

การออกแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ใน
ระบบไฟฟ้ากำลัง

THE OPTIMAL DESIGN OF BATTERY ENERGY SYSTEM IN
ELECTRICAL POWER SYSTEM

ประกาศิต ปราบพาล

ดุขฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุขฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่
ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ประกาศิต ปราบพาล

ดุชนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอ รับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This dissertation consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

.....
(นายประกาศิต ปราบพาล)



หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

The Optimal Design of Battery Energy Storage System in Electrical Power System

ชื่อ - นามสกุล

นายประกาศิต ปราบพาล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, D.Eng.

ปีการศึกษา

2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์รวิวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรินทร์ แห่งมงาม, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธคง, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 25 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อคุณิพนธ์

การออกแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้
แบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ชื่อ – นามสกุล

นายประกาศิต ปราบพาล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, D.Eng.

ปีการศึกษา

2564

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในโลกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ
เขตอุตสาหกรรมและสังคมเมืองของแต่ละประเทศ หน่วยงานที่รับผิดชอบการผลิตพลังงานไฟฟ้า
จำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตอย่างต่อเนื่อง ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าบางส่วนเวลาที่มีโหลดต่ำมี
พลังงานไฟฟ้าคงเหลือและทิ้งพลังงานไฟฟ้าไปโดยไม่ได้ใช้ แนวคิดของการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าใน
ช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อนำมาชดเชยการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีโหลดไฟฟ้าสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
การใช้พลังงานไฟฟ้าและลดต้นทุนการผลิตของหน่วยงานที่รับผิดชอบ คุณิพนธ์นี้จึงนำเสนอการ
ออกแบบและติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่
เหมาะสมที่สุด

การหาขนาดและตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ออกแบบและ
วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบก่อนและหลังการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อเพิ่ม
ประสิทธิภาพระบบไฟฟ้ากำลังให้มีเสถียรภาพขึ้น การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บ
พลังงานไฟฟ้าใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพันธุกรรมเปรียบเทียบกับวิธีกลุ่มอนุภาค และจำลองการ
ทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังโดยเลือกระบบจำหน่ายไฟฟ้ามาตรฐานของ IEEE ขนาด 30 บัส

ผลการศึกษาพบว่าขนาดและตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบ
แบตเตอรี่ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาคได้ขนาดของแบตเตอรี่
1,539 กิโลวัตต์ และ 1,000 กิโลวัตต์ และตำแหน่งการติดตั้งด้วยวิธีพันธุกรรมได้ตำแหน่งบัสที่ 3 และ
ตำแหน่งการติดตั้งด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคได้ตำแหน่งบัสที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้วิธีการหาค่าเหมาะสม
ที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อหาขนาดและตำแหน่งการติดตั้งได้ผลดีกว่าการใช้วิธีพันธุกรรม ผลของการ
ติดตั้งระบบการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง
สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดกำลังที่สูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นการศึกษาการออกแบบ
ระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลังที่เหมาะสมสามารถใช้เป็นต้นแบบการ
แก้ปัญหาการจัดการระบบไฟฟ้ากำลังได้ในอนาคตได้

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บพลังงาน, แบตเตอรี่, เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

Thesis Title	The Optimal Design of Battery Energy Storage System in Electrical Power System
Name - Surname	Mr. Prakasit Prabpal
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Krischonme Bhumkittipich, D.Eng.
Academic Year	2021

ABSTRACT

Currently, the use of electricity in the world has been increasing rapidly due to an increase in the industrial zones and urbanization. The agency responsible for electric power generation needs to continually increase the production capacity. Consequently, some of the power generation at low load time results in power surplus and it is left unused. The concept of energy storage during those periods is to compensate the use of peak load in order to enhance the efficient use of the electric power and to reduce the production costs of the responsible unit. This thesis, therefore, presents the design and installation of an electric power storage system using batteries to optimize the efficiency of the power system.

To determine the appropriate size and installation location of the battery energy storage system (BESS), the electric power flow was designed and analyzed before and after the storage system installation. This was carried out to optimize the efficiency and stability of the power system. Calculations of the size and location of BESS were based on the comparison between the genetic algorithm (GA) optimization and the particle swarm optimization (PSO). An IEEE standard 30-bus distribution system was chosen to stimulate the power system operation.

The study results showed that the size and installation location of the BESS by GA and PSO obtained the battery size of 1,539 and 1,000 kW, respectively. Meanwhile, the installation location of GA was the 3rd bus and the installation location PSO was the 9th bus. The results revealed that using the PSO method to determine the size and installation location was better than using the GA method. In conclusion, the appropriate size and installation location of the battery energy storage system of the power system can increase efficiency and reduce losses. Therefore, the study of the optimal design of BESS in power system could be used as a model for solving power system management problems in the future.

Keywords: energy storage system, batteries, optimization technique

กิตติกรรมประกาศ

ดุขฉุฉนัฟนัฟนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี ได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำจากท่านอาจารย์ผู้ควบคุมดุขฉุฉนัฟนัฟ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคตติพิชญ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ายั้งเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนชี้แนวทางในการทำดุขฉุฉนัฟนัฟให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง และกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกและประธานกรรมการสอบดุขฉุฉนัฟนัฟ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยั้ง ปลั้งกลาง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ แห่งมงามกรรมการควบคุมการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณฐภัทร พันธัคง กรรมการควบคุมการสอบและประธานหลักสูตร ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขดุขฉุฉนัฟนัฟให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณครูอาจารย์ผู้สั่งสอนวิทยาการแก่ผู้วิจัยทุกท่านทุกระดับชั้นการศึกษา ขอบพระคุณ ดร.ยุทธนา คงจัน รองศาสตราจารย์ ดร.ภณทัต เกิดขึ้น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอนบุรี และ ศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ยุพาพิน สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 ที่กรุณาให้คำปรึกษาการจัดทำดุขฉุฉนัฟนัฟ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ตลอดจน ภรรยา บุตรสาว และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และ ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ใช้สถานที่ในการศึกษาค้นคว้าและตลอดจนการใช้ชีวิตร่วมกันของพี่ๆน้อง ๆ PSRC Lab ทุกท่านตลอดระยะเวลา 6 ปี ที่ผ่านมา

ประกาศิต ปราบพาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	16
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	16
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	16
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	17
1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษา.....	17
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 บทนำ.....	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.3 ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่.....	32
2.4 การหาค่าที่เหมาะสม.....	43
2.5 โปรแกรม OpenDSS.....	52
บทที่ 3 วิธีดำเนินการดุษฎีนิพนธ์.....	55
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการดุษฎีนิพนธ์.....	55
3.2 กรณีศึกษาที่ 1 การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 กรณีศึกษาที่ 2 วิเคราะห์ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาค.....	58
3.4 กรณีศึกษาที่ 3 วิเคราะห์ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบ 30 บัส ควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า.....	65
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	69
4.1 บทนำ.....	70
4.2 กรณีศึกษาที่ 1 การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	70
4.3 ผลทดสอบระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีการด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาค.....	76
4.4 ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบ 30 บัส ควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า.....	77
บทที่ 5 สรุป.....	82
5.1 สรุปผลการทำดัชนีพันธ์.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
บรรณานุกรม.....	86
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	100

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีพินธ์ กลุ่มระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย.....	21
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีพินธ์ กลุ่มระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	23
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีพินธ์ กลุ่มระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน.....	26
ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีพินธ์ กลุ่มระบบผลิตพลังงานแบบแยกเดี่ยว.....	28
ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีพินธ์ การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งระบบ กักเก็บพลังงาน.....	29
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการทดสอบระบบกักเก็บพลังงานเพื่อศึกษาการไหลของระบบไฟฟ้า	57
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการทดสอบการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งในระบบสำรองพลังงาน	60
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการทดสอบในระบบ 30 บัส ทดสอบหาค่าผลรวมของกำลังสูญเสียในระบบและทดสอบค่าเบี่ยงเบนแรงดันโหลด.....	68
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน.....	74
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของระบบกักเก็บพลังงาน.....	77
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการหาขนาดและติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน.....	77
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของระบบกักเก็บพลังงาน 30 บัส แบบควบคุมแรงดัน....	78
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังสูญเสียพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด.....	78

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โหลดโปรไฟล์การใช้พลังงานใน 1 วันเทียบกับการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่.....	14
รูปที่ 1.2 พื้นฐานการสำรองพลังงานไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2.1 การแบ่งชนิดของระบบผลิตพลังงานทดแทน.....	18
รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์การทำงานของระบบสำรองพลังงาน.....	19
รูปที่ 2.3 การแบ่งชนิดของระบบสำรองพลังงานแบบต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของเซลล์แบตเตอรี่.....	32
รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นพลังงานและพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ.....	32
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	34
รูปที่ 2.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่พื้นฐาน.....	34
รูปที่ 2.8 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตามสมการของเทวินิน.....	35
รูปที่ 2.9 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัต.....	36
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบในการหาค่าตัวแปรในแบตเตอรี่.....	37
รูปที่ 2.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่.....	38
รูปที่ 2.12 แผนภาพในควิตส์.....	38
รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองเชิงเวลาด้วยการอัดและคายประจุต่อเนื่อง.....	39
รูปที่ 2.14 วงจรทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบตเตอรี่.....	39
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการทดลองหาค่าอิมพีแดนซ์.....	41
รูปที่ 2.16 แผนผังการควบคุม BESS และการเชื่อมต่อโครงข่าย.....	42
รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่.....	43
รูปที่ 2.18 แผนผังวิธีการดำเนินงานของวิธีพันธุกรรม.....	46
รูปที่ 2.19 แสดงการสุ่มติหาประชากรเริ่มต้นจำนวน 4 โครโมโซม.....	47
รูปที่ 2.20 แสดงสัดส่วนของคาบฟังก์ชันความเหมาะสมในรูปวงลอรูเลต.....	48
รูปที่ 2.21 การขามสายพันธุ์.....	48
รูปที่ 2.22 การกลายพันธุ์.....	48
รูปที่ 2.23 หลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค.....	49

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.24 กรรมวิธีการดำเนินงานของวิธีกลุ่มอนุภาค.....	51
รูปที่ 3.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 13 บัส.....	57
รูปที่ 3.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส.....	58
รูปที่ 3.3 เงื่อนไขในการทดสอบหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมด้วยวิธีพันธุกรรม.....	64
รูปที่ 3.4 เงื่อนไขในการทดสอบหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมด้วยวิธีอนุภาค.....	65
รูปที่ 3.5 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าตามรูปแบบการควบคุม Volt/var ใน p.u.	66
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริงในระบบ IEEE13 บัส โดยไม่มีระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่.....	69
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบ IEEE13 บัส โดยไม่มีระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่.....	70
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริงในระบบ IEEE13 บัส โดยมีระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่.....	70
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบ IEEE13 บัส โดยมีระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่.....	71
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานสำรองของแบตเตอรี่ในระบบ IEEE13 บัส.....	71
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองช่วงเวลาการจ่ายพลังงานแบบเตอรี่.....	72
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่.....	72
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการทำงานของโหลดในระบบ 13 บัส.....	73
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เกิดขึ้นเทียบกับระยะทาง.....	73
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงในระบบ IEEE13 บัส.....	74
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ IEEE13 บัส.....	75
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการทำงานของโหลดในระบบ 30 บัส.....	76
รูปที่ 4.13 โปรไฟล์โหลดรายวันขอความต้องการพลังงาน.....	79
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระบบมาตรฐาน กับ GA และ PSO.....	80
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน (active power).....	80
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน (reactive power).....	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ

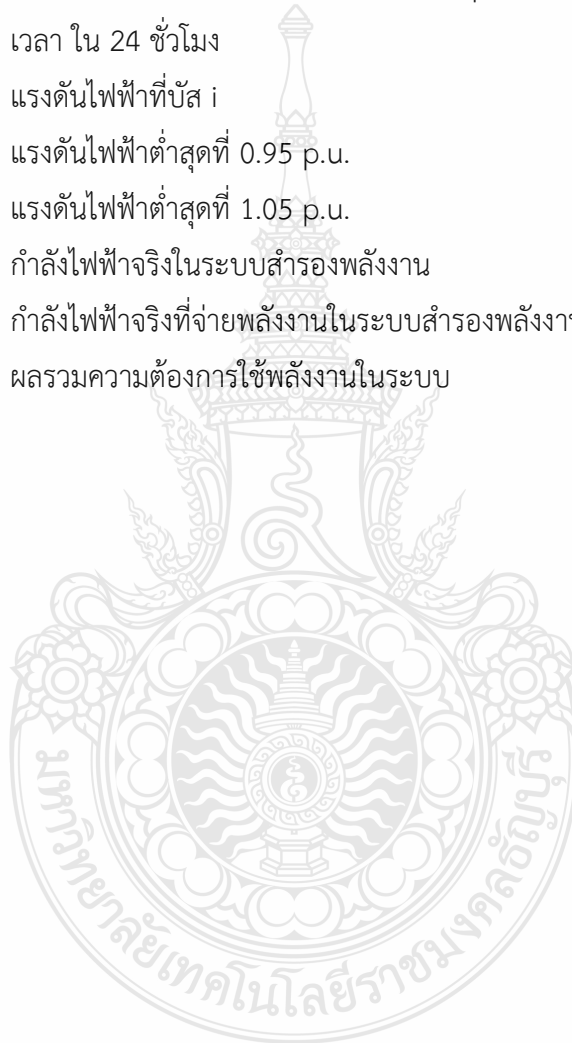
V_b	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่
V_{oc}	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร
I_b	กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
R_{ohm}	ความต้านทานไฟฟ้าของแบตเตอรี่
R_{load}	ความต้านทานไฟฟ้าของโหลด
I_{cell}	กระแสไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่
R_i	ความต้านทานไฟฟ้าภายในของแบตเตอรี่
R_{cl}	ความต้านทานไฟฟ้าภายในของแบตเตอรี่ตัวกำเนิดกระแสไฟฟ้า
C_{cl}	ตัวเก็บประจุภายในของแบตเตอรี่ตัวกำเนิดกระแสไฟฟ้า
SOC ,	อัตราการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่
SOC_0	อัตราการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่เริ่มต้น
V_{batt}	แรงดันแบตเตอรี่ขณะมีโหลด
$V_{Z_{ARC}}$	แรงดันจากอิมพีแดนซ์
V_{ZW}	แรงดันจากอิมพีแดนซ์ผลของอุณหภูมิ
L	ค่าความเหนี่ยวนำภายในของแบตเตอรี่
f_{r1}	ความถี่ทดสอบขณะที่ไม่ได้ต่อความเหนี่ยวนำภายนอกเข้าไปในวงจร
f_{r2}	ความถี่ทดสอบขณะที่มีการต่อความเหนี่ยวนำภายนอกเข้าไปในวงจร
l	ตัวเหนี่ยวนำภายนอก
ΔE_{do}	ผลรวมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
E_{bt}	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่
I_{BESS}	กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
x_i	ตำแหน่งของอนุภาคที่ i
v_i	อัตราความเร็วสำหรับอนุภาคที่ i
p_{besti}	ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่คนหามาแล้วของอนุภาคที่ i
g_{bestd}	อนุภาคที่คนหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด
m	จำนวนอนุภาค

คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ (ต่อ)

n	จำนวนอนุภาคในกลุ่ม
m	จำนวนตัวแปร
t	ครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration)
ω	แฟคเตอร์น้ำหนักความเฉื่อย (Inertial weight factor)
C_1, C_2	ค่าคงที่ของอัตราเร่ง
$rand()$	ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง $[0,1]$
V_{id}^t	ความเร็วของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t โดยที่ $v_d^{\min} \leq v_{id}^t \leq v_d^{\max}$
$V^{\max}$	ใช้ในการหาความละเอียดของคำตอบถ้ามีความมากเกินไปจะทำให้อนุภาค บินผ่านคำตอบที่ดีที่สุดไป
F_A	ค่าอัตราการอัดประจุต่อเวลา
t	เวลาจำนวน 24 ชั่วโมง
μ	ค่าเฉลี่ย
σ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ
t_{end}	ระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้า (ชั่วโมง) และสถานะของค่าใช้จ่ายของ แบตเตอรี่ (%)
N_{BESS}	จำนวนของ BESS ในระบบไฟฟ้า
P_{BESS}	กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการอัดประจุ
N_{Load}	ผลรวมของจำนวนโหลดในระบบไฟฟ้า
P_{Load}	ผลรวมของกำลังไฟฟ้าในโหลดของระบบไฟฟ้า
$\#$	จำนวนประจุไฟฟ้าของระบบสำรองพลังงาน
hr	เวลาในการอัดประจุไฟฟ้าของระบบสำรองพลังงาน จำนวน 24 ชั่วโมง
f_1	ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
f_2	ผลรวมความต้องการพลังงาน
f_3	ผลรวมกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง
$P_{systemDemand}$	ความต้องการพลังงานของการโหลดแต่ละครั้งใน 1 วัน
NL	ผลรวมของจำนวนสายส่ง
R_l	ค่าความต้านทานสายส่ง

คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ (ต่อ)

V	แรงดันไฟฟ้าในสายส่ง
P_l	กำลังไฟฟ้าจริง
Q_l	สถานะของระบบจำหน่าย
l	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ปกติกำหนดให้เป็น 1 p.u.
t	เวลา ใน 24 ชั่วโมง
$V_{Bus,i}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัส i
V_{min}	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 0.95 p.u.
V_{max}	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 1.05 p.u.
P_{BESS_i}	กำลังไฟฟ้าจริงในระบบสำรองพลังงาน
P_{inj}	กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายพลังงานในระบบสำรองพลังงาน
$P_{TotalLoad}$	ผลรวมความต้องการใช้พลังงานในระบบ

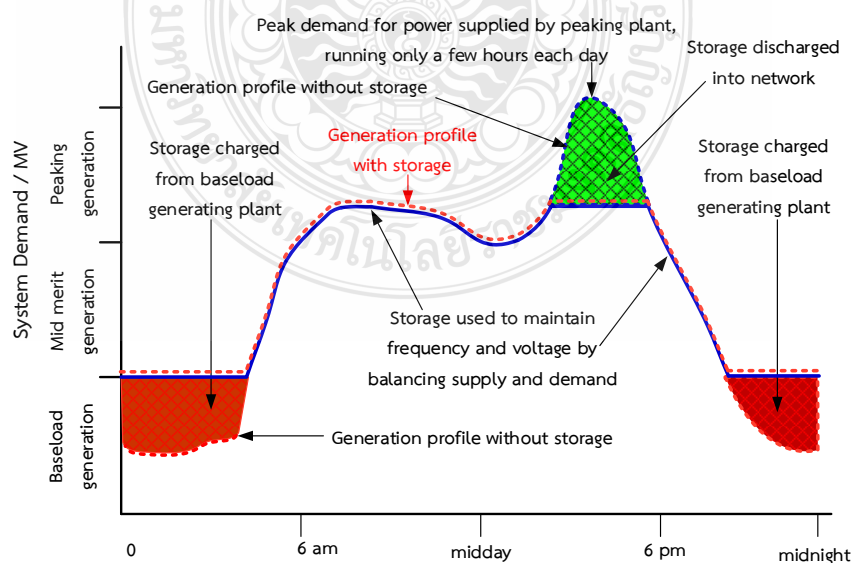


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การจัดการพลังงานไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจในโลกศตวรรษที่ 21 ในยุคการเจริญเติบโตด้วยการใช้เทคโนโลยีที่มีอัตราสูงในทุกภาคส่วนไม่ว่าจะเป็น การศึกษา การพัฒนาอุตสาหกรรม การขนส่ง การคมนาคม การสื่อสาร ล้วนทำให้มีกิจกรรมการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยมีความต้องการใช้ในอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ประเทศไทยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าที่ผลิตมาจากพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ จำนวนมาก [1] ซึ่งทางภาครัฐก็มีนโยบายส่งเสริมและพัฒนาขีดความสามารถในการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิลลง และส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานสะอาดในอุตสาหกรรมมากขึ้นเนื่องจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมมีอัตราการใช้ไฟฟ้าสูงและมีอัตราการใช้พลังงานในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) [2] เป็นอันดับต้นจากการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของประเทศ การส่งเสริมการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองในรูปแบบต่างๆ [3] เพื่อใช้ในช่วงเวลาดังกล่าว จะสามารถช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



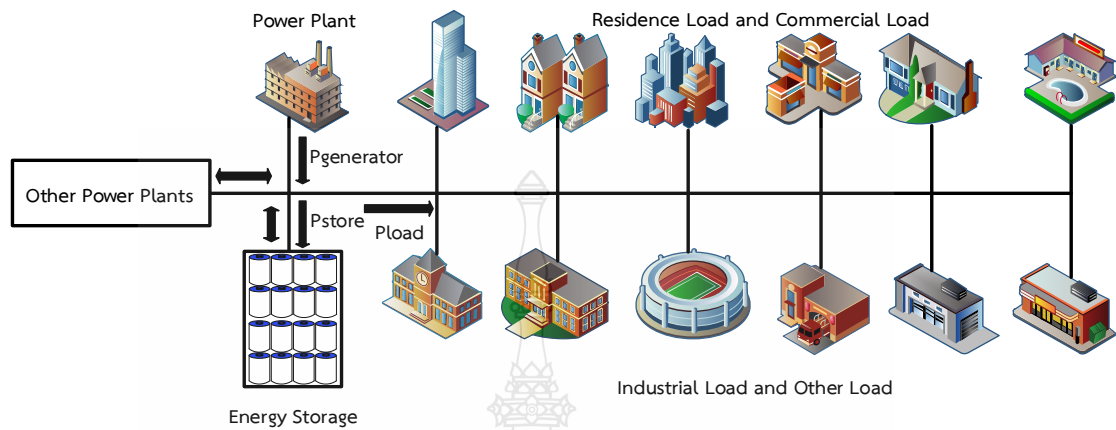
รูปที่ 1.1 โหลดโปรไฟล์การใช้พลังงานใน 1 วันเทียบกับการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

ระบบการออกแบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS) เป็นเทคโนโลยีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในรูปแบบปฏิกิริยาทางเคมี [4] เป็นการบริหารการผลิตไฟฟ้าเพื่อช่วยลดขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak) โดยการเก็บพลังงานไฟฟ้าในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak) และนำมาใช้ในช่วงเวลาที่มีความต้องการสูงสุด ดังรูปที่ 1.1 เพื่อทดแทนการผลิตไฟฟ้าแบบปกติ (Conventional) ลงได้บางส่วน ระบบ BESS นี้มีหลักการคล้ายกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่า สามารถติดตั้งในที่ต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะในที่ซึ่งใช้ไฟฟ้ามก [5] มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่ำมากเนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านแบตเตอรี่และการควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ประกอบการส่งเสริมจากทางภาครัฐในด้านภาษีทั้งในด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและในด้านลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดมีความจำเป็นอย่างมาก

จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีอย่างจำกัดการมีระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า เพื่อลดกำลังการผลิตไฟฟ้าลงรองรับการขยายตัวของการใช้พลังงานไฟฟ้า ด้วยเหตุผลดังกล่าวมีนัยสำคัญที่จำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมและคุณลักษณะของระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ ต่อผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง การบริหารจัดการ การผลิต การส่งกำลังไฟฟ้า และความเหมาะสมกับการใช้งานในระบบในด้านตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสม [6] เพื่อประกอบการวางแผนการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในอนาคต

ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ใช้เพื่อจัดการพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานส่วนเกินจากโครงข่าย โดยทั่วไป การจัดการระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ขึ้นอยู่กับความต้องการพลังงานในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าสูงสุด และเป็นปัจจัยสำคัญในการบริหารจัดการพลังงานสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแก้ปัญหาโดยวิธีการจัดการระบบไฟฟ้าด้วยการจัดเก็บพลังงานในระบบ กักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่สำหรับความต้องการพลังงานวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลาสูงสุด [7] การวิเคราะห์ระบบพลังงานที่นำเสนอใช้สำหรับตัวเลือกการออกแบบระบบที่ไม่แน่นอนโดยปัจจัยที่สำคัญคือ ค่าพารามิเตอร์ เช่น ขนาดโหลดพลังงานและราคาซื้อเพลิง สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า [8] ตามแผนการผลิตและส่งจำหน่ายไฟฟ้าจะมีความแตกต่างในแต่ละฤดูกาล ปัจจัยตามฤดูกาลดังกล่าวส่งผลต่อการวางแผนสำรองพลังงานอันเนื่องมาจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม การควบคุมความต้องการพลังงานของกระแสโหลดสูงสุดในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นปัจจัยหลักสำหรับการออกแบบ กักเก็บสำรอง

พลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าเพียงพอ ดังตัวอย่าง ของระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย โรงไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงาน และโหลดทางอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ดังนี้



รูปที่ 1.2 พื้นฐานการสำรองพลังงานไฟฟ้า[9]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบการหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

1.3.1 สามารถออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่โดยใช้วิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาคในการหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่

1.3.2 สามารถเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของการหาตำแหน่งและขนาดการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาค

1.3.3 สามารถใช้วิธีการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สามารถออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่โดยใช้วิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาคในการหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

1.4.2 สามารถเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของการหาตำแหน่งและขนาดการติดตั้งระบบ กักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีฝูงอนุภาค

1.4.3 สามารถใช้วิธีการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบสำรองพลังงานแบบ แบตเตอรี่

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 การศึกษาข้อมูลเพื่อกำหนดขอบเขตของดุษฎีนิพนธ์ จากเอกสารตำราและงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

1.5.2 ทบทวนวรรณกรรม เรียบเรียงรวบรวมข้อมูลที่สำคัญในงานวิจัย

1.5.3 ศึกษารวบรวมระบบทดสอบมาตรฐานเรเดียล IEEE เพื่อใช้ในการออกแบบกักเก็บพลังงาน แบบแบตเตอรี่

1.5.4 จำลองและทดสอบระบบด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาค ทำการวิเคราะห์ผลการ ทดสอบและบันทึกผลการทดลอง

1.5.5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

1.5.6 จัดทำดุษฎีนิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ข้อยกจำกัดของการศึกษา

1.6.1 ระบบที่ใช้เป็นระบบเรเดียลมาตรฐาน IEEE

1.6.2 ข้อมูลโหลดในระบบจำหน่ายเป็นระบบสามเฟสสมดุลในสภาวะคงตัว

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจพฤติกรรมหลักการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

1.7.2 ได้รูปแบบโหลดระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

1.7.3 นำรูปแบบโหลดระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่ได้นำไปใช้ในการศึกษารูปแบบ และพฤติกรรมการใช้พลังงานและอื่น ๆ เช่น การออกแบบระบบไฟฟ้า การบริหารจัดการด้านพลังงาน

1.7.4 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและวางแผนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย พลังงานทดแทนรูปแบบต่าง ๆ

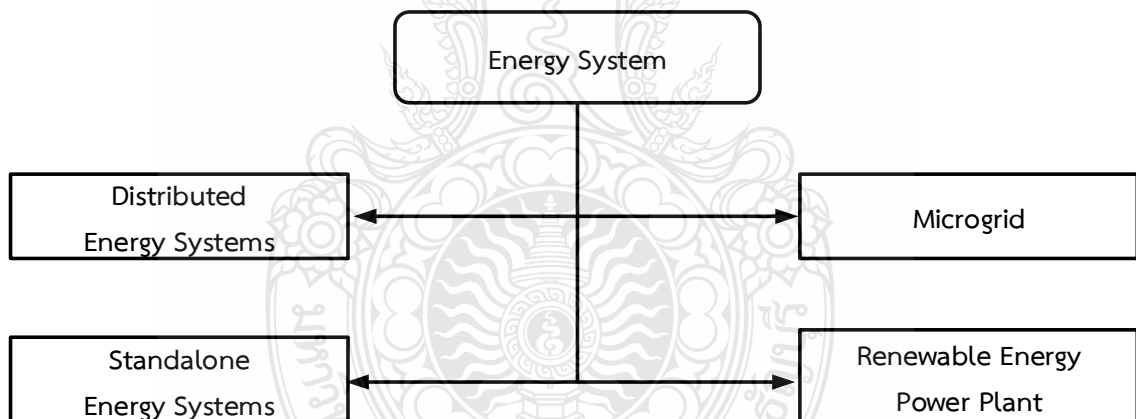
1.7.5 เข้าใจผลกระทบของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในสภาวะคงตัวในเสถียรภาพ ของระบบไฟฟ้า

