

การออกแบบความถี่ยืมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มสมรรถนะการ  
ตอบสนองเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังขณะเปลี่ยนผ่านไปสู่โหมดแยกโดด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

VIRTUAL INERTIA DESIGN FOR BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM TO INCREASE  
FREQUENCY RESPONSE PERFORMANCE OF POWER SYSTEM DURING TRANSITION TO  
ISLANDING MODE



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบความถี่เอชเอ็มไอสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังขณะเปลี่ยนผ่านไปสู่โหมดแยกโดด
โดย	นายกรณ ศุภหัตถานุกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์พล จีรพงศานานุรักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์พล จีรพงศานานุรักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนวัช แสงสว่าง)

กรณี ศุภหัตถานุกูล : การออกแบบความเฉื่อยเสมือนสำหรับระบบกักเก็บพลังงาน  
 แบตเตอรี่เพื่อเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังขณะเปลี่ยน  
 ผ่านไปสู่โหมดแยกโดด. ( VIRTUAL INERTIA DESIGN FOR BATTERY ENERGY  
 STORAGE SYSTEM TO INCREASE FREQUENCY RESPONSE PERFORMANCE OF  
 POWER SYSTEM DURING TRANSITION TO ISLANDING MODE) อ.ที่ปรึกษาหลัก :  
 อ. ดร.พิสิษฐ์พล จิรพวงศานานุรักษ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ

ในปัจจุบัน ระบบไฟฟ้าบางพื้นที่ที่กำลังการผลิตเพียงพอที่จะเดินเครื่องในรูปแบบแยก  
 โดดในกรณีที่ระบบไฟฟ้าหลักไม่พร้อมเชื่อมต่อ แต่ยังไม่สามารถทำได้เนื่องจากหลายปัจจัย  
 โดยเฉพาะด้านเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ปัญหาโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำซึ่งเกิดจาก  
 สัดส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เพิ่มสูงขึ้นหรือขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครมส์ที่มี  
 ขนาดเล็กในระบบขณะแยกโดดเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะก่อให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงความถี่  
 เมื่อเกิดการรบกวนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขณะที่ระบบไฟฟ้ากำลังเปลี่ยนผ่านไปสู่โหมดแยกโดด  
 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการนำระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มาใช้เพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการ  
 ตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบแยกโดด โดยออกแบบความเฉื่อยเสมือนผ่านตัวควบคุมด้วย  
 เทคนิค Linear Quadratic Regulation (LQR) ผลการทดสอบพบว่า แบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วย  
 ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยเทคนิค LQR ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อยกว่าแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มี  
 ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยคงที่ ในขณะที่พลังงานที่ใช้มีค่าต่างกันไม่มากนักโดยที่ขนาดการ  
 เบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลายังอยู่ในค่าที่มาตรฐานกำหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6070105421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: virtual inertia, battery energy storage system, frequency response performance, islanding operation

Gorn Suphahatthanukul : VIRTUAL INERTIA DESIGN FOR BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM TO INCREASE FREQUENCY RESPONSE PERFORMANCE OF POWER SYSTEM DURING TRANSITION TO ISLANDING MODE. Advisor: Pisitpol Chirapongsananurak, Ph. D. Co-advisor: Assoc. Prof. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D.

Nowadays, power systems in some areas have a potential for operating in an islanding mode. However, there are many factors making the islanding system unstable and unsecure. One of the problems is the low inertia situation resulting from a high PV penetration or a low synchronous machine rating when operating in islanding mode, which could cause frequency instability when the islanding system is disturbed, especially, during the power system is transferring from a grid-connected mode to an islanding mode. This thesis proposes the use of a battery energy storage system to increase the frequency response performance of an islanding system by designing a controller using LQR technique. The results reveal that the battery controlled by the LQR-technique controller consumes less maximum power than the battery controlled by the constant virtual inertia technique whereas the used energy is significantly indifferent, which affects the cost of the battery energy storage system whereas the maximum of the system frequency deviation and the rate of change of frequency do not violate the frequency standard.

