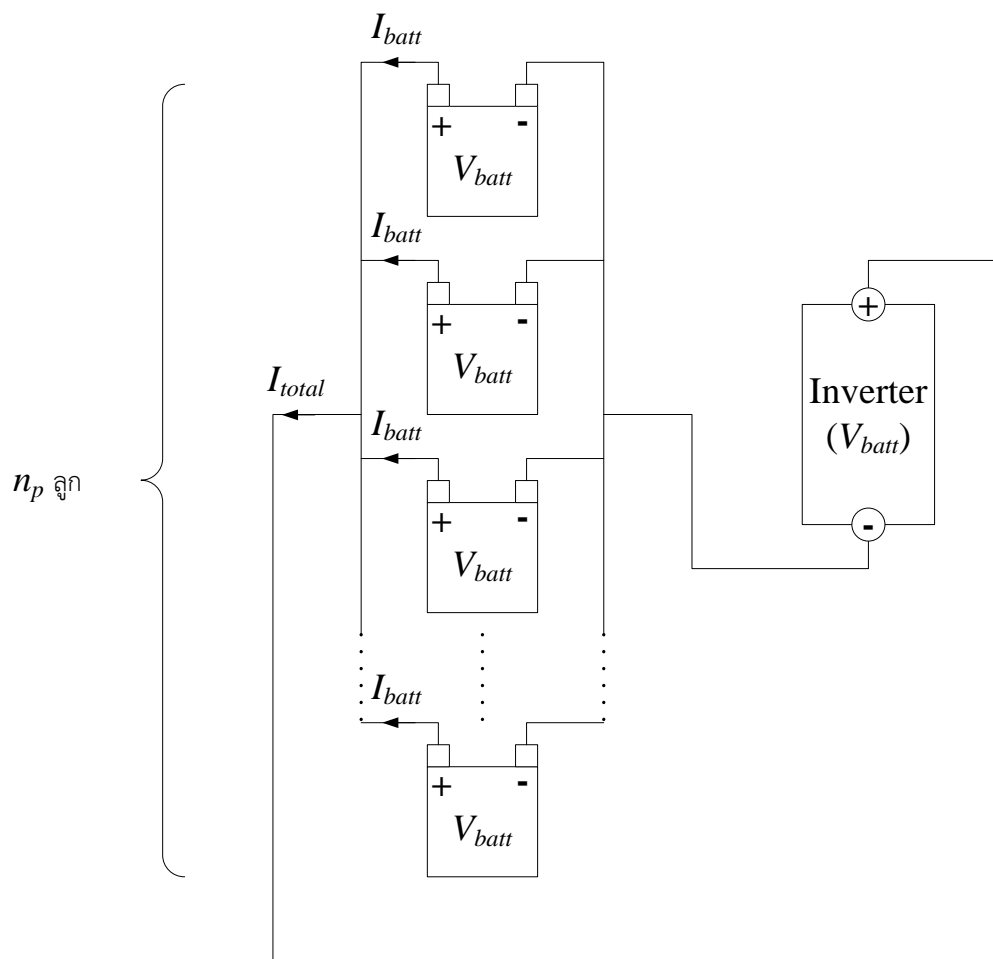


ภาพที่ 3.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม

3.4.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน

การต่อชุดแบตเตอรี่ในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความจุของชุดแบตเตอรี่ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-hour; Ah) ให้เพียงพอหรือเหมาะสมกับความต้องการในการใช้งาน ในขณะที่แรงดันของแบตเตอรี่จะยังคงมีค่าเท่าเดิม โดยการต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนานนี้จะนำขั้วบวกของแบตเตอรี่ลูกหนึ่งเชื่อมต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ลูกถัดไป และนำขั้วลบของแบตเตอรี่ลูกนั้นเชื่อมต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ลูกถัดไปเช่นกันในลักษณะดังภาพที่ 3.3 จนกระทั่งได้ความจุรวมของชุดแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ ซึ่งความจุรวมในที่นี้มีค่าเท่ากับผลรวมของความจุของแบตเตอรี่ทั้งหมดที่นำมาต่อขนานกัน นั่นคือ หากนำแบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุเท่ากับ I_{batt} แอมแปร์-ชั่วโมง มาเชื่อมต่อแบบขนานกันทั้งสิ้น n_p ลูก จะสามารถคำนวณขนาดความจุรวม (I_{total}) ได้ดังสมการต่อไปนี้

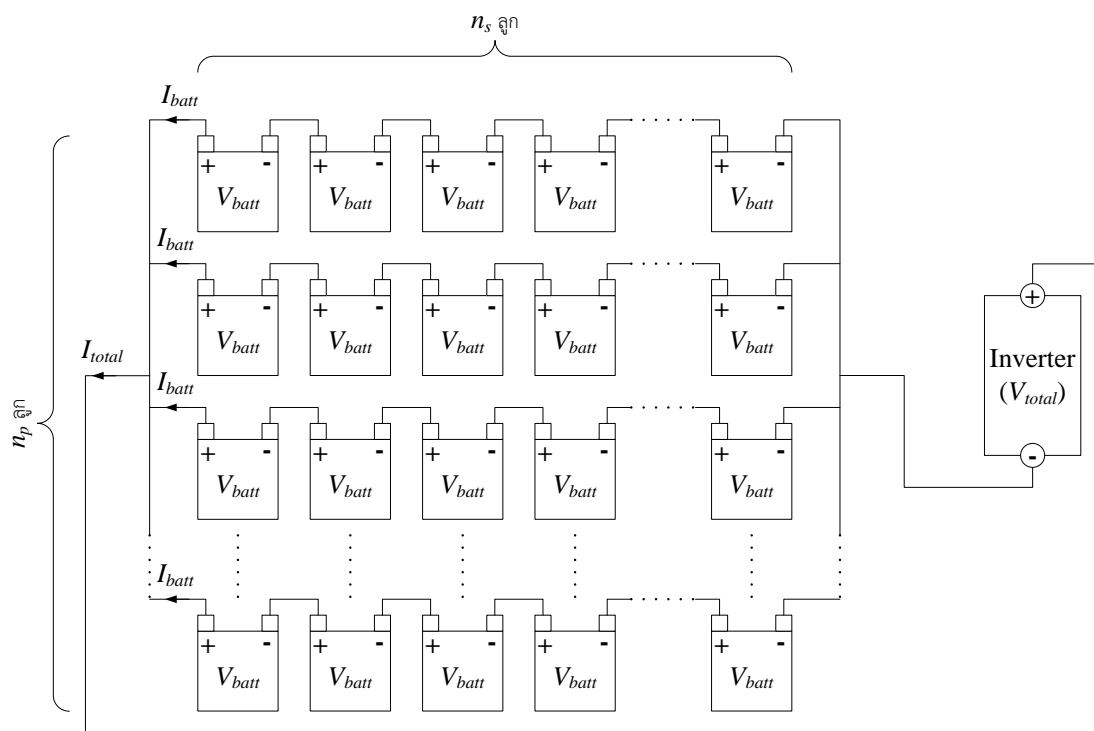
$$I_{total} = n_p \times I_{batt} \quad (3.4)$$



ภาพที่ 3.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน

3.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมร่วมกับแบบขนาน

การต่อชุดแบตเตอรี่ในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มทั้งแรงดันและความจุของชุดแบตเตอรี่ให้เพียงพอหรือเหมาะสมกับความต้องการในการใช้งาน โดยการต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมร่วมกับแบบขนานนี้จะทำการเชื่อมต่อในลักษณะดังภาพที่ 3.4 จนกระทั่งได้แรงดันและความจุรวมของชุดแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ ซึ่งแรงดันและความจุรวมนี้จะสามารถคำนวณได้จากผลรวมของแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งหมดที่นำมาต่ออนุกรมกัน และผลรวมของความจุของแบตเตอรี่ทั้งหมดที่นำมาต่อขนานกัน ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ



ภาพที่ 3.4 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมร่วมกับแบบขนาน

3.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรแปลงกำลัง

วงจรแปลงกำลังสามารถแบ่งตามลักษณะการแปลงกำลังได้ 4 ชนิด ได้แก่ วงจรแปลงไฟตรง-ไฟตรง วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง และวงจรแปลงไฟสลับ-ไฟสลับ แต่วงจรแปลงกำลังที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ คือ วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ และ วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง เท่านั้น เนื่องจากวงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับมีจุดประสงค์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากการคายประจุของแบตเตอรี่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้วจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และในทางตรงกันข้าม วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรงมีจุดประสงค์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจ่ายให้กับแบตเตอรี่เพื่ออัดประจุไฟฟ้ากลับคืน [28], [29]

3.5.1 วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ

วงจรแปลงไฟตรง-ไฟสลับ หรือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่โหลด โดยสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดันและความถี่ที่แปรค่าได้

แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงขาเข้าของอินเวอร์เตอร์นี้สามารถเป็นแบตเตอรี่ เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแหล่งจ่ายไฟตรงอื่นๆ ส่วนปริมาณทางไฟฟ้าในด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์นี้สามารถเป็นได้ทั้งปริมาณ 1 เฟส หรือ 3 เฟส ตัวอย่างการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ เช่น แหล่งจ่ายไฟสลับสำรอง แหล่งจ่ายไฟที่ไม่ขาดตอน (Uninterruptible Power Supplies; UPS) และวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟสลับแบบปรับความเร็วได้ เป็นต้น

3.5.2 วงจรแปลงไฟสลับ-ไฟตรง

วงจรไฟสลับ-ไฟตรง หรือ วงจรเรียงกระแส (Rectifier, AC-DC Converter) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กลายเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรเรียงกระแสนี้ใช้ไดโอดทำหน้าที่เป็นสวิตช์ หรือหากใช้ SCR เป็นสวิตช์ จะเรียกวงจรนี้ว่า วงจรเรียงกระแสควบคุม (controlled rectifier) สวิตช์เหล่านี้จะควบคุมให้กระแสไหลในทิศทางเดียว ดังนั้นกระแสไหลจึงมีทิศทางเดียว ซึ่งวงจรแปลงกำลังนี้จะประกอบไปด้วยสวิตช์ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลง และหากพิจารณาวงจรแปลงกำลังเป็นแบบอุดมคติที่ไม่มีการสูญเสียในองค์ประกอบใดๆ จะทำให้กำลังเฉลี่ยด้านเข้าเท่ากับกำลังเฉลี่ยด้านออก

วงจรเรียงกระแสนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เริ่มตั้งแต่งานที่ต้องการกำลังไม่สูงนัก เช่น ใช้สำหรับจ่ายกำลังไฟตรงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไปจนถึงการเป็นแหล่งจ่ายกำลังเพื่อการทำอิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมเคมี หรือเพื่อการส่งกำลังผ่านสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) ซึ่งต้องการกำลังสูง อีกทั้งยังมีการใช้ที่แพร่หลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ ใช้สำหรับจ่ายกำลังเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรง และเพื่อสะสมประจุในแบตเตอรี่ เป็นต้น

วงจรแปลงกำลังอิเล็กทรอนิกส์นี้ยังสามารถแบ่งตามชนิดของแหล่งจ่ายไฟตรงว่าเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน หรือแหล่งจ่ายกระแสได้ดังนี้

1. **คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Converters; VSCs และ Voltage-Source Inverters; VSIs)** วงจรแปลงกำลังลักษณะนี้มีแหล่งจ่ายไฟตรงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน และกระแสที่ไหลผ่านสามารถมีค่าเป็นบวกหรือลบ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างด้านไฟตรงและไฟสลับไหลได้สองทิศทาง (bidirectional) ตามทิศทางของกระแสนั้นเอง

2. คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current-Source Converters; CSCs และ Current-Source Inverters; CSIs) วงจรแปลงกำลังลักษณะนี้มีแหล่งจ่ายไฟตรงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส และแรงดันของคอนเวอร์เตอร์นี้จะมีค่าเป็นบวกหรือลบ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างด้านไฟตรงและไฟสลับไหลได้สองทิศทาง (bidirectional) ตามทิศทางของแรงดันนั่นเอง

บทที่ 4

แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดและ การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงมีหลายขนาดและหลายชนิดให้เลือกใช้งานได้ตรงตามความต้องการ อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีความทนทานและไม่ต้องการการบำรุงรักษามากด้วย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ และขั้นตอนในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

4.1 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนี้เป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ และเนื่องด้วยแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการพัฒนามาก่อนแบตเตอรี่ชนิดอื่น ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้มักถูกพัฒนาให้เป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูงและสามารถจ่ายกระแสได้มาก เพราะต้นทุนในการเก็บพลังงานต่ำกว่าแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ชนิดอื่น [26]

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนี้สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพได้ทั้งสิ้น 5 ประเภทดังนี้

4.1.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบน้ำ (Flooded Type หรือ Wet Type)

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดประเภทแรกนี้ เป็นแบตเตอรี่แบบดั้งเดิมที่ใช้ในการช่วยเริ่มจุดระเบิดของเครื่องยนต์ โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่นี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเมื่อแบตเตอรี่แห้งลง ผู้ใช้งานสามารถเปิดฝาของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่เพื่อเติมน้ำกลั่นเพิ่มได้

4.1.2 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบปิดผนึก (Sealed)

แบตเตอรี่ประเภทนี้ได้รับการพัฒนาต่อเนื่องมาจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบน้ำ โดยมีโครงสร้างภายในลักษณะเหมือนกัน แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ทำการปิดผนึกเซลล์ของแบตเตอรี่ไว้ เนื่องจากผู้ผลิตต้องการป้องกันการรั่วไหลของน้ำกรดภายในเซลล์แบตเตอรี่ อีกทั้งยังเป็นการรักษาปริมาณน้ำกรดภายในแบตเตอรี่ไว้ให้นานที่สุดด้วย ดังนั้นแบตเตอรี่ประเภทนี้จึงสามารถทำงานได้อย่างปกติภายในระยะเวลาที่ผู้ผลิตรับประกัน โดยแบตเตอรี่ชนิดอื่นที่จะกล่าวถึงในลำดับต่อจากนี้จะเป็นแบตเตอรี่แบบปิดผนึกทั้งสิ้น

4.1.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบ AGM (Absorbent Glass Mat)

แบตเตอรี่ประเภทนี้ถือเป็นแบตเตอรี่ที่มีคุณภาพสูง และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น โดยโครงสร้างของแบตเตอรี่ประเภทนี้จะใช้แผ่นใยแก้ว ซึ่งเป็นวัสดุพิเศษในการทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ อีกทั้งแผ่นใยแก้วนี้ยังทำหน้าที่ในการดูดซับน้ำกรดทั้งหมดเอาไว้ภายในแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้นจึงทำให้น้ำกรดไม่สามารถรั่วไหลออกมาได้ อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิการทำงานสูงสุดได้ไม่เกิน 55 องศาเซลเซียส ซึ่งหากใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้ด้วยอุณหภูมิสูงเกินกำหนดอย่างต่อเนื่องและเป็นเวลานาน จะส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดต่ำกว่าปกติได้

4.1.4 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบเจล (Gel)

แบตเตอรี่ประเภทนี้ใช้เจลเป็นวัสดุดูดซับน้ำกรดที่อยู่ภายในเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งหากเปลือกนอกของแบตเตอรี่ประเภทนี้แตกออก จะไม่มีน้ำกรดไหลซึมออกมา อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่แบบเจลนี้ เมื่อใช้งานอยู่ในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง เจลจะเกิดการละลาย และหากทำการอัดประจุมากเกินไป (Overcharge) เจลจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นวอยด์ (Void) และไปเกาะติดอยู่ที่แผ่นขั้วไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดต่ำลง ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้แบตเตอรี่แบบ AGM มากกว่าแบตเตอรี่แบบเจล

4.1.5 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบ VRLA (Valve - Regulated Lead Acid)

แบตเตอรี่ประเภทนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับแบตเตอรี่แบบปิดผนึก แต่มีการติดตั้งวาล์วระบายความดันหรือวาล์วเพื่อความปลอดภัย สำหรับระบายก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนในกรณีที่ความดันในเซลล์แบตเตอรี่สูงเกินไปจากการอัดประจุ

4.2 แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบบจำลองของแบตเตอรี่แบบดัดแปลงจากแบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมีของ Shepherd ซึ่งแบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมีของ Shepherd นี้เป็นแบบจำลองที่อธิบายถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้ว แรงดันเปิดวงจร ความต้านทานภายใน กระแสอัดและคายประจุ และสถานะของประจุ (State-Of-Charge; SOC) ของแบตเตอรี่ที่แต่ละช่วงเวลา [6]