บทที่ 2

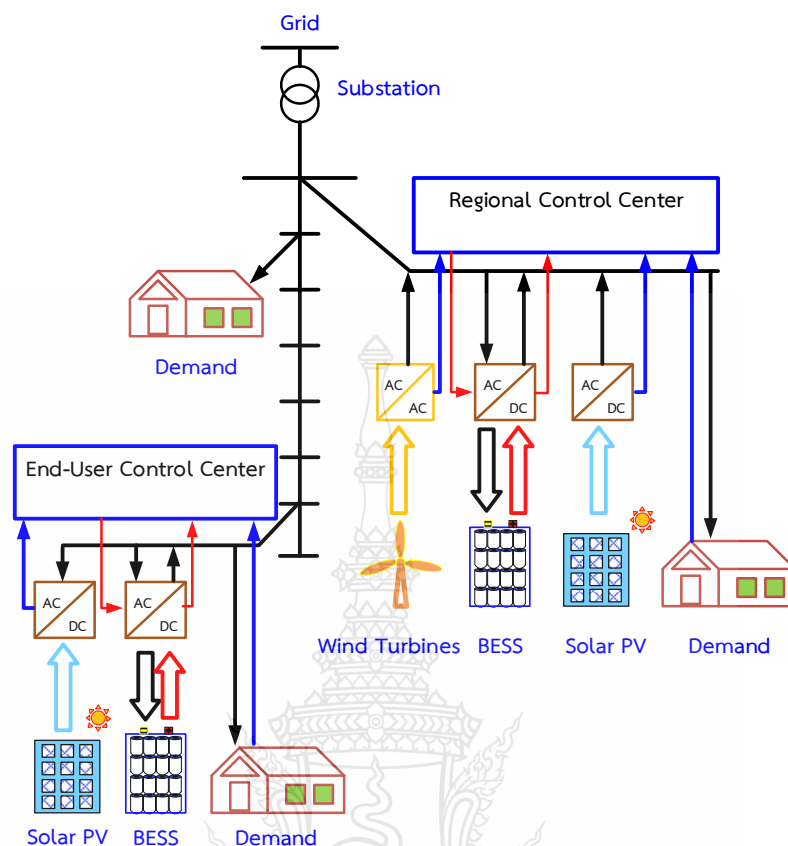
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การออกแบบระบบสำรองพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการศึกษานี้ในพฤติกรรมการใช้พลังงานในแต่ละรูปแบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของระบบที่มีการใช้งานโดยพิจารณาประกอบการศึกษาในแต่ละกรณีของระบบ คือ ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Power Systems) [7] ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Grid) [8] ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน (Renewable Energy Power Systems) [10] ระบบผลิตพลังงานแบบแยกเดี่ยว (Standalone Power Systems) [11] ดังรูปที่ 2.1 เมื่อเราทราบถึงระบบที่มีการใช้งานจริงแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าในแต่ละระบบมีการวิเคราะห์การทำงานในรูปแบบที่ต่างกักันดังตัวอย่างระบบสำรองพลังงานในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การแบ่งชนิดของระบบผลิตพลังงานทดแทน

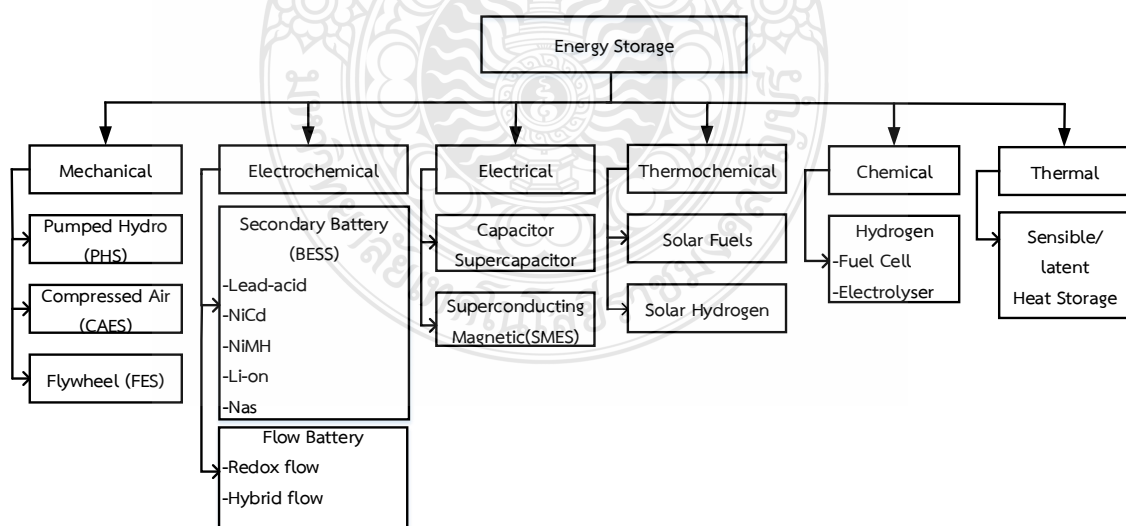


รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์การทำงานของระบบสำรองพลังงาน[9]

จากปัญหาดังกล่าวมีการแก้ปัญหาด้วยงานวิจัยที่มีการนำระบบสำรองพลังงานในรูปแบบต่างๆ มาใช้เพื่อออกแบบระบบสำรองพลังงานโดยจะแบ่งรูปแบบการออกแบบระบบสำรองพลังงานที่สามารถจำแนกออกเป็นรูปแบบต่างๆ ดังนี้ [3] ดังรูปที่ 2.3 การแบ่งชนิดของระบบสำรองพลังงานแบบต่างๆ อันได้แก่ ระบบสำรองพลังงานแบบเชิงกล (Mechanical) ประกอบไปด้วย 3 ชนิด แหล่งกำเนิดพลังงานคือ 1. แบบปั้มน้ำ (Pumped Hydro) [12] เป็นการใช้น้ำเหนือเขื่อนเพื่อสำรองพลังงานมีการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ใช้ไฟสูงและสูบกลับในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าต่ำ 2. ระบบอัดอากาศ (Compressed Air) [13] ใช้การปั้มน้ำอัดอากาศเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้ในเวลาที่ต้องการจะเสริมแรงดันไฟฟ้าในระบบ 3. ระบบสำรองในรูปแบบแรงเฉื่อย (Flywheel) [14] จะใช้ระบบสำรองพลังงานโดยใช้แรงเฉื่อยเพื่อเก็บพลังงานจลน์จากการหมุนของมอเตอร์สะสมพลังงานจากความเร็วในการหมุนโดยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานจลน์ ระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Electrochemical) [15] แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1. ระบบสำรองแบบแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary Battery) เป็นระบบสำรองพลังงานแบบไฟฟ้าเคมีที่สามารถมีการอัดและ

คายประจุของแบตเตอรี่ [3] ประกอบไปด้วยคุณลักษณะทางเคมีในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ประกอบไปด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead acid) แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม (Nicc) แบตเตอรี่นิกเกิล-เมทัลไฮไดรต์ (NiMH) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-on) แบตเตอรี่โซเดียม-ซัลเฟอร์ (Nas) [5] แบตเตอรี่เหลวชนิดอิเล็กโตรไลต์ภายใน (Flow Battery) [16] รีดอกโฟว์ (Redox flow Hybrid flow) แบตเตอรี่กลุ่มนี้ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ชนิดวานาเดียมรีดอกซ์ (Vanadium Redox Battery: VRB),

แบตเตอรี่ชนิดโพลีซัลไฟด์โบรไมด์ (Polysulfide Bromide Battery) และ แบตเตอรี่ชนิด Fe-Cr ระบบสำรองพลังงานแบบไฟฟ้าประกอบไปด้วย 1. ชนิดตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Super capacitor) [17] 2. ชนิดตัวนำยิ่งยวด (Electrical Capacitor Super capacitor Superconducting Magnetic (SMES)) [18] ระบบสำรองพลังงานแบบเคมีความร้อน (Thermochemical) ประกอบไปด้วย 1. ระบบสำรองพลังงานแบบเคมีแสงอาทิตย์ด้วยความร้อน (Solar Fuels) 2. ระบบสำรองพลังงานเคมีแบบแสงอาทิตย์ด้วยไฮโดรเจน (Solar Hydrogen) [19] ระบบสำรองพลังงานแบบเคมี (Chemical) ประกอบไปด้วย 1. ระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) 2. ระบบอิเล็กโตรไลซิส (Electrolyze) และระบบสำรองพลังงานแบบความร้อน (Thermal) ประกอบไปด้วยระบบสะสมความร้อน (Sensible latent Heat Storage) [3] แสดงจากแผนผังภาพประกอบ รูปที่ 2.3 ในคู่มือฉบับนี้จะทำการศึกษาระบบสำรองพลังงานที่ใช้ในรูปแบบของแบตเตอรี่ดังกล่าวในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป



รูปที่ 2.3 การแบ่งชนิดของระบบสำรองพลังงานแบบต่างๆ[9]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการออกแบบระบบสำรองพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่มีการศึกษาที่ได้รับความนิยมและความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง ผู้วิจัยจึงสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและนำเสนอแนวคิดวิธีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบระบบสำรองพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ สามารถสรุปนำแนวความคิดและองค์ความรู้เหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในชุมชนผู้วิจัยขอเสนอไว้ตามลำดับ โดยแบ่งตามคุณลักษณะของระบบที่มีการใช้งานโดยพิจารณาประกอบการศึกษาในแต่ละกรณีของระบบ คือ ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Power Systems) ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Grid) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน (Renewable Energy Power Systems) ระบบผลิตพลังงานแบบแยกเดี่ยว (Standalone Power Systems) กลุ่มงานวิจัยที่หาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบสำรองพลังงานที่ใช้เทคนิคในการติดตั้งและประยุกต์ใช้หลักการของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยกรรมวิธีทาง ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชุมชนผู้วิจัย กลุ่มระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2008	Jenkins et al.[20]	นำเสนอการหาขนาดของแบตเตอรี่ต่อกับพลังงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบโซล่าโซลาร์รูฟท็อป ขนาด 2.5 kW กังหันลมขนาด 1.5 kW และพลังงานความร้อนร่วมขนาด 1 kW เพื่อหาขนาดของแบตเตอรี่แบบกรดตะกั่ว ขนาด 21-63 kWh โดยพิจารณาจากอายุของแบตเตอรี่ และขนาดการอัดประจุที่ร้อยละ 92 เพื่อดูผลของการติดตั้งในระบบและการวิเคราะห์อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในระบบ
2010	Atwa et al.[7]	นำเสนอการหาขนาดของแบตเตอรี่ต่อกับพลังงานร่วมกับกังหันลมขนาด 22.8 kW เพื่อหาขนาดของค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่แบบ Zn/Br ที่ ขนาด 51.94 MWh/6MW โดยพิจารณาจากราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้า
2012	Hussein et al. [21]	นำเสนอการหาขนาดของแบตเตอรี่ร่วมกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยแบตเตอรี่ ขนาด 8 kWh วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบในช่วงเวลาที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2013	Ru et al. [22]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1.5 kW พิจารณาจากโหลดทั่วไปและวิเคราะห์ราคาติดตั้งจากราคาค่าไฟฟ้าเทียบราคาของแบตเตอรี่
2013	Wang et al.[23]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับการต่อกังหันลม ขนาด 850 kW พิจารณาจากการจ่ายพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้ในระบบและวิเคราะห์หาขนาดของแบตเตอรี่ที่ขนาด 3.72-8.31 kWh ในการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบ
2014	Yang et al.[24]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับการต่อโซลาร์เซลล์ พิจารณาจากการจ่ายพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดไปจนถึงช่วงที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้ในระบบและวิเคราะห์หาขนาดของแบตเตอรี่ที่ขนาด 3.72-8.31 kWh ในการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบ
2015	Nazaripouya et al. [25]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการโวลต์เรกกูเรชั่น คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของขนาดแบตเตอรี่ด้วยขนาด 0.1196 p.u. ตามเวลาที่ต้องการควบคุมแรงดันไฟฟ้า
2016	Zheng et al. [26]	นำเสนอการหาขนาดของแบตเตอรี่ต่อกับพลังงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม ด้วยเงื่อนไขการจ่ายพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนขนาด 0.82-2.14 kWh และจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ที่ ร้อยละ 25 วิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียที่น้อยที่สุดในระบบเพื่อหาค่าของขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบ
2016	Schneider et al. [27]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อหาขนาดของแบตเตอรี่ ขนาด 26-37 kWh ด้วยอัตราการคายประจุ ร้อยละ 100 และ ร้อยละ 70

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2016	Zhang et al. [28]	นำเสนอการหาค่าดำเนินการของการต่อแบตเตอรี่ขนาด 2.56 kWh ต่อกับพลังงานร่วมกับ กังหันลม ด้วยเงื่อนไขการลดค่าต้นทุนการผลิตพลังงานน้อยที่สุด
2019	T. J. A. Abreu et al. [29]	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพแบบไฮบริด ขึ้นอยู่กับ metaheuristic Evolutionary Particle Swarm Optimization (EPSO) และ Linear Programming สำหรับการแก้ปัญหา ปัญหาด้านขนาด ตำแหน่ง และเทคโนโลยีอินเทอร์เฟซ เครือข่ายการเลือกระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (BESS) แบตเตอรี่ถูกรวมเข้าในเครือข่ายการจำหน่ายที่กระจายการกระจายการผลิตไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ (PV) ดังนั้น สถานการณ์รูปแบบจำลองการสร้างยังถูกเสนอสำหรับการสร้างฐานข้อมูลสำหรับราคาการผลิต PV โหลดและราคาพลังงาน

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2011	Chen et al. [30]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับ กังหันลม ขนาด 30 kW Fuel cell ขนาด 50 kW ต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 20 kW ด้วยวิธีการหาค่าขนาดที่น้อยที่สุดของแบตเตอรี่ ที่เหมาะสมกับระบบ
2012	Chen et al. [31]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ และกังหันลม โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ขนาด 500 kWh ด้วยวิธีการแก้ปัญหาการลดค่าใช้จ่ายในระบบไฟฟ้าขนาด 1400 kWh แบบระบบไมโครกริดบนพื้นที่เกาะ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2012	Bahramirad et al. [32]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 16 MW ด้วยวิธีการหาของที่เหมาะสมที่สุดด้วย แบตเตอรี่ ขนาด 900 kW คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุด
2012	Bahramirad et al. [33]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดต่อกับพลังงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแก๊ส กังหันลม ด้วยเงื่อนไขการจ่ายพลังงานจากระบบสำรองพลังงานที่ดีที่สุดและค่าใช้จ่ายต่ำสุด
2013	Kerdphol et al. [34]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำ เพื่อหาขนาดของแบตเตอรี่ ที่ขนาด 1.3124 MW ด้วยวิธีการ PSO และการนำเสนอการควบคุมความถี่และแรงดันที่มีประสิทธิภาพดีสุด
2015	Nguyen et al. [35]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ Vanadium Redox ร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังดีเซล แบบระบบไมโครกริดบนพื้นที่เกาะเพื่อหาค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดในระบบ
2015	Gao et al. [36]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดต่อกับพลังงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแก๊ส กังหันลม และเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ ขนาด 60 MWh / 0.75kW ด้วยเงื่อนไขการจ่ายพลังงานจากระบบสำรองพลังงานที่ดีที่สุดและค่าใช้จ่ายต่ำสุด

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2015	Fossati et al. [37]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม กังหันลมขนาดเล็ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดีเซล และ Fuel cell ด้วยการหาขนาดที่น้อยที่สุดของแบตเตอรี่ โดยใช้แบตเตอรี่ ขนาด 300 MWh / 30 kW ใช้ในระบบแบบระบบไมโครกริดบนพื้นที่เกาะ และขนาด 400 MWh / 50 kW ใช้ในระบบแบบระบบไมโครกริด และหาค่าใช้จ่ายที่ต่ำสุดในการเชื่อมต่อระบบไมโครกริดทั้งสองระบบ
2016	Khorramdel et al. [38]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม กังหันลมขนาดเล็ก เซลล์แสงอาทิตย์ และ Fuel cell ด้วยการหาขนาดที่น้อยที่สุดของแบตเตอรี่ ได้ขนาดของแบตเตอรี่ใช้ในระบบแบบระบบไมโครกริด 400-1100 kW และขนาดของแบตเตอรี่ใช้ในระบบแบบระบบไมโครกริดบนพื้นที่เกาะ ค่าใช้จ่ายที่ต่ำสุดในการเชื่อมต่อระบบไมโครกริดทั้งสองระบบ
2021	P. Paliwal [39]	ในบทความนี้ ได้การกำหนดขนาดส่วนประกอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับไมโครกริดแบตเตอรี่พลังงานแสงอาทิตย์ แล้ว การสร้างแบบจำลองการแผ่รังสีแสงอาทิตย์เป็นระยะๆ โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบเบต้า มีการใช้อัลกอริธึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากชีวภาพที่เรียกว่า Butterfly-PSO ในการแก้ปัญหาการปรับให้เหมาะสมที่สุด เกณฑ์ความน่าเชื่อถือที่พิจารณาคือเปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่ไม่ได้ให้บริการ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้รับการกำหนดขึ้นเพื่อลดต้นทุนพลังงานที่ปรับระดับ (LCOE) การวิเคราะห์ความไวจะดำเนินการเพื่อช่วยให้เข้าใจผลลัพธ์ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2003	Korpaas et al. [40]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม ขนาด 10 MW ด้วยการหาขนาดที่น้อยที่สุดของแบตเตอรี่ ที่ขนาด 150 kWh/ 8 MW และการจัดการระบบที่เหมาะสม
2008	Wang et al. [41]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม โดยใช้แบตเตอรี่ ขนาด 0.68 MWh/1.33MW คำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดจากการพยากรณ์การจ่ายพลังงานที่สูญเสีย
2009	Pinson et al. [42]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดด้วยวิธีการปรับขนาดความไม่สมดุลของพลังงานด้วยการพยากรณ์การจ่ายพลังงานที่ 4.82 ต่อหน่วย ที่จ่ายชดเชยให้แรงดัน ร้อยละ100
2011	Bludszweit et al. [43]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม โดยใช้แบตเตอรี่ ขนาด 22 MWh/300kW เงื่อนไขร้อยละ 15 ขนาด 46 MWh/800kW เงื่อนไขร้อยละ 100 คำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุด
2011	Brekken et al. [44]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลมด้วยวิธีการควบคุมขั้นสูง คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดได้ขนาดของแบตเตอรี่ 40 MWh / 34 MW
2013	Etherden et al. [45]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม ขนาด 45 MW/30MW ศึกษาผลกระทบในระบบในการจ่ายพลังงานแบบประหยัดสำหรับลดการเกิดแรงดันเกินและการลดทอนแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2014	Wu et al. [46]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม ขนาด 45 MW / 30 MW โดยใช้แบตเตอรี่ ขนาด 0.68 MWh/1.33MW คำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดจากพยากรณ์การจ่ายพลังงานที่สูญเสีย
2015	Yue et al. [47]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการควบคุมความถี่ให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ pf=0.946 และ pf=0.977 เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุด
2015	Li et al. [48]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลมและต่อเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของขนาดแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดด้วยการวิเคราะห์คุณภาพของไฟฟ้า
2015	Johnston et al. [49]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลมด้วยวิธีการควบคุมความถี่ คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดได้ขนาดของแบตเตอรี่ ที่ 3 MWh/5.3 MW
2015	Shokrzadeh et al. [50]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม ขนาด 1650 kW ด้วยคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมช่วง 4278 kWh ถึง 64233 kW
2016	Cervone et al. [51]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 99.36 kW ด้วยคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดเพื่อลดความแปรปรวนของระบบได้ขนาดและชนิดของแบตเตอรี่ คือ 100 kWh 80 kWh และ 90 kWh ชนิดของแบตเตอรี่ 3 ประเภท คือ LA, NaS, และ Li-ion

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบผลิตพลังงานแบบแยกเดี่ยว

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2009	Abbey et al. [52]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล ศึกษาผลกระทบในระบบในการจ่ายพลังงานแบบประหยัดได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 0.279-0.744 kWh/0.048-0.159 kW
2010	Ross et al. [53]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม ขนาด 600 kW ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล ขนาด 1230 kW คำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 2196 kWh/246.4 kW
2014	Birnie et al. [54]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการหาค่าของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุด
2014	Alex et al. [55]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของขนาดแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดและหาว่าสูญเสียในระบบน้อยสุดได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 114.5 kWh – 49.8 kWh
2014	Luo et al. [56]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ชนิด Nas ร่วมกับกังหันลมด้วยวิธีการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดและหาว่าสูญเสียในระบบน้อยสุดได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 36.4 MWh/5.5 MW
2014	Dragicevic et al. [57]	นำเสนอการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ชนิด VRLA กับชนิด Li-ion ร่วมกับกังหันลม Fuel cell และเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการหาขนาดที่น้อยที่สุดของแบตเตอรี่ ที่เหมาะสมกับระบบตามแผนการผลิตไฟฟ้าได้ขนาดของแบตเตอรี่ VRLA 18.04 kWh และ Li-ion 14.65 kWh

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ กลุ่มระบบผลิตพลังงานแบบแยกเดี่ยว (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2014	Aghamohamma di et al. [58]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันน้ำขนาดเล็ก ขนาด 31.1 kVA ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล ขนาด 31.1 kVA Fuel cell ขนาด 10 kW และเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 13 kW ด้วยวิธีการควบคุมความถี่คำนวณหาค่าที่เหมาะสมเวลาของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดที่อัตรา 4 kW เพื่อให้เพียงพอกับการแผนการผลิตกำลังไฟฟ้า
2015	Rodrigues et al. [59]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ชนิด NaS ร่วมกับกังหันลม ขนาด 170 MW คำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานได้ขนาดของแบตเตอรี่ขนาด 288 MWh/40 MW
2016	Shang et al. [60]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานดีเซลล์ คำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานในรอบปี ได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 1200 kW

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2010	Atwa et al. [61]	นำเสนอการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลม ด้วยวิธีการหาขนาดของกังหันลมที่ที่เร็วไหลเพื่อใช้หาค่าเหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในระบบ 41 บัส
2012	Watanabe et al. [62]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลมและตัวเก็บประจุจากแหล่งกำเนิดพลังงานด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการหาขนาดของความผันผวนของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้หาค่าเหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดในการจ่ายพลังงานเสริมระบบ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีพินธ์ การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งระบบสำรองพลังงาน
(ต่อ)

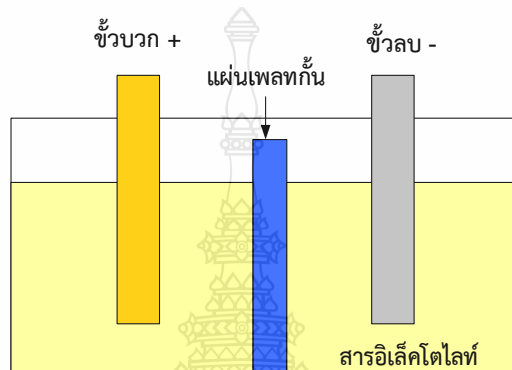
ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2014	Wang et al. [63]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับกังหันลมและตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการหาขนาดของแบตเตอรี่ที่ค่าเหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองและใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ช่วยเสริมระบบในช่วงที่มีความต้องการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมสูงสุด
2014	Jia et al. [64]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมและตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการควบคุมความถี่และวิเคราะห์ผลของอายุแบตเตอรี่และขนาดที่ติดตั้ง
2015	Nazaripouya et al. [65]	นำเสนอการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในระบบสำรองพลังงานระบบผลิตไฟฟ้าแบบปั๊ม มาตรฐาน IEEE 14 บัส ได้ขนาดของแบตเตอรี่มีค่าเป็นร้อยละ 11.96 เท่า ของขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์
2015	Yuan et al. [66]	นำเสนอการหาขนาดระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ ร่วมกับกังหันลมและตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการควบคุมความถี่ขณะจ่ายพลังงานของกังหันลมเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าอย่างมีเสถียรภาพ
2015	Bitaraf et al. [67]	นำเสนอการหาขนาดระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ชนิด Nas และ CAES ร่วมกับกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยวิธีการจากพยากรณ์การจ่ายพลังงานที่สูญเสีย เพื่อใช้หาค่าเหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดใช้ในจ่ายพลังงานเสริมระบบ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งระบบสำรองพลังงาน
(ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2015	Wang et al. [68]	นำเสนอการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ และตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในระบบด้วยวิธีการคำนวณประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานในการเสริมระบบพลังงานแสงอาทิตย์
2015	Zhao et al. [69]	นำเสนอการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ ร่วมกับกังหันลม ด้วยวิธีการหาค่าของกังหันลมที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดที่ใช้ในช่วงมีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด
2016	Xiao et al. [70]	นำเสนอการหาขนาดของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ ร่วมกับกังหันลม และเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าแบบปั๊ม มาตรฐาน IEEE 33 บัส
2016	Zheng et al. [71]	นำเสนอการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ ชนิด Li-ion และ LA ร่วมกับกังหันลม เพื่อใช้หาค่ากำลังสูญเสียในระบบเหมาะสมของการจ่ายพลังงานสำรองที่ดีที่สุดในระบบสำรองพลังงานระบบผลิตไฟฟ้าแบบปั๊ม มาตรฐาน IEEE 15 บัส

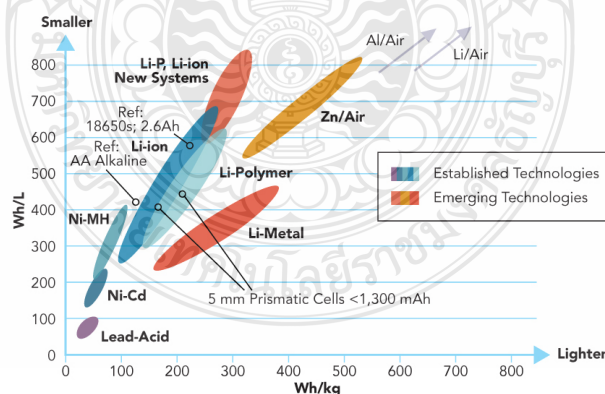
2.3 ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

องค์ประกอบแบตเตอรี่นั้นมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานเพื่อไว้ใช้ถือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) ที่ประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบ พร้อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) แบตเตอรี่มีองค์ประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์หรือมากกว่าก็ได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของเซลล์แบตเตอรี่

แบตเตอรี่แบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ [72] ตั้งแต่แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (lead-acid battery) แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd battery) แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรไรด์ (Ni-Mh battery) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion battery) สมบัติของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ ด้านค่าความหนาแน่นพลังงานและพลังงานจำเพาะดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นพลังงานและพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ [73]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีคุณสมบัติการกักเก็บพลังงานจำเพาะสูงเนื่องจากมีน้ำหนักเบา สมรรถนะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วแบตเตอรี่และการออกแบบแบตเตอรี่