Field of Study: Electrical Engineering

Academic Year: 2018

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร. พิสิษฐ์พล จิรพจนานุกรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้ตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนวัช แสงสว่าง ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยในการนำเสนอผลงานทางวิชาการ ตลอดจนนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังทุกท่านที่ให้อำนาจใจ ความคิดเห็น และ ตรวจทานแก้ไขข้อผิดพลาดในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนพี่น้อง เพื่อนๆ ทุกคนของผู้วิจัยที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กรณ์ ศุภหัตถานุกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับร่างวิทยานิพนธ์ .....	3
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานสำหรับการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง .....	6
2.1 สมการการแกว่ง.....	6
2.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาความถี่เชิงพลวัต .....	7
2.2.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด .....	8
2.2.2 แบบจำลองต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว .....	9
2.2.3 แบบจำลองสมดุลงำลังไฟฟ้าและความถี่ของระบบ.....	11
2.3 การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง .....	12

2.3.1 การตอบสนองขั้นปฐมภูมิ .....	12
2.3.2 การตอบสนองขั้นทุติยภูมิ .....	13
2.4 ดัชนีชี้วัดการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ.....	14
บทที่ 3 การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	17
3.1 แนวคิดพื้นฐาน.....	17
3.2 การควบคุมความถี่ด้วยความเฉื่อยเสมือน.....	18
3.3 การควบคุมความถี่ด้วยค่าคงที่ลักษณะรูป.....	19
3.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	20
3.4.1 ควบคุมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส .....	21
3.4.2 ควบคุมจากสมการการแกว่ง .....	22
3.4.3 ควบคุมจากสมการ ความถี่ – กำลังไฟฟ้า .....	23
3.4.4 ควบคุมจากสมการลักษณะรูป.....	23
บทที่ 4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบความเฉื่อยเสมือนเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่.....	25
4.1 การศึกษาผลกระทบจากการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน.....	25
4.1.1 ระบบที่ใช้ศึกษาผลกระทบของการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน .....	25
4.1.2 ผลการศึกษาผลกระทบ .....	27
4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบความเฉื่อยเสมือน .....	28
4.2.1 การศึกษาที่ 1 การศึกษาขณะระบบเปลี่ยนผ่านไปสู่อิมพีแดนซ์แยกโดด .....	29
4.2.1.1 ระบบที่ใช้ทดสอบในการศึกษาที่ 1.....	29
4.2.1.2 ผลการศึกษาที่ 1 .....	31
4.2.2 การศึกษาที่ 2 การศึกษาขณะระบบกำลังเดินเครื่องแบบแยกโดด.....	34
4.2.2.1 ระบบที่ใช้ทดสอบในการศึกษาที่ 2.....	34



4.2.2.2 ผลการศึกษาที่ 2 .....	35
บทที่ 5 การออกแบบความเฉื่อยเสมือนของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค LQR .....	39
5.1 การกำหนดรูปแบบปัญหา .....	39
5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบ .....	40
5.3 การประยุกต์ใช้เทคนิค LQR.....	42
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรถ่วงน้ำหนักกับตัวแปรสถานะ .....	42
5.5 วิธีการนำเทคนิค LQR ไปควบคุมแบตเตอรี่ .....	43
บทที่ 6 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล .....	45
6.1 ระบบทดสอบและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	45
6.2 วิธีทดสอบและผลการทดสอบ .....	46
6.2.1 การทดสอบที่ 1 การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่อกับระบบหลัก .....	47
6.2.2 การทดสอบที่ 2 การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังรับกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนผ่าน ไปสู่โหมดแยกโดด .....	50
6.2.3 การทดสอบที่ 3 การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนผ่าน ไปสู่โหมดแยกโดด .....	54
6.2.4 การทดสอบที่ 4 การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังเดินเครื่องแบบแยกโดด .....	58
6.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	63
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	65
7.1 บทสรุป .....	65
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	66
บรรณานุกรม.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	72

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ.....	26
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน ..	26
ตารางที่ 3 สรุปผลการศึกษาผลกระทบเมื่อเดินเครื่องที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน.....	27
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการศึกษาที่ 1 .....	30
ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ ใช้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของการศึกษาที่ 1 .....	34
ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ ใช้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของการศึกษาที่ 2.....	38
ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 1 .....	48
ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 2 .....	50
ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักของการทดสอบที่ 2 .....	51
ตารางที่ 10 ตารางสรุปผลการทดสอบที่ 2 .....	54
ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักของการทดสอบที่ 3.....	55
ตารางที่ 12 ตารางสรุปผลการทดสอบที่ 3.....	58
ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 4 .....	59
ตารางที่ 14 ตารางแสดงค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักของการทดสอบที่ 4.....	60
ตารางที่ 15 ตารางสรุปผลการทดสอบที่ 4 .....	63