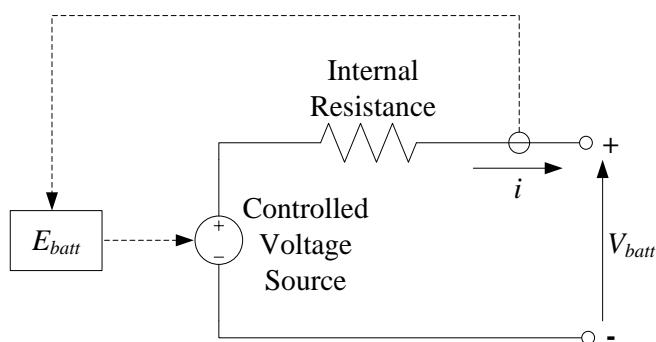
อย่างไรก็ดี แม้ว่าสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมีของ Shepherd จะสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดี แต่ในทางปฏิบัติ บางพจน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณร่วมกับโปรแกรม MATLAB ได้ เนื่องจากเกิดปัญหาทางพีชคณิต หรือ Algebraic loop ขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงเกิดแนวคิดในการดัดแปลงแบบจำลองเดิมให้มีความเหมาะสมกับการจำลองสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยแบบจำลองของแบตเตอรี่ที่ดัดแปลงขึ้นนี้ ยังคงความสามารถในการแสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ไว้ได้ อีกทั้งยังมีข้อดีในการนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงของแบตเตอรี่ที่มีขายในท้องตลาดได้โดยง่าย เนื่องจากแบบจำลองนี้สามารถคำนวณค่าตัวแปรของแบบจำลองได้จากเอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ผู้ผลิตกำหนดมาให้ โดยอาศัยเพียงการอ่านค่าจากกราฟลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่เพียง 3 จุดเท่านั้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบดัดแปลงของ Shepherd และวิธีการคำนวณตัวแปรของแบบจำลองจากข้อมูลจริงของแบตเตอรี่ [7], [8] สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนี้ประยุกต์ใช้แนวคิดอย่างง่ายของแบบจำลองแบตเตอรี่ที่นำแหล่งกำเนิดแรงดันมาต่ออนุกรมเข้ากับความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ โดยทำการปรับปรุงแหล่งกำเนิดแรงดันให้มีการปรับค่าตามสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ นั่นคือเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันที่ถูกควบคุมโดยกระแสและสถานะประจุของแบตเตอรี่ (Controlled Voltage Source) ส่วนตัวต้านทานที่นำมาต่ออนุกรมกับแหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมนั้นยังคงพิจารณาเป็นตัวต้านทานที่มีขนาดคงที่หรือไม่ขึ้นกับสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ แนวคิดของแบบจำลองดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4.1 แนวคิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

จากแนวคิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอนี้ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่แหล่งจ่ายแรงดันควบคุม (E_{batt}) และขนาดแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (V_{batt}) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{batt} = E_{batt} - Ri \quad (4.1)$$

โดย

R คือ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Ω)

i คือ กระแสของแบตเตอรี่ (A) ซึ่งมีความมากกว่า 0 เมื่ออยู่ในสภาวะคายประจุ และมีค่าน้อยกว่า 0 เมื่ออยู่ในสภาวะอัดประจุ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอนี้ กำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันควบคุม ทำหน้าที่เป็นตัวแทนของพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ที่เป็นผลมาจากสถานะของประจุ รวมถึงขนาดและทิศทางการไหลของกระแสของแบตเตอรี่ ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ของขนาดแรงดันที่แหล่งจ่ายแรงดันควบคุม (E_{batt}) จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ กล่าวคือ สภาวะคายประจุ และสภาวะอัดประจุ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

- สภาวะคายประจุ

$$E_{batt,dch} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Exp(t) \quad (4.2)$$

- สภาวะอัดประจุ

$$E_{batt,ch} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Exp(t) \quad (4.3)$$

โดย

$E_{batt,dch}$ คือ ขนาดแรงดันที่แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมในสภาวะคายประจุ (V)

$E_{batt,ch}$ คือ ขนาดแรงดันที่แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมในสภาวะอัดประจุ (V)

E_0 คือ แรงดันส่วนที่คงที่ของแบตเตอรี่ (V)

K คือ ความต้านทานโพลาริเซชัน (Ω) หรือค่าคงที่โพลาริเซชัน (V/Ah)

Q คือ ความจุสูงสุดของแบตเตอรี่ขนาดมาตรฐาน 1 ลูก (Ah)

i^* คือ กระแสที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (A)

ประจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไป (it) ทำหน้าที่เป็นตัวระบุปริมาณของประจุในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) ที่แบตเตอรี่ใช้ในการจ่ายให้กับโหลดตลอดช่วงเวลาที่ยาวนาน (t) ดังนั้น ประจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไปนี้จึงสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$it = \int_0^t idt \quad (4.4)$$

ส่วน $Exp(t)$ คือพจน์ที่เป็นตัวแทนปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสของแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Exp(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot u(t)) \quad (4.5)$$

โดย

A คือ แอมพลิจูดของย่านเอกซ์โพเนนเชียล (V)

B คือ ค่าคงที่ทางเวลาผกผันของย่านเอกซ์โพเนนเชียล $(Ah)^{-1}$

$u(t)$ คือ สถานะการคายประจุ ($u(t) = 0$) หรือการอัดประจุ ($u(t) = 1$)

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการที่ (4.2) และ (4.3) ลงในสมการที่ (4.1) และพิจารณาผลของประจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไปและปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสของแบตเตอรี่ตามสมการที่ (4.4) และ (4.5) จะสามารถสรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดได้ดังต่อไปนี้

- สถานะคายประจุ

$$V_{batt,dch} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Exp(t) \quad (4.6)$$

- สถานะอัดประจุ

$$V_{batt,ch} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Exp(t) \quad (4.7)$$

โดย

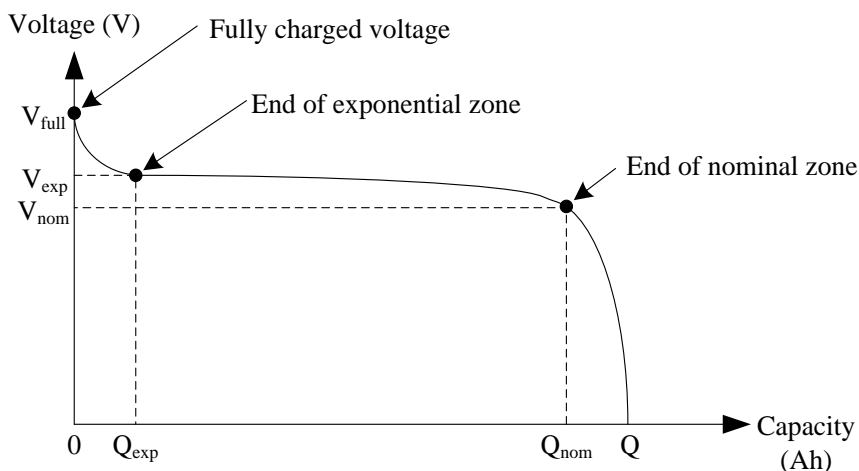
$V_{batt,dch}$ คือ ขนาดแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ในสถานะคายประจุ (V)

$V_{batt,ch}$ คือ ขนาดแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ในสถานะอัดประจุ (V)

4.2.2 การคำนวณตัวแปรของแบบจำลองจากข้อมูลจริงของแบตเตอรี่

หลังจากทราบถึงแนวคิดและสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจึงนำเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลองร่วมกับข้อมูลจริงของแบตเตอรี่ กล่าวคือ การคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ของแบบจำลองจากเอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่ เพื่อใช้สำหรับการจำลองสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ด้วยโปรแกรมคำนวณที่พัฒนาขึ้น

หนึ่งในข้อดีของแบบจำลองที่นำเสนอนี้ คือ สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรของแบตเตอรี่ได้โดยง่าย เนื่องจากต้องการข้อมูลจากกราฟลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่เพียง 3 จุดเท่านั้น ซึ่งกราฟนี้ ผู้ผลิตแบตเตอรี่จะกำหนดมาให้ในเอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่ โดยลักษณะของกราฟดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4.2 กราฟลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่

กราฟลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ข้างต้นแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่และปริมาณความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไปในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง ซึ่งกราฟลักษณะการคายประจุที่ผู้ผลิตกำหนดมาในเอกสารข้อมูลนั้นจะได้อามาจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่ที่ค่าซี-เรตของแบตเตอรี่ชนิดนั้น

จากภาพที่ 4.2 จุดแรกของกราฟเรียกว่า จุดแสดงแรงดันขณะอัดประจุเต็ม (fully charged voltage point) ซึ่งเป็นจุดที่แสดงถึงแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ในสถานะที่มีประจุอยู่เต็ม ส่วนจุดที่สองของกราฟเรียกว่า จุดสิ้นสุดของย่านเอกซ์โพเนนเชียล (end of the exponential zone point) ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของความสัมพันธ์ในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลระหว่างแรงดันที่ขั้วและปริมาณความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไป โดยย่านเอกซ์โพเนนเชียลนี้เป็นผลมาจากปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการแก้สมการที่ (4.5) เมื่อพิจารณาว่า แบตเตอรี่กำลังคายประจุด้วยกระแสนาตรงคงที่ค่าหนึ่ง และ $u(t) = 0$ ดังนี้

$$Exp_{dch}(t) = Ae^{-B \cdot it} \tag{4.8}$$

และจุดสุดท้ายของกราฟเรียกว่า จุดสิ้นสุดของย่านแรงดันที่ระบุ (end of the nominal zone point) ซึ่งเป็นจุดที่แบตเตอรี่คายประจุออกไปจนกระทั่งแรงดันที่ขั้วเริ่มตกลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาที่จุดแสดงแรงดันขณะอัดประจุเต็ม ซึ่งเป็นจุดที่แบตเตอรี่เพิ่งเริ่มจ่ายกระแสคายประจุหลังจากถูกอัดประจุจนเต็ม นั่นคือ ปริมาณความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไปมีค่าเท่ากับ 0 แอมแปร์-ชั่วโมง ($it = 0$) และกระแสที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (i^*) มีค่าเท่ากับ 0 แอมแปร์ ดังนั้น เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (4.6) และ (4.8) จะสามารถคำนวณแรงดันขณะอัดประจุเต็ม (V_{full}) ได้ดังนี้

$$V_{full} = E_0 - R \cdot i + A \quad (4.9)$$

ต่อมา พิจารณาที่จุดสิ้นสุดของย่านเอกซ์โพเนนเชียล โดยที่จุดนี้ผลของแรงดันจากพจน์เอกซ์โพเนนเชียลซึ่งเป็นตัวแทนปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสของแบตเตอรี่ควรใกล้หมดไป กล่าวคือ มีค่าใกล้เคียง 0 ดังนั้น เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว ผู้นำเสนอแบบจำลองจึงกำหนดให้ผลของพจน์เอกซ์โพเนนเชียลเหลือเพียง 5% ของค่าเริ่มต้น ดังนี้

$$Ae^{-B \cdot Q_{exp}} = Ae^{-3} = 0.05A \quad (4.10)$$

จะได้ว่า

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (4.11)$$

และเนื่องจากแบตเตอรี่คายประจุมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้วที่จุดสิ้นสุดของย่านเอกซ์โพเนนเชียลและจุดสิ้นสุดของย่านแรงดันที่ระบุ ดังนั้นกระแสที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (i^*) จึงเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว นั่นคือ กระแสที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านมีค่าเท่ากับกระแสคายประจุของแบตเตอรี่ ($i^* = i$) นั่นเอง แทนค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้พร้อมกับสมการที่ (4.8) และ (4.11) ลงในสมการที่ (4.6) จะสามารถคำนวณแรงดันที่จุดสิ้นสุดของย่านเอกซ์โพเนนเชียลและจุดสิ้นสุดของย่านแรงดันที่ระบุ ได้ดังนี้

$$V_{exp} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - Q_{exp}} \cdot (Q_{exp} + i) + Ae^{-3} \quad (4.12)$$

$$V_{nom} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - Q_{nom}} \cdot (Q_{nom} + i) + Ae^{\left(-\frac{3}{Q_{exp}} Q_{nom}\right)} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.9), (4.11), (4.12) และ (4.13) จะเห็นว่า เมื่อทราบค่าพิกัดของจุดแสดงแรงดันขณะอัดประจุเต็ม ($0, V_{full}$) พิกัดของจุดสิ้นสุดของย่านเอกซ์โพเนนเชียล (Q_{exp}, V_{exp}) และพิกัดของจุดสิ้นสุดของย่านแรงดันที่ระบุ (Q_{nom}, V_{nom}) แล้ว จะสามารถคำนวณค่าของ E_0, K, A และ B ซึ่งเป็นตัวแปรของแบบจำลองแบตเตอรี่ได้ โดยค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (R) จะระบุไว้ในเอกสารข้อมูลแบตเตอรี่เรียบร้อยแล้ว

4.3 การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

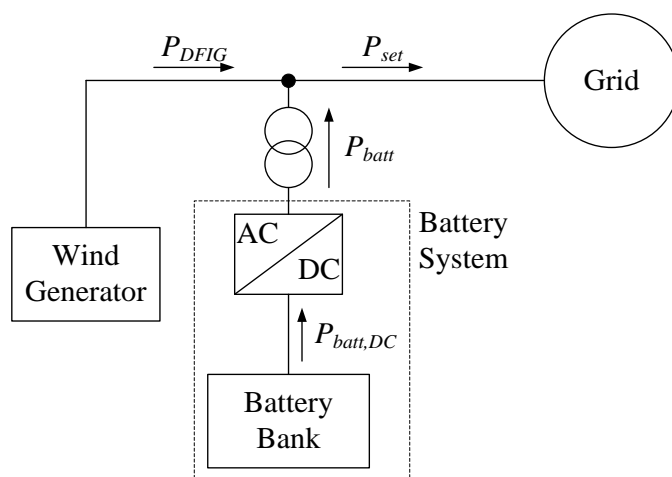
จุดประสงค์ของการติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม คือเพื่อช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ความถี่และแรงดันที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าในบริเวณที่มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเชื่อมต่ออยู่ โดยแบตเตอรี่จะพยายามชดเชยให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สม่ำเสมอ และช่วยลดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับระบบผลิตไฟฟ้าในรูปแบบเดิมที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

เพื่อให้การติดตั้งแบตเตอรี่ช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกขนาดของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เนื่องจาก หากเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ติดตั้งน้อยเกินไปอาจทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถกักเก็บหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลให้ช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพตามไปด้วย แต่หากเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่สูงเกินไป จะส่งผลให้มูลค่าการลงทุนสูงตามไปด้วย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเลือกขนาดของแบตเตอรี่เพื่อใช้ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมให้มีความเหมาะสม

4.3.1 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่รับหรือจ่าย

การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เริ่มต้นจากการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่รับหรือจ่าย (P_{batt}) ในแต่ละช่วงเวลาก่อน โดยสามารถกำหนดได้จากกำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมจ่ายสู่ระบบไฟฟ้า (P_{set}) และกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ขณะนั้น (P_{DFIG}) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 และสมการดังต่อไปนี้

$$P_{batt} = P_{set} - P_{DFIG} \quad (4.14)$$



ภาพที่ 4.3 การติดตั้งระบบแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

จากสมการข้างต้น ในช่วงเวลาที่ $P_{batt} > 0$ แสดงว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าที่ต้องการดังนั้นระบบแบตเตอรี่จึงต้องช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยให้กำลังไฟฟารวมมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด และในทางตรงกันข้าม เมื่อ $P_{batt} < 0$ แสดงว่าระบบแบตเตอรี่ต้องช่วยรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ เพื่อให้กำลังไฟฟารวมมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดเช่นกัน

4.3.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับหรือจ่าย

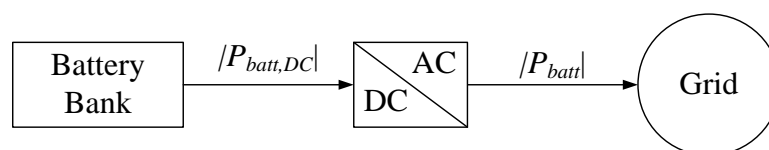
เนื่องจากชุดแบตเตอรี่ (Battery Bank) รับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่ระบบไฟฟ้าส่วนที่เหลือเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้น หากต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหรือทำการอัดประจุ จึงจำเป็นต้องแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยคอนเวอร์เตอร์ก่อนแล้วจึงอัดประจุให้กับชุดแบตเตอรี่ และในทำนองเดียวกัน หากต้องการให้ชุดแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ระบบไฟฟ้าหรือคายประจุจำเป็นจะต้องแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอินเวอร์เตอร์ก่อนแล้วจึงจ่ายกำลังให้กับระบบไฟฟ้าต่อไป ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์ที่สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ได้ คือ อินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง (Bi-Directional Inverter)

อย่างไรก็ดี ในขณะที่อินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางทำการแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างระบบไฟฟ้ากับชุดแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะสูญเสียไประหว่างที่ทำการแปลงกำลังนี้ ดังนั้น หลักจากทราบกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่ (Battery System) รับหรือจ่ายแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาลำดับต่อมาจึงคือ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับหรือจ่าย ($P_{batt,DC}$) ซึ่งสามารถพิจารณาแยกเป็น 2 กรณีดังนี้

4.3.2.1 กรณีที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าหรือคายประจุ

ชุดแบตเตอรี่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือคายประจุ ก็ต่อเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมมีปริมาณน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ หรือ $P_{batt} > 0$ ดังนั้นทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจะไหลจากชุดแบตเตอรี่เข้าสู่อินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางและไหลออกไปสู่ระบบไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 4.4 นั่นคือ หากอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางมีประสิทธิภาพในการแปลงกำลังไฟฟ้าเท่ากับ η จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากชุดแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$P_{batt,DC} = \frac{1}{\eta} \cdot P_{batt} \quad (4.15)$$