ประเภทนี้ประกอบด้วยขั้วบวกที่ทำจากลิเทียมเมทัลออกไซด์ (LiMO₂) และขั้วลบที่เป็นคาร์บอน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น LiPF₆ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาและสามารถใช้งานได้อย่างหลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ แลปทอปคอมพิวเตอร์ ในด้านการวิจัยด้านระบบสำรองพลังงานไฟฟ้ามีการใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจากบริษัทผู้ผลิตระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่ ดังนั้นความสำคัญของการวิจัยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อทราบคุณลักษณะสำคัญ ทางเคมี และคุณลักษณะทางไฟฟ้า เพื่อนำคุณลักษณะดังกล่าวมาใช้งานในระบบสำรองพลังงานไฟฟ้า คุณลักษณะทางไฟฟ้า ปัจจัยสำคัญของการใช้งานแบตเตอรี่มีการอัดประจุ (State of Charge) การคายประจุ (Depth of Discharge) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลกระทบต่อสถานะภาพของแบตเตอรี่ (State of Health) อัตราการอัดและคายประจุนั้นจะทำให้มีการเปลี่ยนสภาพวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ในสภาวะการใช้กับระบบสำรองพลังงานไฟฟ้า มีการวิเคราะห์หาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบพลวัต ทดสอบให้เหมาะสมกับงานระบบสำรองไฟฟ้าและเป็นแนวทางในการหาค่าด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนให้เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติและการบอกอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ต่อไป

2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

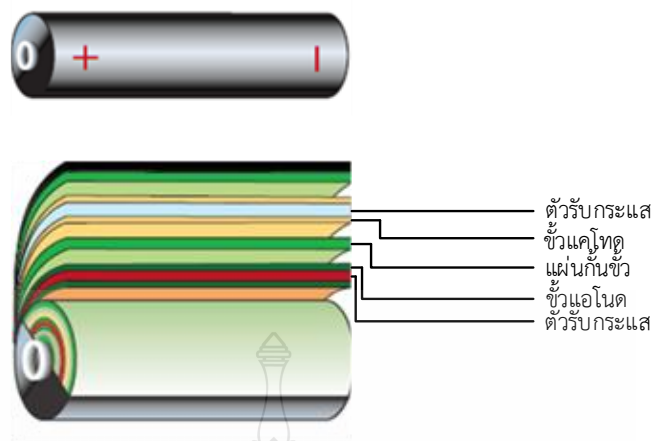
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2 คือ

2.3.1.1 ขั้วไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode)

2.3.1.2 แผ่นกั้นในแบตเตอรี่ (Separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกันกับขั้วแอโนดสัมผัสกับขั้วแอโนดจนเกิดการลัดวงจรของกระแส

2.3.1.3 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีเกลือของลิเทียมผสมอยู่ เป็นตัวนำที่ยอมให้ไอออนไหลผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านจึงเป็นตัวนำไอออนที่ดีแต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนที่เลวและสำหรับขั้วแคโทดในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วย 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุประเภทเลเยอร์ (Layered Structure, LiMO₂) เช่น LiCoO₂, LiNiO₂, LiCo_{1/3}

2.3.1.4 ตัวนำกระแส (Current Collector) หรือโลหะตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอก และเกิดการนำไฟฟ้าไปใช้งาน



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [73]

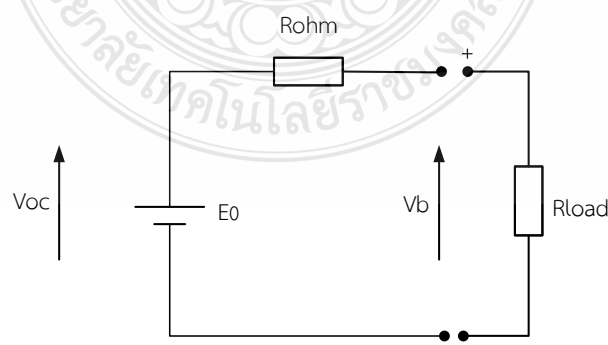
2.3.2 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่

2.3.2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่พื้นฐาน

จากรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ E_0 ความต้านทานภายใน R_{ohm} และความต้านทานของโหลด R_{load} เราสามารถวิเคราะห์สมการจากรูปแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่พื้นฐานวิเคราะห์สมการอัตราการไหลของกระแสเพื่อหาอัตราการอัดประจุพื้นฐานของแบตเตอรี่ได้สมการ ดังนี้

$$V_b = V_{oc} - I_b \cdot R_{ohm} \quad (2.1)$$

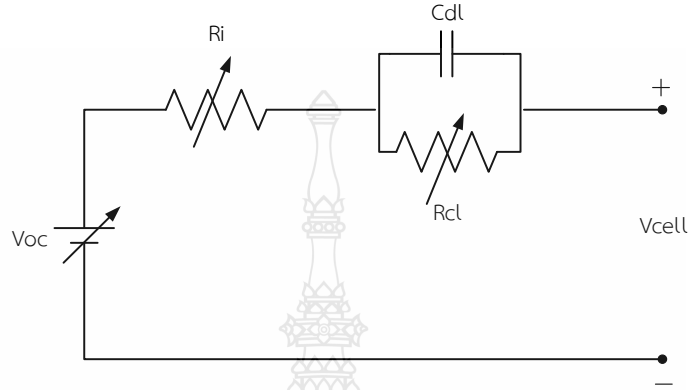
$$I_b = \frac{V_{oc}}{R_{ohm} + R_{load}} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่พื้นฐาน

3.2.3 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตามสมการของเทวินิน

จากแบบจำลองทางไฟฟ้าจากสมการของเทวินิน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พฤติกรรมของแบตเตอรี่เมื่ออยู่ในสภาวะการอัดประจุไฟฟ้าในช่วงเวลาหนึ่งจนกระแสในแบตเตอรี่เต็ม กระแสจะหยุดไหลทันที เราสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตามสมการของเทวินิน [1]

จากแบบจำลองทางไฟฟ้าจากสมการของเทวินิน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พฤติกรรมของแบตเตอรี่เมื่ออยู่ในสภาวะการอัดประจุไฟฟ้าในช่วงเวลาหนึ่งจนกระแสในแบตเตอรี่เต็ม กระแสจะหยุดไหลทันที เราสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรได้ดังนี้

$$I_{cell} = \frac{V_{oc}}{R_i + R_{cl}} \quad (2.3)$$

$$V_{cell} = V_{OC} - R_i I_1 - R_{cl} I_{batt} \quad (2.4)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{(I_{batt} - I_1)}{R_i C_{dl}} \quad (2.5)$$

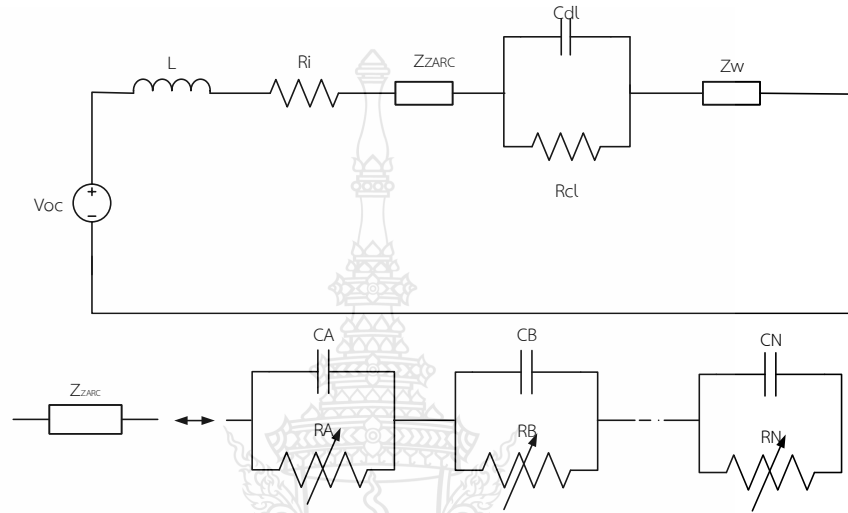
$$V_{oc} = f(SOC) \quad (2.6)$$

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{I_{batt}}{C_{cl}} dt \quad (2.7)$$

$$V_{cell} = V_{oc}(SOC) - R_i(SOC, T)I_1 - R_0(SOC, T)I_{batt} \quad (2.8)$$

เมื่อ I_{cell} คือ กระแสแบตเตอรี่
 V_{cell} คือ แรงดันแบตเตอรี่
 SOC คือ อัตราการอัดประจุ

2.3.4 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัต



รูปที่ 2.9 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัต [1]

จากแบบจำลองทางไฟฟ้าจากสมการของเทวินิน พฤติกรรมของแบตเตอรี่เมื่ออยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง [6] ไม่มีการอัดประจุและไม่มีการคายประจุ แรงดันในช่วงแรก จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแบตเตอรี่ อุณหภูมิ สามารถคำนวณหาจรรยาสมมูลของแบตเตอรี่ได้ การคำนวณหาจากแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบไม่เชิงเส้น เปรียบเทียบกับวงจรแบบจำลองทางไฟฟ้าจากสมการของเทวินิน นั้นมีค่าตัวแปรที่เพิ่มขึ้นและเข้ามาเกี่ยวข้องดังสมการ

$$V_{batt} = V_{OC} - V_L - V_{R_i} - V_{ZARC} - V_{Cdl} - V_{ZW} \quad (2.9)$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

$$V_{R_i} = R_i I \quad (2.11)$$

$$V_{ZARC} = R_{Cn} I \quad (2.12)$$

$$V_{Cdl} = \int \frac{1}{Cdl} \left(I - \frac{V_{Cdl}}{R_{ct}} \right) dt \quad (2.13)$$

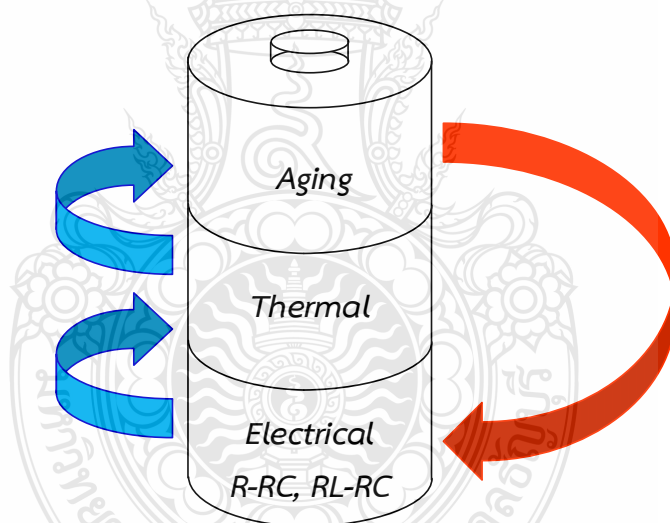
$$V_{ZW} = R_{ZW} I \quad (2.14)$$

เมื่อ V_{batt} คือ แรงดันแบตเตอรี่ขณะมีโหลด

V_{ZARC} คือ แรงดันจากอิมพีแดนซ์

V_{ZW} คือ แรงดันจากอิมพีแดนซ์ผลของอุณหภูมิ

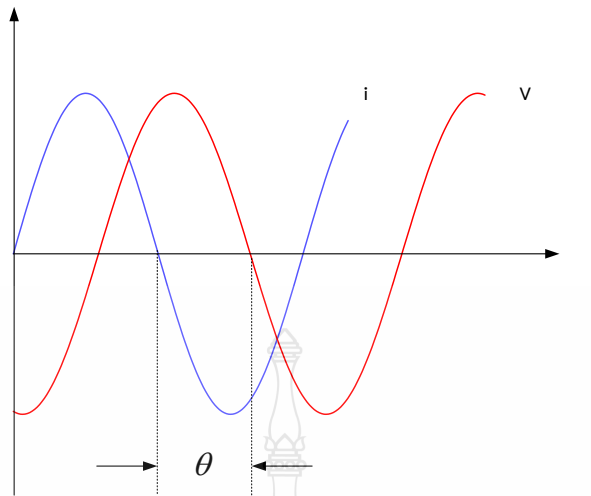
แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ใช้เป็นแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัตเพื่อทดสอบหาค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ขณะใช้งานอธิบายได้ตามรูปส่วนประกอบการหาค่าตัวแปรในแบตเตอรี่



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบการหาค่าตัวแปรในแบตเตอรี่

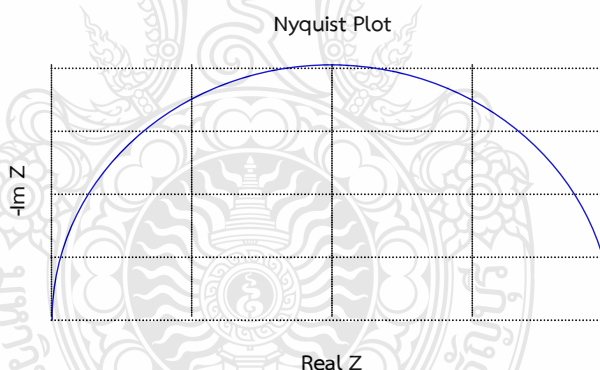
2.3.5 เทคนิคการหาจรรยาสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่

วิธีการทดสอบหาค่าตัวแปรในวงจรสมมูลของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่นำหลักการ Electrochemical Impedance Spectroscopy : EIS [73] ด้วยการป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ เพื่อดูผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วแบตเตอรี่จากทดลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ชั่วของแบตเตอรี่ [74]

จากสัญญาณกระแสไฟฟ้ามีมุมต่างเฟส (Phase Shift) ซึ่งมุมต่างเฟสนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ ในรูปของขนาดและมุมต่างเฟส ในการหาวงจรสมมูลและค่าตัวแปรภายในแบตเตอรี่จะใช้แผนภาพไนควิสต์ (Nyquist plot) ในการวิเคราะห์

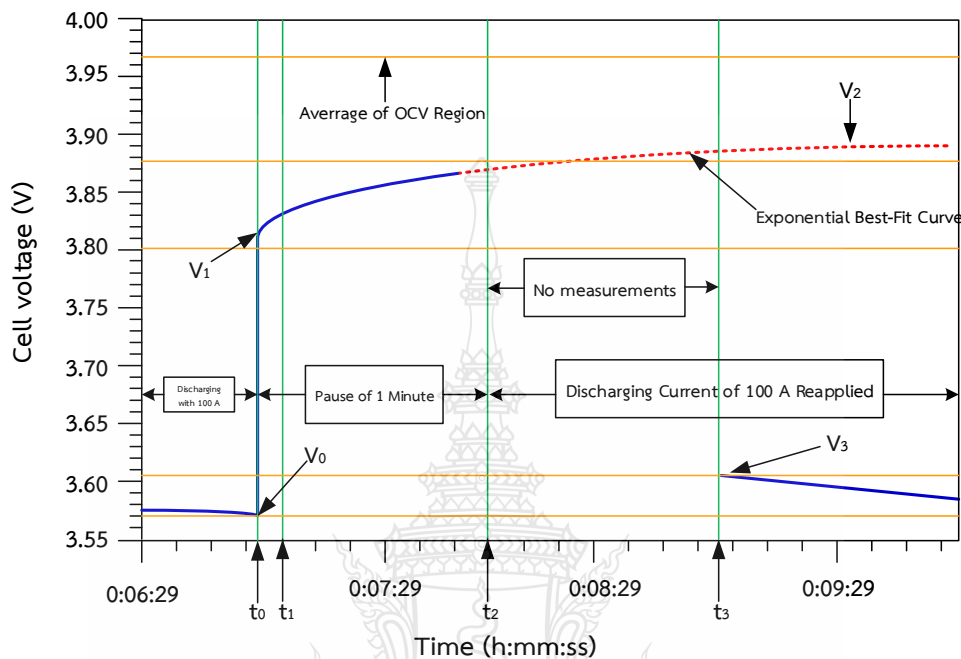


รูปที่ 2.12 แผนภาพไนควิสต์

จากรูปที่ 2.12 แผนภาพไนควิสต์ แกน X จะแสดงค่าส่วนจริงและแกน Y จะแสดงค่าส่วนจินตภาพของวงจร RC ที่ต่อขนาดกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม 1 รูป แสดงถึงวงจรนี้มีค่าคงที่เวลา (Time constant) ในแผนภาพไนควิสต์ยังสามารถแสดงทั้งขนาดและมุมเฟส โดยที่ขนาดของอิมพีแดนซ์แสดงด้วยเวกเตอร์ขนาด $|Z|$ ตามสมการ

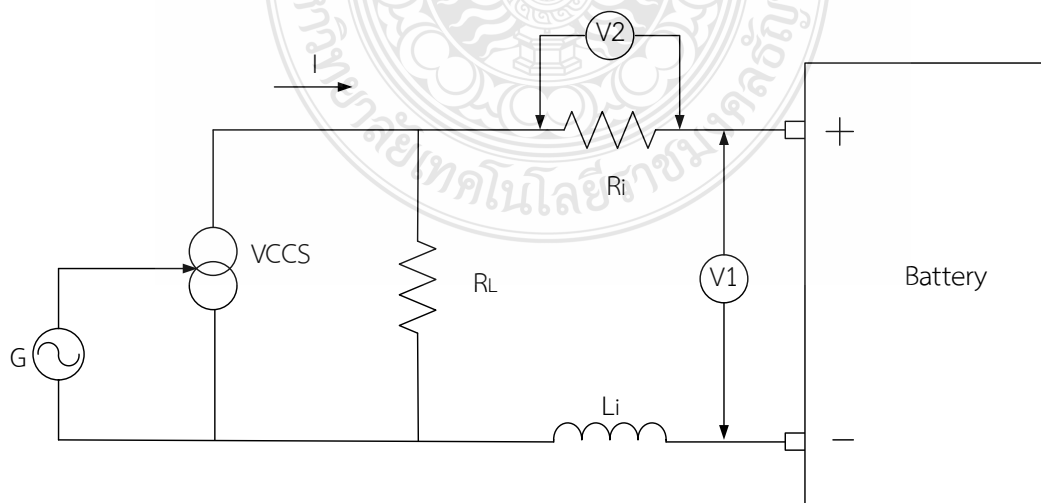
$$Z = \frac{V \angle 0^\circ}{I \angle \theta} = |Z_m| \angle -\theta \quad (2.15)$$

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาในรูปที่ 2.13 สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปร R_i , R_A , R_{cl} ได้ดังสมการ [75] ตัวอย่างการหาค่าความสัมพันธ์จากกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองเชิงเวลาด้วยการอัดและคายประจุต่อเนื่อง [75]

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ กำหนดวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse Charge) ในช่วงความถี่ 3 Hz – 40 kHz ค่าพิกัดของแบตเตอรี่ กระแสที่ 1.9 Ahr แรงดันที่ 3.7 V การทดสอบใช้วงจรดังรูปที่ 2.14



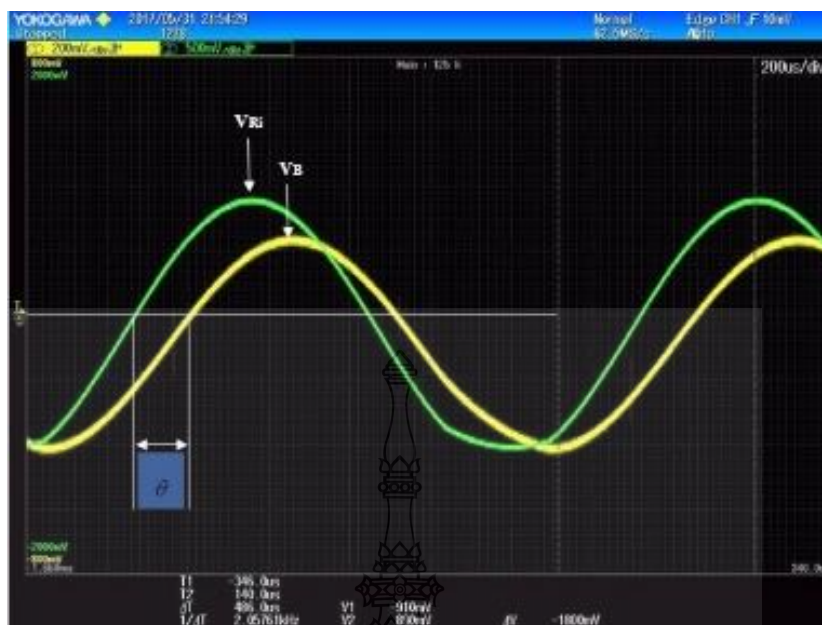
รูปที่ 2.14 วงจรทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบตเตอรี่

จากรูปวงจรประกอบด้วยสัญญาณความถี่ที่สร้างแรงดันไฟฟ้าควบคุมกระแสไฟฟ้า (Voltage Controlled Current Source: VCCS) ตัวต้านทานตรวจจับสนกระแสไฟฟ้า (R_i) ตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า (RL) ตัวเหนี่ยวนำภายนอก สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรค่าความเหนี่ยวนำภายในแบตเตอรี่ได้ดังสมการที่ 2.16

$$L = \frac{l}{\left(\frac{f_{r_1}}{f_{r_2}}\right)^2 - 1} \quad (2.16)$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำภายในของแบตเตอรี่
 f_{r_1} คือ ความถี่ทดสอบขณะที่ไม่ได้ต่อความเหนี่ยวนำภายนอกเข้าไปในวงจร
 f_{r_2} คือ ความถี่ทดสอบที่มีการต่อความเหนี่ยวนำภายนอกเข้าไปในวงจร
 l คือ ตัวเหนี่ยวนำภายนอก

ก่อนการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ได้ต้องทำการตรวจสอบผลของวงจรโดยวัดความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหลดความต้านทาน และพบว่าความต่างเฟสในช่วง 3 Hz – 40 kHz เท่ากับ 0 องศา ผลแสดงว่าวงจรนี้ไม่มีผลต่อความต่างเฟสในช่วงความถี่ที่ใช้ในการหาวงจรสมมูล การเตรียมสภาวะก่อนการทดสอบแบตเตอรี่นั้นจะต้องควบคุมให้แบตเตอรี่อยู่ในอุณหภูมิห้องก่อนที่จะทดสอบในช่วงความถี่แต่ละครั้ง รูปที่ 2.15 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ (VB) และแรงดันไฟฟ้าคร่อม ความต้านทาน R_i (V_{Ri}) โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.17



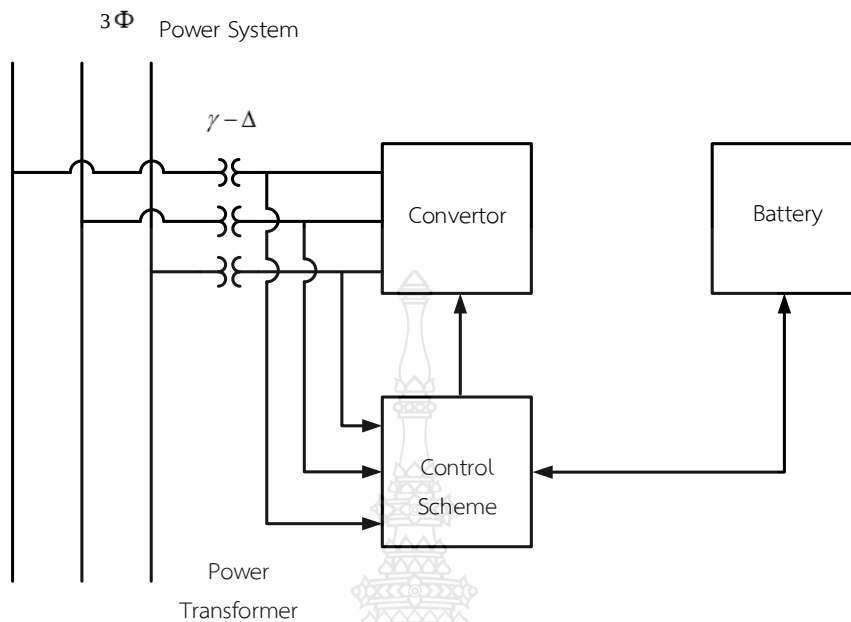
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นสัญญาณมีใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์

$$Z = \frac{V_B \times R_i}{V_{R_i}} \times (\cos \theta + j \sin \theta) \quad (2.17)$$

เมื่อ	Z	คือ ค่าอิมพีแดนซ์
	V_B	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่
	V_{R_i}	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน
	R_i	คือ ตัวต้านทาน

2.3.6 ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบการกระจายเป็นการใช้เทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อรองรับการใช้พลังงานในระบบ มีส่วนประกอบของ BESS ในระบบไฟฟ้าจะถือว่าเป็นแก้ปัญหาดังกล่าวการจัดการความถี่และแรงดันไฟฟ้าในการศึกษาระบบที่เกิดจาก BESS ต้องใช้เวลาที่เหมาะสมเพื่อจัดหาพลังงานให้กับระบบความมั่นคงของระบบในหลักของวัตถุประสงค์ BESS สามารถช่วยลดความต้องการของการโหลดในความถี่สูงสุดประสิทธิภาพของความเสถียรของระบบขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายโอนกำลังไฟสูงสุดโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และรูปแบบวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ หน่วยแปลงพลังงานตามที่แสดงโดยแผนผังของการควบคุม BESS และการเชื่อมกับการแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนผังการควบคุม BESS และการเชื่อมโครงข่าย[9]

องค์ประกอบของการแปลงพลังงานของ BESS ประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่และชิ้นส่วนควบคุมในการส่งออกของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะแสดงได้ดังสมการที่ 2.18

$$\Delta E_{do} = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} E_t \quad (2.18)$$

สามารถคำนวณวงจรสมมูลย์แบตเตอรี่ของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_{bt} &= \Delta E_{do} \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_{co} I_{BESS} \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_t (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) - \frac{6}{\pi} X_{co} I_{BESS} \end{aligned} \quad (2.19)$$

กระแสไฟฟ้าในแบตเตอรี่ในวงจรสมมูลย์ของ BESS ไหลเข้าไปในนิพจน์สามารถแสดงดังสมการ

$$I_{BESS} = \frac{E_{bt} - E_{boc} - E_1}{r_{bt} + r_{bs}} \quad (2.20)$$

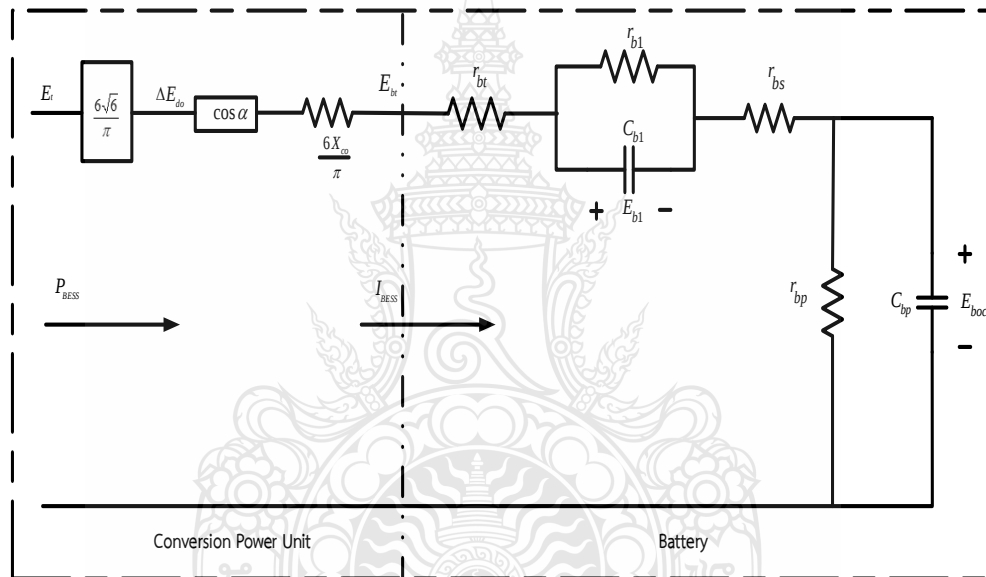
เมื่อ

$$E_{boc} = \frac{r_{bp}}{1 + ST_{bp}} I_{BESS} \quad (2.21)$$

$$E_{b1} = \frac{r_{b1}}{1 + ST_{b1}} I_{BESS}$$

$$T_{bp} = r_{bp} C_{bp} \quad (2.22)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏใน BESS สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เป็นวงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่

2.4 การหาค่าที่เหมาะสม

ปัญหาทางวิศวกรรมเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนการแก้ปัญหาเหล่านี้ด้วยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการคำนวณโดยใช้หลักการพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์การกำหนดตัวแปรที่มีส่วนเกี่ยวข้องถูกนำมาประยุกต์ใช้ มีวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือการทำการแก้ปัญหของนิวตัน (Newton Method) จากนั้นได้มีการนำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่เรียกกันว่า กำหนดการเชิงเส้น