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระบบควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส .....	8
รูปที่ 2.2 แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	8
รูปที่ 2.3 แบบจำลองพลวัตของโหลด.....	9
รูปที่ 2.4 แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด .....	9
รูปที่ 2.5 แบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วและอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกล.....	10
รูปที่ 2.6 ลักษณะद्रูปอดมคติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 2.7 แบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส .....	11
รูปที่ 2.8 แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ขั้นปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	13
รูปที่ 2.9 ลักษณะद्रูปอดมคติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อปรับกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง.....	14
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างความถี่ของระบบที่เหมาะสมในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2.11 ความถี่ของระบบเมื่อเกิดการรบกวนที่มีความรุนแรงต่างกัน.....	16
รูปที่ 3.1 แนวคิดสำหรับการควบคุมแบตเตอรี่ให้ช่วยตอบสนองเชิงความถี่.....	18
รูปที่ 3.2 แบบจำลองพลวัตของแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยสมการการแกว่ง .....	19
รูปที่ 3.3 แบบจำลองพลวัตของระบบที่มีแบตเตอรี่ถูกควบคุมด้วยสมการการแกว่ง .....	19
รูปที่ 3.4 แบบจำลองพลวัตของแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยสมการลักษณะद्रูป .....	20
รูปที่ 3.5 แบบจำลองของระบบที่มีแบตเตอรี่ถูกควบคุมด้วยสมการลักษณะद्रูปรวมอยู่ด้วย .....	20
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการควบคุมอินเวอร์เตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส .....	22
รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการควบคุมอินเวอร์เตอร์จากสมการการแกว่ง.....	23
รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพการควบคุมอินเวอร์เตอร์จากสมการความถี่ — กำลังไฟฟ้า.....	23

รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ศึกษาผลกระทบของการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ.....	26
รูปที่ 4.2 ความถี่ของระบบไฟฟ้าเมื่อมีส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน.....	27
รูปที่ 4.3 วงจรของระบบที่ใช้ศึกษา.....	29
รูปที่ 4.4 วงจรของระบบทดสอบในการศึกษาที่ 1.....	30
รูปที่ 4.5 แบบจำลองเชิงพลวัตที่ใช้ในการศึกษาที่ 1.....	31
รูปที่ 4.6 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1.....	32
รูปที่ 4.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1.....	32
รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1.....	33
รูปที่ 4.9 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสนขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1.....	33
รูปที่ 4.10 วงจรของระบบทดสอบในการศึกษาที่ 2.....	35
รูปที่ 4.11 แบบจำลองเชิงพลวัตที่ใช้ในการศึกษาที่ 2.....	35
รูปที่ 4.12 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2.....	36
รูปที่ 4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2.....	36
รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2.....	37
รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสนขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2.....	37
รูปที่ 5.1 แบบจำลองการควบคุมตัวแปรสถานะป้อนกลับวงปิด.....	40
รูปที่ 5.2 แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ใช้ออกแบบตัวควบคุม.....	41
รูปที่ 5.3 แบบจำลองการควบคุมตัวแปรสถานะวงจรถูกเหมาะกับการควบคุมความถี่.....	42
รูปที่ 5.4 ส่วนคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่.....	43
รูปที่ 5.5 แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่แบตเตอรี่ถูกควบคุมด้วยเทคนิค LQR.....	43
รูปที่ 5.6 สรุปวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค LQR.....	44
รูปที่ 6.1 วงจรของระบบทดสอบ.....	46
รูปที่ 6.2 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 1.....	47

รูปที่ 6.3 แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ใช้ในการทดสอบที่ 1 .....	48
รูปที่ 6.4 การเบี่ยงเบนความถี่ของระบบขณะยังไม่มีแบตเตอรี่ของการทดสอบที่ 1 .....	49
รูปที่ 6.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบขณะยังไม่มีแบตเตอรี่ของการทดสอบที่ 1 .....	49
รูปที่ 6.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 2.....	50
รูปที่ 6.7 แบบจำลองเชิงพลวัตของการทดสอบที่ 2.....	51
รูปที่ 6.8 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2.....	52
รูปที่ 6.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2.....	52
รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2 .....	53
รูปที่ 6.11 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2.....	53
รูปที่ 6.12 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2.....	54
รูปที่ 6.13 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 3 .....	55
รูปที่ 6.14 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3 .....	56
รูปที่ 6.15 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3.....	56
รูปที่ 6.16 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3 .....	57
รูปที่ 6.17 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3.....	57
รูปที่ 6.18 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3.....	58
รูปที่ 6.19 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 4 .....	59
รูปที่ 6.20 แบบจำลองเชิงพลวัตของการทดสอบที่ 4.....	60
รูปที่ 6.21 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4 .....	61
รูปที่ 6.22 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4.....	61
รูปที่ 6.23 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4 .....	62
รูปที่ 6.24 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4.....	62
รูปที่ 6.25 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4.....	63