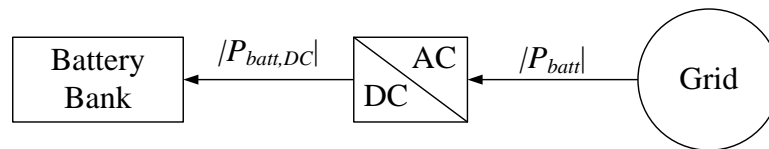


ภาพที่ 4.4 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อชุดแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้า

4.3.2 กรณีที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าหรืออัดประจุ

ชุดแบตเตอรี่จะรับกำลังไฟฟ้าหรืออัดประจุ ก็ต่อเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมมีปริมาณมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ หรือ $P_{batt} < 0$ ดังนั้นทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจะไหลจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่อินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางและไหลออกไปสู่ชุดแบตเตอรี่ดังแสดงในภาพที่ 4.5 นั่นคือ หากอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางมีประสิทธิภาพในการแปลงกำลังไฟฟ้าเท่ากับ η จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ชุดแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$P_{batt,DC} = \eta \cdot P_{batt} \quad (4.16)$$



ภาพที่ 4.5 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อชุดแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้า

4.3.3 การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น

หลังจากทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับหรือจ่าย ($P_{batt,DC}$) แล้ว การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลาสามารถทำได้โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากชุดแบตเตอรี่ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ขนาดมาตรฐานสามารถรับหรือจ่ายได้ในเวลาที่กำหนดดังสมการต่อไปนี้

$$C_{Wh,cal} = \begin{cases} \frac{P_{batt,DC}}{V_{batt,dch} \cdot i_{batt}^{max}} \cdot C_{Wh}, & P_{batt,DC} > 0 \\ \frac{P_{batt,DC}}{V_{batt,ch} \cdot (-i_{batt}^{max})} \cdot C_{Wh}, & P_{batt,DC} < 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

โดย

$C_{Wh,cal}$ คือ ขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเวลาที่พิจารณาในหน่วยวัตต์-ชั่วโมง

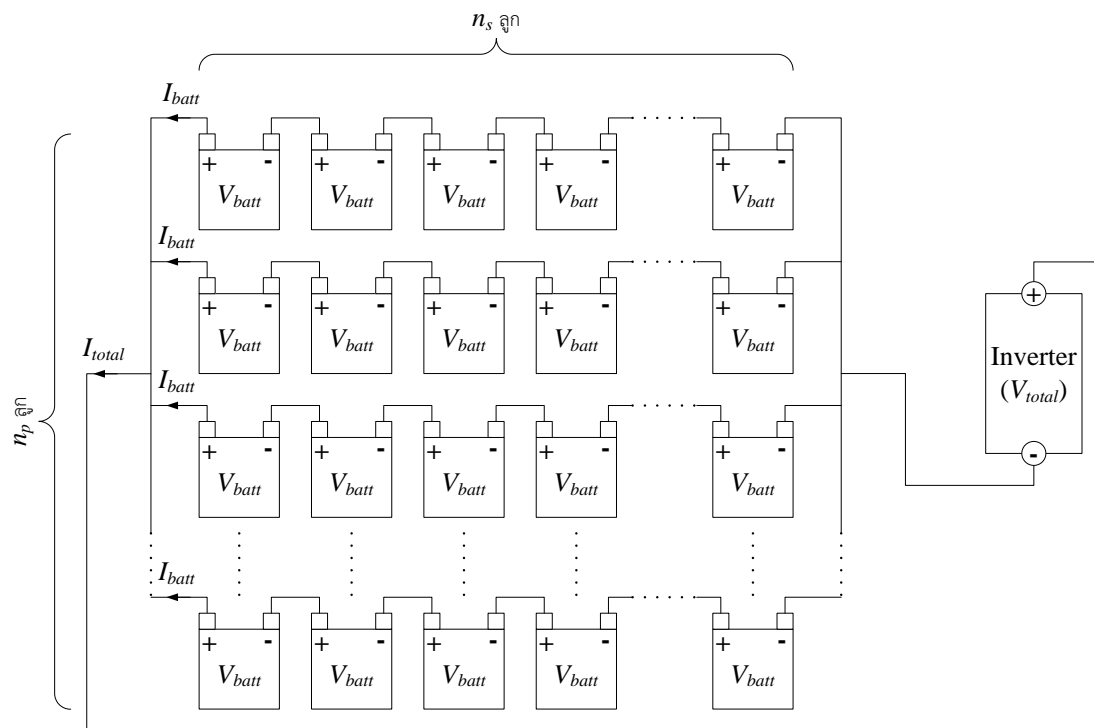
C_{Wh} คือ ขนาดมาตรฐานของแบตเตอรี่ 1 ลูกในหน่วยวัตต์-ชั่วโมง

i_{batt}^{max} คือ กระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่ทนได้ กำหนดได้จากเอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่

เมื่อคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่ทุกช่วงเวลาได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำขนาดแบตเตอรี่นั้น มาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ และทำการเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับเหตุการณ์นั้น โดยกำหนดให้ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ต้องรองรับร้อยละ 95 ของเหตุการณ์ทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นได้

อย่างไรก็ดี ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมดังกล่าวเป็นเพียงคำตอบที่สอดคล้องกับข้อมูล ความเร็วลมที่สุ่มได้เพียง 1 เหตุการณ์เท่านั้นซึ่งยังไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงทำการสุ่มความเร็วลมเป็นจำนวน 1,000 เหตุการณ์ โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ย รายชั่วโมงร่วมกับค่าส่วนเบี่ยงเบนความเร็วลมรายชั่วโมงของข้อมูลชุดเดิมนั้น ในการคำนวณค่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม (P_{DFIG}) และกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องรับหรือจ่าย (P_{batt}) แล้วทำการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการเดิม เมื่อได้ค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม 1,000 ค่า ซึ่งแต่ละค่าเป็นค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลความเร็วลมแต่ละชุด จะสามารถสร้างกราฟแจกแจงความถี่ซึ่งเป็นตัวแทนของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ของขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมตามความเร็วลมทั้งปีได้

จากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังกล่าว ด้วยความเชื่อมั่น 95% จะสามารถสรุปได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของข้อมูลความเร็วลมทั้งปีจะอยู่ในช่วงค่าหนึ่ง ซึ่งขนาดแบตเตอรี่ดังกล่าวอาจมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดแบตเตอรี่ที่มีขายในท้องตลาด ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงการต่อแบตเตอรี่หลายลูกเข้าด้วยกันเป็นชุดแบตเตอรี่เพื่อให้ได้ขนาดของแบตเตอรี่ตามที่ต้องการด้วย



ภาพที่ 4.6 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมร่วมกับแบบขนาน

ในทางปฏิบัติ ความจุของแบตเตอรี่ 1 ลูกสามารถทราบได้จากเอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ผู้ผลิตกำหนดมาให้ แต่เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง จึงจำเป็นต้องพิจารณาการต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมจนได้แรงดันที่ต้องการ และเพื่อให้ได้ความจุรวมของชุดแบตเตอรี่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องพิจารณาการต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนานเช่นกัน ดังนั้นชุดแบตเตอรี่ที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมนี้จึงต่อแบบอนุกรมร่วมกับแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 4.6

จากภาพที่ 4.6 จำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาต่ออนุกรมกัน (n_s) สามารถคำนวณได้จากแรงดันที่ระบุของแบตเตอรี่ (V_{batt}) และแรงดันด้านไฟตรงของอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง (V_{total}) ดังสมการต่อไปนี้

$$n_s = \frac{V_{total}}{V_{batt}} \quad (4.18)$$

หลังจากทราบจำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาต่ออนุกรมกันแล้ว จะสามารถคำนวณจำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกัน (n_p) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$n_p = \frac{C_{Wh,opt}}{n_s \cdot V_{batt} \cdot C_{Ah}} \quad (4.19)$$

โดย

$C_{Wh,opt}$ คือ ขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในหน่วยวัตต์-ชั่วโมง

C_{Ah} คือ ขนาดมาตรฐานของแบตเตอรี่ 1 ลูกในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง

อย่างไรก็ดี ขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอนี้ เป็นเพียงขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น เนื่องจากพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น โดยเงื่อนไขการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบจะพิจารณาในหัวข้อถัดไป

4.3.4 การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ

ในการพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ จำเป็นต้องกำหนดตัวชี้วัดที่สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณการแกว่งเหล่านี้ได้ โดยในมาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในช่วงปี 2552-2553 ได้กำหนดดัชนีวัดผลการดำเนินงานหลักและเกณฑ์มาตรฐาน คุณภาพการบริการไว้ [9] ซึ่งมีดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันทั้งหมด 2 ดัชนี ได้แก่

1. ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation)

ความถี่ทางไฟฟ้าเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ของคุณภาพไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าส่งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมความถี่ให้ได้มาตรฐานจึงเป็นการช่วยลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นตัวกำหนดมาตรฐานการเชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าด้วย

การเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation) หมายถึง จำนวนครั้งที่ความถี่ออกนอกย่านความถี่ที่กำหนดไว้ ซึ่งย่านความถี่ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 50 ± 0.225 เฮิร์ตซ์ หรือระหว่าง 49.775 - 50.225 เฮิร์ตซ์ โดยค่าของดัชนีสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$FD = \frac{\sum_{t=1}^{SP} FD_t}{SP} \times 100 \quad (4.20)$$

โดย

FD คือ ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (%) ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.054%

FD_t คือ ผลการวัดทุกช่วงเวลา t ที่กำหนด โดยที่

$FD_t = 1$ เมื่อความถี่ของระบบออกนอกช่วงการยอมรับ

$FD_t = 0$ เมื่อความถี่ของระบบอยู่ในช่วงการยอมรับ

SP คือ จำนวนครั้งที่ทำการวัดในระยะเวลาที่กำหนด

2. ดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation)

แรงดันถือเป็นอีกหนึ่งในพารามิเตอร์ของคุณภาพไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าส่งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมแรงดันให้ได้มาตรฐานจึงถือเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญเช่นกัน

การเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation) หมายถึง จำนวนครั้งที่แรงดันเบี่ยงเบนออกนอกช่วงการยอมรับที่กำหนดไว้ ซึ่งช่วงการยอมรับดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 95%-105% ($\pm 5\%$) ของแรงดันปกติ โดยค่าของดัชนีสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$VD = \frac{\sum_{t=1}^{SP} VD_t}{SP} \times 100 \quad (4.21)$$

โดย

VD คือ ดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (%) ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 2.852%

VD_t คือ ผลการวัดทุกช่วงเวลา t ที่กำหนด โดยที่

$VD_t = 1$ เมื่อแรงดันออกนอกช่วงการยอมรับ

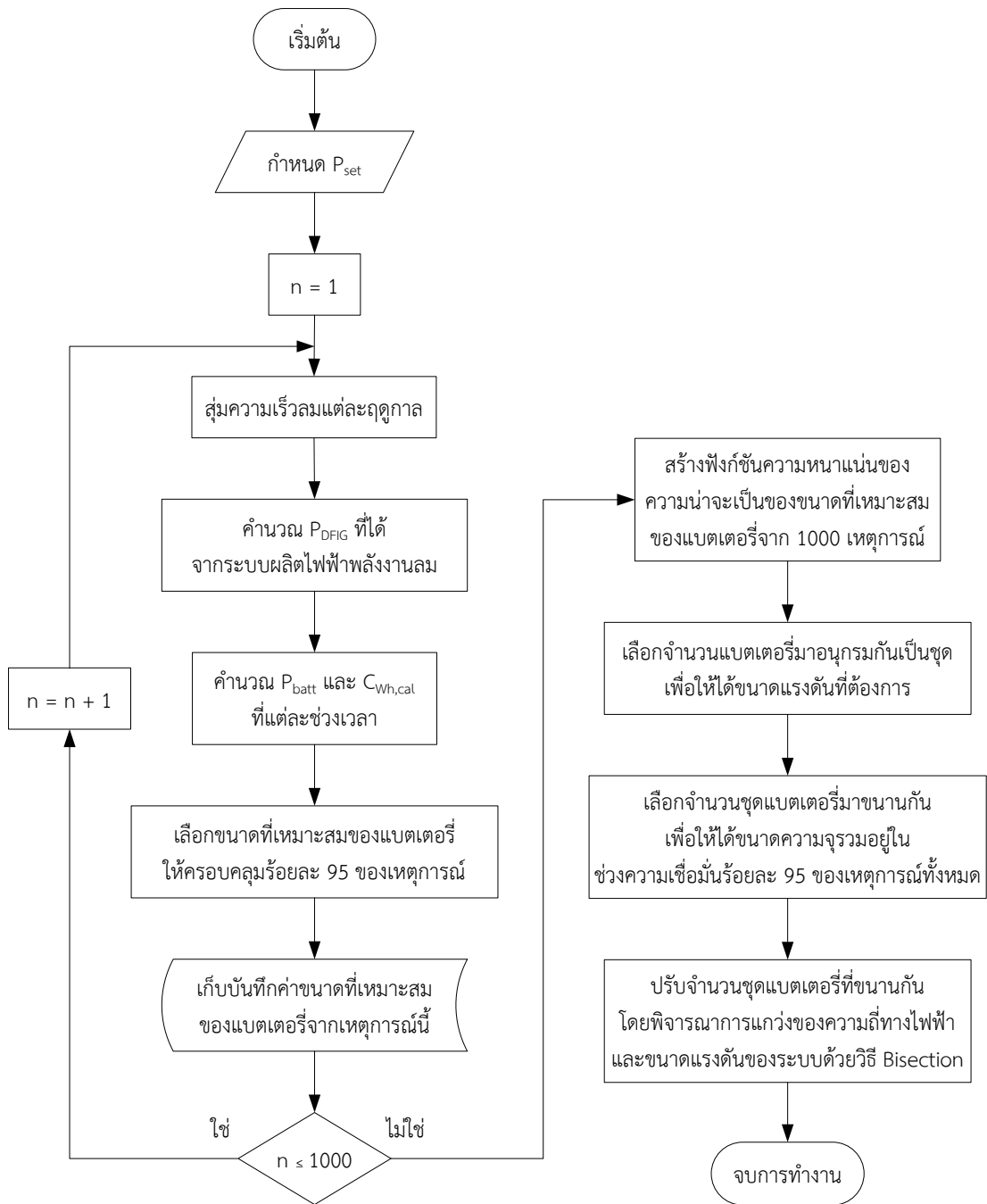
$VD_t = 0$ เมื่อแรงดันอยู่ในช่วงการยอมรับ

เนื่องจากขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ สามารถรองรับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้แบตเตอรี่รับหรือจ่ายได้ถึง 95% ของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ ดังนั้น กำลังไฟฟ้ารวมที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตได้หลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดดังกล่าวจึงมีการแกว่งอยู่ในกรอบที่ค่อนข้างแคบ ส่งผลให้ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้ามีการแกว่งอยู่ในกรอบที่แคบมากตามไปด้วยจนสามารถรับรองได้ว่าการเบี่ยงเบนของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงที่กำหนดแน่นอน

อย่างไรก็ดี แบตเตอรี่ดังกล่าวยังสามารถปรับลดขนาดลงได้อีก เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการติดตั้งแบตเตอรี่ให้กับโรงไฟฟ้าพลังงานลม โดยที่ยอมให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้า การแกว่งของความถี่ และการแกว่งของแรงดันมีค่ามากขึ้น แต่การเบี่ยงเบนของความถี่และแรงดันจากช่วงการยอมรับยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

การปรับลดขนาดของแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการลดจำนวนแถวของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกัน (n_p) ลงด้วยวิธี Bisection โดยมีเงื่อนไขว่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะต้องเป็นขนาดที่เล็กที่สุดซึ่งยังคงทำให้ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (FD) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (VD) ยังอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนด

ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการคำนวณได้ดังภาพต่อไปนี้



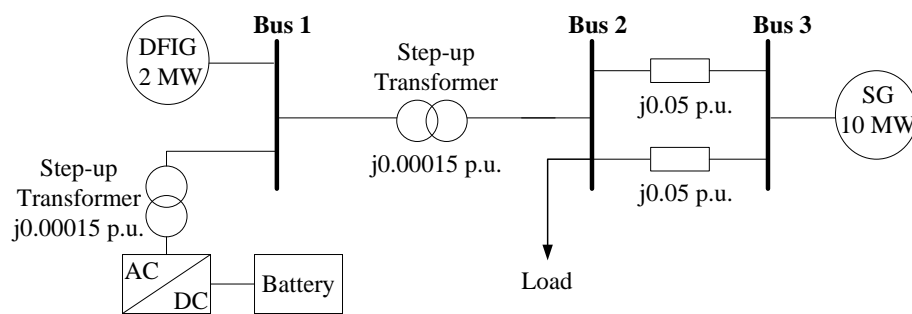
ภาพที่ 4.7 แผนผังขั้นตอนการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้นำเสนอผลการคำนวณเพื่อหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งหัวข้อการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อ คือ ระบบทดสอบ และผลการทดสอบ ซึ่งในส่วนของผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 6 การทดสอบ ประกอบด้วย (1) การทดสอบการสั่นความถี่ (2) การทดสอบการสั่นความถี่ที่ต้องการกำลังไฟฟ้า (3) การทดสอบกำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ (4) การคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น (5) การทดสอบหา กำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้ในเบื้องต้น และสุดท้ายคือ (6) การคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ

5.1 ระบบทดสอบ

การทดสอบวิธีการที่นำเสนอกำหนดให้ใช้ระบบทดสอบดังภาพที่ 5.1 โดยระบบทดสอบนี้จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางที่ต่ออยู่กับระบบแบตเตอรี่ในบัสที่ 1 และมีหม้อแปลงแรงดันขึ้นต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 2 โดยบัสที่ 2 กำหนดให้เป็นโหลดบัส และมีอิมพีแดนซ์ต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3 ซึ่งบัสที่ 3 จะต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อใช้เป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเชื่อมต่ออยู่ เพื่อให้สามารถศึกษาผลของแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าได้



ภาพที่ 5.1 ระบบทดสอบ

5.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (SG)

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ละเลยผลของสถานะชั่วคราวทางไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ที่ส่งผลในช่วงชับทรานเซียนต์ [18] โดยระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะประกอบไปด้วย ระบบควบคุมความเร็ว (Speed Governor) และระบบกระตุ้น (Excitation System) ซึ่งแบ่งออกเป็น ส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator; AVR) และส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer; PSS)

5.1.2 ความต้องการกำลังไฟฟ้า (Load)

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้แบบจำลองของความต้องการกำลังไฟฟ้าหรือโหลด เป็นแบบจำลองกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับกระบวนการสุ่ม (Stochastic Load Model) โดยมีแนวโน้มเป็นไปตามโหลดรายวันของแต่ละฤดูกาล ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$P_t = P_{avg,t} + \sigma P_{t-1} Z \sqrt{t} \quad (5.1)$$

โดย

- P_t คือ ความต้องการไฟฟ้าในช่วงเวลาที่พิจารณา
- $P_{avg,t}$ คือ ความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่พิจารณา
- σ คือ ค่าความแปรปรวนของความต้องการไฟฟ้า
- Z คือ จำนวนที่สุ่มมาจากการกระจายแบบปกติมาตรฐาน (standard normal distribution)
- t คือ จุดเวลาที่ต้องการพิจารณา

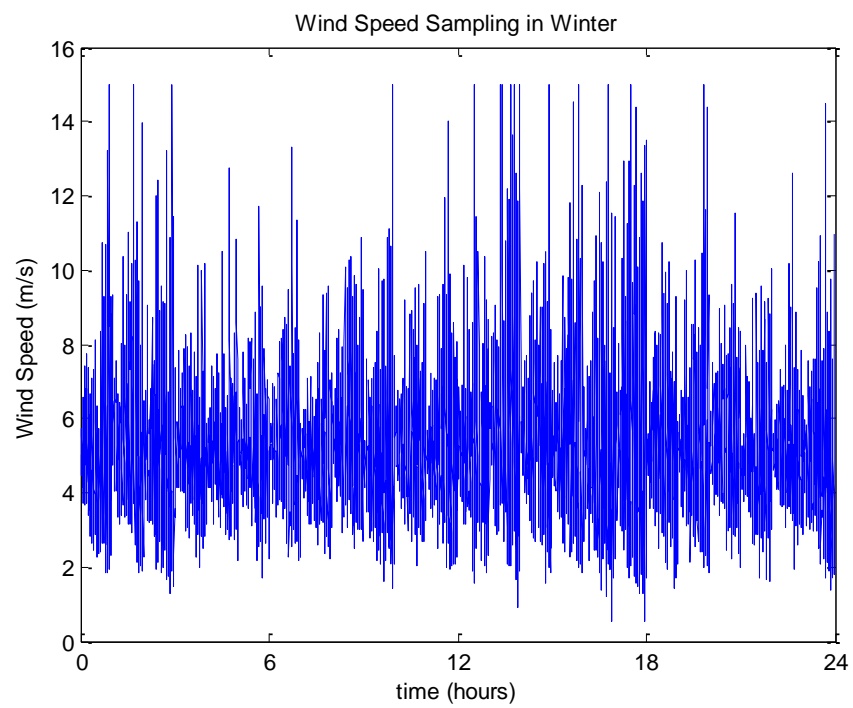
5.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจากทั้ง 6 การทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น (1) ผลการทดสอบการสุ่มความเร็วลม (2) ผลการทดสอบการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้า (3) ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้า และขนาดแรงดันของระบบ (4) ผลการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น (5) ผลการทดสอบหากำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้ในเบื้องต้น และสุดท้ายคือ (6) ผลการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

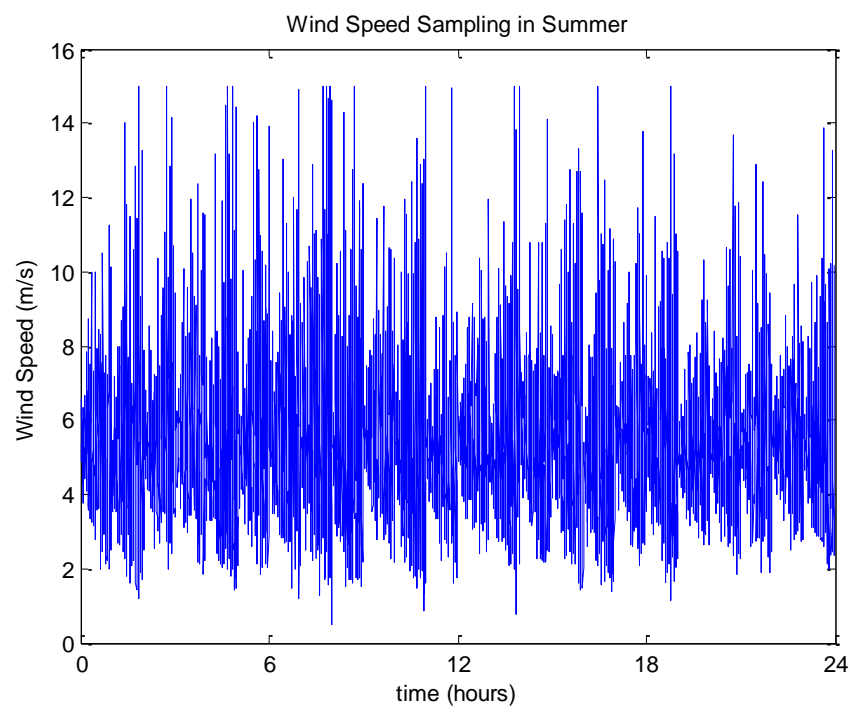
5.2.1 ผลการทดสอบการสุ่มความเร็วลม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ได้จากข้อมูลความเร็วลมที่วัดได้ในปี 2005 ดังแสดงในภาคผนวก ก.1 ซึ่งข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ฤดูร้อน คือช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายน ฤดูฝน คือช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนตุลาคม และฤดูหนาว คือช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ โดยข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละชั่วโมงจะแสดงในภาคผนวก ก.3 และ ก.4

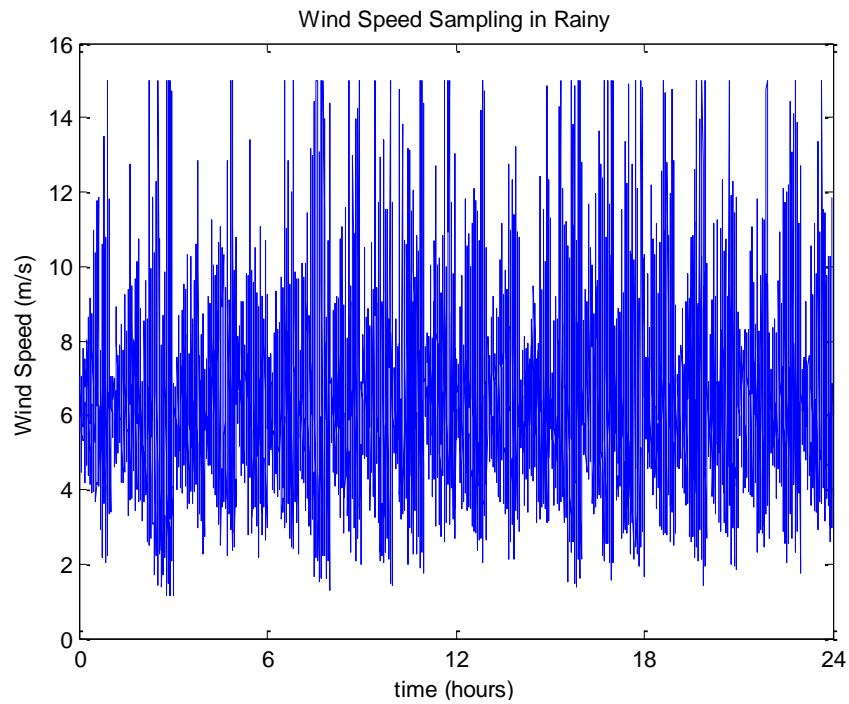
เมื่อทราบความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง ($v_{trend,t}$) และความแปรปรวนของความเร็วลมแต่ละชั่วโมง ($\sigma_{trend,t}$) แล้ว จะสามารถคำนวณความเร็วลมได้ตามสมการ (2.17) อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ความเร็วลมสูงสุดที่สุ่มได้ต้องมีค่าไม่เกิน 15 m/s โดยในหนึ่งชั่วโมงจะทำการสุ่มความเร็วลม 3600 ค่า หรือสุ่มความเร็วลมทุก 1 วินาที นั่นเอง ดังนั้นค่าจุดเวลาที่ใช้คือ $t = \frac{1}{3600}$, $\frac{2}{3600}$, $\frac{3}{3600}$, ... , 1 ชั่วโมง ส่งผลให้ในระยะเวลา 1 วัน จะมีความเร็วลมที่เปลี่ยนไปทั้งหมด 86,400 ค่า โดยตัวอย่างของความเร็วลมที่ได้จากการสุ่มในแต่ละฤดูกาลสามารถแสดงได้ภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 5.2 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูหนาว

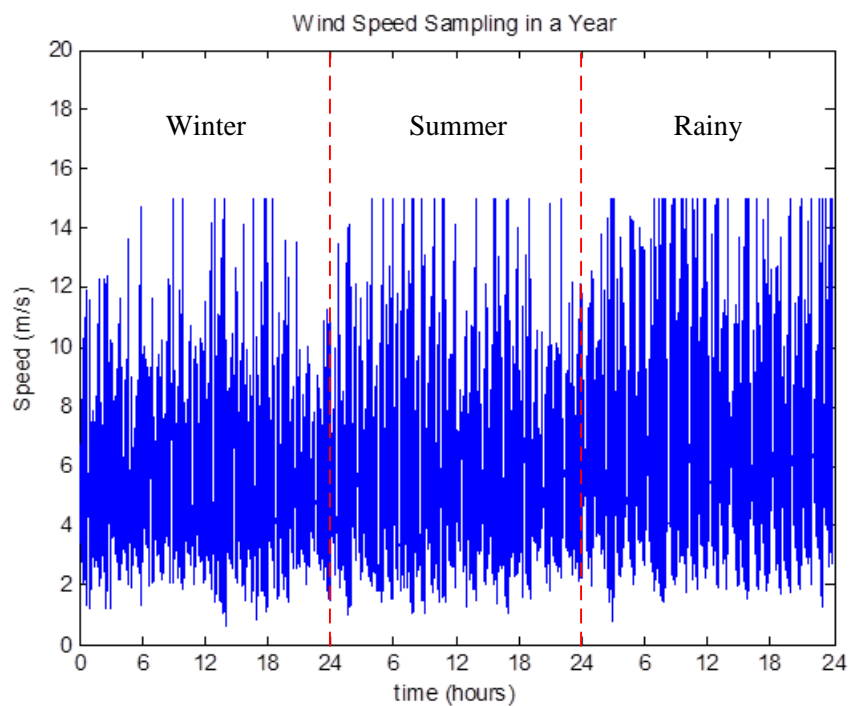


ภาพที่ 5.3 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูร้อน



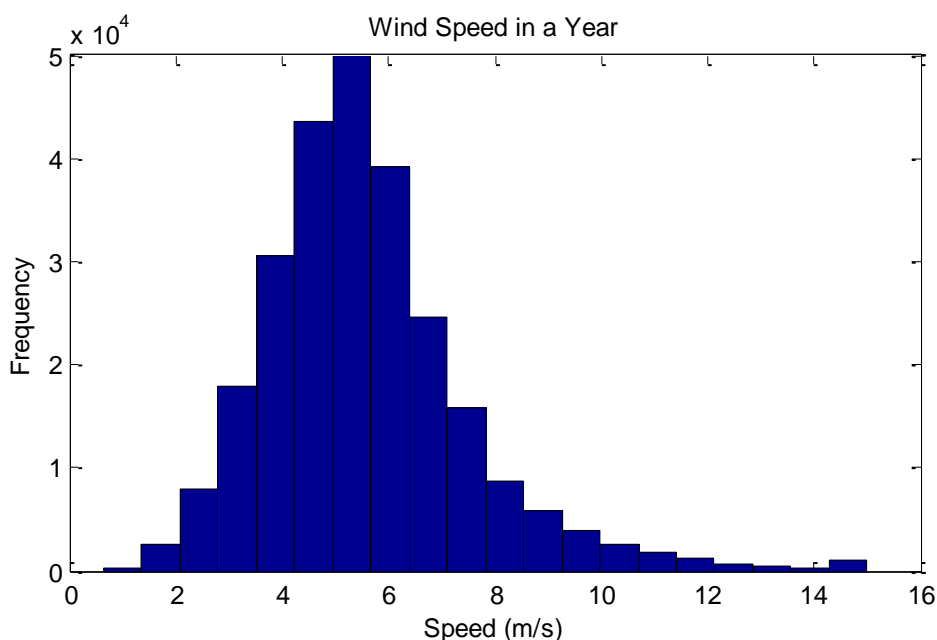
ภาพที่ 5.4 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมในฤดูฝน

เนื่องด้วยความเร็วลมเฉลี่ยและความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาลจะมีแนวโน้มเดียวกัน ดังนั้นตัวแทนความเร็วลมสำหรับระยะเวลา 1 ปี จึงนำมาจากการสุ่มความเร็วลมในระยะเวลา 1 วันจากแต่ละฤดูกาล ดังแสดงต่อไปนี้



ภาพที่ 5.5 ตัวอย่างการสุ่มความเร็วลมทั้งปี

ความเร็วลมทั้งปีที่สามารถได้จากแบบจำลองความเร็วลมที่นำเสนอ สามารถแสดงเป็นกราฟการกระจายตัวของความเร็วลมได้ดังนี้



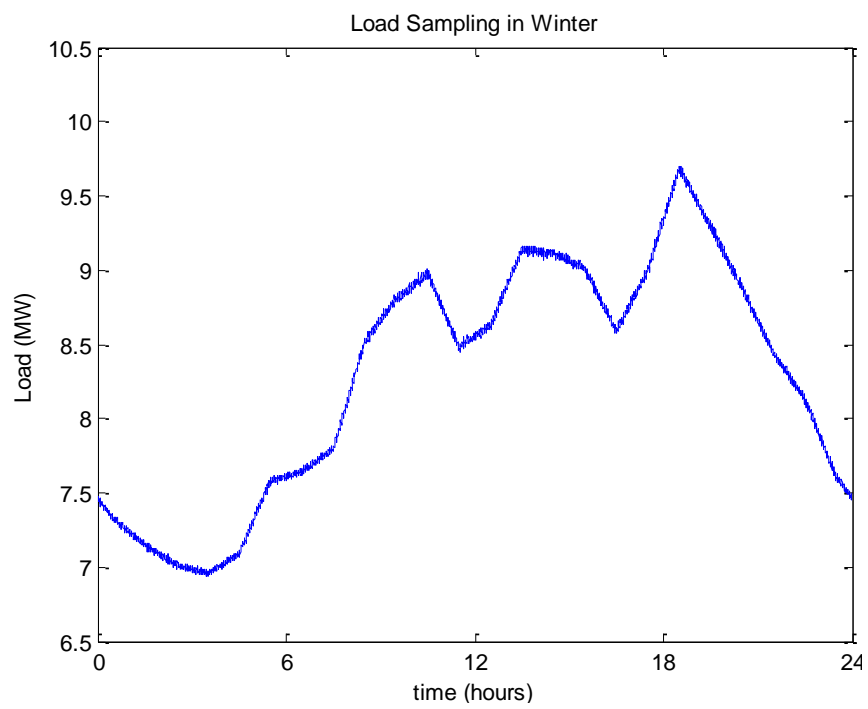
ภาพที่ 5.6 การกระจายตัวของความเร็วลมทั้งปี

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in speed) มีค่าเท่ากับ 3.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งจากภาพที่ 5.6 จะเห็นว่าความเร็วลมส่วนใหญ่ที่สามารถได้จากแบบจำลองที่นำเสนอ มีค่าสูงกว่าความเร็วลมเข้าระบบนี้ ดังนั้นศักยภาพความเร็วลมที่สามารถใช้ได้จึงเพียงพอต่อการผลิตไฟฟ้า