(Linear Programming) จนมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมีการประยุกต์ใช้ในด้าน เศรษฐศาสตร์ คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์

การนำการหาค่าที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้าน วิศวกรรมไฟฟ้า มีการนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมใช้แก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง มีงานวิจัยที่นำ แนวคิดดังกล่าวมาใช้ในการด้าน เศรษฐศาสตร์ของการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยมีการวิจัยในการหาขนาดและตำแหน่งของการวางเครื่องต้นกำลังในการผลิตไฟฟ้า การจัดเรียงสายป้อนในระบบ จำหน่ายและการหาตำแหน่งของการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังที่เหมาะสม การพัฒนา เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่มีการพัฒนาประสิทธิภาพมีหลากหลายวิธีการ เช่น วิธีพันธุกรรมยีนต์ วิธีการกลุ่มอนุภาค วิธีการจำลองการอบอุ่น วิธีการตาบู่เสิร์ช ในแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ออกไป มีฟังก์ชันเป้าหมายลักษณะที่ต่างกัน สามารถแบ่งแยกได้ตามลักษณะวิธีปริภูมิการค้นหาค่าได้ดังนี้ (Search Space) คือ การค้นหาแบบท้องถิ่นหรือแบบเฉพาะที่ (Local Search) หรือการค้นหาแบบที่ดี สุดของกลุ่ม (Global Search) ดุษฎีนิพนธ์นำเสนอการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ปัญหาด้วยวิธีการกลุ่มอนุภาคซึ่งประกอบไปด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยการหาค่าที่เหมาะสม วิธีพันธุกรรมยีนต์ และวิธีการกลุ่มอนุภาค ประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่พิจารณาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของการหาค่าคำตอบต่อระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ในระบบระบบเบรเดียล 30 บัส

2.3.1 การหาค่าที่เหมาะสมวิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithms: GA)

พันธุกรรมเป็นการจำลองกระบวนการในการวิวัฒนาการของยีนโดย John Holland ในปี ค.ศ. 1975 มีการตั้งสมมติฐานว่าคุณลักษณะที่ดีและไม่ดีของสิ่งมีชีวิตในระดับยีน โดยยีนที่มีคุณลักษณะที่ดี ย่อมมีโอกาสดำรงอยู่รอดและจะมีการถ่ายทอดทางพันธุกรรมไปยังรุ่นลูกหลานในโอกาสที่มากกว่าเพื่อ วิวัฒนาการการในคุณลักษณะที่ดีกว่าการประยุกต์ใช้วิธีพันธุกรรมยีนต์ มาใช้แก้ปัญหาการหาค่าที่ เหมาะสมที่สุด ใช้หลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรม เพื่อให้ได้คำตอบในรุ่นต่อไป มีค่าของฟังก์ชันความ เหมาะสมต่อไปดีขึ้น มีการใช้งานในปัจจุบันอย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหาในหลากหลายสาขาวิชา ใน การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.1.1 กรรมวิธีพื้นฐานของวิธีพันธุกรรม

กรรมวิธีพื้นฐานของวิธีพันธุกรรม ใช้ โครโมโซม (Chromosome) เป็นตัวแทนในการนำเสนอข้อมูลของวิธีพันธุกรรม แต่ละโครโมโซม มีส่วนประกอบคือจำนวนบิต (Bit) ใช้นามเรียกว่า ยีนต์ (Gene) วิธีการจะคัดเลือกโครโมโซมที่มีความสมบูรณ์เหมาะสมที่สุดจากจำนวนโครโมโซมทั้งหมด กระบวนการต่อมาจะนำโครโมโซมเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการคัดเลือกที่เลียนแบบการคัดเลือกทางรหัสพันธุกรรม เพื่อหาโครโมโซมที่ดีที่สุดเหมาะสมในการอยู่รอด จะใช้ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) [76] ขั้นตอนระเบียบวิธีการของวิธีพันธุกรรมอื่น ได้แสดงไว้ในผังในรูปที่ 2.1 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างประชากรโครโมโซมเริ่มต้น จากกระบวนการสุ่มเลือกให้ได้ประชากรต้นแบบ

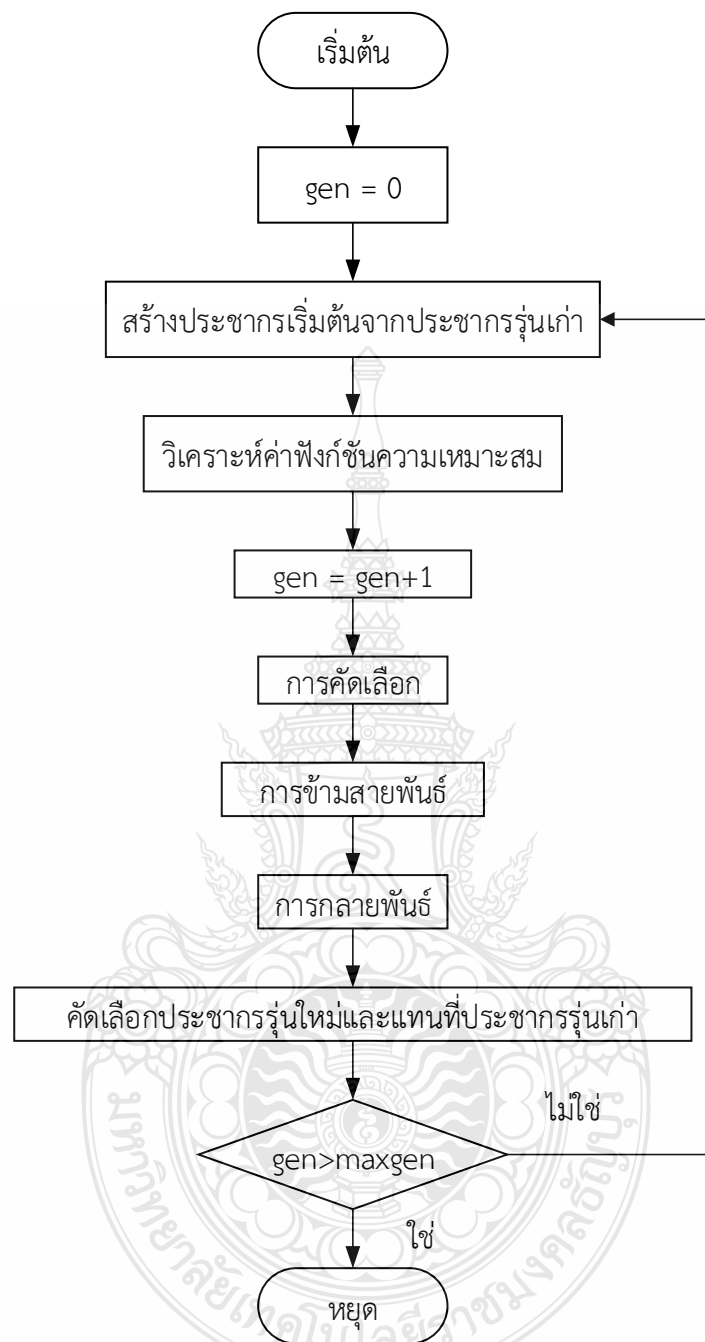
ขั้นตอนที่ 2 นำโครโมโซมมาวิเคราะห์หาค่าฟังก์ชันความเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 3 การคัดเลือก (Re-production) โครโมโซมด้วยค่าอ้างอิงค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ว่าโครโมโซมใดมีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุด โดยให้น้ำหนักค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกแต่ละครั้งสูง

ขั้นตอนที่ 4 การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) วิธีการกำหนดค่าการสุ่มให้แก่โครโมโซมที่ได้รับการเลือกทั้งหมด พิจารณาจากโครโมโซมที่มีค่าสุ่มน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการเกิดการข้ามสายพันธุ์ จะถูกนำไปใช้เป็นการจับคู่โครโมโซมพ่อแม่ ขั้นตอนต่อมา มีการเลือกเปลี่ยนโครโมโซมบางส่วนของทั้งสองเพื่อสร้างรุ่นลูกคล้ายกับการเกิดของสิ่งมีชีวิต

ขั้นตอนที่ 5 การกลายพันธุ์ (Mutation) ทำโดยการกำหนดอัตราการกลายพันธุ์โดยทำการเปลี่ยนค่าของโครโมโซมในบางตำแหน่งเป็นค่าใหม่จากตำแหน่งเดิมที่สุ่มได้

ขั้นตอนที่ 6 การแทนที่ประชากร (Replacement) ประชากรชุดใหม่ เป็นประชากรโครโมโซมลูกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนในวิวัฒนาการที่ขั้นตอนข้างต้น จะถูกใช้ในการแทนที่ประชากรรุ่นก่อนหน้าเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการวิวัฒนาการอีกครั้งโดยจะถูกทำกระบวนการแบบวนซ้ำจนกระทั่งถึงรุ่นที่ต้องการใช้งาน



รูปที่ 2.18 แผนผังวิธีการดำเนินงานของวิธีพันธุกรรม

2.3.1.2 ส่วนประกอบของวิธีพันธุกรรม

วิธีพันธุกรรมสามารถแบ่งส่วนประกอบออกเป็น 4 ส่วน คือ

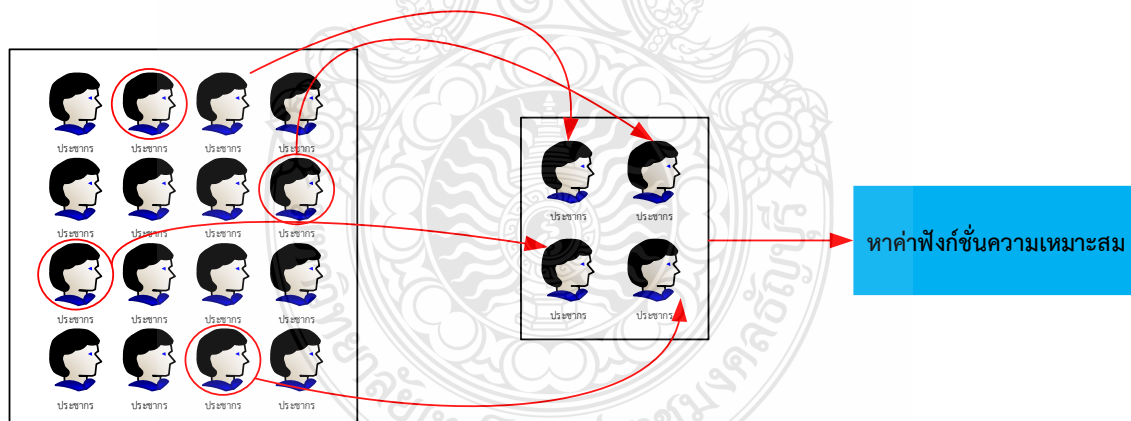
1. รูปแบบโครโมโซม (Chromosome Encoding) การได้มาซึ่งโครโมโซมหรือการถอดรหัส เป็นส่วนแรกที่จะเริ่มดำเนินการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีพันธุกรรม การถอดรหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับปัญหา ดังนั้นรูปแบบของโครโมโซมมีความแตกต่างกันออกไปตามปัญหานั้น ๆ ที่นิยมจะแสดงในรูปแบบเลขฐานสอง (Binary) โดยทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 ตัวอย่างเช่น

โครโมโซม A : 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0

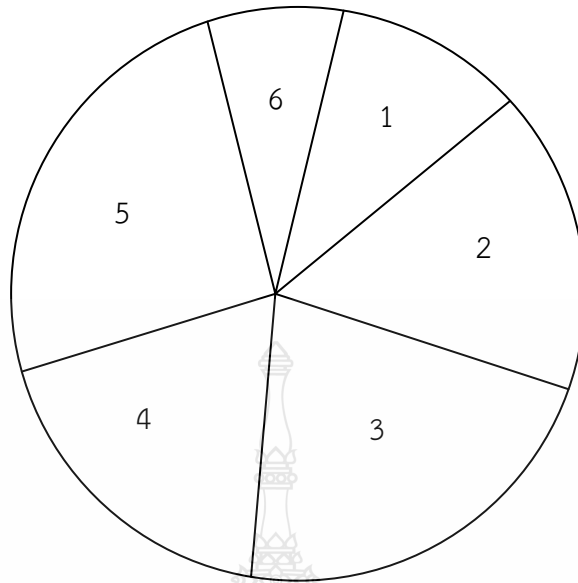
โครโมโซม B : 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1

2. ประชากรต้นกำเนิด (Initial Population)

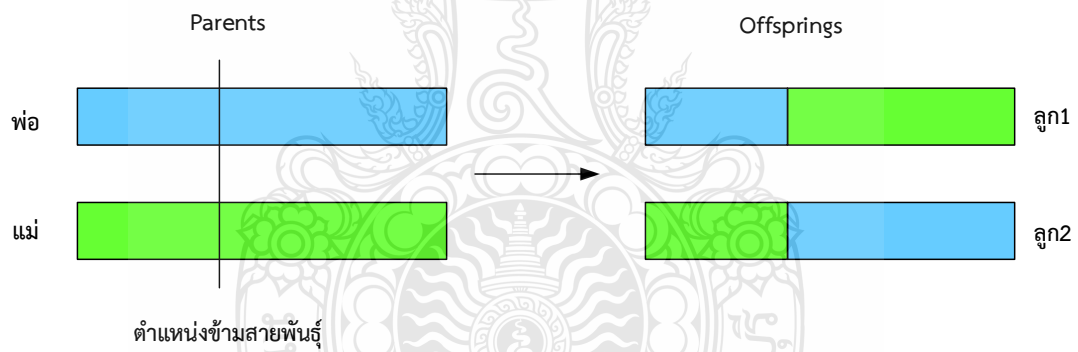
เป็นการดำเนินการอันดับแรกก่อนที่จะเข้ากระบวนการของวิธีพันธุกรรม ประชากรที่เกิดจากการสุ่ม (Random) ดังรูป 2.19 เพื่อนำประชากรเข้าไปในกระบวนการ ในการสุ่มจะต้องสุ่มมิติให้ได้จำนวนเท่ากับขนาดของรุ่นที่ได้กำหนดไว้ โดยที่ยังไม่มีการสนใจค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม



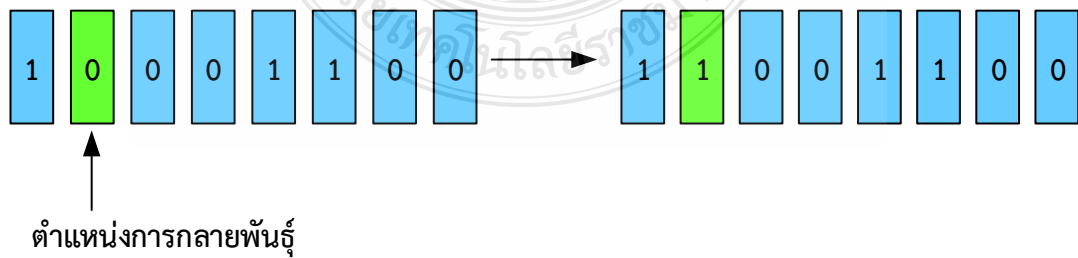
รูปที่ 2.19 แสดงการสุ่มมิติหาประชากรเริ่มต้นจำนวน 4 โครโมโซม



รูปที่ 2.20 แสดงสัดส่วนของคาบงกซ์ความเหมาะสมในรูปวงล้อรูเล็ต



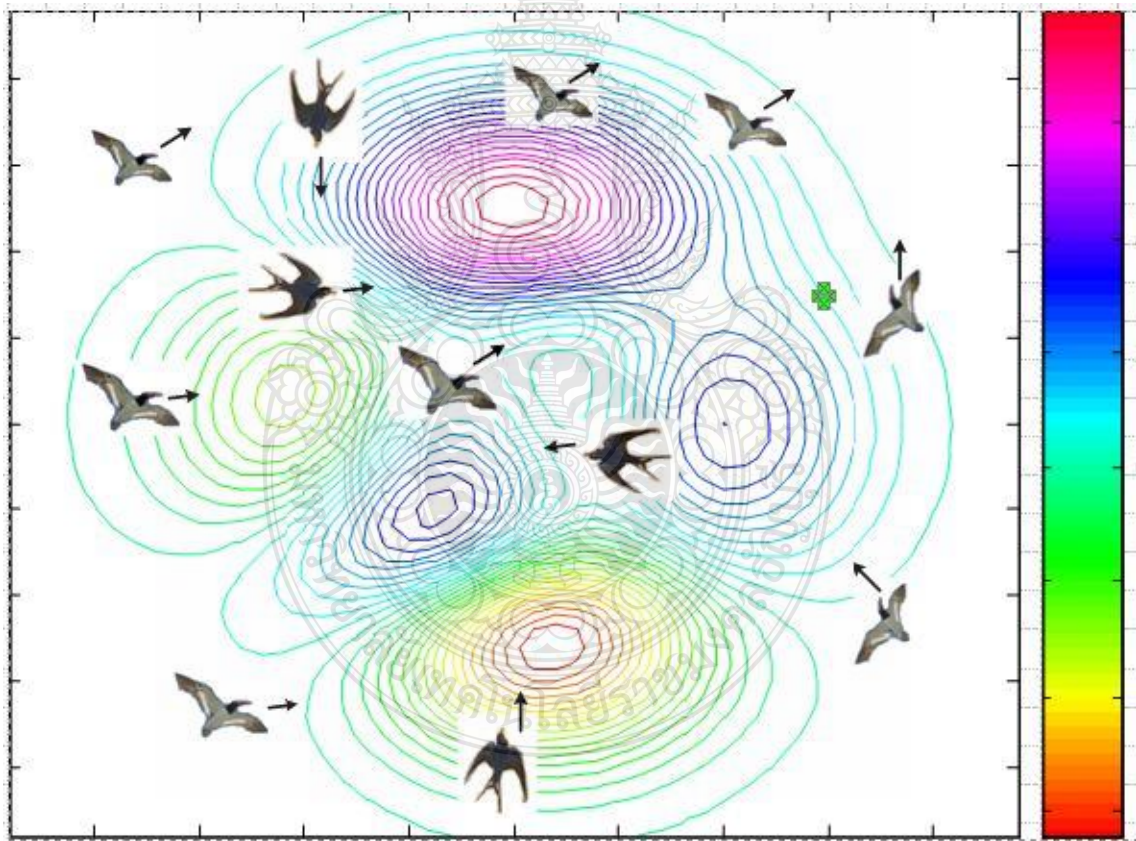
รูปที่ 2.21 การข้ามสายพันธุ์



รูปที่ 2.22 การกลายพันธุ์

2.3.2 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)

Kennedy และ Eberhart ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีอนุภาคเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ.1995 ได้แรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมของการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ เช่น ฝูงปลา หรือ ฝูงนก ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งวิธีกลุ่มอนุภาคนี้เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสม อาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร (Population-based) แต่ละตัวดำเนินการ เรียกว่า “อนุภาค (Particle)” ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ อนุภาคนี้อาจรวมตัวกันเป็นกลุ่มบินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา ระหว่างบินแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่งโดยอาศัยการอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางการเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งอาจจะค้นพบด้วยตัวเอง หรือ อนุภาคใกล้เคียง



รูปที่ 2.23 หลักการพื้นฐานของวิธีกลุ่มอนุภาค [79]

2.3.2.1 ขั้นตอนการดำเนินการของวิธีกลุ่มอนุภาค

ระเบียบขั้นตอนของวิธีกลุ่มอนุภาค แสดงในรูปที่ 2.24 มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้ กำหนดให้

d คือ มิติ (Dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา

$(x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ แทน ตำแหน่งของอนุภาคที่ i

$(v_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ แทน อัตราความเร็วสำหรับอนุภาคที่ i

$(p_{besti} = p_{besti1}, p_{besti2}, \dots, p_{bestid})$ แทน ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหา

มาแล้วของอนุภาคที่ i

g_{best_d} แทน อนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด

m คือ จำนวนอนุภาค

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้น Iteration = 0 กำหนดให้อนุภาคทั้ง m ตัวของกลุ่มแรก

ค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ แทนด้วย $(x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ พร้อมทั้งหาค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละคำตอบ แทนด้วย $F = f(x_i) = (f(x_{i1}), f(x_{i2}), \dots, f(x_{id}))$ แล้วเลือกอนุภาคที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุด เป็นคำตอบที่ดีที่สุด แทนด้วย g_{best_d}

ขั้นตอนที่ 2 ห้อัตราความเร็วสำหรับอนุภาคแต่ละตัว แทนด้วย $(v_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$

จากสมการที่ (2.32) และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคแต่ละตัว โดยใช้สมการที่ 2.23

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละคำตอบ แล้วเลือก

อนุภาคที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุด เป็นคำตอบที่ดีที่สุด แทนด้วย g_{best_d}

ขั้นตอนที่ 4 เพิ่มจำนวนรอบในการค้นหา Iteration = Iteration + 1

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดดำเนินการ ถ้ายังไม่ตรงตามเงื่อนไข

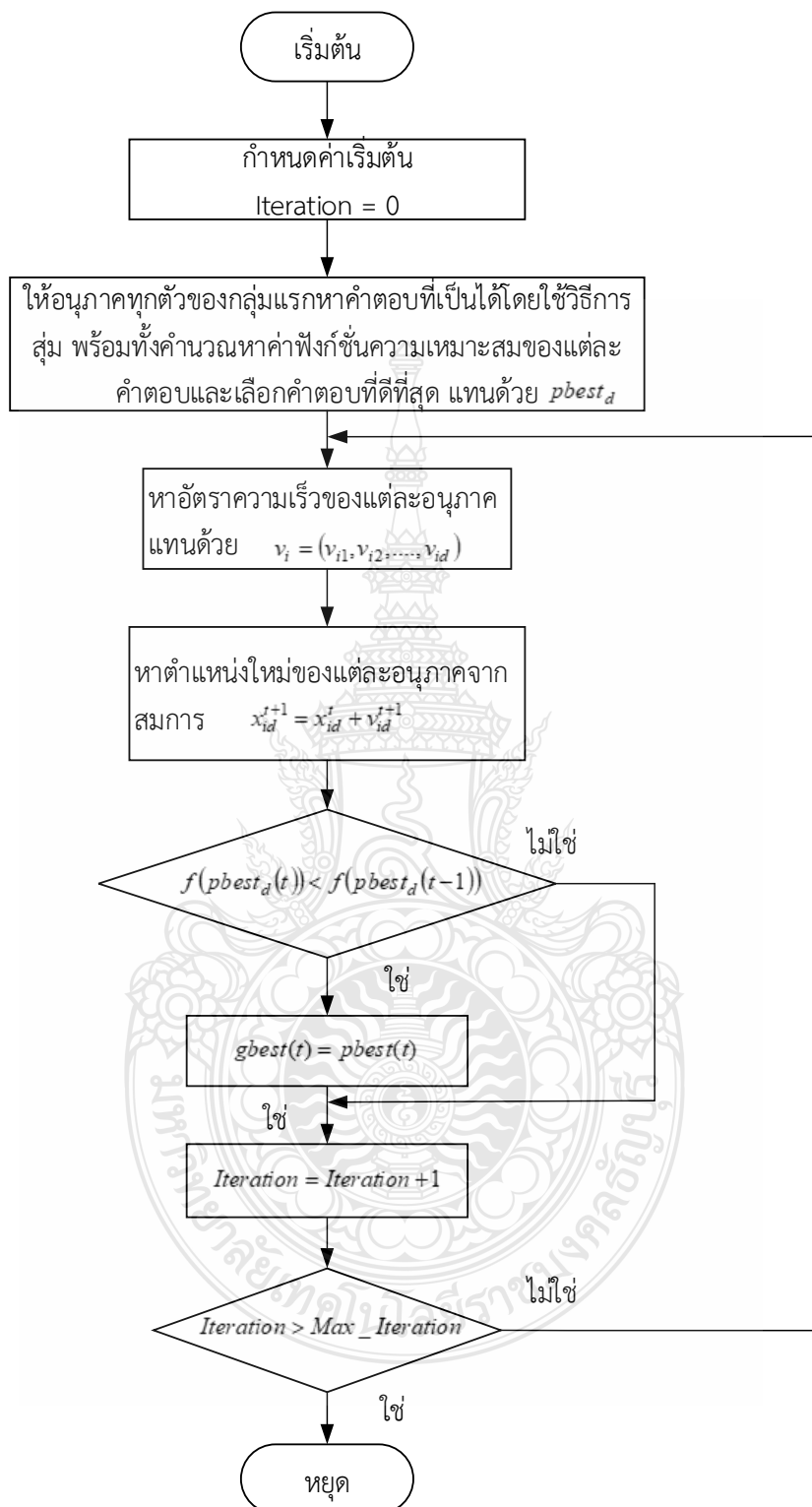
ให้วนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 แต่ถ้ายังตรงตามเงื่อนไขให้หยุดทำงาน

2.3.2.2 องค์ประกอบของวิธีกลุ่มอนุภาค

การเปลี่ยนความเร็ว และตำแหน่งของแต่ละอนุภาค สามารถคำนวณได้โดยใช้

ความเร็วปัจจุบันและระยะทางระหว่าง $p_{best_{id}}$ ถึง g_{best_d} ดังสมการ

$$v_{id}^{t+1} = \omega * v_{id}^t + c_1 * rand() * (p_{best_{id}} - x_{id}^t) + c_2 * rand() * (g_{best_{id}} - x_{id}^t) \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.24 กรรมวิธีการดำเนินงานของวิธีก่อนอนุภาค

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2.24)$$

เมื่อ

n คือ จำนวนอนุภาคในกลุ่ม

m คือ จำนวนตัวแปร

t คือ ครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration)

ω คือ แฟคเตอร์น้ำหนักความเฉื่อย (Inertial weight factor)

C_1, C_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร่ง

$rand()$ คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง $[0,1]$

V_{id}^t คือ ความเร็วของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t โดยที่ $v_d^{\min} \leq v_{id}^t \leq v_d^{\max}$

ค่า $v^{\max}$ ใช้ในการหาค่าความละเอียดของคำตอบ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้อนุภาคบินผ่านคำตอบที่ดีที่สุดไป แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปก็อาจจะค้นหาไม่ครอบคลุมทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นจากการทดสอบมาแล้ว ควรจะกำหนดค่า $v^{\max}$ ประมาณ 10 - 20% ของช่วงการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรแต่ละตัว ค่าคงที่ c_1 และ c_2 แทนน้ำหนักของความเร็วแบบสุ่มของแต่ละอนุภาคตามตำแหน่ง pbest และ gbest ถ้ามีค่าน้อยเกินไป ในกรณีที่อนุภาคอยู่ห่างจากตำแหน่งเป้าหมายก็อาจจะหมดแรงก่อนถึงเป้าหมาย แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปก็อาจจะบินข้ามเป้าหมายไป ดังนั้นค่า c_1 และ c_2 จากการทดสอบมาแล้วควรอยู่ระหว่าง 1.4 - 2.0 การเลือกค่า ω ที่เหมาะสมควรใช้สมการ

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (2.25)$$

ค่าที่เหมาะสม คือ $\omega_{\max} = 0.9$ และ $\omega_{\min} = 0.4$

2.5 โปรแกรม OpenDSS (The Open Distribution System Simulator)

โปรแกรมจำลองการกระจายพลังงานไฟฟ้า OpenDSS (The Open Distribution System Simulator) ถูกสร้างขึ้นโดยสถาบันวิจัยพลังงานไฟฟ้าแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากในปี ค.ศ. 1965 ได้มีเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกา ส่งผลให้ประชากร 30 ล้านคนในสหรัฐอเมริกาไม่มีไฟฟ้าใช้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจที่มีการพึ่งพาอุตสาหกรรมเป็นหลัก ล้วนแต่ใช้พลังงานไฟฟ้าก่อให้เกิดความไม่มั่นคงในการใช้พลังงานไฟฟ้า รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้มีมติให้