## บทที่ 1

### บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ระเบียบวิธีวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้าในบางพื้นที่ มีศักยภาพการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพียงพอที่จะสามารถเดินเครื่องแบบแยกโดดได้ กล่าวคือ กำลังการผลิตในบางพื้นที่เพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้าตลอดช่วงระยะเวลา เช่น ระบบของโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก (SPP) ที่มีผู้รับพลังงานไฟฟ้ากับโรงไฟฟ้าดังกล่าวโดยตรง สายป้อนของระบบจำหน่ายที่มีโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) เชื่อมต่ออยู่กับระบบ ระบบที่สามารถเดินเครื่องแบบแยกโดดได้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการสนับสนุนจากภาครัฐที่สนับสนุนโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเพื่อลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่เกิดการกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ระบบไฟฟ้าที่สามารถเดินเครื่องแบบแยกโดดได้ เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบหลักของการไฟฟ้าหรือในสภาวะที่ระบบหลักไม่พร้อมที่จะเชื่อมต่อเพื่อจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า เป็นระบบที่มีศักยภาพที่จะสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องได้ เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับผลกระทบน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม การควบคุมระบบไฟฟ้าแบบแยกโดดมีความซับซ้อนในทุกๆ ด้าน

ระบบที่เดินเครื่องแบบแยกโดดมีค่าที่โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ [1] ซึ่งส่งผลให้ระบบมีความเสี่ยงต่อการสูญเสียเสถียรภาพเชิงความถี่ได้ง่าย สาเหตุหลักที่ระบบเมื่อเดินเครื่องแบบแยกโดดมีความเฉื่อยต่ำ คือ ระบบแยกโดดโดยส่วนมาก จะมีโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเช่น โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และ โรงไฟฟ้าพลังงานลมเป็นกำลังการผลิตหลักเนื่องจากเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้จะเชื่อมต่อกับระบบผ่านอินเวอร์เตอร์ซึ่งไม่ได้ถูกควบคุมให้ตอบสนองเชิงความถี่และไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อย ดังนั้น เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ในระบบแยกโดด จึงมีโอกาที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงความถี่ได้ง่าย ซึ่งสามารถก่อให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในระบบได้ ซึ่งผิดกับวัตถุประสงค์ของการเดินเครื่องแบบแยกโดดที่ตั้งใจไว้

ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากับระบบเนื่องจาก อินเวอร์เตอร์มีความยืดหยุ่นสูงในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเนื่องจากเทคโนโลยีในการควบคุมได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องและใช้เวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งในเวลาสั้นๆ ซึ่งรวมไปถึงมีแนวคิดที่จะนำระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้

แบตเตอรี่มาใช้งานหลากหลายหน้าที่ซึ่งจำเป็นต้องเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์อยู่แล้ว ส่งผลให้ในปัจจุบัน อินเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์แก้ไขปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งในระบบส่ง และระบบจำหน่าย เช่น แรงดันกระเพื่อม แรงดันตก แรงดันไม่สมดุล การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบส่ง ซึ่งรวมไปถึงเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยให้กับระบบไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสโดยที่ยังไม่สนใจในแง่มุมของขนาดและพิกัดของแหล่งพลังงานต้นทางซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการลงทุนติดตั้งแบตเตอรี่เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่

ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบแยกโดดโดยควบคุมให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส ในขณะที่ความถี่ของระบบเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน โดยควบคุมความเฉื่อยเสมือนให้มีความเหมาะสมขณะที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ช่วยระบบรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาคุณลักษณะ ปัจจัย และ ผลกระทบเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าเมื่อเดินเครื่องแบบแยกโดด
- 2) เพื่อออกแบบตัวควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบขณะเปลี่ยนผ่านไปสู่โหมดแยกโดด

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาระบบไฟฟ้าที่เดินเครื่องแบบแยกโดดซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ และ ผู้ใช้ไฟฟ้า
- 2) พิจารณาการรบกวนขนาดใหญ่ (Large Disturbance) คือการทรูปของเซอกิตเบรกเกอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าหลักและระบบแยกโดด
- 3) ออกแบบตัวควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ในระบบ
- 4) ไม่พิจารณาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ