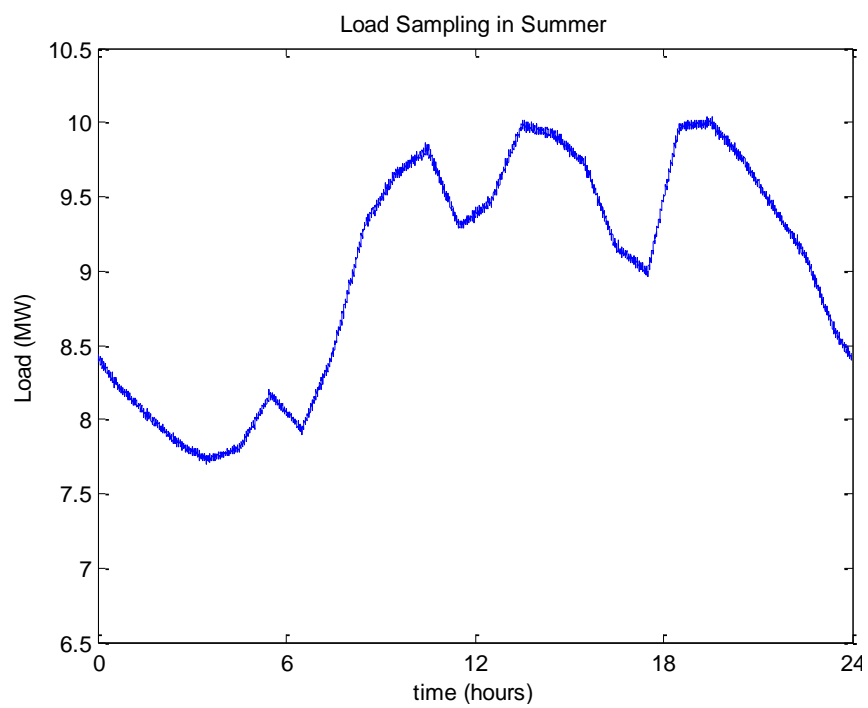
5.2.2 ผลการทดสอบการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้า

ความต้องการกำลังไฟฟ้าถือเป็นหนึ่งในตัวแปรของระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและมีความไม่แน่นอน ดังนั้นเพื่อคาดการณ์ความต้องการกำลังไฟฟ้างดกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับกระบวนการสุ่ม (Stochastic Load Model) ดังแสดงในสมการที่ (5.1) โดยใช้ข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ดัดแปลงจากข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงในปี 2010 ให้มีค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 10 เมกะวัตต์

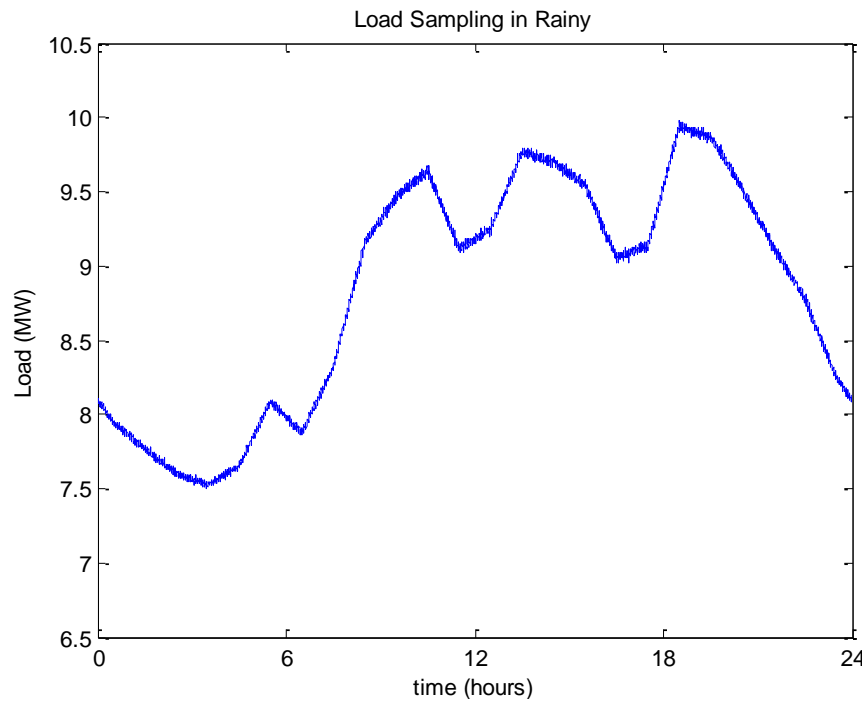
ข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยซึ่งสะท้อนความต้องการไฟฟ้าจากการพยากรณ์แสดงอยู่ในภาคผนวก ค.4 ซึ่งข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเช่นเดียวกันกับข้อมูลความเร็วลม ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว โดยผลจากการทดสอบการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้ความแปรปรวนของความต้องการไฟฟ้าซึ่งสะท้อนความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์โหลด (Load forecast error) มีค่าเท่ากับ 3% สามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 5.7 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าในฤดูหนาว

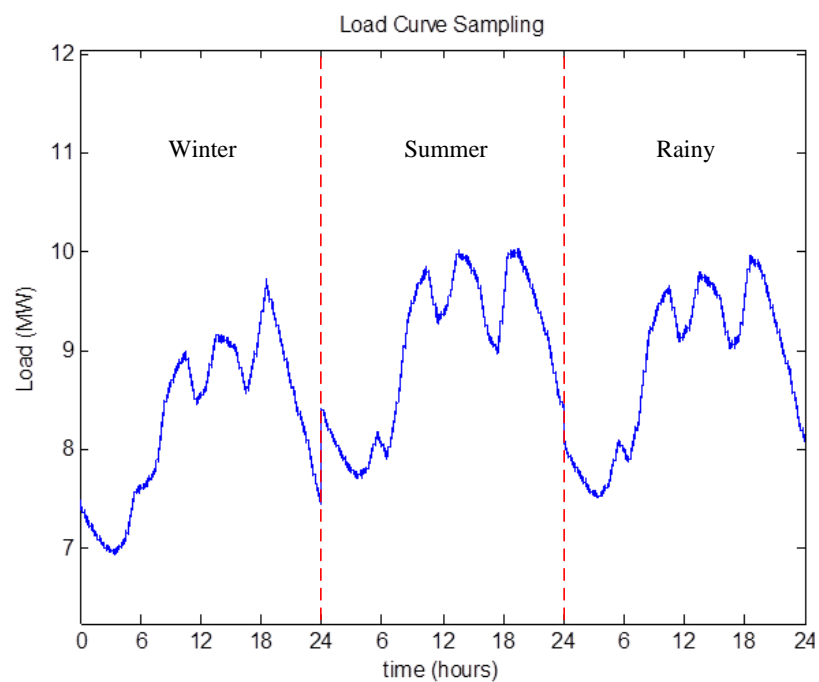


ภาพที่ 5.8 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าในฤดูร้อน



ภาพที่ 5.9 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าในฤดูฝน

เนื่องด้วยค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความต้องการกำลังไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาลมีค่าเท่ากัน ดังนั้น ในทำนองเดียวกันกับการสุ่มความเร็วลม ตัวแทนความต้องการกำลังไฟฟ้าสำหรับระยะเวลา 1 ปี จึงนำมาจากการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าในระยะเวลา 1 วันจากแต่ละฤดูกาล ดังแสดงต่อไปนี้



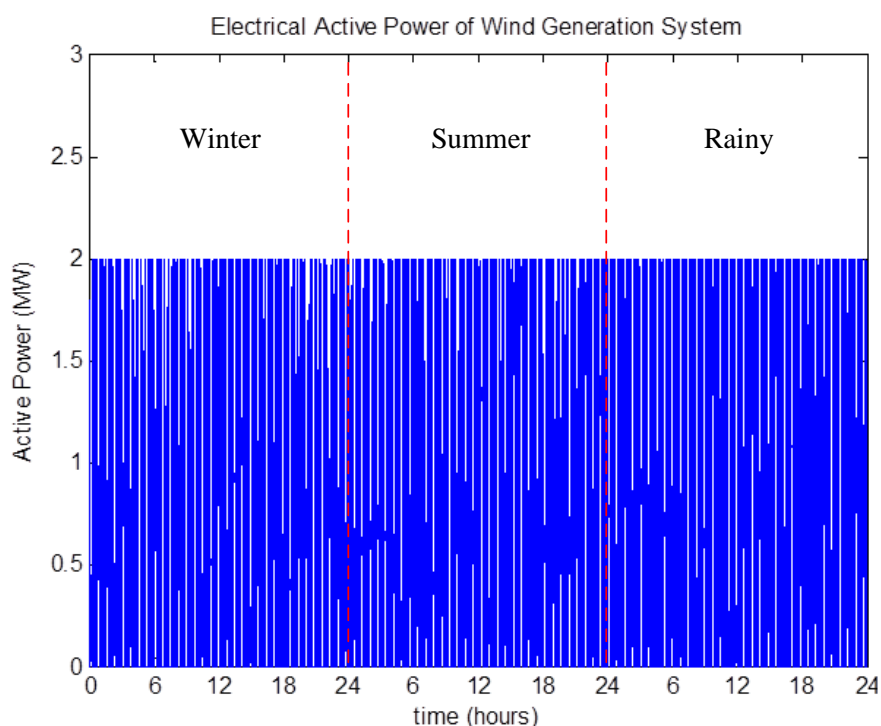
ภาพที่ 5.10 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าทั้งปี

5.2.3 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ

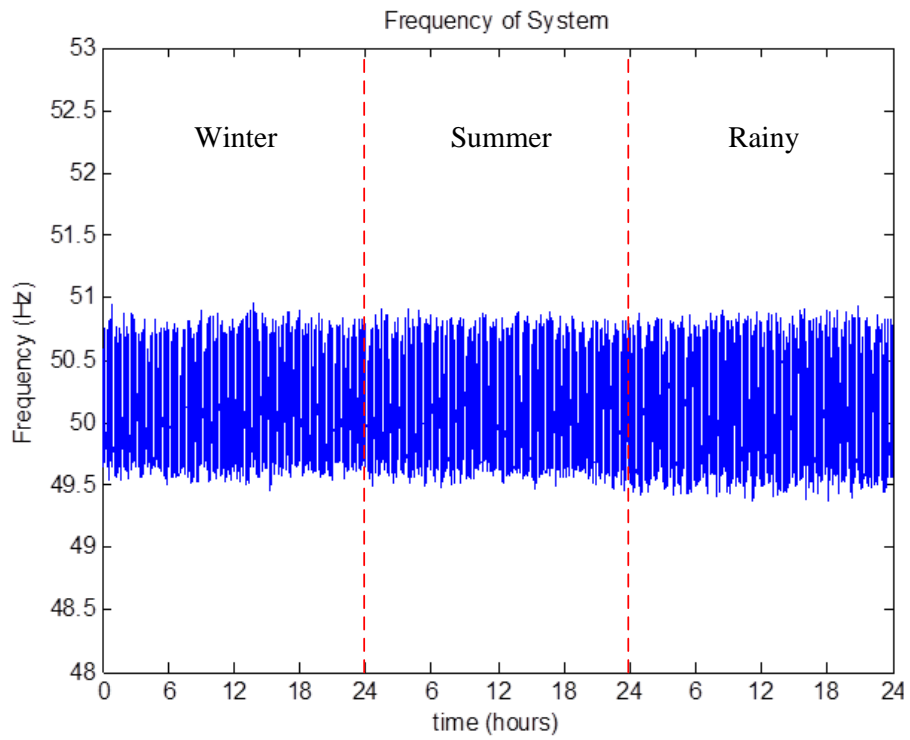
เมื่อทราบค่าความเร็วลมในแต่ละช่วงเวลาแล้ว ความเร็วลมเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นกำลังทางกลโดยแบบจำลองกังหันลม ตามสมการที่ (2.18) - (2.19) หลังจากนั้นจึงแปลงกำลังทางกลนั้นเป็นกำลังทางไฟฟ้าผ่านแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง ที่อาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันที่ขั้ว ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.20) - (2.62) โดยใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) และใช้ตัวควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมนั้นจะแสดงในภาคผนวก ข.

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมดังกล่าวข้างต้น จะถูกส่งไปยังโหนดบัส ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาดังแสดงในหัวข้อก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมนี้ ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งจึงถูกส่งมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งเป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าส่วนที่เหลือ โดยความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันที่คำนวณได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนี้ จะใช้เป็นตัวแทนการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดของแรงดัน ณ บริเวณที่มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเชื่อมต่ออยู่นั่นเอง

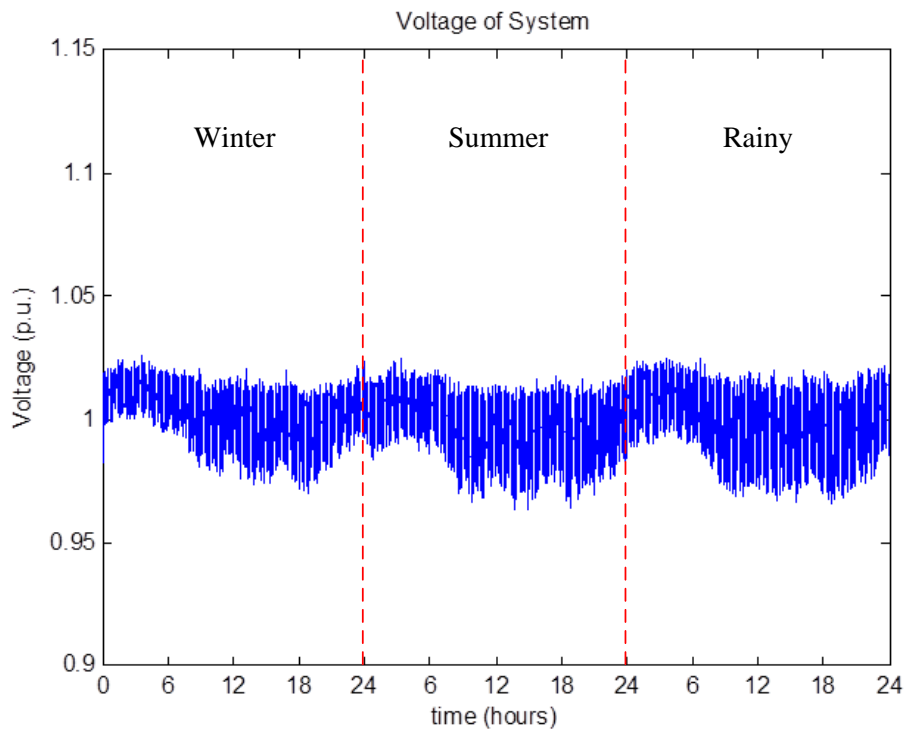
ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริง ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบบริเวณที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเชื่อมต่ออยู่ โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมและความต้องการกำลังไฟฟ้าทั้งปีที่สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5.11 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่



ภาพที่ 5.12 ตัวอย่างความถี่ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่



ภาพที่ 5.13 ตัวอย่างขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

จากผลการคำนวณที่แสดงข้างต้น พบว่า กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ตามความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่งผลให้ขนาดแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความถี่จะแปรผันตามกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมสามารถผลิตได้ กล่าวคือ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากทางด้านระบบไฟฟ้าจะมองเห็นโหลดมีค่าลดลง ส่งผลให้ความถี่ของระบบสูงขึ้น และในทางตรงข้าม เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้ต่ำลง ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากทางด้านระบบไฟฟ้าจะมองเห็นโหลดมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความถี่ของระบบต่ำลง ส่วนการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าเป็นผลมาจากพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในส่วนของ การรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator หรือ AVR) และส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer หรือ PSS) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าส่วนที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมต่ออยู่

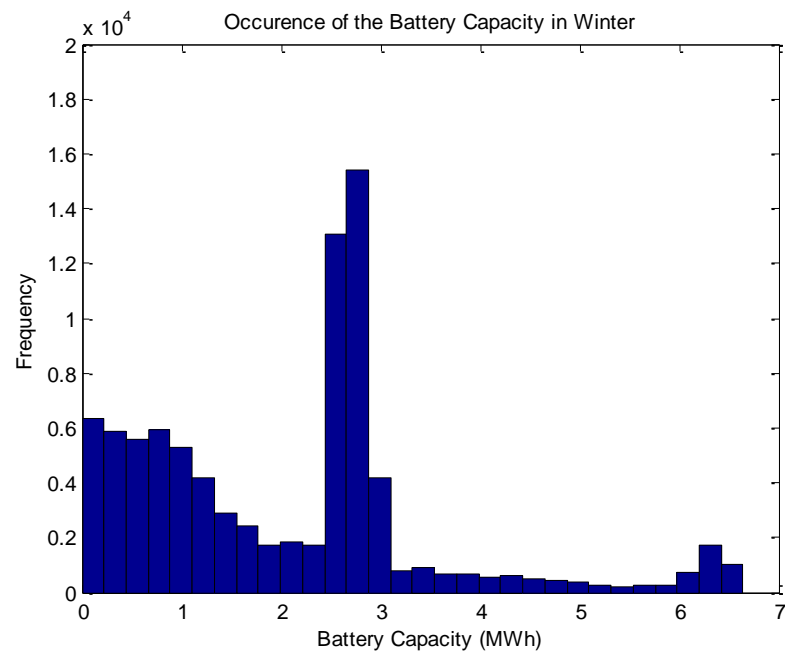
5.2.4 ผลการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น