จัดสร้างสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อสนับสนุนการวิจัยพลังงานไฟฟ้าโดยให้ ดร. Chauncey Star สร้างองค์การวิจัยและพัฒนาอิสระ (Electric Power Research Institute (EPRI)) เพื่อสนับสนุนการวิจัยภาคไฟฟ้าและจัดการกับปัญหาด้านเทคนิคและการปฏิบัติการ ดร. Chauncey Star ได้นำเสนอการสร้างสถาบันอย่างเป็นทางการต่อของคณะกรรมการการพาณิชย์ วุฒิสภาสหรัฐอเมริกาเขาได้นำเสนอวิสัยทัศน์ของเขาสำหรับสถาบันวิจัยพลังงานไฟฟ้าในการให้บริการ สำหรับวัตถุประสงค์การวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากมายในอุตสาหกรรมไฟฟ้าด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยี เช่น พลังงานหมุนเวียนการควบคุมสิ่งแวดล้อมและสมรรถกิริยา EPRI พบกับความท้าทายแบบดั้งเดิมและที่เกิดขึ้นใหม่ด้วยนวัตกรรมเทคโนโลยีความเป็นผู้นำทางความคิดและความเชี่ยวชาญด้านเทคนิคผลงานการวิจัยดังกล่าวถึงปัญหาที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและเทคโนโลยีแม้ว่าความคาดหวังพื้นฐานจะยังคงที่สำหรับไฟฟ้าที่ราคาไม่แพงน่าเชื่อถือและรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีนักวิจัยหลากหลายเข้ามาทำวิจัย 2 คนผู้ได้คิดค้น โปรแกรม OpenDSS คือ ดร. Roger C. Dugan ดร. Davis Montenegro และ Matthew Rylander และทีมวิจัย ได้คิดค้นโปรแกรมจำลองการกระจายพลังงานไฟฟ้า ที่ออกแบบมาเพื่อสนับสนุนการรวมกริดการกระจายพลังงาน (DER) และการสร้างระบบที่สะดวกลดความยุ่งยากในการคำนวณในรูปแบบตาราง ช่วยให้วิศวกรสามารถทำการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนโดยใช้แพลตฟอร์มที่ยืดหยุ่นปรับแต่งและใช้งานง่ายซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อตอบสนองความท้าทายของระบบการแจกจ่ายในปัจจุบันและอนาคตและเป็นพื้นฐานสำหรับการทำความเข้าใจและการผสมรวมเทคโนโลยีและทรัพยากรใหม่ OpenDSS จำลองเทคโนโลยีการกระจายแบบดั้งเดิมและขั้นสูงทรัพยากรทรัพยากรสิ้นและการควบคุม มันเป็นแพลตฟอร์มแรกที่มีการจัดเก็บพลังงานอย่างละเอียดและข้อมูลอินเวอร์เตอร์ขั้นสูงและเป็นเครื่องมือในการพัฒนาการวิเคราะห์ระบบการกระจายใหม่ เช่น วิธีการจัดการโฮสต์ที่ใช้ในเครื่องมือการรวมทรัพยากรการกระจายและการประเมินมูลค่า (DRIVE) ของ EPRI OpenDSS ได้รับการพัฒนาในปี 1997 ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้คำนึงถึงผลกระทบด้านเวลาและตำแหน่งกริดของ DER โดยการนำเสนอแนวคิดของการวิเคราะห์แบบกึ่งคงที่เวลาอนุกรม ให้กับอุตสาหกรรมพลังงานไฟฟ้า เพื่อประสานงานและพัฒนาแอปพลิเคชันสมรรถกิริยาล่วงหน้า DSS นั้นได้รับการเปิดแหล่งที่มาสี่ปีต่อมา ด้วยการดาวน์โหลดมากกว่า 65,000 ครั้งและผู้ใช้นับพันทั่วโลก OpenDSS ได้กลายเป็นเครื่องมือการจำลองที่ทรงพลังที่ใช้ทั่วทั้งอุตสาหกรรมโดยระบบสาธารณูปโภคห้องปฏิบัติการวิจัยและมหาวิทยาลัยสำหรับการสร้างแบบจำลองและจำลองการใช้งานการกระจายขั้นสูง นอกจากนี้ยังใช้เป็นเครื่องมือฝึกอบรมสำหรับนักเรียนและวิศวกรกระจายใหม่ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ไม่มีลิขสิทธิ์สามารถใช้งานและเชื่อมต่อกับโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางวิศวกรรมได้หลากหลายชนิด เช่น โปรแกรม Matlab VB Dephi และ

Python สามารถลดขั้นตอนการเขียนโปรแกรมทางวิศวกรรมไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนเช่นการคำนวณการไหลของกระแสไฟฟ้าแบบวิเคราะห์โหนดโพล์ได้ในเวลาอันสั้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการดุษฎีนิพนธ์

ดุษฎีนิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง การออกแบบใช้ระบบมาตรฐานของ IEEE 30 บัส ในรูปแบบโหลดมาตรฐานเพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ศึกษาผลกระทบที่ส่งผลในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เพื่อสร้างองค์ความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากกรณีศึกษาในการประกอบการวางแผนติดตั้งรองรับระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าในอนาคตให้มีความเหมาะสมกับการใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอเหมาะสมกับสภาพการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ในดุษฎีนิพนธ์นี้ได้ศึกษาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ด้วยการพิจารณาขนาดที่ติดตั้งในระบบและตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของระบบ ศึกษาผลกระทบที่ส่งผลต่อระบบไฟฟ้า เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ สามารถใช้ประกอบการพิจารณาปัญหาด้านความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจากกรณีที่ทำการศึกษาและวางแผนรองรับการขยายตัวของระบบกักเก็บพลังงานในอนาคต ในดุษฎีนิพนธ์นี้เสนอวิธีการวิเคราะห์ กรณีศึกษาออกเป็นในแต่ละกรณีและให้มองเห็นสภาพปัญหาปัจจุบันและมีการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังในแต่ละวิธีการจากระบบทดสอบที่นำเสนอ ซึ่งระบบทดสอบประกอบไปด้วย ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 13 บัส ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส และการทดสอบระบบด้วยการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ 30 บัส [9]

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการดุษฎีนิพนธ์

ดุษฎีนิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม OpenDSS เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลกระทบในระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

จัดเตรียมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบจำหน่ายแบบ 13 บัส และระบบ 30 บัส ใช้ในการทดสอบ เพื่อนำมาป้อนค่าในโปรแกรม OpenDSS

สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่จะนำมาทดสอบ ในโปรแกรม OpenDSS โดยนำค่าพารามิเตอร์จากขั้นตอนที่ 1 มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง

คำนวณ และวิเคราะห์ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB

คำนวณ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานแบบ
สรุปผลการทดสอบ

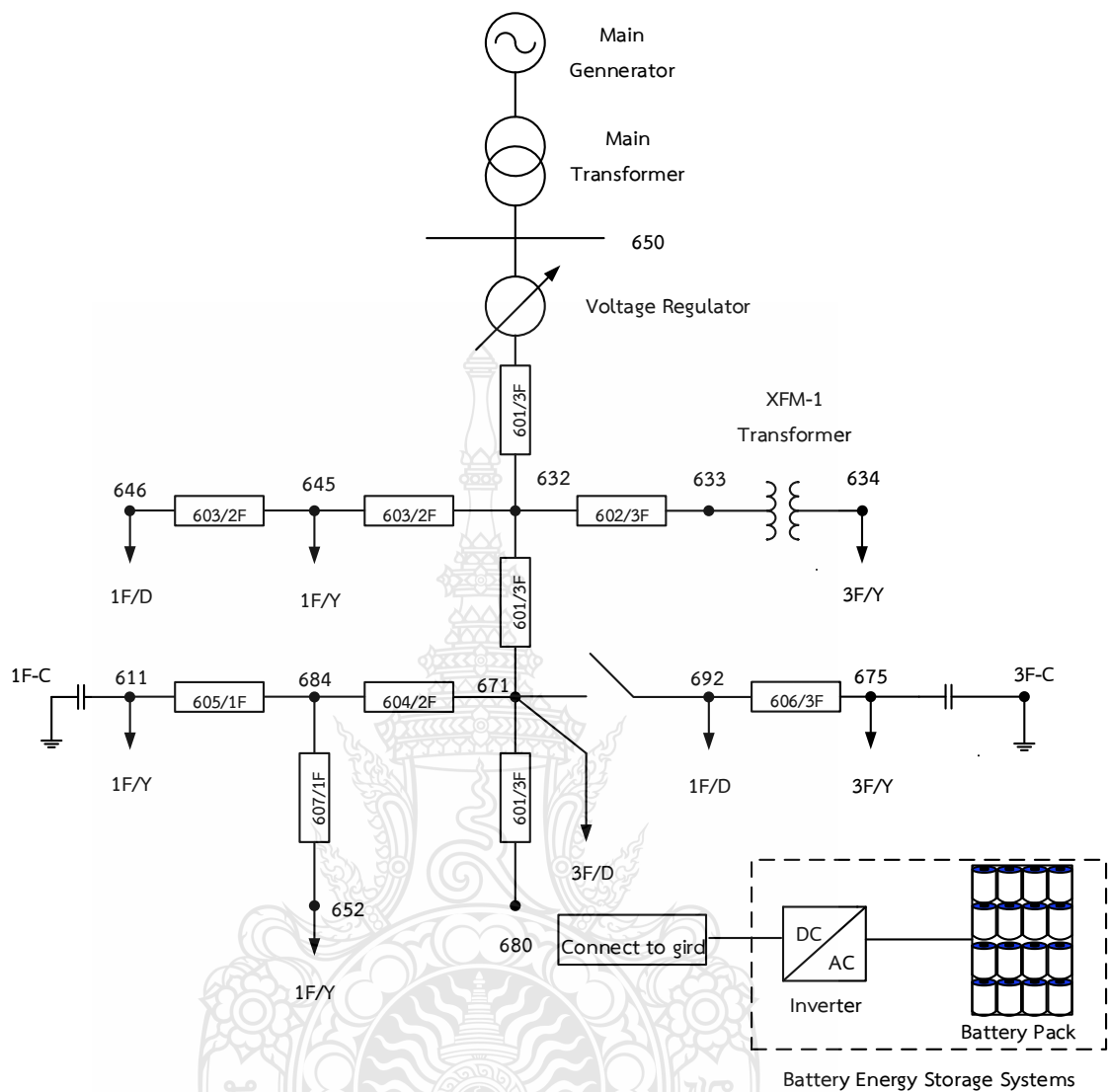
3.2 กรณีศึกษาที่ 1 การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบ แบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาระบบการไหลของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้านั้นสามารถดำเนินการได้ในหลายวิธีการส่วนใหญ่ใช้การวิเคราะห์ในเชิงตัวเลข (Numerical Analysis) เช่น วิธีการนิวตันราฟสัน [75, 76] วิธีการเกาซ์เดิ้ล [77] วิธีการคำนวณกระแสย้อนกลับและแรงดันไปข้างหน้า [78] การเขียนโปรแกรม MATLAB ด้วยการเขียนสคริปต์ m – files และทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะสมดุล เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาวางแผนการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในกรณีต่างๆ การออกแบบระบบไฟฟ้าในรูปแบบของการเขียนโปรแกรมที่ยาวและซับซ้อนนั้นเกิดความไม่คล่องตัวในทางปฏิบัติอย่างยิ่ง ด้วยปัญหาดังกล่าวจึงเกิดแนวความคิดในการพัฒนาโปรแกรมฟรีซอฟต์แวร์ คือ โปรแกรม OpenDSS ที่ใช้การวิเคราะห์โดยสามารถนำเสนอระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้ในการจำลองการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะคงตัวด้วยโปรแกรม OpenDSS ในระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 13 บัส ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าตัวแปรมาตรฐาน ประกอบไปด้วยค่าตัวแปรสายส่ง ค่าตัวแปรหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าตัวแปรตัวเก็บประจุ และตัวแปรโหลดในระบบมาตรฐานในบัสที่กำหนดตามรูปที่ 3.1

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสร้างรูปแบบระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่โดยใช้โปรแกรม OpenDSS

ขั้นตอนที่ 3 ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานในบัสมาตรฐาน IEEE 13 บัส โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นการทดสอบระบบเพื่อศึกษาการไหลของระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยวิธีการสุ่มเลือกขนาดและตำแหน่งติดตั้ง โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้



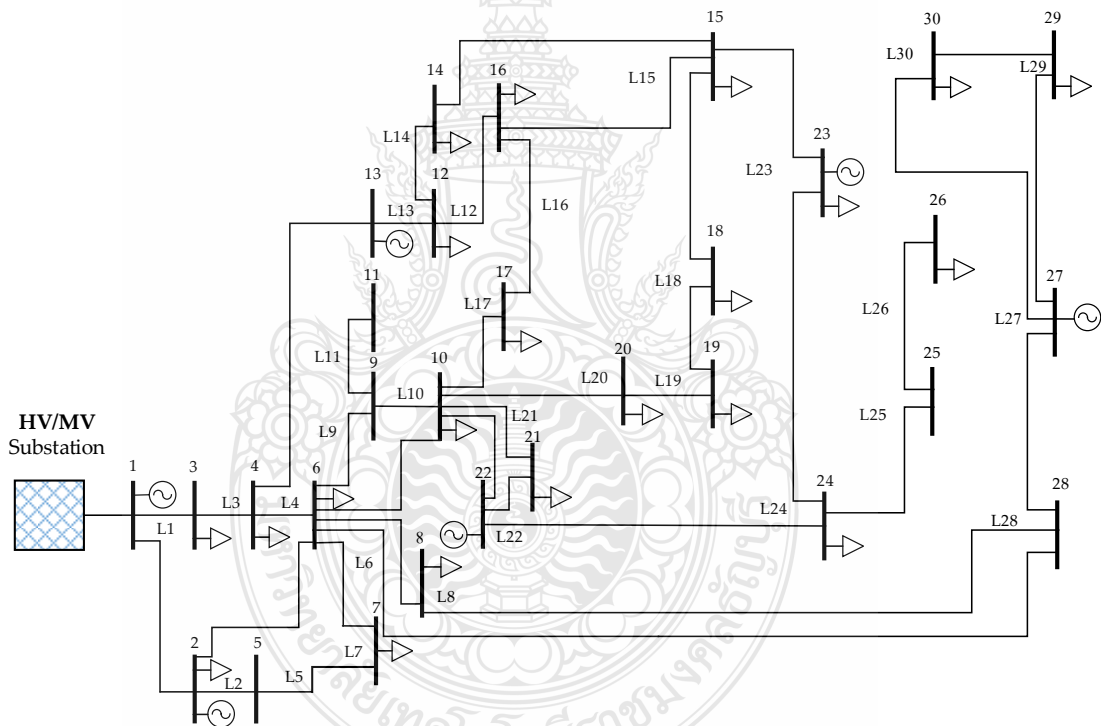
รูปที่ 3.1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 13 บัส

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการทดสอบระบบกักเก็บพลังงานเพื่อศึกษาการไหลของระบบไฟฟ้า

กรณีทดสอบ	เงื่อนไข
A	ทดสอบระบบโดยไม่มีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่
B	ทดสอบระบบโดยมีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ บัส 1
C	ทดสอบระบบโดยมีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ บัส 13

3.3 กรณีศึกษาที่ 2 วิเคราะห์ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาค

วัตถุประสงค์การวิเคราะห์การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่เพื่อจะหลักที่จะแก้ไขการปรับขนาดและการจัดสรรตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่พร้อมการเพิ่มประสิทธิภาพลดการสูญเสียพลังงาน ความสำคัญของสภาพปัญหา คือ ผลกระทบต่อการปรับขนาดและตำแหน่งติดตั้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการหาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบมาตรฐานแบบเรเดียล 30 บัส ดังรูปที่ 3.2 ในการติดตั้ง BESS ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม 2 วิธี คือ วิธีการด้วยวิธีพันธุกรรมยีนต์และวิธีกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 3.2 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส

การใช้โหลดของระบบกักเก็บพลังงานกำหนดลักษณะการทำงานด้วย การใช้งานโหลดใน 24 ชั่วโมง (Daily load profile) เพื่อใช้ออกแบบการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ ในรูปแบบอัตราการอัดประจุ (SOC) ของแบตเตอรี่ถูกใช้ในการคำนวณกำลังการอัดการอัดประจุ ต่อที่อัตรา 3.4 kW และค่า

pf 0.85 ของการชาร์จแบตเตอรี่ [76-78] ความน่าจะเป็นของการอัตราการอัดประจุ สามารถคำนวณดังแสดงในสมการ 3.1

$$F_A(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-\mu)/2\sigma^2}; 0 < t < 24 \quad (3.1)$$

เมื่อ	F_A	คือ ค่าอัตราการอัดประจุต่อเวลา
	t	คือ เวลาจำนวน 24 ชั่วโมง
	μ	คือ ค่าเฉลี่ย
	σ	คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ

แบตเตอรี่ที่ใช้ในการจัดเก็บพลังงานโดยการอัตราการอัดประจุ ด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อแปลงไฟ พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงหรือโหมดการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ โหมดการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่จะเกี่ยวข้องกับเวลาในการอัดประจุไฟฟ้า ดังนั้นเวลาที่สิ้นสุดการอัดประจุไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยระดับ SOC โดยจะถูกใช้ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบกักเก็บพลังงาน สามารถกำหนดระยะเวลาการอัดประจุไฟฟ้าได้ตามที่แสดงในสมการที่ 3.2

$$t_{End} = \left(1 - \frac{SOC}{100}\right) \times \left(\frac{24}{3.4}\right) \quad (3.2)$$

เมื่อ	t_{end}	คือ ระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้า (ชั่วโมง) และสถานะของค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ (%)
	24	คือ เวลาจำนวน 24 ชั่วโมง
	3.4	คือ อัตราการอัดประจุไฟฟ้า (กิโลวัตต์)

ขนาดของ BESS ใช้ถูกกำหนดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของกำลังการผลิตรวมของ BESS กับกำลังการผลิตรวมของการไหลดั่วไปเพื่อจะบอกถึงระดับของการบริโภคพลังงานไฟฟ้าซึ่งสามารถแสดงตามที่แสดงในสมการ 3.3

$$PenetrationLevel(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{BESS}} BESS(i)}{\sum_{i=1}^{N_{Load}} P_{Load}(n)} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ N_{BESS} คือ จำนวนของ BESS ในระบบไฟฟ้า
 P_{BESS} คือ กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการอัดประจุ
 N_{Load} คือ ผลรวมของจำนวนโหลดในระบบไฟฟ้า
 P_{Load} คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าในโหลดของระบบไฟฟ้า

การคำนวณหาค่าอัตราการอัดประจุของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ คำนวณจากการพิจารณาเวลาและ สถานะของการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่และวิธีการอัดประจุไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในงานนี้ถูกกำหนดไว้ในสภาพการอัดประจุแบบปกติ ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ อัตราการอัดประจุของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ แสดงการอัดประจุในแต่ละวันสามารถแสดงได้ในสมการ 3.4

$$TotalChart\ Profiles_{hr} = \sum_{i=1}^{#ofBESS} P_{BESS}(i, hr) \quad (3.4)$$

เมื่อ # คือ จำนวนประจุไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงาน
 hr คือ เวลาในการอัดประจุไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงาน จำนวน 24 ชั่วโมง

ผลกระทบของการอัดประจุไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงาน เป็นผลกระทบโดยตรงของตารางการอัดประจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะต้องสามารถจัดการและให้แหล่งพลังงานในการลดการใช้พลังงานสูงสุด การพิจารณาขั้นต่อไปคือการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการหาค่าคำตอบของระบบ

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการทดสอบการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งในระบบกักเก็บพลังงาน

กรณีทดสอบ	เงื่อนไข
A	ทดสอบระบบโดยไม่มี BESS
B	ทดสอบระบบโดยมี BESS ใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพันธุกรรม (GA) การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้ง
C	ทดสอบระบบโดยมี BESS ใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้ง

ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 ประกอบการทำงานที่แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ของ 132 kV การปรับขนาดและการจัดสรรที่เหมาะสมที่สุดของ BESS ในการจัดจำหน่ายในตำแหน่งที่ใช้ในระบบ โหลดไม่สมดุล ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE30 เวลาเริ่มต้นในแต่ละวันของการอัดประจุไฟฟ้าใน แบตเตอรี่ถูกคำนวณตามสมการ 3.1 และสมการ 3.2 เท่ากับ 2, 10, 20 โดยการกำหนดอัดประจุไฟฟ้า ในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อยและเวลาในการอัดประจุไฟฟ้า ความต้องการพลังงานของโหลดเชิง พหุคูณและที่อยู่อาศัยมีวัตถุประสงค์ที่จะขึ้นอยู่กับปัจจัยโหลด ความต้องการพลังงานของระบบกักเก็บ คำนวณโดยใช้พลังงานที่ 3.4 kW ของอัตราการอัดประจุของแบตเตอรี่ ถูกกำหนดไว้ในสามกรณีโดยใช้ พลังงานตามจากที่มีทั้งหมดของแต่ละโหลดในตารางเพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการ ค้นหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมที่สุดและการปันส่วนได้แสดงให้เห็นจากสมการที่ เกี่ยวข้อง 3 ประการตามที่แสดงในสมการ

$$\min(f) = (f_1 + f_2 + f_3) \times \text{pennalty} \quad (3.5)$$

$$f_1(x) = \max(VUF) \quad (3.6)$$

$$f_2(x) = \sum_{t=1}^{24hr} P_{\text{SystemDemand},t} \quad (3.7)$$

$$f_3(x) = \sum_t \sum_{l=1}^{NL} R_{lt} \left(\frac{P_{l,t}^2 + Q_{l,t}^2}{V_{l,t}^2} \right); l \in NL \quad (3.8)$$

เมื่อ	$P_{\text{systemDemand}}$	คือ ความต้องการพลังงานของการโหลดแต่ละครั้งใน 1 วัน
	NL	คือ ผลรวมของจำนวนสายส่ง
	R_l	คือ ค่าความต้านทานสายส่ง
	V	คือ แรงดันไฟฟ้าในสายส่ง
	P_l	คือ กำลังไฟฟ้าจริง
	Q_l	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ
	l	คือ ค่าพารามิเตอร์สายส่ง
	t	คือ เวลา ใน 24 ชั่วโมง
	$\max(VUF)$	คือ ค่าสูงสุดของปัจจัยของแรงดันไม่สมดุล

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ประกอบด้วยค่าปัจจัยความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด f_1 ผลรวมความต้องการพลังงาน f_2 ผลรวมกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง f_3 ค่าตั้งสมการที่ (3.5), (3.6), (3.7) ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องในระบบกักเก็บพลังงานสามารถควบคุมได้ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมในเงื่อนไขการเชื่อมต่อกริดดังแสดงในสมการ

$$V_{\min} \leq V_{Bus,i} \leq V_{\max} \quad (3.8)$$

$$P^{\min} \leq P_{BESS_i} \leq P^{\max} \quad (3.9)$$

- เมื่อ $V_{Bus,i}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 $V_{\min}$ คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 0.95 p.u.
 $V_{\max}$ คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 1.05 p.u.
 P_{BESS_i} คือ กำลังไฟฟ้าจริงในระบบกักเก็บพลังงาน

เงื่อนไขการทำงานของระบบที่ใช้ในการควบคุมการใช้พลังงานไปยังระบบกักเก็บพลังงาน คือ ระบบกักเก็บพลังงานลดด้วยปริมาณการใช้โหลด ดังสามารถแสดงตามสมการ (3.10)

$$P_{inj} = P_{BESS} - P_{TotalLoad}$$

$$Penalty = \begin{cases} P_{inj} < 0; Penalty = 10,000 \\ P_{inj} > 0; Penalty = 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

- เมื่อ P_{inj} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายพลังงานในระบบกักเก็บพลังงาน
 $P_{TotalLoad}$ คือ ผลรวมความต้องการใช้พลังงานในระบบ

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมในการหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยวิธีการวิวัฒนาการ (GA) และวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ด้วยวิธีการเชื่อมต่อกับโปรแกรม OpenDSS ด้วยวิธีการตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการออกแบบวงจรระบบทดสอบ 30 บัส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง
ในโปรแกรม OpenDSS

ขั้นตอนที่ 2 ติดตั้งค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบและติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบ
แบตเตอรี่ในระบบ

ขั้นตอนที่ 3 เขียนโปรแกรมเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม OpenDSS

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากสมการที่ (3.5) ภายใต้เงื่อนไขเชื่อมต่อระหว่าง
โปรแกรม MATLAB และโปรแกรม OpenDSS

ขั้นตอนที่ 5 การติดตั้งค่าพารามิเตอร์ของ BESS ที่เหมาะสมที่สุดตามด้วยวิธีการ GA และ
PSO ตามค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนด ด้วยเงื่อนไขดังนี้

- Population size = 50
- Max. number of generations = 10
- Number of Variables = 2
- Crossover = 0.8
- Mutation = 0.1
- Defined Max. and Min. of BESS size in 3 phases = [1000 70000] kW.
- Defined Max. and Min. of BESS location

ขั้นตอนที่ 6 สุ่มสร้างประชากรเริ่มต้นของโครโมโซมและป้อนข้อมูลของขนาด BESS และ
ตำแหน่งไปยัง IEEE30 บัส การทดสอบผ่านทางเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม
OpenDSS

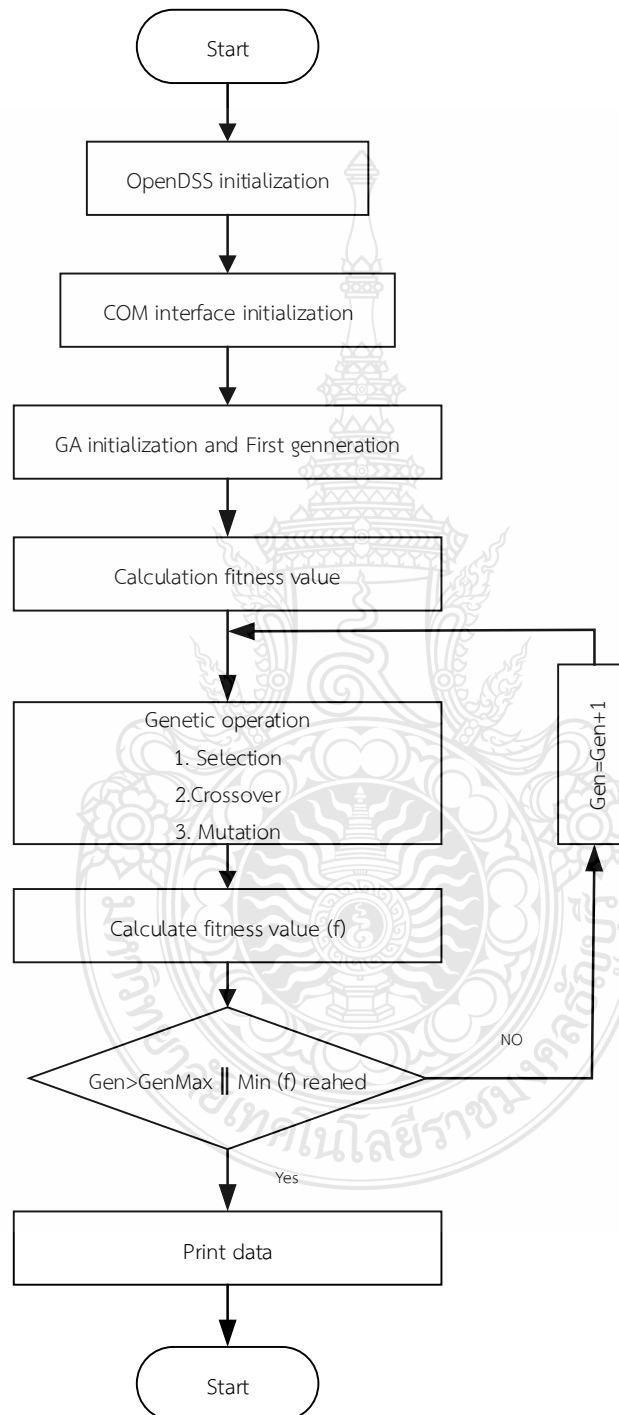
ขั้นตอนที่ 7 เตรียมใช้งานการประเมินการคำนวณครั้งแรกโดยการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์
ที่ขึ้นอยู่กับข้อมูลจากทางเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม OpenDSS

