ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246291

การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

นางสาวอัญชลี ประภัสสรพิทยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า
โดย	นางสาวอัญชลี ประภัสสรพิทยา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ประดิษฐ์ เฟื่องฟู)

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

246291

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ ได้รับความสนใจในการนำมาผลิตไฟฟ้า แต่ปัญหาใหญ่ที่พบจากการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม คือ กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความถี่ทางไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากความไม่แน่นอนของความเร็วลม ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าและเสถียรภาพของไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย การติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการติดตั้งแบตเตอรี่ คือ ขนาดของแบตเตอรี่จะต้องมีความเหมาะสมกับกำลังการผลิต ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และช่วยควบคุมต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินความจำเป็น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอ วิธีการคำนวณ หาขนาดข องแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ จะเริ่มจากการจำลอง ความเร็วลมที่ผ่านกังหันในแต่ละชั่วโมงซึ่งรวมผลของความไม่แน่นอนด้วยแบบจำลองที่เหมาะสม และคำนวณกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความถี่ทางไฟฟ้า ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้ โดยใช้วิธีการติดตามกำลังลมสูงสุด ในส่วนของแบตเตอรี่นั้นจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว ร่วมกับวิธีการเชิงเลขเพื่อคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยจะเลือกใช้ขนาดแบตเตอรี่จาก ข้อมูลจริงของบริษัทผู้ผลิต วิธีการที่นำเสนอนี้ได้ถูกทดสอบกับระบบทดสอบที่กำหนดขึ้น ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าเป็นที่น่าพอใจ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต อัญชลี ประภัสสรพิทยา

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2553

5270714521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

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

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

246291

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

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

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบ บุญ หุนเจริญ และดร. ประดิษฐ์ เฟื่องฟู ที่ได้เสียเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนๆทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 3

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์..... 3

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 4

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง..... 5

2.1 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม..... 5

2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้..... 6

2.3 ลักษณะกลศาสตร์การเคลื่อนไหวของอากาศ..... 8

2.4 แบบจำลองกังหันลม..... 9

2.5 แบบจำลองความเร็วลม..... 10

2.6 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG)..... 13

2.6.1 แบบจำลองส่วนกลไฟฟ้า..... 14

2.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง. 14

2.6.3 แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์..... 16

2.6.4 แบบจำลองของตัวควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง... 18

2.6.4.1 แบบจำลองของตัวควบคุมทางกล..... 19

2.6.4.2 แบบจำลองของตัวควบคุมทางไฟฟ้า..... 19

2.6.4.2.1 การควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์..... 19

หน้า

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

หน้า

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

สารบัญตาราง

หน้า

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

สารบัญภาพ

หน้า

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

หน้า

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