เมื่อได้ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนียวนาชนิดสองทางตามหัวข้อ 5.2.3 แล้ว พบว่า ศักยภาพของกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตได้ จะมีค่าแตกต่างกันไปตามศักยภาพของความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง เพราะฉะนั้นในการกำหนดค่ากำลังไฟฟารวมที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมจ่ายสู่ระบบไฟฟ้า หรือ P_{set} สำหรับการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ จึงควรคำนึงถึงศักยภาพของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ด้วย และในขณะเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตได้หลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ก็ไม่ควรเปลี่ยนแปลงบ่อยจนเกินไปเช่นกัน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดให้ P_{set} มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลา 3 ชั่วโมง โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยในทุก 3 ชั่วโมงของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

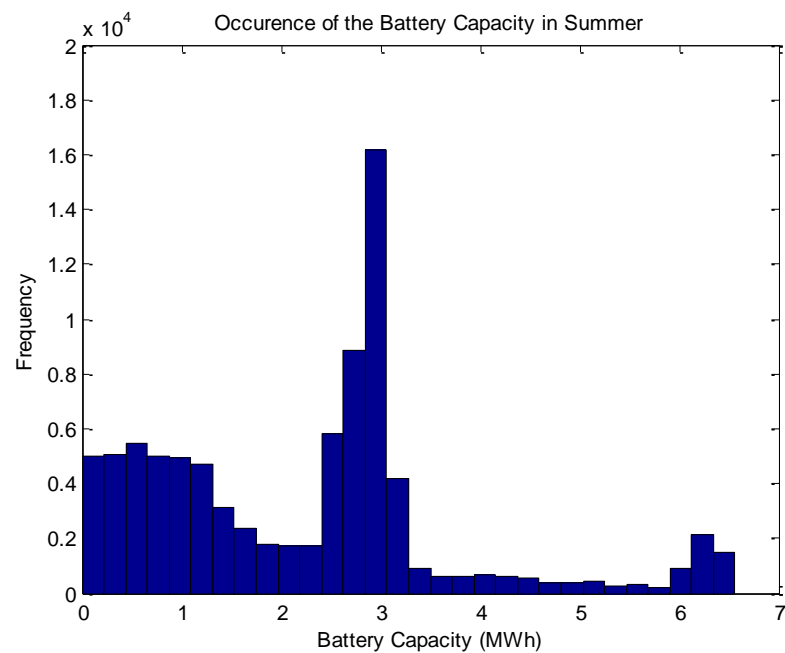
ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

ชั่วโมงที่	ค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม (MW)		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
1 - 3	0.5328	0.5636	0.6744
4 - 6	0.5655	0.5892	0.7310
7 - 9	0.6240	0.5260	0.6240
10 - 12	0.5682	0.5832	0.6528
13 - 15	0.5722	0.5860	0.7035
16 - 18	0.5078	0.5486	0.6292
19 - 21	0.5587	0.5991	0.6677
22 - 24	0.5277	0.6255	0.7070

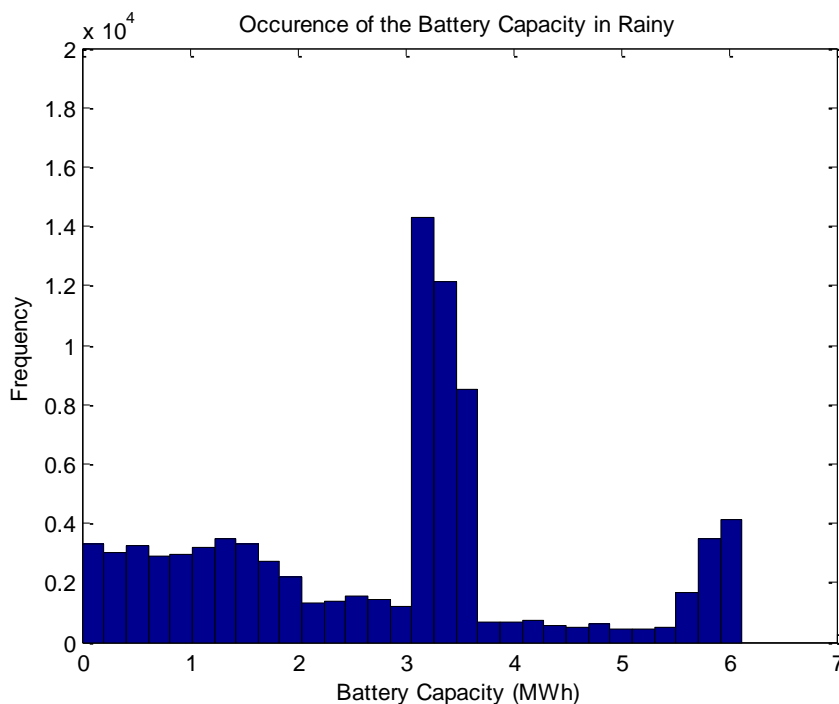
หลังจากทราบ P_{set} แล้ว ลำดับต่อไปจึงทำการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ตามขั้นตอนที่นำเสนอในบทที่ 4 ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากผลการทดสอบก่อนหน้านี้ ทำให้สามารถกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่แต่ละจุดเวลาได้ โดยขนาดของแบตเตอรี่ทั้งหมดที่เป็นไปได้ถูกนำมาสร้างเป็นกราฟแจกแจงความถี่แยกตามฤดูกาลได้ดังนี้



ภาพที่ 5.14 ตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดแบตเตอรี่จาก 1 เหตุการณ์ในฤดูหนาว



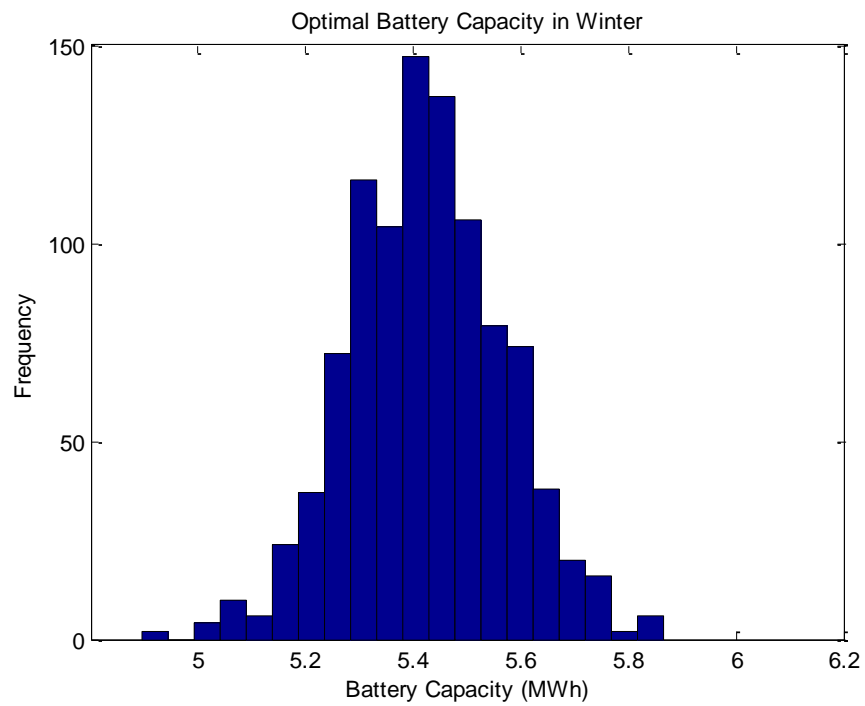
ภาพที่ 5.15 ตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดแบตเตอรี่จาก 1 เหตุการณ์ในฤดูร้อน



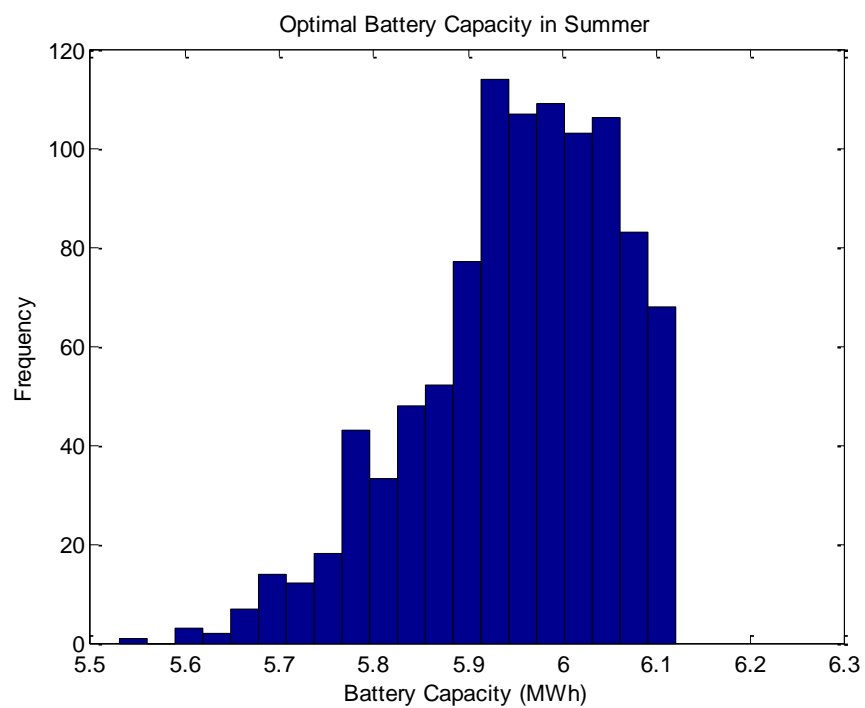
ภาพที่ 5.16 ตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดแบตเตอรี่จาก 1 เหตุการณ์ในฤดูฝน

ในการเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่นั้น ควรเลือกแบตเตอรี่ที่สามารถรับหรือจ่ายกำลังเพื่อชดเชยผลต่างของกำลังไฟฟ้าได้มากเพียงพอ แต่หากเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่เกินไปจะทำให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมมีค่าสูงเกินความจำเป็น ดังนั้น ควรเลือกขนาดของแบตเตอรี่ให้เพียงพอที่จะสามารถชดเชยผลต่างของกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอให้เลือกแบตเตอรี่ที่มีขนาดครอบคลุมร้อยละ 95 ของเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น ในที่นี้ผลการคำนวณหาค่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาข้อมูลความเร็วลมจากฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูฝนที่สุ่มได้ภายใน 1 เหตุการณ์ คือ 5.1648, 6.0504 และ 5.9030 เมกะวัตต์-ชั่วโมง (MWh) ตามลำดับ

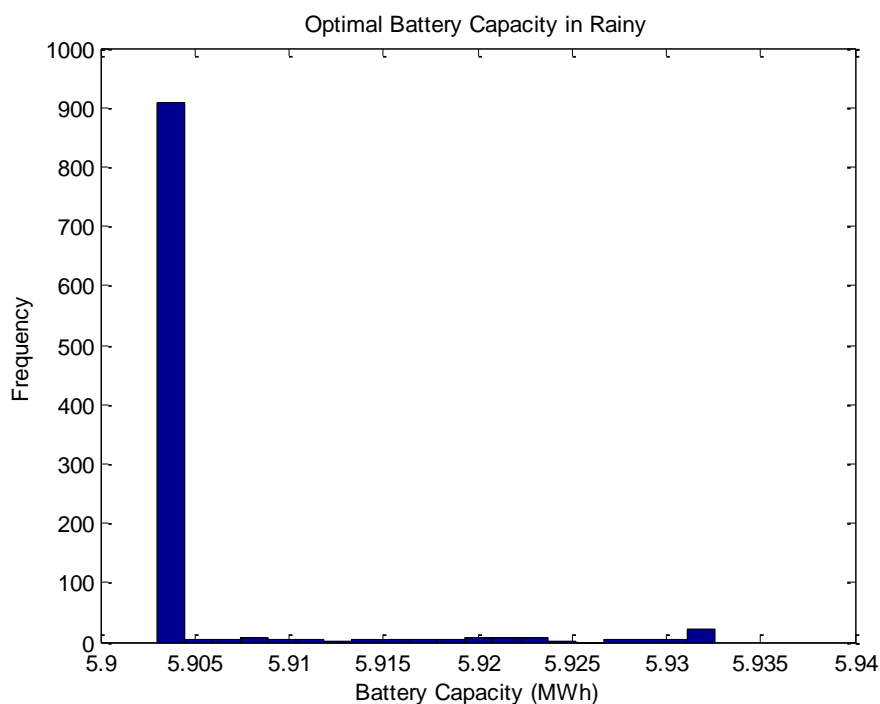
อย่างไรก็ดี ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ดังกล่าวเป็นเพียงคำตอบที่สอดคล้องกับข้อมูลความเร็วลมที่สุ่มได้เพียง 1 เหตุการณ์เท่านั้น ซึ่งยังไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงทำการสุ่มความเร็วลม 1 วันจากทุกฤดู หรือความเร็วลมทั้งปี เป็นจำนวน 1,000 เหตุการณ์ โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงร่วมกับความแปรปรวนของความเร็วลมชุดเดิมในการสุ่มความเร็วลมสำหรับแต่ละเหตุการณ์ เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ต้องรับหรือจ่ายจากแบตเตอรี่ แล้วทำการคำนวณหาค่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ด้วยวิธีการเดิม จากวิธีการคำนวณนี้จะได้ค่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ทั้งสิ้น 3 ชุด ชุดละ 1,000 ค่าแยกตามฤดูกาล ซึ่งแต่ละค่าเป็นค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลความเร็วลมแต่ละเหตุการณ์ ทำให้สามารถแสดงกราฟการกระจายตัวของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นตัวแทนของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ตามความเร็วลมแต่ละฤดูกาลได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 5.17 การกระจายตัวของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับฤดูหนาว



ภาพที่ 5.18 การกระจายตัวของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับฤดูร้อน



ภาพที่ 5.19 การกระจายตัวของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับฤดูฝน

จากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังกล่าว ด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะสามารถสรุปได้ว่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ของข้อมูลความเร็วลมแต่ละฤดูกาลจะอยู่ในช่วงดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 ช่วงของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับแต่ละฤดูกาล

ฤดูกาล	ช่วงของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ (MWh)
ฤดูหนาว	5.1445 - 5.7168
ฤดูร้อน	5.7041 - 6.1176
ฤดูฝน	5.9030 - 5.9295

จากผลการคำนวณข้างต้น พบว่า ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในฤดูฝนจะเท่ากับ 5.9030 เมกะวัตต์-ชั่วโมงเป็นส่วนมาก กล่าวคือ ไม่มีการกระจายตัวในลักษณะดังเช่นผลการคำนวณในฤดูหนาวและฤดูร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากศักยภาพความเร็วลมที่ค่อนข้างสูงในฤดูฝน ส่งผลให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด 2 เมกะวัตต์ได้มากกว่าฤดูกาลอื่น อีกทั้งระดับกำลังการผลิตนี้ยังทำให้กำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่รับไว้ หรือ P_{batt} มีค่าสูงที่สุดสำหรับแต่ละค่า P_{set} ด้วยขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ที่ระดับกำลังการผลิตนี้จึงมีขนาดใหญ่และเกาะกลุ่มอยู่ตอนปลายของตัวอย่างการกระจายตัวดังแสดงในภาพที่ 5.16 ดังนั้นในการคำนวณหาแบตเตอรี่ที่มีขนาดครอบคลุมร้อยละ 95 ของแต่ละเหตุการณ์จึงพบแบตเตอรี่ขนาดนี้เป็นส่วนมาก

สิ่งที่ต้องคำนวนต่อไป คือ จำนวนของแบตเตอรี่ที่ต้องนำมาต่ออนุกรมและขนาน เพื่อให้ได้แรงดันและความจุตามที่ต้องการ ซึ่งค่าแรงดันนี้รู้ได้จากขนาดแรงดันของหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับแบตเตอรี่โดยขนาดหม้อแปลงที่เลือกใช้มีขนาดพิกัด คือ 22 กิโลโวลต์ - 400/230 โวลต์ ใช้งานร่วมกับอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่มีขนาดพิกัดแรงดันด้านไฟตรง 360 โวลต์ ซึ่งเป็นข้อมูลจริงของอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง จากบริษัท Leonics รุ่น Apollo MTP-4110F [31] และเมื่อแบตเตอรี่ 1 ลูกมีแรงดันพิกัดที่ขั้วแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้แบตเตอรี่ต่ออนุกรมกันแถวละ 30 ลูก เพื่อให้ได้แรงดันที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางนี้