ขั้นตอนที่ 8 สร้างประชากรใหม่โดยใช้การดำเนินการ GA และ PSO ตามค่าฟังก์ชัน
เป้าหมายละเอียดซึ่งประกอบด้วยกระบวนการคัดเลือกกระบวนการไขว้การกลายพันธุ์และได้รับ
ประชากรใหม่สำหรับรุ่นต่อไป

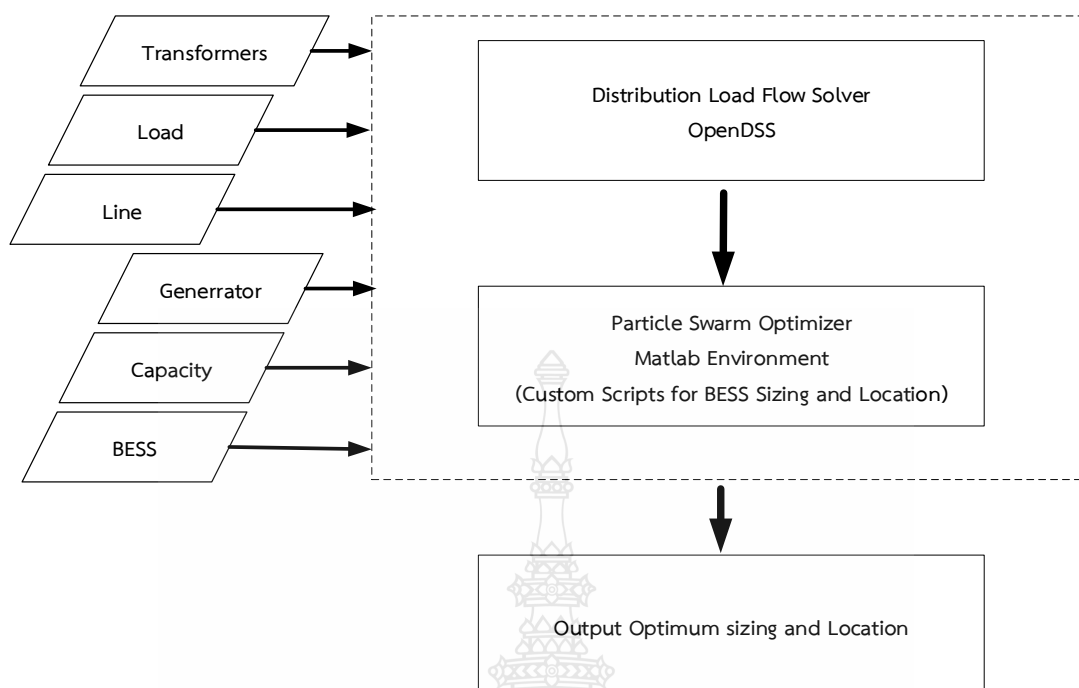
ขั้นตอนที่ 9 คำนวณการสุ่มสร้างของประชากรใหม่

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบเงื่อนไขและเกณฑ์การเลือกประชากรด้วยการเข้าถึงสูงสุด รุ่นถ้าเงื่อนไขไม่พอใจไปที่ขั้นตอนที่ 8 ถ้าได้เงื่อนไขดำเนินการขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 สิ้นสุดการทดสอบและนำผลการทดสอบไปสรุปผล



รูปที่ 3.3 เงื่อนไขในการทดสอบหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมด้วยวิธีพันธุกรรม



รูปที่ 3.4 เงื่อนไขในการทดสอบหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมด้วยวิธีอนุภาค

3.4 กรณีศึกษาที่ 3 วิเคราะห์ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบ 30 บัส ควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า

การทดสอบระบบ 30 บัส ในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่เพื่อจะหลักที่จะแก้ไขการปรับขนาดและการจัดสรรตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้าพร้อมการเพิ่มประสิทธิภาพลดการสูญเสียพลังงาน ทดสอบหาค่าผลรวมของกำลังสูญเสียในระบบและทดสอบค่าเบี่ยงเบนแรงดันโวลต์ วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบควบคุมการทำงานมากกว่าในการคำนวณที่ทำได้โดยวิธีความเร็วของเครือข่าย ซึ่งสามารถระบุปัญหาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น มีปัจจัยสำคัญหลายประการในระบบไฟฟ้าซึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้ามีเสถียรภาพในการเข้าถึงสิ่งที่อาจเกิดขึ้น ในกรณีเพิ่มเติม การชดเชยแรงดัน-แอมแปร์รีแอคทีฟ (Voltage-Ampere Reactive: VAR) ใช้เพื่อวิเคราะห์นั้นยัง ไม่เพียงพอที่จะบ่งชี้ถึงการโอเวอร์โวลต์ VAR ใช้สำหรับวัดกำลังไฟฟ้าวงจรไฟฟ้าของกำลังไฟฟ้แอคทีฟ พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย คือ กำลังไฟฟ้แอคทีฟซึ่งมีส่วนประกอบที่แอคทีฟมาจากตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ หน่วยของ VAR ใช้เพื่อกำหนดเฉพาะประเภทของพลังงานที่สังเกตได้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้า (Power flow analysis: PFA) เป็นจุดสำคัญในการกำหนดสถานะของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายพลังงานจากกริดไปยังโหลดแต่ละครั้ง PFA

ใช้เพื่อค้นหาระดับแรงดันไฟ การสูญเสียพลังงาน และกระแสไฟของแต่ละสาขาและบัส โดยทั่วไป เครือข่ายที่ซับซ้อนและโหลดสมัยใหม่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสไฟแบบไม่เชิงเส้น สามารถคำนวณได้ในสมการ (3.11) และแรงดันบัสสามารถแสดงได้ในสมการ (3.12) ดังนี้

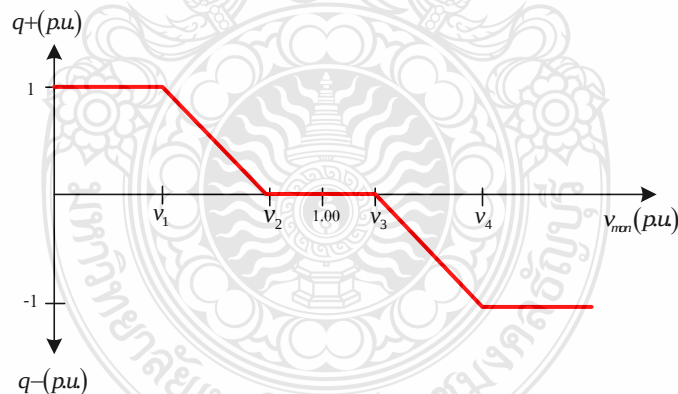
$$I_{inj}(v) = Y_{system} V \quad (3.11)$$

เมื่อ $I_{inj}(v)$ คือ กระแสที่จ่ายป้อนเข้าไปในระบบ

$$V_{n+1} = [Y_{system}]^{-1} I_{inj}(v_n) \quad (3.12)$$

$n \in 0, 1, 2, \dots \text{until converged}$

กระแสที่จ่ายป้อนเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้รับผลกระทบจากการปรับระดับขนาดแรงดันไฟฟ้า โดยทั่วไป กระบวนการชิงโครไนซ์เป็นข้อจำกัดหนึ่งที่สำคัญในการปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าให้เท่ากับกริด ดังนั้นการควบคุมฐานตัวแปลงพลังงานจึงเป็นวิธีที่ง่ายในการควบคุมโหมตโวลต์/วาร์หรือการควบคุมพลังงานปฏิกิริยา รูปแบบการควบคุม Volt/var สามารถนำเสนอได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าตามรูปแบบการควบคุม Volt/var ใน p.u.

รูปที่ 3.5 แสดงเกณฑ์การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยใช้กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ฉีดเข้าไปในกริดจากฐานตัวแปลง เรียกว่าฟังก์ชันควบคุม volt/var ฟังก์ชันควบคุมนี้ใช้เพื่อควบคุมตัวแปลงจากการตั้งค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจสอบ ดังนั้น ตัวแปลงจากฟังก์ชันการควบคุม Volt/var สามารถปรับได้สำหรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสำหรับการตั้งค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า และแตกต่างกันไปตาม

รูปแบบโหลดของกริด พลังงานปฏิกิริยาสามารถแสดงได้โดยใช้กำลังไฟฟ้ากระแสสลับและกำลังไฟฟ้าปรากฏ ดังแสดงในสมการ (3.13)

$$|Q(t)| = \begin{cases} 0, & \text{if } P_{ac}(t) < P_{\min} \\ \frac{k \text{ var Max} \times P_{ac}(t)}{\%P_{\min} \text{ NoVars}}, & \text{if } P_{\min} \leq P_{ac}(t) < P_{\max} \\ k \text{ var Max}, & \text{if } P_{ac}(t) \geq P_{\max} \end{cases} \quad (3.13)$$

โดยที่ $P_{ac}(t)$ และ $k \text{ var Max}$ คือ เอาต์พุตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ $P_{\min}$ และ $P_{\max}$ คือ ขอบเขตกำลังเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (kW) และ $P_{\min} \text{ NoVars}$ เป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าขั้นต่ำของคอนเวอร์เตอร์ ความสามารถของอินเวอร์เตอร์หรือเอาต์พุตพิกัด kVA และ $(\bar{S})$ สัมพันธ์กับคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์และสถานะเกินขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า ความสามารถในการให้คะแนนอินเวอร์เตอร์จะแสดงเป็นขั้นตอนเวลา ดังแสดงในสมการ (3.14) ดังนี้

$$\bar{S} = P_{ac}(t) + jQ_{ac}(t) \quad (3.14)$$

การสูญเสียพลังงานที่ใช้งานและปฏิกิริยาของระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ในสถานะคงที่โดยใช้โหลดสูงสุดที่เชื่อมต่อ ในขณะเดียวกัน รูปแบบการโหลดจากกริดในอนุกรมเวลาหรือขั้นตอนเวลาจำเป็นต้องชี้ขั้นตอนโดยใช้การแก้ปัญหาเวลา การสูญเสียพลังงานของความละเอียดในแต่ละครั้งจะกลายเป็นการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด (TEEL) ถูกใช้เพื่อตรวจสอบการสูญเสียพลังงานจากแหล่งไฟฟ้าไปยังโหลดไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ (3.15) ดังนี้

$$TEEL = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{NBL} (R_i \times |I_i^t|^2) \quad (3.15)$$

โดยที่ NBL คือ จำนวนสายส่งทั้งหมดในกริด R_i คือ ความต้านทานแต่ละเส้นของสายส่ง i คือหมายเลขสายส่ง I_i^t คือ กระแสปัจจุบันของสายส่งในขั้นตอนเวลา (t) และ t เป็นขั้นตอนเวลาใน 24 ชั่วโมง

ค่าเบี่ยงเบนแรงดันโหลด (Load voltage deviation: LVD) ใช้เพื่อแก้ไขขนาดแรงดันไฟโดยการเปรียบเทียบแรงดันไฟมาตรฐานหรือแรงดันไฟระบุ โดยทั่วไป แรงดันไฟที่กำหนดถูกกำหนดโดย 1.0

p.u. ค่าต่ำสุดของ LVD จำเป็นต่อการรักษาและคงค่าไว้ใกล้ศูนย์ LVD บนอนุกรมเวลาหรือขั้นตอนเวลา แสดงโดยสมการ (3.16) ดังนี้

$$LVD = \frac{\sum_{t=1}^{24} (\sum_{i=1}^{N_{node}} \left| \frac{V_i^t - V_{ref}}{V_{ref}} \right|)}{24} \quad (3.16)$$

โดยที่ V_i^t แรงดันโหนดของขั้นตอนเวลา V_{ref} คือ แรงดันไฟฟ้าปกติ N_{node} จำนวนโหนดทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลัง และ t คือ ขั้นตอนเวลาใน 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการทดสอบในระบบ 30 บัส ทดสอบหาค่าผลรวมของกำลังสูญเสียในระบบและทดสอบค่าเบี่ยงเบนแรงดันโหนด

กรณีทดสอบ	เงื่อนไข
A	ทดสอบระบบโดยไม่มี BESS
B	ทดสอบระบบโดยมี BESS ใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพันธุกรรม (GA) การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้ง
C	ทดสอบระบบโดยมี BESS ใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้ง

บทที่ 4

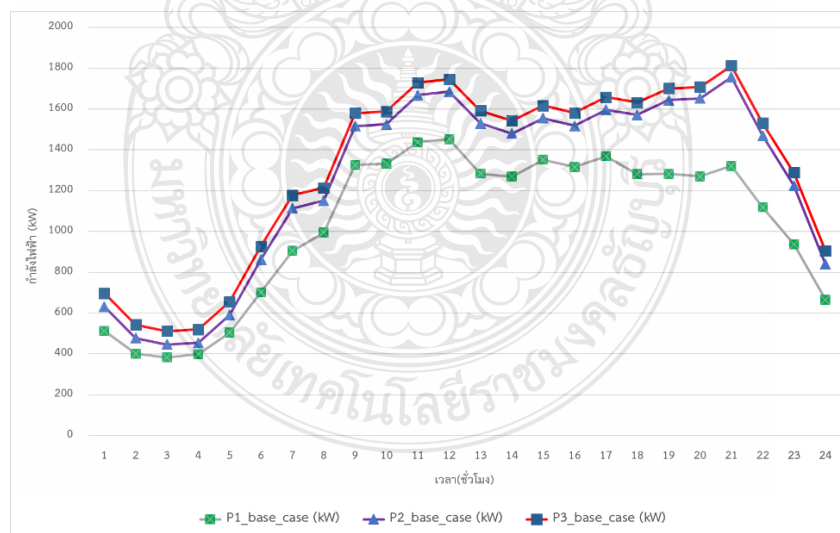
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

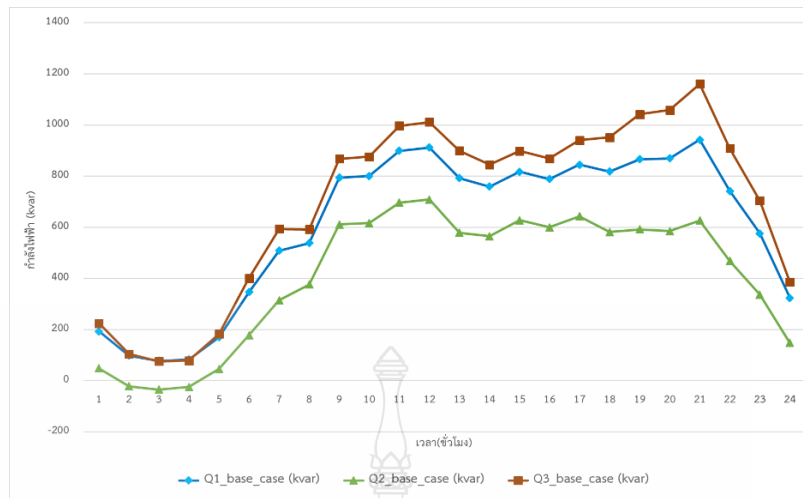
ในการวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ใช้พื้นฐานการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป โปรแกรม OpenDSS และโปรแกรม MATLAB ในแต่ละกรณีศึกษา เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ ตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานตามที่วางไว้ จากวิธีการดำเนินงานดุษฎีนิพนธ์นั้นได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี การพิจารณาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากกรณีศึกษาในการประกอบการวางแผนติดตั้งรองรับระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าในอนาคตให้มีความเหมาะสมกับการใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอเหมาะสมกับสภาพการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น

4.2 กรณีศึกษาที่ 1 การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

4.2.1 ทดสอบระบบโดยไม่มีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่



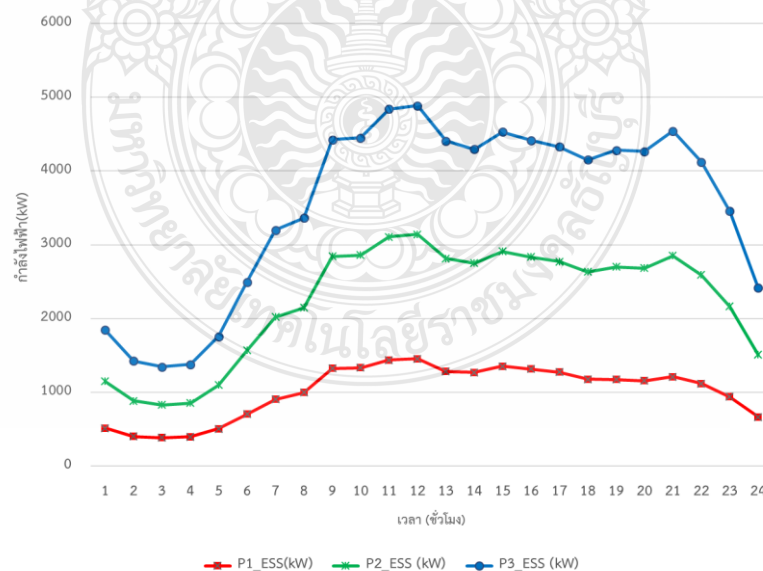
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริงในระบบ IEEE13 บัส โดยไม่มีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่



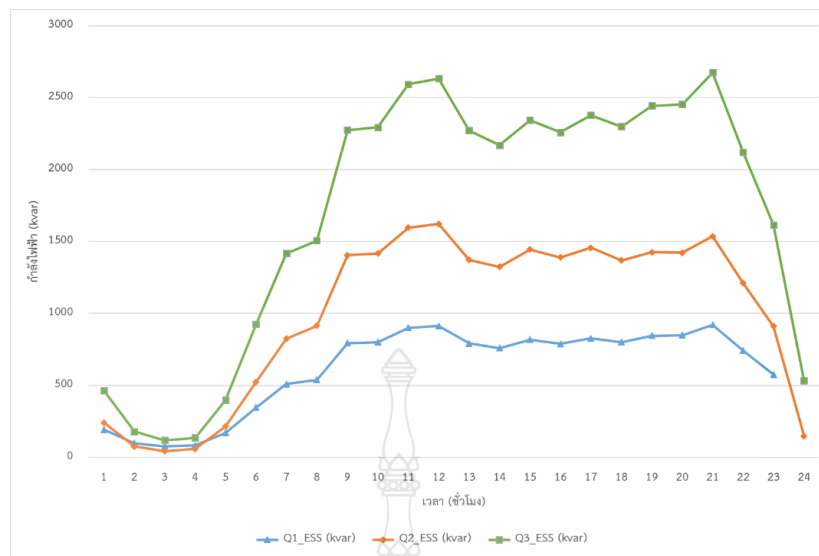
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ IEEE13 บัส โดยไม่มีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

จากรูปที่ 4.1 ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และรูปที่ 4.2 ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานใน 24 ชั่วโมง ของระบบ IEEE 13 บัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้พลังงานจะมีช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้พลังงานสูงในช่วงเวลา 17.00 – 22.00 น. และช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานต่ำคือช่วงเวลา 24.00- 04.00 น.

4.2.2 ทดสอบระบบโดยมีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

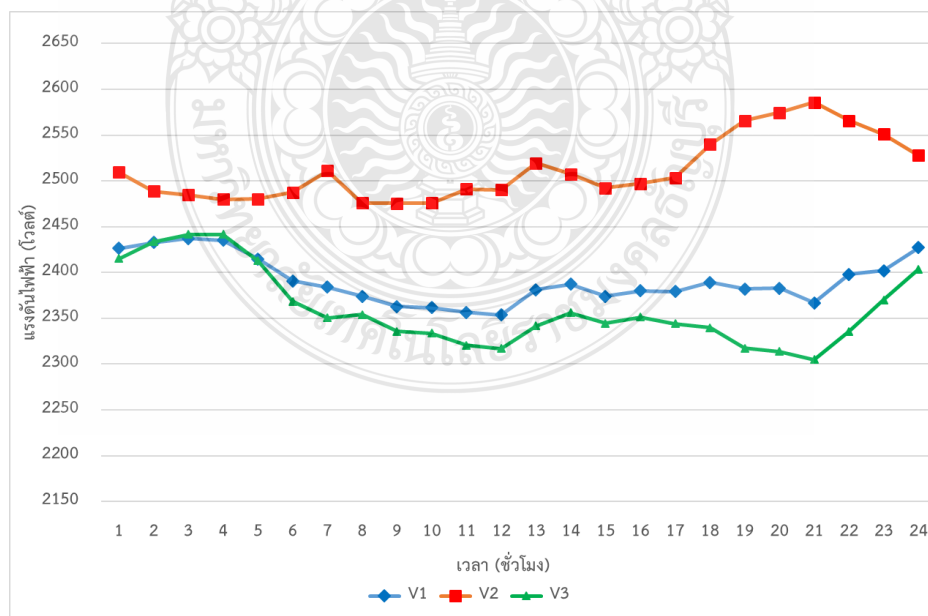


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าจริงในระบบ IEEE13 บัส โดยมีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

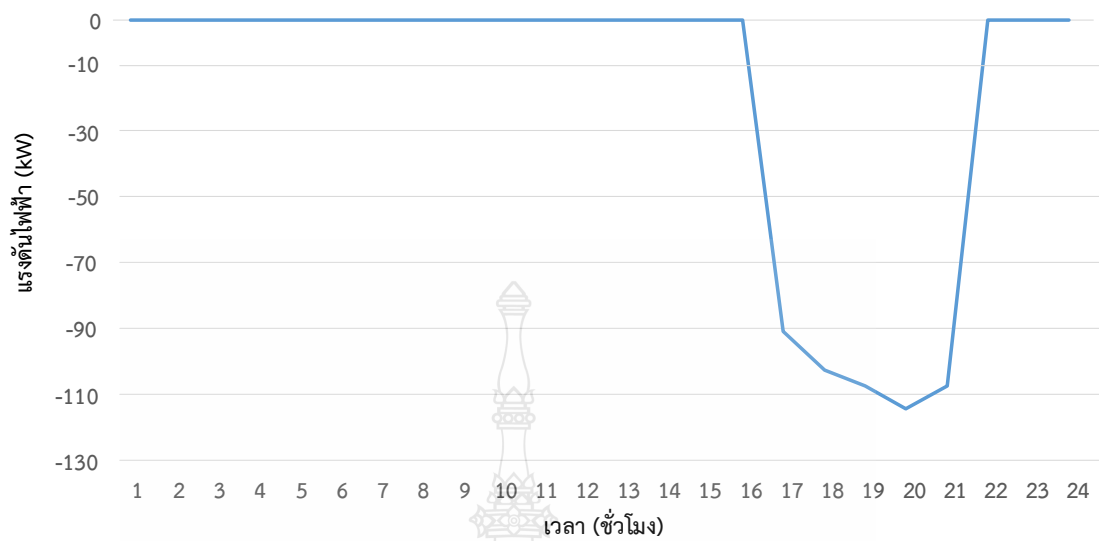


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ IEEE13 บัส โดยมีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

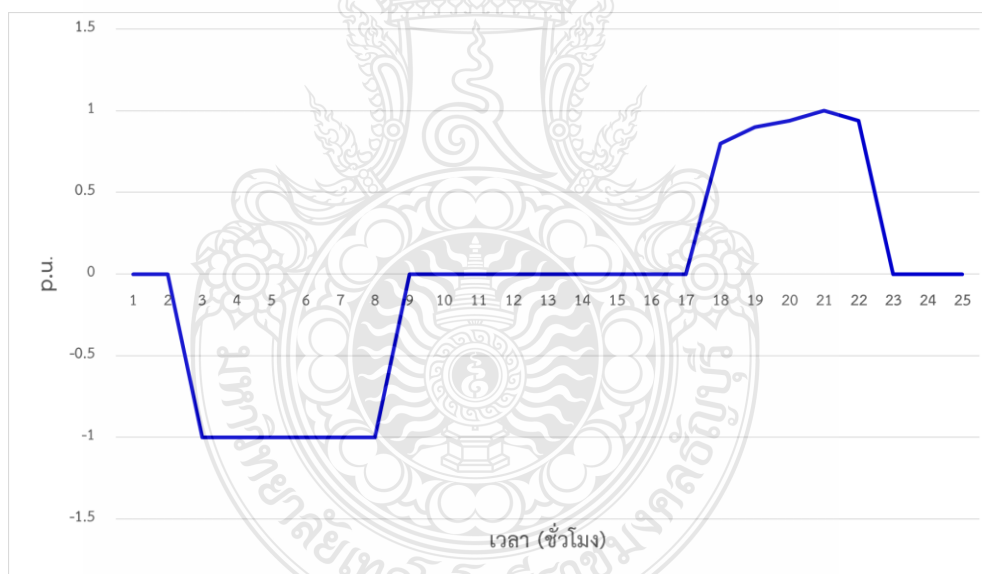
จากรูปที่ 4.3 ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงโดยมีระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ และรูปที่ 4.4 ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานแบบแบตเตอรี่ช่วยเสริมระบบในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้พลังงานสูงในช่วงเวลา 17.00 – 22.00 น.