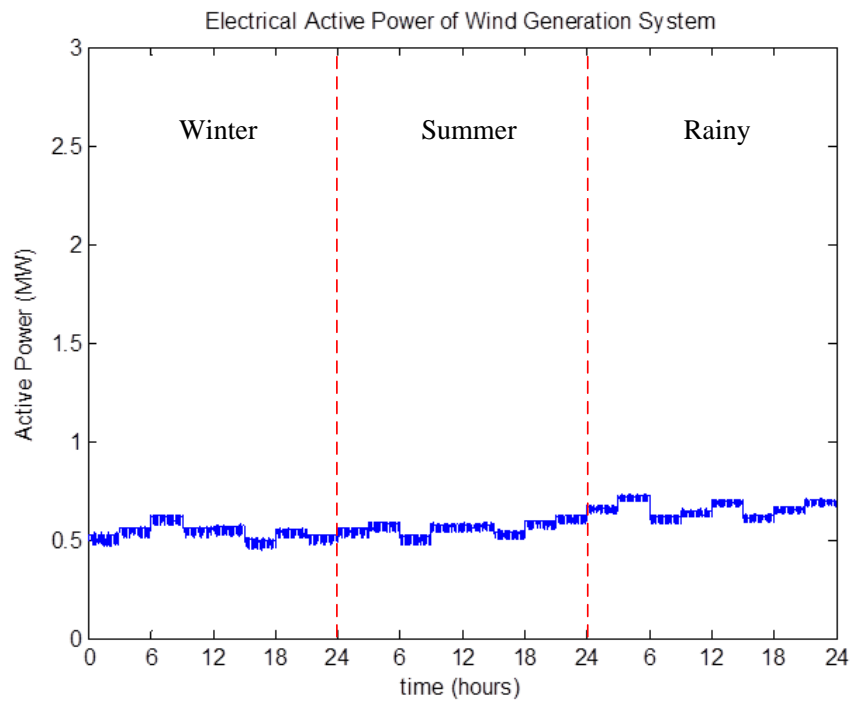
เมื่อทราบจำนวนแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันแล้ว จะสามารถคำนวณหาจำนวนแถวของแบตเตอรี่ที่จะใช้ต่อขนานกันได้ โดยคำนวณจากขนาดแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ เพื่อให้จำนวนลูกของแบตเตอรี่เป็นจำนวนเต็ม อย่างไรก็ตาม ขนาดของแบตเตอรี่ที่เลือกนี้จะต้องใช้งานได้กับทั้ง 3 ฤดูกาล ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ คือ 6.084 เมกะวัตต์-ชั่วโมง นั่นคือจะต้องใช้แบตเตอรี่จำนวน 65 แถวต่อขนานกัน เพื่อให้ได้ความจุของชุดแบตเตอรี่เป็นไปตามที่ต้องการ จากการคำนวณดังกล่าว สรุปได้ว่า จะต้องใช้แบตเตอรี่ต่ออนุกรมและขนานกันเป็นชุดแบตเตอรี่ทั้งหมด 1,950 ลูก

5.2.5 ผลการทดสอบหากำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้ในเบื้องต้น

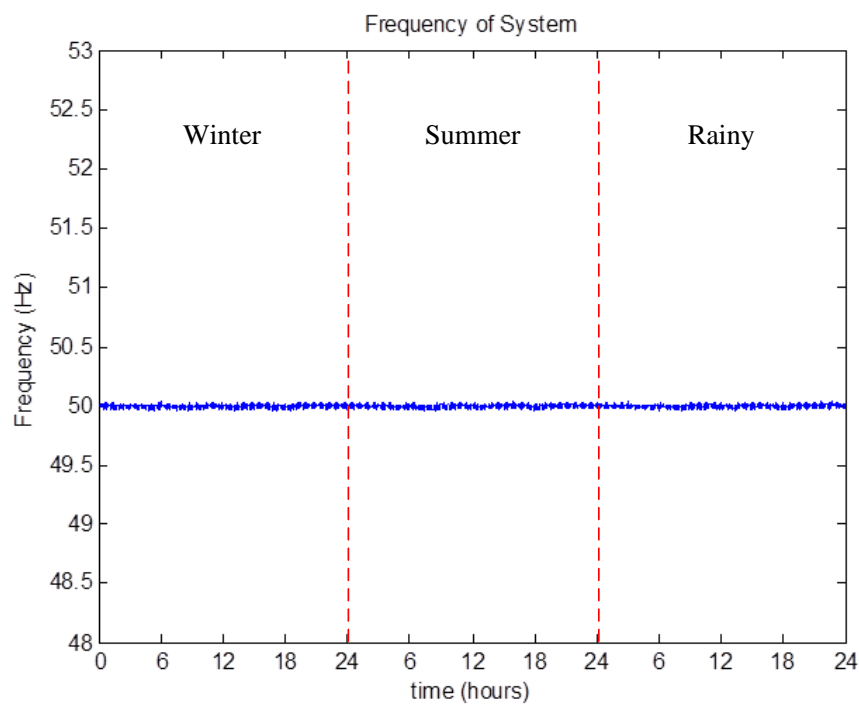
ในการทดสอบนี้ทำการสุ่มความเร็วลมทั้งปีขึ้นมาใหม่ 1 ชุด และกำหนดให้กำลังไฟฟารวมที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมจ่ายสู่ระบบไฟฟ้า หรือ P_{set} มีดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้สำหรับหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูฝนตามลำดับ เพื่อทดสอบว่าขนาดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเบื้องต้นจะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบได้จริง เมื่อทราบข้อมูลความเร็วลมแล้วจะสามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทราบกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จะช่วยชดเชยได้ และจะสามารถคำนวณหากำลังไฟฟารวมที่เข้าสู่ระบบ (P_{total}) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{total} = P_{DFIG} + P_{batt} \quad (5.2)$$

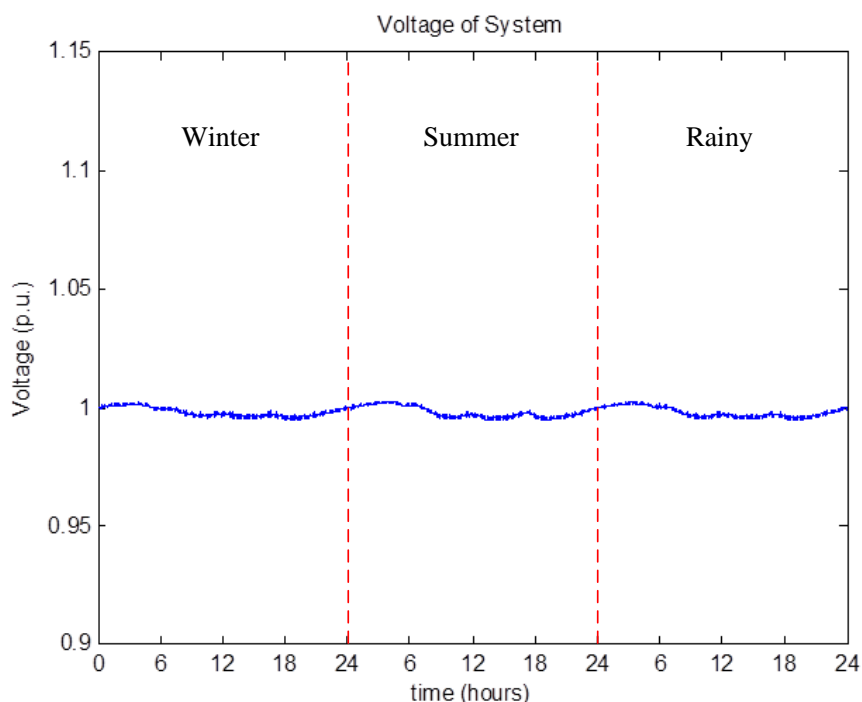
ผลการทดสอบกำลังไฟฟารวมที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีขนาดเหมาะสม รวมถึงความถี่และแรงดันของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้น โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมทั้งปีที่สุ่มได้ สามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 5.20 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเบื้องต้น



ภาพที่ 5.21 ตัวอย่างความถี่ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเบื้องต้น



ภาพที่ 5.22 ตัวอย่างขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเบื้องต้น

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีการแกว่งน้อยลง ส่งผลให้แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้ามีการแกว่งลดลงตามไปด้วย โดยสาเหตุที่กำลังไฟฟ้ายังมีการแกว่งอยู่เล็กน้อยนั้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมของแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าได้ทัน รวมถึงขีดจำกัดการอัดและคายประจุสูงสุดของแบตเตอรี่ และอีกสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและแรงดันของระบบ คือ การเปลี่ยนแปลงความต้องการทางไฟฟ้าที่เกิดจากแนวโน้มของความต้องการไฟฟ้ารายวันและกระบวนการสุ่มความต้องการไฟฟ้า

5.2.6 ผลการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ

ผลการทดสอบในหัวข้อก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่า ขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอ สามารถแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี เพราะสามารถลดปัญหาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบได้ โดยทั้งความถี่และแรงดันดังกล่าวจะแกว่งตัวอยู่ในช่วงการยอมรับตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ นั่นคือ ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (FD) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (VD) มีค่าเท่ากับ 0 ทั้งสองดัชนี

อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติ ดัชนีการเบี่ยงเบนทั้งสองดัชนีนี้อาจไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากับ 0 เพียงแต่ต้องไม่เกินค่าที่ผู้ดูแลระบบไฟฟ้ากำหนดไว้ ซึ่งมาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในช่วงปี 2552-2553 ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานของดัชนีทั้งสองไว้ดังนี้

ตารางที่ 5.3 มาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในช่วงปี 2552-2553 (บางส่วน)

ชื่อดัชนีวัดผลการดำเนินงานหลัก	เกณฑ์มาตรฐาน คุณภาพการบริการ
การเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation)	ไม่เกิน ร้อยละ 0.054
การเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation)	ไม่เกิน ร้อยละ 2.852

ดังนั้น ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเบื้องต้น จึงสามารถปรับลดลงได้อีก โดยอาศัยการปรับลดจำนวนแถวของชุดแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกันด้วยวิธี Bisection โดยมีเงื่อนไขว่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะต้องเป็นขนาดที่เล็กที่สุดซึ่งยังคงทำให้ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (*FD*) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (*VD*) ยังอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

ผลลัพธ์จากการคำนวณดังกล่าวมานี้ สามารถลดจำนวนแถวของชุดแบตเตอรี่จาก 65 แถว เหลือเพียง 40 แถว หรือลดจำนวนแบตเตอรี่จาก 1,950 ลูก เหลือเพียง 1200 ลูก นั่นคือ ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ลดเป็น 3.744 เมกะวัตต์-ชั่วโมง โดยค่าดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (*FD*) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (*VD*) ที่คำนวณได้หลังจากปรับลดขนาดแบตเตอรี่สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

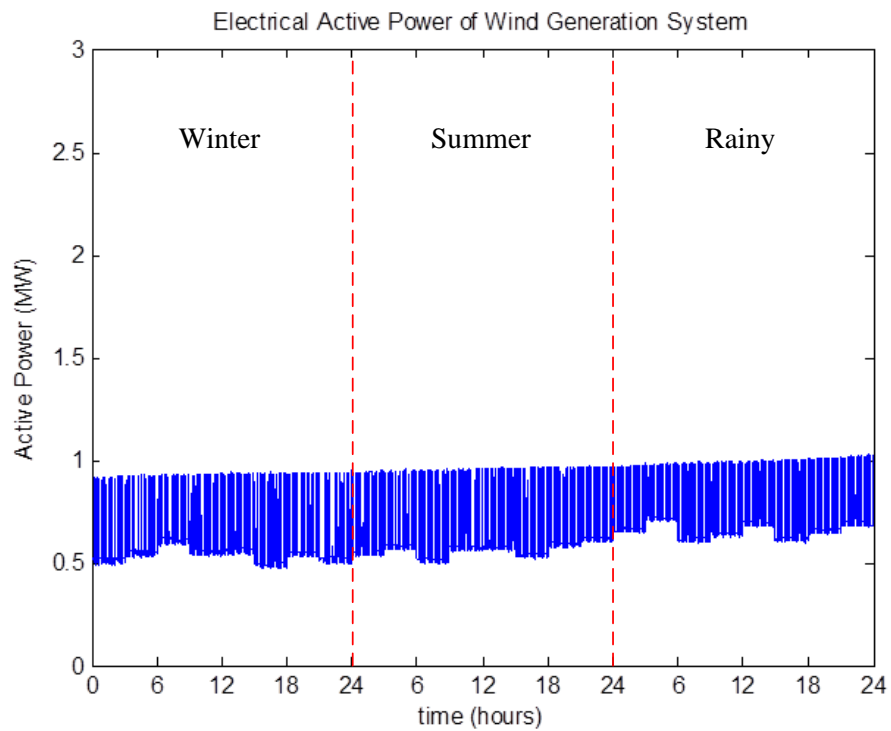
ตารางที่ 5.4 ค่าดัชนีการเบี่ยงเบนฯ หลังจากปรับลดขนาดแบตเตอรี่

ดัชนี	ค่าของดัชนี
การเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation)	0.0463
การเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation)	0

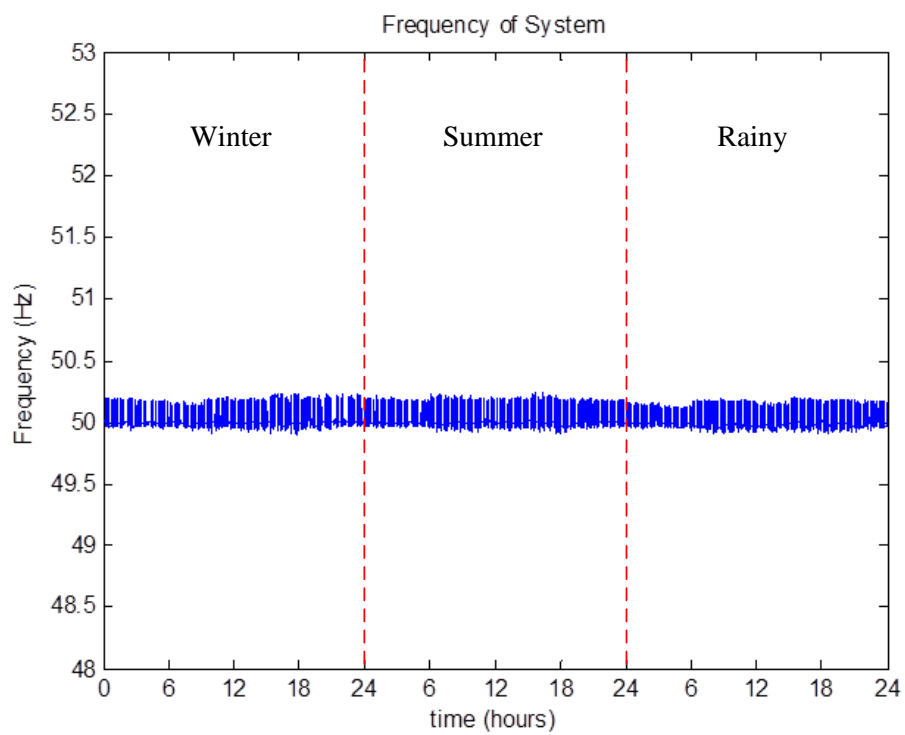
ส่วนผลการทดสอบกำลังไฟฟารวมที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีขนาดเหมาะสมนี้ รวมถึงแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.23 ถึงภาพที่ 5.25

จากภาพที่ 5.23 ซึ่งแสดงตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม หลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีการแกว่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงในภาพที่ 5.20 ดังนั้นความถี่ทางไฟฟ้าและแรงดันของระบบจึงเกิดการแกว่งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 5.24 และภาพที่ 5.25

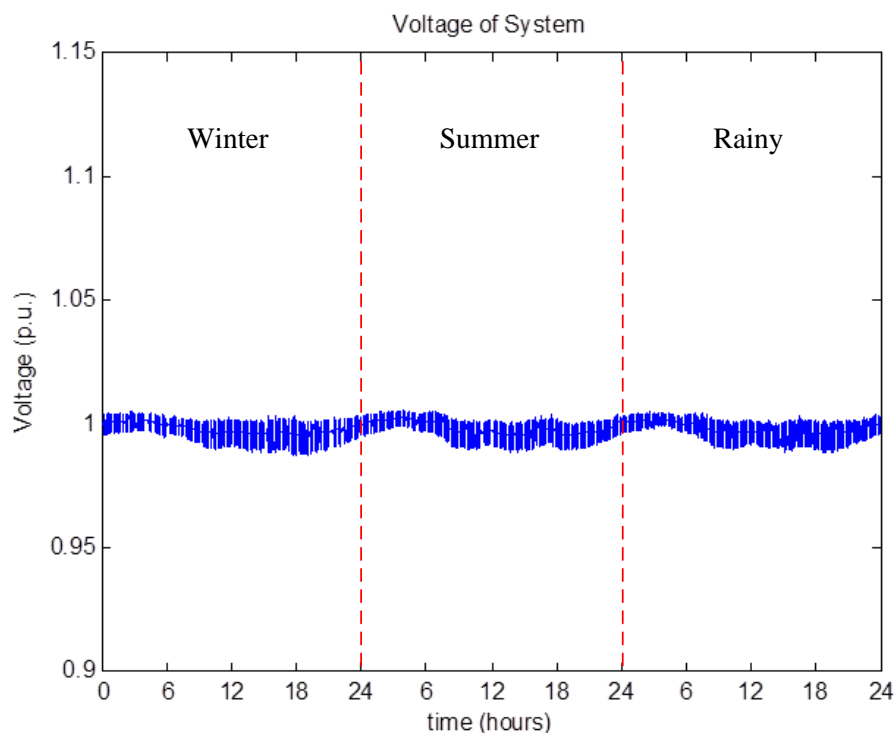
ทั้งนี้ ภาพที่ 5.23 ยังแสดงให้เห็นอีกว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟารวมที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมจ่ายสู่ระบบไฟฟ้า หรือ P_{set} ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่เล็กลงนี้ ไม่สามารถช่วยรับกำลังไฟฟ้าที่เกินจากความต้องการได้ทั้งหมด แต่ยังสามารถช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าความต้องการได้อยู่ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เกินจากความต้องการส่วนใหญ่จะมีขนาดสูงกว่าความสามารถในการรับกำลังไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กลง ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าความต้องการนั้น ยังไม่เกินความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กลงนี้



ภาพที่ 5.23 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้



ภาพที่ 5.24 ตัวอย่างความถี่ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้



ภาพที่ 5.25 ตัวอย่างขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้

จากผลการคำนวณที่แสดงข้างต้น กำลังไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ส่งผลให้ขนาดแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงไป ในทำนองเดียวกันกับ ลักษณะการแกว่งของขนาดแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งชุดแบตเตอรี่ กล่าวคือ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความถี่จะแปรผันตามกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมสามารถผลิตได้ โดยในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้ารวมได้สูงขึ้น ความถี่ของระบบไฟฟ้า จะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากทางด้านระบบไฟฟ้าจะมองเห็นโหลดมีค่าลดลง ส่งผลให้ความถี่ของระบบสูงขึ้น และในทางตรงข้าม เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้ารวมได้ต่ำลง ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากทางด้านระบบไฟฟ้าจะมองเห็นโหลดมีค่าสูงขึ้น ส่งผล ให้ความถี่ของระบบต่ำลง ดังนั้น ความถี่ทางไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 5.24 ส่วนใหญ่จึงออกมาใน ลักษณะที่สูงขึ้นจากค่าปกติ (50 เฮิรตซ์) เพราะกำลังไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน ลมส่วนใหญ่สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ส่วนการแกว่งของแรงดันไฟฟ้ายังคงเป็นผลมาจากพฤติกรรมของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสในส่วนของ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator หรือ AVR) และส่วนลดการ แกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer หรือ PSS) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของระบบ ไฟฟ้าส่วนที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมต่ออยู่

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เพื่อช่วยลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของความเร็วลมซึ่งขึ้นอยู่กับศักยภาพพลังงานลมของแต่ละพื้นที่ รวมถึงสภาพภูมิอากาศในแต่ละฤดูกาล โดยปัญหาที่เกิดจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ คือ แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณที่มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเชื่อมต่ออยู่จะเกิดการแกว่งตามไปด้วย ซึ่งหากปล่อยให้กำลังไฟฟ้าที่มีความไม่แน่นอนนี้ผ่านเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับช่วยลดการแกว่งแล้ว อาจทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดปัญหาในด้านเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าได้ ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบตเตอรี่เพื่อช่วยรับกำลังไฟฟ้า เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เกินจากระดับกำลังการผลิตที่ต้องการ และในทางตรงกันข้าม แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ต่ำกว่าระดับกำลังการผลิตที่ต้องการเช่นกัน ด้วยสาเหตุและแนวทางแก้ปัญหาดังกล่าวมานี้ จึงเห็นว่าแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สามารถช่วยลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวได้

ทั้งนี้ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือขนาดความจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เนื่องจากหากกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ต่ำเกินไป แบตเตอรี่ดังกล่าวจะไม่สามารถลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้แบตเตอรี่ช่วยรับหรือจ่าย จะสูงกว่าความสามารถในการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ แต่หากกำหนดขนาดของแบตเตอรี่สูงจนเกินไป จะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนเกินความจำเป็น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้งานกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมนี้ได้อย่างเหมาะสม

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เพื่อใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม โดยคำนึงถึงผลของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมติดตั้งอยู่นี้ เริ่มจากการจำลองค่าความเร็วลมในแต่ละช่วงเวลาด้วยแบบจำลองความเร็วลม ซึ่งแบบจำลองความเร็วลมที่นำเสนอนี้ได้พิจารณาถึงผลของความไม่แน่นอนด้วยกระบวนการสุ่มในเชิงคณิตศาสตร์ จากนั้น ความเร็วลมที่สุ่มได้จะถูกแปลงให้กลายเป็นกำลังทางกลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม แล้วจึงเปลี่ยนกำลังทางกลที่คำนวณได้นี้เป็นกำลังทางไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง ซึ่งถือเป็นตัวแทนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เมื่อทราบกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมสามารถผลิตได้แล้ว จึงทำการคำนวณค่าแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมนี้เชื่อมต่ออยู่ โดยอาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับกระบวนการสุ่ม มาเป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าและความต้องการกำลังไฟฟ้าในบริเวณนั้นตามแต่ละช่วงเวลา ข้อดีของแบบจำลองที่ใช้กันนี้ คือสามารถคำนวณตัวแปรต่างๆ ของระบบไฟฟ้าได้ใกล้เคียงความจริง

หลังจากทราบตัวแปรต่างๆ ของระบบไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาแล้ว จึงทำการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงมีหลายขนาดและหลายชนิดให้เลือกใช้งานได้ตรงตามความต้องการ อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีความทนทานและไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก และในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ จะคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ที่ดัดแปลงจากแบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมีของ Shepherd ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดี และได้รับการปรับปรุงสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองให้เหมาะสำหรับการจำลองสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ด้วยโปรแกรม MATLAB อีกทั้งยังมีข้อดีในการนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงของแบตเตอรี่ในท้องตลาดได้โดยง่าย เนื่องจากแบบจำลองนี้สามารถคำนวณค่าตัวแปรของแบบจำลองได้จากเอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ผู้ผลิตกำหนดมาให้ โดยอาศัยเพียงการอ่านค่าจากกราฟลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่เพียง 3 จุดเท่านั้น โดยการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เริ่มจากการกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมจ่ายเข้าสู่ระบบโดยมีการแกว่งน้อยที่สุดหรือมีกำลังขาออกสู่ระบบไฟฟ้าสม่ำเสมอมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ จากนั้นจึงคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่ต้องการในช่วงเวลานั้น โดยกำหนดให้ขนาดของแบตเตอรี่ต้องสามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เป็นผลต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตได้ ณ ขณะนั้น วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้นต้องสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อทราบขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการคำนวณหาจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต้องนำมาต่อเป็นชุดแบตเตอรี่ จากนั้นจึงนำขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ไปทดสอบกับระบบทดสอบที่กำหนดขึ้น เพื่อดูผลของแบตเตอรี่ที่มีต่อกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้น

จากผลการทดสอบพบว่า กำลังไฟฟ้ารวมที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมผลิตได้หลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดดังกล่าว จะมีการแกว่งอยู่ในกรอบที่ค่อนข้างแคบ ส่งผลให้ค่าความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้ามีการแกว่งอยู่ในกรอบที่แคบตามไปด้วย จนสามารถรับรองได้ว่า การเบี่ยงเบนของความถี่และขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงที่กำหนดแน่นอน ดังนั้น ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จึงสามารถปรับลดลงได้อีกในระดับหนึ่ง โดยที่การเบี่ยงเบนของความถี่และแรงดันจากช่วงการยอมรับยังคงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

การปรับลดขนาดของแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการลดจำนวนแถวของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกันลงด้วยวิธี Bisection โดยมีเงื่อนไขว่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะต้องเป็นขนาดที่เล็กที่สุดซึ่งยังคงทำให้ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (FD) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (VD) ยังอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนด

จากการทดสอบพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจาก เมื่อติดตั้งชุดแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้แล้ว สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ

รายการอ้างอิง

- [1] Qina, Z., Li, W., and Xiong, X., Estimating wind speed probability distribution using kernel density method. Electric Power Systems Research 81 (December 2011): 2139–2146.
- [2] Morgan, E. C., Lackner, M., Vogel, R. M., and Baise, L. G. Probability distributions for offshore wind speeds. Energy Conversion and Management 52 (January 2011): 15-26.
- [3] Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. Wind energy explained: Theory, design, and application. 2nd Edition. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [4] Prapassornpittaya, A., and Audomvongseree, K. Determining optimal battery capacity of wind generator with power fluctuation consideration. Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (May 2011): 820 – 823.
- [5] Durr, M., Cruden, A., Gair, S., McDonald, J.R. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. Journal of Power Sources 161 (October 2006): 1400-1411.
- [6] Shepherd, C. M., Design of primary and secondary cells - part 2. an equation describing battery discharge. Journal of Electrochemical Society 112 (July 1965): 657-664.
- [7] Tremblay, O., Dessaint, L.-A., and Dekkiche, A.-I., A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (September 2007): 284-289.
- [8] Tremblay, O., and Dessaint, L.-A., Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. World Electric Vehicle Journal 3 (May 2009).
- [9] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สถาบันวิจัยพลังงาน. มาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตในช่วงปี 2552-2553, 2008.
- [10] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ฝ่ายแผนงานพัฒนาโรงไฟฟ้า. เทคโนโลยีกังหันลม [Online]. Available from: http://www2.egat.co.th/re/egat_wind/wind_technology.htm [2012, Aug 21]
- [11] Zang, T.C. Initial Study of Using Rechargeable Batteries in Wind Power Generation with Variable Speed Induction Generators. IET Renewable Power Generation 2 (July 2007): 89-101.

- [12] 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.
- [13] Chowdhury, B. H., and Chellapilla, S. Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation. Electric Power Systems Research 76 (June 2006): 786–800.
- [14] Masters, G. M. Renewable and efficient electric power systems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [15] MathWorks. MATLAB & Simulink [Online]. Available from: <http://www.mathworks.com> [2012, Aug 22]
- [16] Lei, Y., Mullane, A., Lightbody, G., and Yacamini, R. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. IEEE Transactions on Energy Conversion 21 (March 2006): 257-264.
- [17] Fernández, L. M., Jurado, F., and Saenz, J. R. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines. Renewable Energy 33 (January 2008): 129–140.
- [18] Kundur, P. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [19] Mohan, N., Undeland, T. M., and Robbins, W. P. Power electronics: Converters, applications, and design. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [20] Bhadra, S. N., Kastha, D., and Banerjee, S. Wind electrical systems. New Delhi: Oxford University Press, 2005.
- [21] Ni, B. and Sourkounis, C. Control strategies for energy storage to smooth power fluctuations of wind parks. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) (April 2010): 973 – 978.
- [22] Patel, M. R. Wind and solar power systems. United States of America: CRC Press LLC, 2000.
- [23] Liu, H. and Jiang, J. Flywheel energy storage-An upswing technology for energy sustainability. Energy and Buildings 39 (May 2007): 599–604.
- [24] Buchmann, I. Battery definitions [Online]. Available from: <http://www.batteryuniversity.com>, [2012, Aug 28].
- [25] MIT electric vehicle team. A guide to understanding battery specifications [Online]. Available from: http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf, [2012, Sep 19].

- [26] Buchmann, I. Batteries in a portable world – a handbook on rechargeable batteries for non-engineers. 2nd Edition. Cadex Electronics Inc., 2001.
- [27] Buchmann, I. Serial and parallel battery configurations [Online]. Available from: <http://www.batteryuniversity.com>, [2013, Mar 21].
- [28] โคทม อารียา. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1-2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2544.
- [29] Acha, E., Agelidis, V. G., Anaya-Lara, O., and Miller, T.J.E. Power electronic control in electrical systems. Oxford: Newnes, 2002.
- [30] Rolls UK & Europe. S12-290AGM 12V 260Ah (C20) [Online]. Available from: <http://www.rolls-battery.com/pdf/S12-290AGM.pdf>, [2012, Sep 21]
- [31] Leonics. APOLLO MTP- 410 three-phase bidirectional dual mode hybrid inverter for mini-grid system. [Online]. Available from: <http://www.leonics.com/product/renewable/inverter/dl/mtp-410-091.pdf>, [2012, Sep 26]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลความเร็วลม

ตารางที่ ก.1 ความเร็วลมเฉลี่ยของแต่ละเดือนในปี 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

ตารางที่ ก.2 ระดับความเร็วลมในการผลิตกำลังไฟฟ้า

ระดับความเร็วลม	ความเร็วลม (m/s)
ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in Speed)	3.5
ความเร็วลมเต็มพิกัด (Nominal or Rated Wind Speed)	7.5
ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind Speed)	25

ตารางที่ ก.3 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
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

ตารางที่ ก.4 ความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละฤดู

ชั่วโมง	ค่าความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละฤดู (σ)		
	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

ภาคผนวก ข

ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและการควบคุม
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม และตัวควบคุมที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทาง โดยข้อมูลค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางและคอนเวอร์เตอร์มีค่าตามตารางที่ ข.1 ส่วนค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสองทางจะแสดงในตารางที่ ข.2

ในส่วนของค่าเริ่มต้นของจุดทำงานและค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจะมีค่าตามตารางที่ ข.3 และตารางที่ ข.4 ตามลำดับ สุดท้ายคือค่าตัวแปรควบคุมต่างๆ ได้แก่ ตัวควบคุมมุมนิชของใบพัดกังหันลม ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริด จะแสดงในตารางที่ ข.5 ถึงตารางที่ 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.
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_β	500	p.u.
β_{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 ตัวแปรควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกรองที่กริด

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

ภาคผนวก ค

ข้อมูลระบบทดสอบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบวิธีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ รวมถึงข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้เป็นตัวแทนระบบไฟฟ้าบริเวณที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมต่ออยู่

ค.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ

ข้อมูลบัสสำหรับใช้เป็นจุดทำงานเริ่มต้นของการทดสอบแสดงไว้ใน

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบสำหรับใช้เป็นจุดทำงานเริ่มต้น

บัส	ประเภท	ความต้องการกำลังไฟฟ้า		อุปกรณ์ตัวต่อแบบขนาน		แรงดันสูงสุด (p.u.)	แรงดันต่ำสุด (p.u.)
		P (MW)	Q (MVar)	G_s (MW)	B_s (MVar)		
1	โหลดบัส	-1	0	0	0	1.05	0.95
2	โหลดบัส	8	0	0	0	1.05	0.95
3	แอสลบบัส	0	0	0	0	1.05	0.95

ค.2 ข้อมูลหม้อแปลง

หม้อแปลงทุกตัวมีค่ารีแอกแตนซ์ 0.00015 pu โดยหม้อแปลงแปลงแรงดันขึ้นที่ต่อระหว่างบัส 1 และ 2 จะมีค่าพิกัดคือ 2 MVA และ 22/230 kV ส่วนหม้อแปลงแปลงแรงดันลงที่ต่ออยู่ระหว่างบัส 1 และคอนเวอร์เตอร์ มีค่าพิกัด 600 kVA และ 22 kV/400 V

ค.3 ข้อมูลสายส่ง

ค่าฐานคือ 2 MVA และ 22 kV

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ

สายส่ง	บัสต้นทาง	บัสปลายทาง	ความต้านทาน (p.u.)	รีแอกแตนซ์ (p.u.)
1	1	2	0	0.00015
2	2	3	0	0.05
3	2	3	0	0.05

ค.4 ความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมง

ตารางที่ ค.3 ความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมง

ชั่วโมง	ความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมง (MW)		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
1	7.33	8.26	7.95
2	7.15	8.04	7.76
3	7.01	7.85	7.60
4	6.96	7.73	7.53
5	7.09	7.81	7.65
6	7.59	8.17	8.09
7	7.64	7.93	7.88
8	7.80	8.45	8.32
9	8.52	9.31	9.16
10	8.81	9.65	9.46
11	8.98	9.82	9.64
12	8.48	9.30	9.11
13	8.63	9.46	9.25
14	9.14	9.98	9.77
15	9.11	9.92	9.70
16	9.01	9.72	9.55
17	8.59	9.16	9.06
18	9.00	9.00	9.13
19	9.69	9.97	9.94
20	9.29	10.00	9.87
21	8.88	9.76	9.52
22	8.44	9.42	9.12
23	8.13	9.11	8.78
24	7.61	8.57	8.25

ค.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงไว้ในตารางที่ ค.4 ค่าตัวแปรของระบบควบคุมความเร็วแสดงไว้ในตารางที่ ค.5 และค่าตัวแปรของระบบกระตุ้นแสดงไว้ในตารางที่ ค.6 และตารางที่ ค.7 ทั้งนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าพิกัด 10 MVA และ 22 kV

ตารางที่ ค.4 ค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ตัวแปรในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	ค่าของตัวแปร	หน่วย
X_d	1.81	p.u.
X_q	1.76	p.u.
X'_d	0.3	p.u.
X'_q	0.65	p.u.
X_l	0.15	p.u.
R_s	0.003	p.u.
T'_{d0}	8	s
T'_{q0}	1	s
H	3.5	s
D	0	p.u.

ตารางที่ ค.5 ค่าตัวแปรของระบบควบคุมความเร็วในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
P	0.05	p.u.
T_g	0.2	s
T_{ch}	3	s

ตารางที่ ค.6 ค่าตัวแปรของส่วนรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
K_a	200	p.u.
T_r	0.015	s
$E_{fd,max}$	7	p.u.
$E_{fd,min}$	-6.4	p.u.

ตารางที่ ค.7 ค่าตัวแปรของส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
K_s	7.5	p.u.
T_w	1.41	s
T_1	0.154	s
T_2	0.033	s
$V_{s,max}$	0.2	p.u.
$V_{s,min}$	-0.2	p.u.

ภาคผนวก ง
ข้อมูลแบตเตอรี่

ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอตัวแปรต่างๆของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดชนิด AGM จากบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM ที่ใช้กับแบบจำลองแบตเตอรี่ในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสม โดยตัวแปรต่างๆสามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ง.1 ค่าตัวแปรของแบตเตอรี่

ตัวแปรของแบตเตอรี่	ค่าของตัวแปร	หน่วย
E_0	12.4526	V
R	0.0018	Ω
K	0.0016	Ω หรือ V/Ah
Q	340	Ah
A	0.1408	V
B	0.3297	$(Ah)^{-1}$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชุตติฉิม อภาพิพัฒน์ เกิดวันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2532 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554