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานกักเก็บของแบตเตอรี่ในระบบ IEEE13 บัส

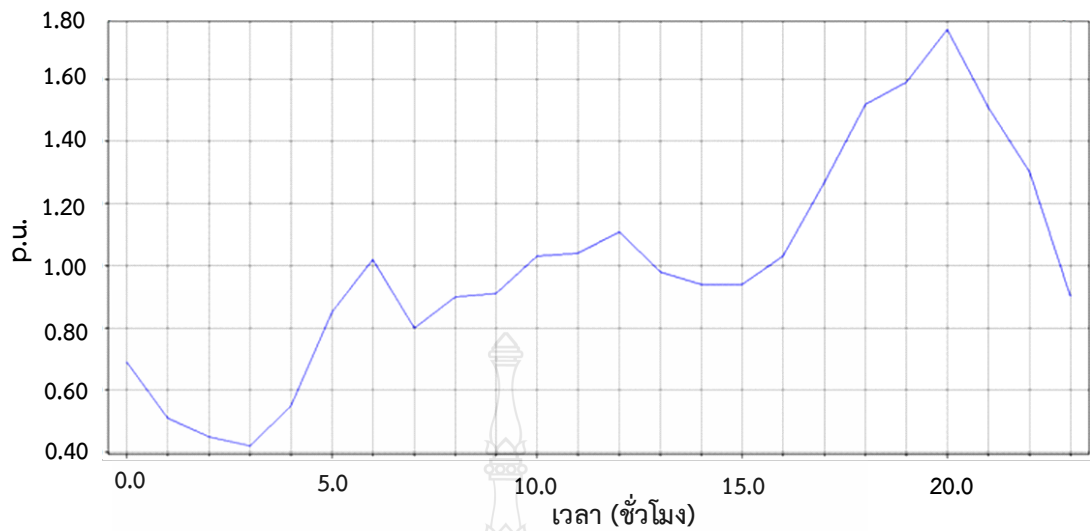


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองช่วงเวลาการจ่ายพลังงานแบตเตอรี่

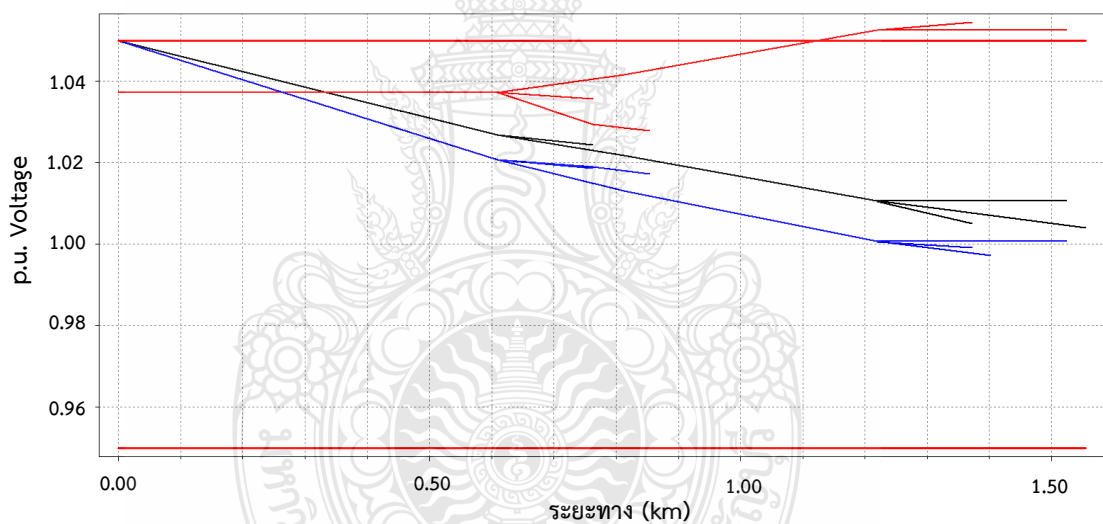


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่

จากรูปที่ 4.5 ผลการจำลองการจ่ายพลังงานกักเก็บของแบตเตอรี่ในระบบ IEEE13 บัส รูปที่ 4.6 ช่วงเวลาการจ่ายพลังงานแบตเตอรี่ แสดงให้เห็นถึงการจ่ายพลังงานเข้าสู่ระบบในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้พลังงานสูงในช่วงเวลา 17.00 – 22.00 น. และรูปที่ 4.7 แสดงผลการการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการทำงานของโหลดในระบบ 13 บัส

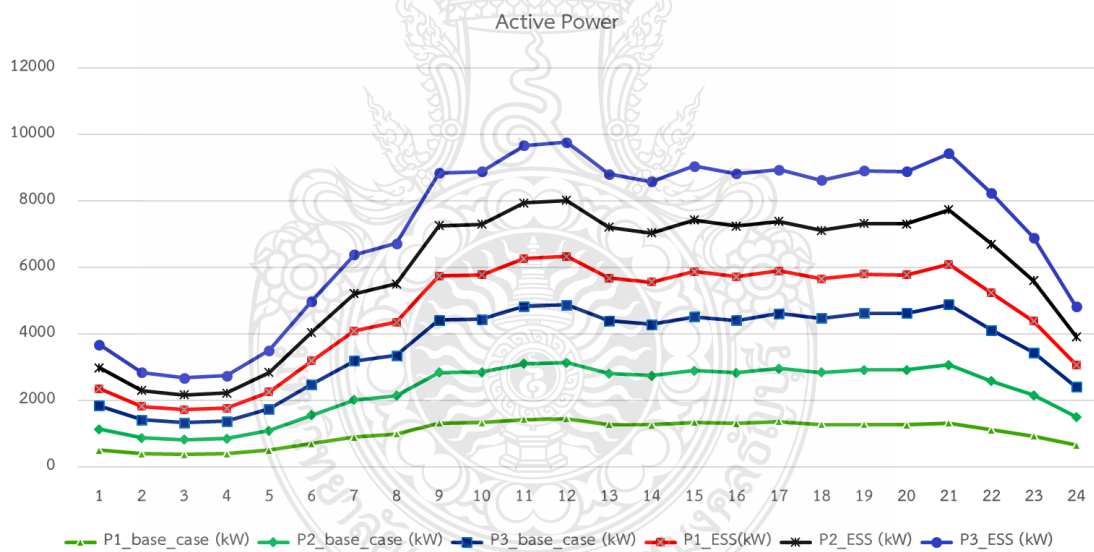


รูปที่ 4.9 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เกิดขึ้นเทียบกับระยะทาง

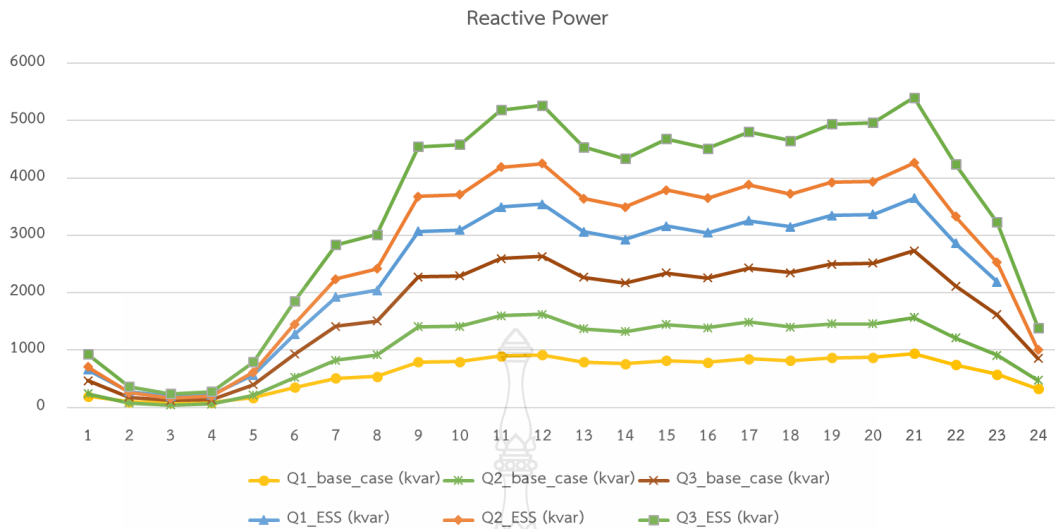
จากผลการทดลองสามารถสรุปวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ในตารางที่ 4.1 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่ขึ้นขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นระบบปกติและระบบที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังสู่มติดตั้งในบัสที่ 1 และบัสที่ 13 เพื่อนำผลมาวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน

ชนิดผลการทดลอง	ระบบ ปกติ	ติดตั้งระบบ กักเก็บ พลังงาน ที่ บัส 1	ติดตั้งระบบกัก เก็บพลังงาน ที่ บัส 13	ค่าร้อยละความ แตกต่าง
Max pu. voltage	1.0545	1.0545	1.0545	0.0000
Min pu. voltage	0.99737	0.99734	0.99734	0.0000
Total Active Power (MW)	2.41098	2.41472	2.41472	0.1490
Total Reactive Power (Mvar)	0.85564	0.85598	0.85598	0.0350
Total Active Losses (MW)	0.05261	0.05272	0.05272	0.1901
Total Reactive Losses (Mvar)	0.12155	0.12186	0.12186	0.2469



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงในระบบ IEEE13 บัส

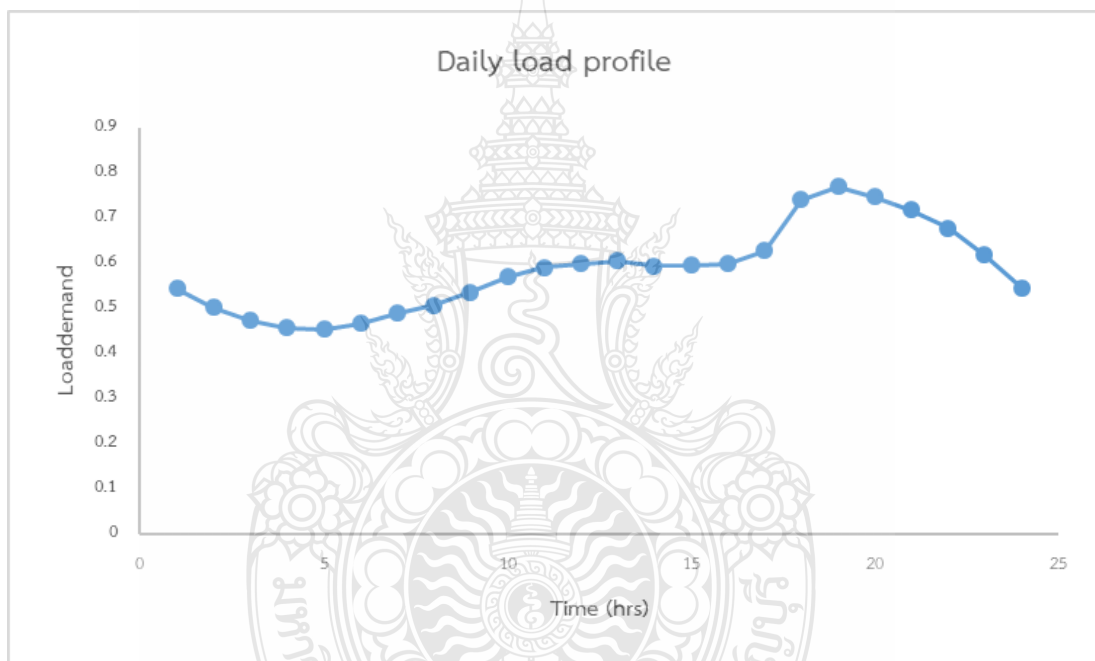


รูปที่ 4.11 ผลการจำลองเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าปรากฏในระบบ IEEE13 บัส

จากผลการจำลองติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบมาตรฐาน IEEE 13 บัส ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้ ค่าแรงดัน p.u. ในการติดตั้งไม่มีผลต่อระบบทั้งสองค่าคือค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.15 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.04 ค่ากำลังสูญเสียจริงมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.20 ค่ากำลังสูญเสียปรากฏมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.25 จากผลการวิเคราะห์มีนัยสำคัญคือ ในส่วนที่ค่าที่มีผลต่อระบบนั้นมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่เข้าไปในระบบ IEEE 13 บัส การทดสอบกรณีต่อไปคือการทดสอบหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งในระบบ IEEE 30 บัส

4.3 ผลทดสอบระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีการด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาค

วัตถุประสงค์การวิเคราะห์การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ เพื่อจะหลักที่จะแก้ไขการปรับขนาดและการจัดสรรตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่พร้อมการเพิ่มประสิทธิภาพลดการสูญเสียพลังงาน ในการติดตั้ง BESS ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม 2 วิธี คือ วิธีการด้วยวิธีพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาค ดำเนินการออกแบบระบบและทดสอบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ดังนี้



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการทำงานของโหลดในระบบ 30 บัส

ในระบบนี้จะทำการทดสอบหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ด้วยกรรมวิธีเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม โดยผลของการหาค่านั้นจะแสดงในตารางที่ 4.2 เพื่อใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการจำลองและผลของตำแหน่งติดตั้งใน ตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของระบบกักเก็บพลังงาน

ชนิดผลการทดลอง	ระบบปกติ	วิธีพันธุกรรมยีนต์ (GA)	วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)
Max pu. voltage	1.0822	1.0822	1.0822
Min pu. voltage	0.9912	0.99119	0.9912
Total Active Power (MW)	260.965	261.243	260.965
Total Reactive Power (Mvar)	-14.219	-14.2094	-14.219
Total Active Losses (MW)	17.5686	17.5901	17.5686
Total Reactive Losses (Mvar)	38.9264	39.0008	38.9264

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการหาขนาดและติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน

ชนิดผลการทดลอง	ระบบปกติ	วิธีพันธุกรรมยีนต์ (GA)	วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)
Power Losses (MW)	17.56	17.59	17.56
Sizing (kW)	-	1539	1000
Location (Bus number)	-	3	9

4.4 ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบ 30 บัส ควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า

ในระบบนี้จะทำการทดสอบหาควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้าพร้อมการเพิ่มประสิทธิภาพลดการสูญเสียพลังงาน ทดสอบหาค่าผลรวมของกำลังสูญเสียในระบบและทดสอบค่าเบี่ยงเบนแรงดันโหลด โดยผลของการหาค่านั้นจะแสดงในตารางที่ 4.4 เพื่อใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการจำลองและผลของตำแหน่งติดตั้งใน ตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของระบบกักเก็บพลังงาน 30 บัส แบบควบคุมแรงดัน

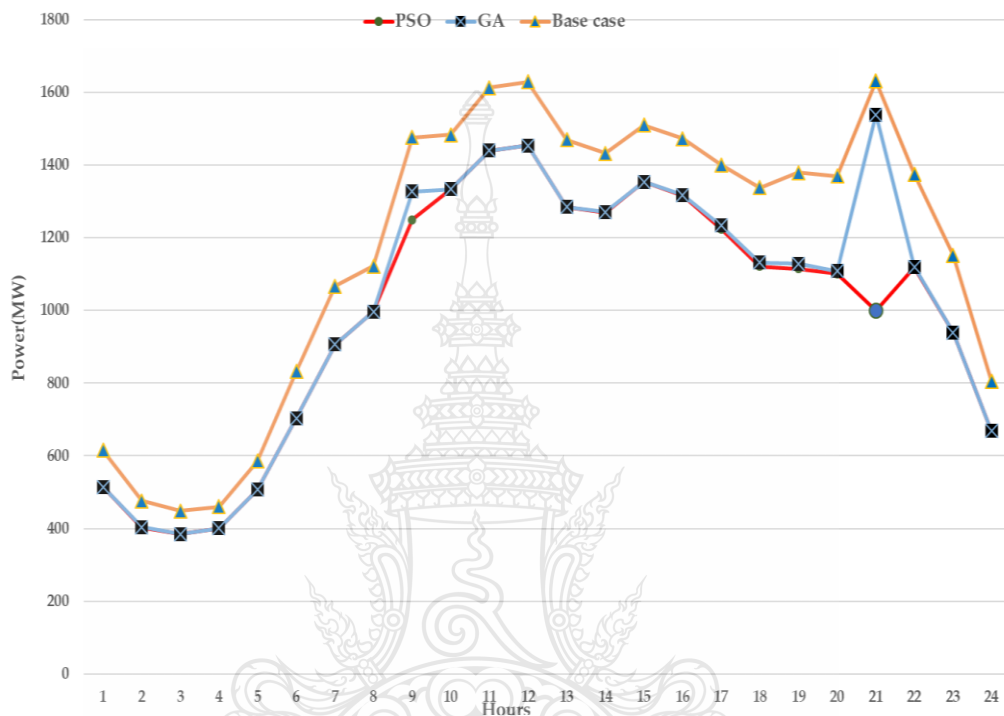
ชนิดผลการทดลอง	ระบบปกติ	วิธีพันธุกรรมยีนต์ (GA)	วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)
Max pu. voltage	1.0822	1.0822	1.0822
Min pu. voltage	0.9912	0.99119	0.9912
Total Active Power (MW)	260.965	261.243	260.965
Total Reactive Power (Mvar)	-14.2190	-14.2094	-14.2190
Total Active Losses (MW)	17.5686	17.5901	17.5686
Total Reactive Losses (Mvar)	38.9264	39.0008	38.9264

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังสูญเสียพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด

ระบบที่ใช้	การควบคุมขนาด แรงดันไฟฟ้า (24 ชม.) W	%	กำลังสูญเสียพลังงานไฟฟ้า ทั้งหมด (24 ชม.) MW	%
มาตรฐาน	40,862.38	0	376.779	0
GA	40,475.97	-0.31	24.666	-7.06
PSO	40,733.57	-0.95	24.611	-7.27

ผลการจำลองแสดงให้เห็นขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเมื่อกำหนดกำลังที่แท้จริงของ BESS ในกรณีฐานไว้ที่ 260.96 MW ของ GA คือ 261.24 MW และของ PSO เท่ากับ 260.96 MW ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลในสถานการณ์จำลองแต่ละประเภทพร้อมผลลัพธ์ที่มีแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ใช้งานทั้งหมด กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งหมด การสูญเสียแอคทีฟทั้งหมด การเปรียบเทียบ LVD ของการควบคุมโวลต์-วาร์ การสูญเสียพลังงานของอินเวอร์เตอร์ลดลงจากเคสพื้นฐาน , GA ที่ -0.31% และ PSO ที่ -0.95% ตามลำดับ การเปรียบเทียบ TEEL จากระบบมาตรฐานลดลงได้ดีที่สุดสำหรับ GA ที่ -7.06% และมากกว่า PSO ที่ -7.27% ตามลำดับ LVD เป็นปัจจัยสำคัญในการลดการสูญเสียพลังงานโดยใช้เงื่อนไขการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในระบบที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 BESS เปลี่ยนขนาดและตำแหน่งเมื่อพบว่ามีความแตกต่างใน p.u สูงสุด การเพิ่มการติดตั้ง BESS อาจทำให้โปรไฟล์โหลดรายวันในขณะทีลดความต้องการพลังงานในโหลดสูงสุดและการสูญเสียทั้งหมด BESS

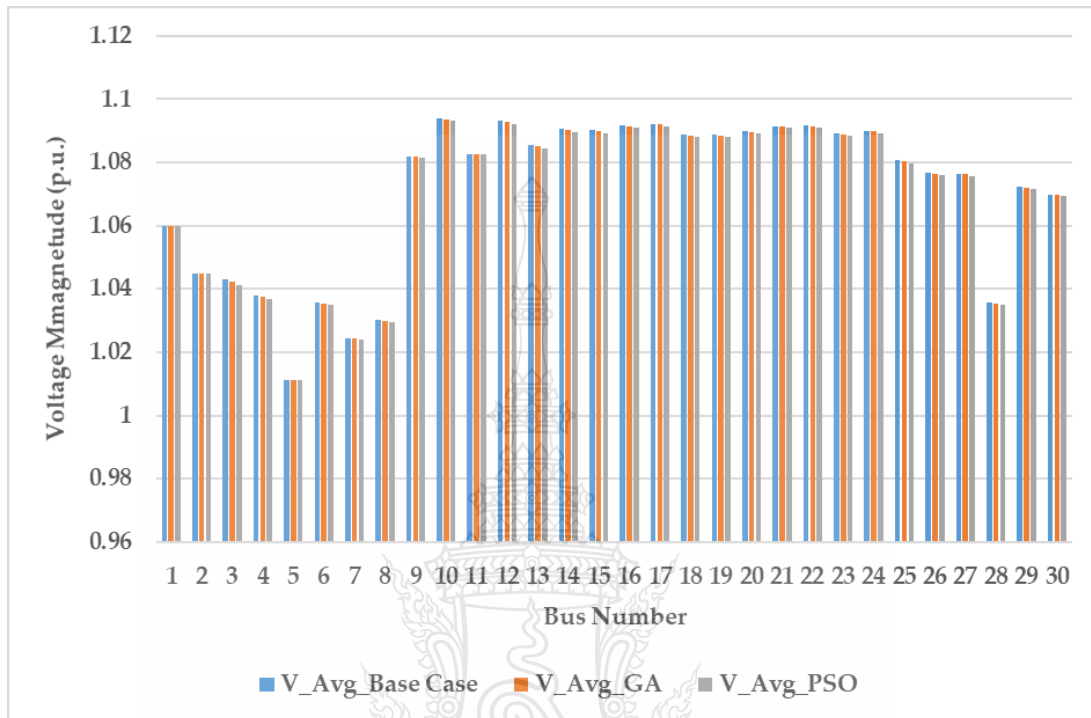
สามารถลดภาระสูงสุดของแหล่งพลังงานที่ทำงานอยู่ได้ภายใต้เงื่อนไขที่เชื่อมต่อกับกริด ในกรณีนี้ ตำแหน่ง BESS เปลี่ยนไปด้วย GA ในตาราง และ BESS ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่บัสหมายเลข 9 (1539 MW) ในขณะที่ BESS ที่เหมาะสมกับ PSO อยู่ที่บัสหมายเลข 3 (1,000 MW)



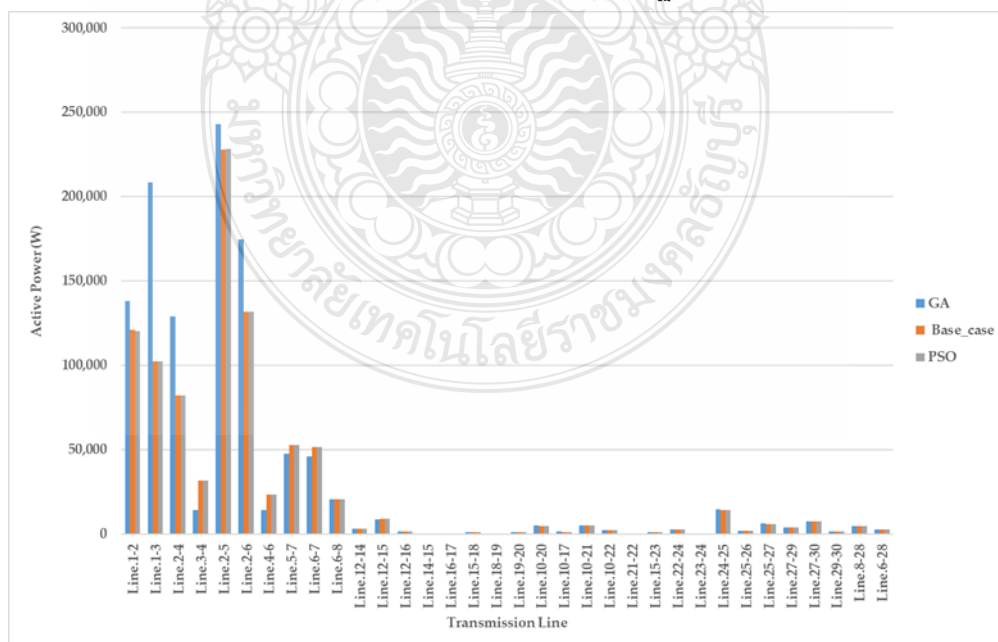
รูปที่ 4.13 โปรไฟล์โหลดรายวันขอความต้องการพลังงาน

จากรูปที่ 4.13 แสดงโปรไฟล์โหลดรายวันขอความต้องการพลังงาน ที่เกี่ยวข้องกับความ ต้องการสูงสุดของกริด ในกรณีของ PSO BESS สามารถส่งพลังงานกลับเข้าไปในระบบได้โดยใช้การ ใช้ สูงสุดสำหรับความต้องการโหลด ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ผลลัพธ์ของ BESS ที่รวมเข้ากับกริดโดยใช้ เทคนิค PSO ระบุว่าส่วนสำคัญคือ มีความยืดหยุ่น ให้การวางแผนการขยายการจัดจำหน่าย ดังนั้น ตารางที่ 4.4 แสดงผล BESS ด้วยค่าสูงสุด แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ใช้งานทั้งหมด กำลังไฟฟ้ารีแอก ทีฟทั้งหมด การสูญเสียแอนด์ทีฟทั้งหมด นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบระบบมาตรฐาน กรณี GA และกรณี PSO จาก BESS แบบรวมโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างระบบมาตรฐาน GA และ PSO ที่ติดตั้ง พร้อมโปรไฟล์โหลด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าที่ใช้งานและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟถูกเปรียบเทียบ ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ พลังงานที่ไม่ใช้งานที่ไม่ตรงกันอาจเกิดขึ้นจากเอฟ

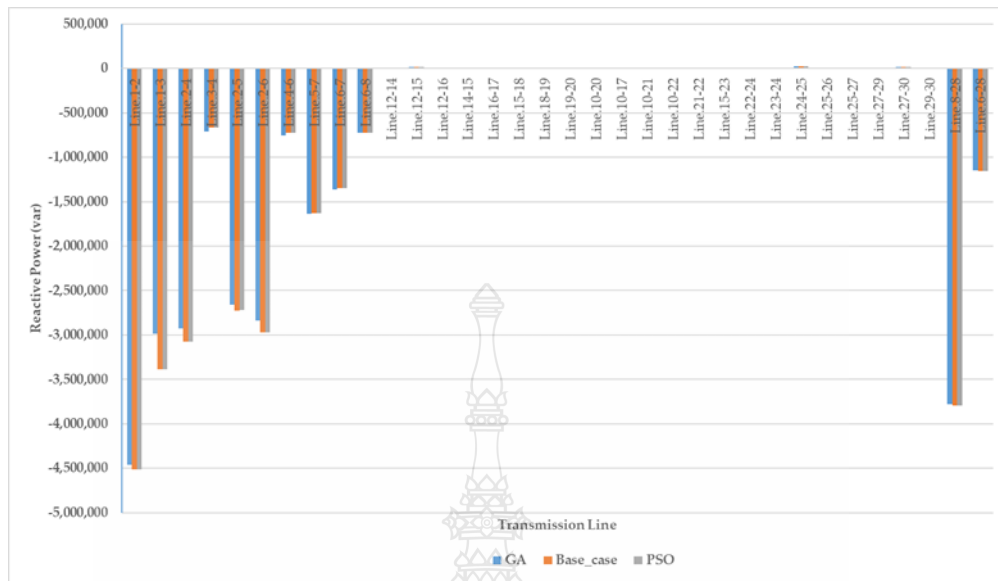
เฟกต์การสะท้อนของข้อต่อสายส่งสัญญาณ ซึ่งอาจนำไปใช้กับกำลังสูงสุดของเรโซแนนซ์ ผลการทดลองระบบได้รับการออกแบบและเปรียบเทียบกับระบบมาตรฐาน



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระบบมาตรฐาน กับ GA และ PSO



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน (active power)



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน (reactive power)

การออกแบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมที่สุดได้ดำเนินการภายใต้สถานะสมมาตร ซึ่งเป็นระบบพลังงานที่แสดงในรูปที่ 4.12 พลังงานที่ประหยัดได้เกิดขึ้นด้วยการทดสอบระบบบัสมাত্রฐาน IEEE 30 บัส โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งถูกนำไปใช้เพื่อให้เกิดความสมดุลของระบบ ในสถานะการชาร์จแบตเตอรี่แบบปกติ สามารถควบคุมและลดการสูญเสียพลังงานในระบบได้ โดยหลักการแล้ว แหล่งพลังงานถูกนำไปใช้โดยระบบการชาร์จที่มีการใช้พลังงานต่ำ สามารถกำหนดค่าได้ด้วยระบบกักเก็บพลังงานซึ่งมีความสมมาตร หมายความว่า การสูญเสียพลังงานในระบบสามารถสมดุลและบรรลุผลได้

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลดัชนีพนธ์

ดัชนีพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยทำการจำลองการวิเคราะห์ปัญหาของระบบไฟฟ้าแบบเบเรเดียล 3 กรณีศึกษา โดยในแต่ละกรณีศึกษาที่พิจารณาศึกษานั้นอยู่ในความสนใจและนำไปสู่การเรียนรู้ หรือแก้ไขปัญหาอย่างเหมาะสม ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ มากยิ่งขึ้นซึ่งสามารถสรุปผลที่ได้จากกรณีศึกษาในแต่ละกรณีดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 ในการศึกษาการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำการทดสอบการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบ IEEE 13 บัส เพื่อศึกษาผลกระทบในสภาวะพลวัตของระบบต่อการตอบสนองของการเพิ่มขึ้นของแหล่งกำเนิดพลังงานในระบบนั้นการควบคุมความถี่เสถียรภาพ มีการพิจารณาได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้ ค่าแรงดัน p.u. ในการติดตั้งไม่มีผลต่อระบบทั้งสองค่าคือค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.15 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.04 ค่ากำลังสูญเสียจริงมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.20 ค่ากำลังสูญเสียปรากฏมีผลต่อระบบในการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.25 จากผลการวิเคราะห์ที่มีนัยสำคัญคือ ในส่วนที่ค่าที่มีผลต่อระบบนั้นมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากในการติดตั้งระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่เข้าไปในระบบ IEEE 13 บัส

กรณีศึกษาที่ 2 วิเคราะห์ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีการด้วยวิธีพันธุกรรม(GA)และวิธีกลุ่มอนุภาค(PSO) นั้นวัตถุประสงค์โดยรวม คือ ต้องการพัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยในการวิเคราะห์ขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม เพื่อให้ให้เกิดความคล่องตัวในการวิเคราะห์ในปัญหาต่างๆด้วยโปรแกรมฟรีแวร์ นั้นคือโปรแกรม OpenDSS โดยเชื่อมต่อกับ MATLAB ในการพิจารณาสร้างแบบจำลองตามที่น่าเสนอในขั้นตอนการดำเนินการ ทำการทดสอบในระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 30 บัส เมื่อทำการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน โดยค่าแรงดัน p.u. ในการติดตั้งไม่มีผลต่อระบบทั้งสองค่าคือค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีผลต่อระบบในด้วยวิธีการ GA การเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.10 ส่วนวิธี PSO นั้นมีค่าเท่ากับ

ระบบมาตรฐาน ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏด้วยวิธีการ GA มีผลต่อระบบมีการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.06 ส่วนวิธี PSO นั้นมีค่าเท่ากับระบบมาตรฐาน ค่ากำลังสูญเสียจริงมีผลต่อระบบด้วยวิธีการ GA มีการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.001 ส่วนวิธี PSO นั้นมีค่าเท่ากับระบบมาตรฐาน ค่ากำลังสูญเสียปรากฏมีผลต่อระบบด้วยวิธีการ GA มีการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.001 ส่วนวิธี PSO นั้นมีค่าเท่ากับระบบมาตรฐาน กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมด้วยวิธีการ GA มีการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.001 ส่วนวิธี PSO นั้นมีค่าเท่ากับระบบมาตรฐาน จากผลการวิเคราะห์หมีนัยสำคัญ คือในส่วนที่ค่าที่มีผลต่อระบบนั้นมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ส่วนขนาดของแบตเตอรี่นั้นวิธีการ GA มีขนาด 1539 kW ตำแหน่งติดตั้งที่บัส ที่ 3 และขนาดของแบตเตอรี่นั้นวิธีการ PSO มีขนาด 1000 kW ตำแหน่งติดตั้งที่บัส ที่ 9 ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าวิธีการ GA

กรณีศึกษาที่ 3 วิเคราะห์ผลของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในระบบ 30 บัส ควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า การหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของ ระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังถูกใช้เพื่อแก้ปัญหาความต้องการโหลดสูงสุด ใช้เพื่อจ่ายพลังงานสนับสนุนให้กับกริด จุดประสงค์ คือ เพื่อใช้ระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังในการรองรับโหลดสูงสุดภายใต้เงื่อนไขของการระบุตำแหน่งที่เหมาะสมและขนาดที่เล็กที่สุด บรรลุเป้าหมายวัตถุประสงค์โดยใช้ GA, PSO เวลาเริ่มต้นรายวันสำหรับการอัดประจุสำหรับ BESS ถูกกำหนดตามขนาดความน่าจะเป็นและตำแหน่ง ผลการจำลองแสดงให้เห็นขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเมื่อระดับการเจาะของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังแตกต่างกัน การปรับขนาดและตำแหน่งระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธี GA ได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 1,539 kW ที่บัสหมายเลข 3 และวิธี PSO ได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 1,000 kW ที่บัสหมายเลข 9 ปัจจัยหลักเกี่ยวกับการจัดวางระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังที่เหมาะสมที่สุดถูกใช้เพื่อลดภาระสูงสุดต่อความต้องการพลังงานทั้งหมดบนกริด แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้ากำลังแสดงความแปรปรวนมากขึ้นในวงกว้างเมื่อระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมต่อกับระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การจัดวางระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังที่เหมาะสมที่สุดที่ระดับการเจาะต่ำสามารถเพิ่มขนาดได้ อย่างไรก็ตามภายใต้เงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ สามารถปรับปรุงได้ แต่ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังต้องถูกจำกัดเพื่อไม่ให้เกินความต้องการจากกริด ดังนั้นการวิจัยในอนาคตจึงสามารถประเมินผลกระทบของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายประเภทลงในกริด โดยดำเนินการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและควบคุมเป็นอนุกรมเวลา ระบบ IEEE 30 บัส เป็นระบบมาตรฐานที่ใช้ยืนยันระบบการติดตั้งที่ใช้ ซึ่งการเปรียบเทียบด้วยระบบ IEEE 30 บัส ถือเป็นข้อดีของการสร้างแบบจำลอง

ดุษฎีนิพนธ์นี้ได้รับการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้รูปแบบระบบมาตรฐานสำหรับเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง โดยได้ทำการศึกษาผลกระทบของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของระบบวิเคราะห์ความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในแต่ละกรณีศึกษาที่นำเสนอการหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาให้เกิดความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ นำไปสู่การประยุกต์ใช้งานในแต่ละด้านในการแก้ไขปัญหาต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลัง และการเพิ่มความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวม ในการรองรับการขยายตัวของการเพิ่มขึ้นของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในอนาคต รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจริงในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลของการไฟฟ้า ประกอบการออกแบบหรือปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังและวางแผนการด้านการบริหารจัดการพลังงานได้อย่างเหมาะสมในลำดับถัดไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ดุษฎีนิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของระบบสำรองพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ ต่อความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในแต่ละกรณีศึกษาโดยในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า นั้นเป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบคงตัว (Static Analysis) ในสภาวะโหลดสมดุล (Balanced load) ซึ่งยังขาดการวิเคราะห์ปัญหาในรูปแบบสภาวะไม่สมดุล (Unbalanced load) จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต และการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เช่น Probabilistic Load Flow หรือการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการ Quasi-Dynamic Simulation เป็นต้น รวมถึงปรับปรุงในส่วนของฟังก์ชันเป้าหมายในวิธีการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการต่างๆ ให้เกิดความหลากหลายและครอบคลุมต่อการแก้ไขปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคต

ดุษฎีนิพนธ์นี้ได้รับการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้รูปแบบระบบมาตรฐานสำหรับเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง โดยได้ทำการศึกษาผลกระทบของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของระบบวิเคราะห์ความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในแต่ละกรณีศึกษาที่นำเสนอการหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาให้เกิดความรู้

ความเข้าใจในพฤติกรรมของระบบสำรองพลังงานแบบแบตเตอรี่ นำไปสู่การประยุกต์ใช้งานในแต่ละด้านในการแก้ไขปัญหาต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลัง และการเพิ่มควมมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวม ในการรองรับการขยายตัวของการเพิ่มขึ้นของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในอนาคต รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจริงในระบบจำหน่ายแบบเรียลไทม์ของการไฟฟ้า ประกอบการออกแบบหรือปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังและวางแผนการด้านการบริหารจัดการพลังงานได้อย่างเหมาะสมในลำดับถัดไป



บรรณานุกรม

- [1] ประกาศิต ปราบพาล, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. “แบบจำลองของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคล”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, 2-4 พฤษภาคม 2560.
- [2] Y. Yang, H. Li, A. Aichhorn, J. Zheng, M. Greenleaf, "Sizing strategy of distributed battery storage system with high penetration of photovoltaic for voltage regulation and peak load shaving," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 982–991, 2014.
- [3] Haoran Zhao, Qiuwei Wu, Shuju Hu, Honghua Xu, and Claus Nygaard Rasmussen, "Review of energy storage system for wind power integration support," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 545–553, 2015.
- [4] A. Castillo, D.F. Gayme, "Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: a survey," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 885–894, 2014.
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, "โครงการศึกษาประเมินและจัดทำแผนงานวิจัยพลังงานทดแทน (Energy Storage)," 2555.
- [6] Yuqing Yanga, Stephen Bremnera, Chris Menictasb, and Merlinda Kay, "Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 109–125, 2018.
- [7] Atwa YM, El-Saadany EF, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 1815–1822, 2010.
- [8] Fathima AH, Palanisamy K, "Optimization in microgrids with hybrid energy systems – a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 431–46, 2015.
- [9] Prabpal P, Kongjeen Y, Bhumkittipich K. "Optimal Battery Energy Storage System Based on VAR Control Strategies Using Particle Swarm Optimization for Power Distribution System," *Symmetry*. 13(9):1692. <https://doi.org/10.3390/sym13091692>. 2021.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Mahmoud MS, Rahman MSU, Sunni FMAL, "Review of microgrid architectures – a system of systems perspective," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9 pp.1064-1078, 2015.
- [11] Rodrigues EMG, Osório GJ, Godina R, Bizuayehu AW, Lujano-Rojas JM, Matias JCO, et al, "Modelling and sizing of NaS (sodium sulfur) battery energy storage system for extending wind power performance in Crete Island," *Energy*, vol. 90, pp. 1606-1617, 2015.
- [12] Zafirakis D, Chalvatzis KJ, Baiocchi G, et al, "Modeling of financial incentives for investments in energy storage systems that promote the large-scale integration of wind energy", *Apply Energy*, vol. 105, pp. 54-138, 2013.
- [13] Madlener R, Latz J, "Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power," *Apply Energy*, vol. 101, pp. 299-309, 2013.
- [14] Wang L, Yu JY, Chen YT, "Dynamic stability improvement of an integrated off shore wind and marine-current farm using a flywheel energy-storage system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5 (5), pp. 96-387, 2011.
- [15] K.C. Divya, Jacob Østergaard, "Battery energy storage technology for power systems : An overview," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 511-520, 2009.
- [16] Le HT, Santoso S, Nguyen TQ, "Augmenting wind power penetration and grid voltage stability limits using ESS: application design, sizing, and a case study", *IEEE Transactions on Power System*, vol. 27(1), pp. 71–161, 2012.
- [17] Liang L, Jianlin L, Dong H, "An optimal energy storage capacity calculation method for 100 MW wind farm", *International conference on power system technology*, 2010, pp 1-4.
- [18] Tam KS, Kumar P, "Application of superconductive magnetic energy storage in an asynchronous link between power systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5(3), pp. 44–436, 1990.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] A. Sharma et al., "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 318–345, 2009.
- [20] Jenkins DP, Fletcher J, Kane D, "Lifetime prediction and sizing of lead–acid batteries for microgeneration storage applications", *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, pp. 191–200, 2008.
- [21] Hussein AA, Kutkut N, Shen ZJ, Batarseh I, "Distributed battery micro-storage systems design and operation in a deregulated electricity market", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, pp. 56–545, 2012.
- [22] Ru Y, Kleissl J, Martinez S, "Storage size determination for grid- connected photovoltaic systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 68–81, 2013.
- [23] Wang W, Mao C, Lu J, Wang D, "An energy storage system sizing method for wind power integration", *Energies*, vol. 4, pp. 3392–3404, 2013.
- [24] Yang Y, Li H, Aichhorn A, Zheng J, Greenleaf M, "Sizing strategy of distributed battery storage system with high penetration of photovoltaic for voltage regulation and peak load shaving", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 91–982, 2014.
- [25] Jenkins DP, Fletcher J, Kane D, "Lifetime prediction and sizing of lead–acid batteries for microgeneration storage applications", *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, pp. 191–200, 2008.
- [26] Zheng Y, Dong ZY, Luo FJ, Meng K, Qiu J, Wong KP, "Optimal Allocation of Energy Storage System for Risk Mitigation of DISCOs With High Renewable Penetrations", *IEEE Transactions on Power System*, vol. 29, pp. 212–220, 2014.
- [27] Schneider M, Biel K, Pfaller S, Schaede H, Rinderknecht S, Glock CH. "Using inventory models for sizing energy storage systems : an interdisciplinary approach", *Journal of Energy Storage*, vol. 8, pp. 339–348, 2016

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] Zhang Y, Dong ZY, Luo F, Zheng Y, Meng K, Wong KP, "Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration", *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, pp. 1105-1113, 2016.
- [29] T. J. A. Abreu, P. Agamez-Arias and V. Miranda, "Battery Storage Sizing and Location in Distribution Systems," 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2019, pp. 1- 6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8894980.
- [30] Chen C, Duan S, Cai T, Liu B, Hu G, "Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 2762–2773, 2011.
- [31] Chen SX, Gooi HB, Wang MQ, "Sizing of energy storage for microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 142-151, 2012.
- [32] Bahramirad S, Daneshi H, "Optimal sizing of smart grid storage management system in a microgrid", *Proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1–7.
- [33] Bahramirad S, Reder W, Khodaei A, "Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 2056-2062, 2012.
- [34] Kerdphol T, Qudaih Y, Mitani Y. Battery energy storage system size optimization in microgrid using particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2014, pp 1–6.
- [35] Nguyen TA, Crow ML, Elmore AC, "Optimal sizing of a vanadium redox battery system for microgrid systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 729-737, 2015.
- [36] Gao DW, "Sizing of energy storage systems for microgrids", *Energy storage sustain. Microgrid*, Academic Press, 2015. p. 125–42.
- [37] Fossati JP, Galarza A, Martín-Villate A, Fontán L, "A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids", *Renew Energy*, vol. 77, pp. 539–549, 2015.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [38] Khorramdel H, Aghaei J, Khorramdel B, Siano P, "Optimal battery sizing in microgrids using probabilistic unit commitment" , *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, pp. 834–843, 2016.
- [39] P. Paliwal, "Determining optimal component sizes for an isolated solar-battery micro-grid using Butterfly PSO," 2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE) , 2021, pp. 1- 6, doi: 10.1109/ICPEE50452.2021.9358614.
- [40] Korpaas M, Holen AT, Hildrum R, "Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, pp. 599–606, 2003.
- [41] Wang XY, Mahinda Vilathgamuwa D, Choi SS, "Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 868–878, 2008.
- [42] Pinson P, Papaefthymiou G, Klockl B, Verboomen J, "Dynamic sizing of energy storage for hedging wind power forecast uncertainty", *In: Proceedings of IEEE power energy soc. gen. meet*, 2009. p. 1–8.
- [43] Bludszuweit H, Dominguez-Navarro JA, "A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power Forecast uncertainty", *IEEE Transactions on Power System*, vol. 26, pp. 1651–1658, 2011.
- [44] Brekken TKA, Yokochi A, Von Jouanne A, Yen ZZ, Hapke HM, Halamay DA. Optimal energy storage sizing and control for wind power applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2(69), pp. 69–77, 2011.
- [45] Etherden N, Bollen MHJ, "Dimensioning of energy storage for increased integration of wind power", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 546–553, 2013.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [46] Wu J, Zhang B, Li H, Li Z, Chen Y, Miao X, "Statistical distribution for wind power forecast error and its application to determine optimal size of energy storage system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 100–107, 2014.
- [47] Yue M, Wang X, "Grid inertial response-based probabilistic determination of energy storage system capacity under high solar penetration", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 1039–1049, 2015.
- [48] Li P, Dargaville R, Liu F, Xia J, Song YD, "Data-Based Statistical Property Analyzing and Storage Sizing for Hybrid Renewable Energy Systems", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 62, pp. 6996–7008, 2015.
- [49] Johnston L, Díaz-González F, Gomis-Bellmunt O, Corchero-García C, CruzZambrano M, "Methodology for the economic optimisation of energy storage systems for frequency support in wind power plants", *Applied Energy*, vol. 137, pp. 660–669, 2015.
- [50] Shokrzadeh S, Jafari Jozani M, Bibeau E, Molinski T, "A statistical algorithm for predicting the energy storage capacity for baseload wind power generation in the future electric grids", *Energy*, vol. 89, pp. 793–802, 2015.
- [51] J Cervone A, Carbone G, Santini E, Teodori S, "Optimization of the battery size for PV systems under regulatory rules using a Markov-Chains approach", *Renew Energy*, vol. 85, pp. 657–665, 2016.
- [52] Abbey C, Joos G. A stochastic optimization approach to rating of energy storage systems in wind-diesel isolated grids. *IEEE Transactions on Power System*, vol. 24, pp.418-426, 2009.
- [53] Ross M, Hidalgo R, Abbey C, Joos G, "Analysis of Energy Storage sizing and technologies", *Proceedings of power energy conference (EPEC) IEEE*, 2010, p. 1–6.
- [54] Birnie III DP, "Optimal battery sizing for storm-resilient photovoltaic power island systems", *Solar Energy*, vol. 109, pp.165-173, 2014.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [55] Alex Z, Clark A, Cheung W, Zou L, Kleissl J, "Minimizing the lead-acid battery bank capacity through a solar PV - wind turbine hybrid system for a high-altitude village in the nepal himalayas", *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1516–1525, 2014.
- [56] Luo Y, Shi L, Tu G, "Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system", *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 407-415, 2014.
- [57] Dragicevic T, Pandzic H, Skrllec D, Kuzle I, Guerrero JM, Kirschen DS, "Capacity optimization of renewable energy sources and battery storage in an autonomous telecommunication facility", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 1367-1378, 2014.
- [58] Aghamohammadi MR, Abdolahinia H, "A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded Microgrid", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 325-333, 2014.
- [59] Rodrigues EMG, Osório GJ, Godina R, Bizuayehu AW, Lujano-Rojas JM, Matias JCO, et al, "Modelling and sizing of NaS (sodium sulfur) battery energy storage system for extending wind power performance in Crete Island", *Energy*, vol. 90, pp. 1606-1617, 2015.
- [60] J Shang C, Srinivasan D, Reindl T, "An improved particle swarm optimisation algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 74, pp. 104-117, 2016.
- [61] Atwa YM, El-Saadany EF, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy", *IEEE Transactions on Power System*, vol. 25, pp.1815–1822, 2010.
- [62] P. Mercier, R. Cherkaoui, A. Oudalov, "Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system", *IEEE Transactions on Power System*, vol. 24, pp.1469-1477, 2009.

บรรณานุกรม (ต่อ)

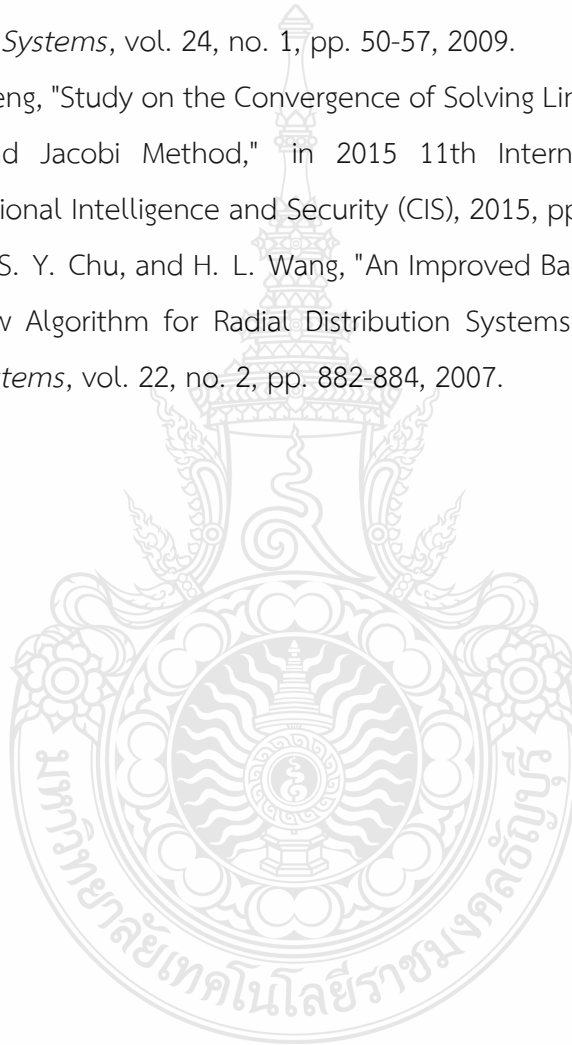
- [63] R. Watanabe, Y. Ito, Y. Hida, R. Yokoyama, K. Iba and T. Tsukada, "Optimal capacity selection of hybrid energy storage systems for suppressing PV output fluctuation," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303135.
- [64] Hongjie Jia, Yunfei Mu, Yan Qi, "A statistical model to determine the capacity of battery-supercapacitor hybrid energy storage system in autonomous microgrid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol 54, pp. 516-524, 2014, doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.025.
- [65] H. Nazaripouya, Y. Wang, P. Chu, H. R. Pota and R. Gadh, "Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation," *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286059.
- [66] Yue Yuan, Chengchen Sun, Mengting Li, San Shing Choi, Qiang Li, "Determination of optimal supercapacitor-lead-acid battery energy storage capacity for smoothing wind power using empirical mode decomposition and neural network", *Electric Power Systems Research*, Vol127, pp.323-331,2015, doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.015.
- [67] H. Bitaraf, S. Rahman and M. Pipattanasomporn, "Sizing Energy Storage to Mitigate Wind Power Forecast Error Impacts by Signal Processing Techniques," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1457-1465, Oct. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2015.2449076.
- [68] Guishi Wang, Mihai Ciobotaru, Vassilios G. Agelidis, "Optimal capacity design for hybrid energy storage system supporting dispatch of large-scale photovoltaic power plant", *Journal of Energy Storage*, Vol 3, pp. 25-35, 2015, doi.org/10.1016/j.est.2015.08.006.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [69] Pan Zhao, Jiangfeng Wang, Yiping Dai, "Capacity allocation of a hybrid energy storage system for power system peak shaving at high wind power penetration level", *Renewable Energy*, Vol 75, pp. 541- 549, 2015, doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.040.
- [70] Xiao J, Zhang Z, Bai L, Liang H. Determination of the optimal installation site and capacity of battery energy storage system in distribution network integrated with distributed generation. *IET Gener Transm Distrib*;10:601–7. 2016, doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0130.
- [71] Pan Zhao, Jiangfeng Wang, Yiping Dai, "Capacity allocation of a hybrid energy storage system for power system peak shaving at high wind power penetration level", *Renewable Energy*, Vol 75, pp 541-549, 2015, doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.040.
- [72] ยุทธนา อุดมผุย, ณัฐพงษ์ ศรีสวัสดิ์, ประกาศิต ปราบพาล, ฤกษ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, "วงจรมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า", การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1 วันที่ 28-29 มิถุนายน 2560, ณ โรงแรม Garden cliff Resort & Spa พัทยาชลบุรี.
- [73] ประกาศิต ปราบพาล, ฤกษ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, "แบบจำลองผลของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคล", การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ 7 - 8 ธันวาคม 2560, โรงแรมเคปราช่า อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี.
- [74] P. Prabpal, K. Bhummikittipich and Tetsunori Haraguchi, "Electrical Modeling of Nickel-Metal Hydride Batteries for Personal Electric Vehicles", *Current Applied Science and Technology*, Vol. 19, No. 2, pp 80-88, 2019.
- [75] Suleiman Abu-Sharkh, Dennis Doerffel, "Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, vol. 130, pp. 226-274, 2004.
- [76] พิพัฒน์ คุรงคดำรงชัย.(2557). ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอที่เหมาะสมสำหรับระบบไฮโดร-เทอร์มอลโดยวิธีฝูงผึ้ง. (คุชชินพนธ์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม).

บรรณานุกรม (ต่อ)

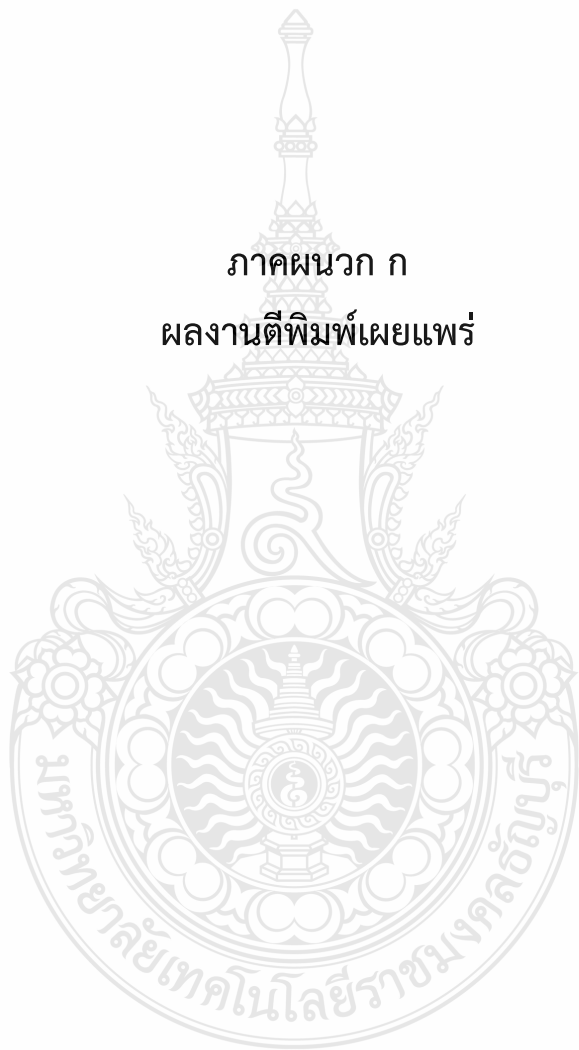
- [77] H. Le Nguyen, "Newton-Raphson method in complex form power system load flow analysis]," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1355-1359, 1997.
- [78] F. Milano, "Continuous Newton's Method for Power Flow Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 50-57, 2009.
- [79] H. Liu and T. Feng, "Study on the Convergence of Solving Linear Equations by Gauss-Seidel and Jacobi Method," in 2015 11th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), 2015, pp. 100-103.
- [80] G. W. Chang, S. Y. Chu, and H. L. Wang, "An Improved Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 882-884, 2007.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



บทความวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1. **P. Prabpal**, K. Bhumkittipich, “Modeling of Temperature Effect on Lithium – Ion battery for Personal Electric Vehicle”, 13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, 1st-4th December, 2016, Centara Hotel & Convension Centre Udon Thani, Thailand.
2. **ประกาศิต ปราบพาล**, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, “แบบจำลองของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคล”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2560 ณ โรงแรม เคพี แกรนด์ จันทบุรี.
3. ยุทธนา อุดมผุย, ณัฐพงษ์ ศรีสวัสดิ์, **ประกาศิต ปราบพาล**, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, “วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า”, การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1, วันที่ 28-29 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรม Garden Cliff Resort & Spa พัทยา ชลบุรี.
4. ปรีดิ์ป ปิ่นวันนา, ภาณุวัฒน์ ราชสีห์, **ประกาศิต ปราบพาล**, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, “การวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม/ขนานของการโอนย้ายพลังงานแบบเหนี่ยวนำสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า”, การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1, วันที่ 28-29 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรม Garden Cliff Resort & Spa พัทยา ชลบุรี.
5. **ประกาศิต ปราบพาล**, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, “แบบจำลองผลของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคล”, การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ, 7 - 8 ธันวาคม 2560 โรงแรมเคปราช่า อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี.
6. **P. Prabpal**, K. Bhumkittipich, “Electrical Modeling of 9.6V-14.4V 6.5Ah Nickel Metal Hydride Batteries for Personal Electric Vehicles Using MATLAB/Simulink”, 4th Internation Conference on Advanced Eletromaterrials, 21st-24th November, 2017, Ramada Plaza jeju Hotel, Jeju, Korea.

7. **P. Prabpal**, K. Bhumkittipich, “ Battery Energy Storage of Photovoltaic System for Voltage Regulation and Peak Load Shaving”, 14th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, 3rd-6th April, 2018, Kyoto University, Japan.
8. **P. Prabpal**, K. Bhumkittipich and Tetsunori Haraguchi, “Electrical Modeling of Nickel-Metal Hydride Batteries for Personal Electric Vehicles” , *Current Applied Science and Technology*, Vol. 19 No. 2, (May – August) 2019.
9. **Prakasit Prabpal**, Yuttana Kongjeen, and Krischonme Bhumkittipich, “Impact of Battery Energy Storage System integrated with Distributed Generation based on Large-Scale Photovoltaic System”, 2nd International Conference on Applied Science, Engineering and Interdisciplinary Studies 2018 (2nd ASEIS 2019), July 4, 2019, Pathumthani, Thailand.
10. **Prakasit Prabpal**, Yuttana Kongjeen, and Krischonme Bhumkittipich, “ Impact of Battery Energy Storage System Integrated Distributed Generation based on Standalone Renewable Energy System” , The 7th International Symposium on Frontier Technology, 24th -25th August 2019, Ambassador City Jomtien, Pattaya, Thailand.
11. **Prakasit Prabpal**, Yuttana Kongjeen, and Krischonme Bhumkittipich, “Optimal Sizing and Allocation of Battery Energy Storage System Integrated in Distribution Using Particle Swarm Optimization” , GMSARN Int. Conf. on Smart Energy, Environment, and Development for Sustainable GMS, 27-29 November 2019, Grand Luang Prabang, Luang Prabang City, Lao PDR.
12. **Prakasit Prabpal**, Yuttana Kongjeen, and Krischonme Bhumkittipich, “Optimal Battery Energy Storage System Based on VAR Control Strategies Using Particle Swarm Optimization for Power Distribution System” , *Symmetry*, 13, 1692, doi.org/10.3390/sym13091692, 2021.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	ประกาศิต ปราบพาล
วัน เดือน ปีเกิด	11 มิถุนายน 2528
ที่อยู่	160 ม.2 บ้านผักบั้ง ต.กลางใหญ่ อ.บ้านผือ จ.อุดรธานี 41160
การศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประกาศนียบัตรวิชาชีพครู (ปว.ค.) มหาวิทยาลัยอีสาน ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2551 - 2554 ครู พิเศษ ประจำ แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษกอุดรธานี พ.ศ. 2554 - 2559 อาจารย์ ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย พ.ศ. 2559 - 2564 รับราชการครู โรงเรียนปากเกร็ด สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษา นนทบุรี กระทรวงศึกษาธิการ พ.ศ. 2564 – ปัจจุบัน รับราชการครู วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 กระทรวงศึกษาธิการ