#### 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ศึกษาปัญหาและสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าเมื่อเดินเครื่องแบบแยกโดด
- 2) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของระบบแยกโดดที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ และวิธีการเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่เมื่อต้องการเดินเครื่องแบบแยกโดดในสภาวะดังกล่าว รวมไปถึงดัชนีชี้วัดการตอบสนองเชิงความถี่
- 3) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์
- 4) ศึกษาแบบจำลองสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความถี่เมื่อระบบถูกรบกวนและองค์ประกอบที่ตอบสนองเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจากค่ามาตรฐาน
- 5) สร้างแบบจำลอง เพื่อนำมาใช้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ
- 6) ออกแบบวิธีควบคุมพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่เมื่อเดินเครื่องในภาวะแยกโดด
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ระบบไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถเดินเครื่องแบบแยกโดดได้โดยมีสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่เพิ่มขึ้นจากระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่

#### 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับร่างวิทยานิพนธ์

จากภาวะที่สัดส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสสูงชันเรื่อยๆ ในทางระบบไฟฟ้ากำลังเรียกภาวะนี้ว่า ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ งานวิจัย [2] ได้วิเคราะห์ปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากภาวะดังกล่าวได้ว่า ในอดีตโมเมนต์ความเฉื่อยในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่มีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ในปัจจุบันเมื่อมีการใช้อินเวอร์เตอร์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาขึ้นอยู่กับความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ และสภาพอากาศที่ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม ส่งผลให้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ใช้ในการตอบสนองเชิงความถี่อุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการตอบสนองเร็วขึ้นกว่าในอดีตเป็นอย่างมาก อีกทั้ง มีการรายงาน [3] ว่า การสูญเสียเสถียรภาพเชิงความถี่จนกระทั่งมีความจำเป็นต้องปลดโหลดหรือแม้กระทั่งเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างนั้น โดยส่วนมาก สาเหตุไม่ได้เกิดจากการผิดพ่วงในระบบ แต่เป็นการปลดออกของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าและโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่กำลังเชื่อมต่อกับระบบ (Secondary Tripping of PV Generation)



จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงความสามารถในการควบคุมและเวลาในการตอบสนองที่รวดเร็วของอินเวอร์เตอร์ งานวิจัย [4-8] ได้นำเสนอแนวคิดการเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าโดยการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Virtual Synchronous Machine) โดยสามารถจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยให้ระบบไฟฟ้าได้เมื่อความถี่ของระบบไฟฟ้าเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน แหล่งพลังงานต้นทางของอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เก็บพลังงานในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสตรง เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) [4] ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ (Super-capacitor) [8] หรือแบตเตอรี่ (Battery) [6, 9] เมื่อระบบไฟฟ้าถูกการรบกวนขนาดใหญ่ที่ส่งผลให้ความถี่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน อินเวอร์เตอร์ที่ถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถลดความรุนแรงของปัญหาลงได้

นอกจากการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ในระบบแล้ว ยังมีวิธีอื่นๆที่สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ได้ ดังนี้ งานวิจัย [9] ได้นำเสนอแนวคิดให้แบ่งการตอบสนองเชิงความถี่ทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิออกเป็น 2 ระดับตามความเร็วของการตอบสนองของอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีเครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังและแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อบนโดยอินเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์ในภาวะดังกล่าวมีความสำคัญมากขึ้นสำหรับการควบคุมให้อุปกรณ์ต่างๆ ระบบช่วยตอบสนองเชิงความถี่ งานวิจัย [10] ได้เสนอสมการสำหรับหาเวลาวิกฤต (Critical Time) ซึ่งเป็นระยะเวลาก่อนที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงความถี่ โดยที่มีตัวแปรต่างๆ เป็นพารามิเตอร์ในระบบซึ่งสามารถค่าเวลาวิกฤตดังกล่าวไปช่วยสั่งการให้ระบบควบคุมการตอบสนองเชิงความถี่ประมวลผลเพื่อการรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัย [11] ได้เสนอแนวคิดที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบแล้ว ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพเชิงความถี่ที่ต่ำลง ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนแปลงวิธีควบคุมจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงวิธีที่หาจุดทำงานที่จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกไปได้สูงที่สุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) มาเป็นควบคุมให้โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานที่จุดทำงานที่ยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบได้เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดภาวะฉุกเฉิน (Spinning Reserve) งานวิจัย [12] ได้เสนอการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเสถียรภาพที่มีการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีจุดเด่นคือจุดทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถอยู่ในย่านที่กว้างมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังกล่าวดีมาก

จากงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่และมาตรฐานการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะความถี่ผิดปกติกจากค่ามาตรฐาน [13] มีเกณฑ์สำหรับใช้ประเมินสถานะของระบบอยู่ 2 เกณฑ์ คือ 1) ค่าความถี่เบี่ยงเบนที่มากที่สุด (Frequency Nadir) และ 2) อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลา (Rate of Change of Frequency) เนื่องจากระบบไฟฟ้ายังมี

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสเชื่อมต่อกับระบบอยู่ด้วย การทำงานในความถี่ต่ำอาจก่อให้เกิดความเสียหายทั้งกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น จากการเกิดความร้อนสะสมที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากภาวะฟลักซ์แม่เหล็กเกินในแกนเหล็ก (Over Fluxing) และที่ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น เกิดการไหลของไอน้ำในกังหันไอน้ำน้อยลง ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมที่ใบพัดของกังหันและเกิดความเสียหายในที่สุด ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจึงมีอุปกรณ์ป้องกันการทำงานที่ความถี่ต่ำ (Frequency Relay, 81) เป็นอุปกรณ์ป้องกันหลัก (Primary Protection)

### 1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 7 บท โดยประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานสำหรับการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบด้วย สมการการแกว่ง แบบจำลองความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง และดัชนีชี้วัดการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ

บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดการนำระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มาช่วยเชิงความถี่ แบบจำลองพลวัตของแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีความเฉื่อยเสมือนและค่าคงที่ลักษณะद्रูปเสมือน และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีต่างๆ

บทที่ 4 กล่าวถึงการศึกษาผลกระทบของการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีโมเมนต์ความเฉื่อยแตกต่างกันและความเป็นไปได้ในการออกแบบความเฉื่อยเสมือนเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบแยกโดด

บทที่ 5 กล่าวถึงการออกแบบความเฉื่อยเสมือนของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค Linear Quadratic Regulator (LQR) ซึ่งประกอบด้วย การกำหนดรูปแบบปัญหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบ การประยุกต์เทคนิค LQR ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรถ่วงน้ำหนักกับตัวแปรสถานะ และวิธีการนำเทคนิค LQR ไปควบคุมแบตเตอรี่

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

## บทที่ 2

หลักการพื้นฐานสำหรับการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

หลักการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในค่ามาตรฐานนั้นคือพยายามควบคุมให้กำลังไฟฟารวมทั้งหมดที่ผลิตขึ้นมาจากรีโตนกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าใช้ในระบบ จะเห็นได้ว่ากลไกดังกล่าวจะถูกควบคุมโดยรีโตนกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเป็นสำคัญ ในหัวข้อแรกจะกล่าวถึง สมการการแกว่ง ซึ่งอธิบายพฤติกรรมของรีโตนกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาความถี่เชิงพลวัต กลไกการตอบสนองของระบบเมื่อความถี่ในระบบไฟฟ้าเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงดัชนีชี้วัดการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ

### 2.1 สมการการแกว่ง

สมการการแกว่ง (Swing Equation) เป็นสมการที่อธิบายพฤติกรรมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งมีหลักการพื้นฐานจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เมื่อนำมาใช้กับการเคลื่อนที่แบบหมุนของโรเตอร์จะได้

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.1)$$

เมื่อ  $J$  คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกังหันต้นกำลัง (กิโลกรัมตารางเมตร)

$\theta_m$  คือ ระยะทางเชิงมุมของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง (เรเดียน)

$T_m$  คือ แรงบิดทางกลที่เกิดจากต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (นิวตันเมตร)

$T_e$  คือ แรงบิดทางกลที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (นิวตันเมตร)

ในสภาวะคงตัว แรงบิดทางกลที่ได้จากต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุนด้วยความเร็วคงที่หรือความเร็วซิงโครนัสเสมอ จากสมการ 2.1 ตำแหน่งของโรเตอร์สามารถอ้างอิงได้ง่ายขึ้นเมื่อกำหนดให้

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.2)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\omega_{sm}$  คือ ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (เรเดียนต่อวินาที)

$\delta_m$  คือ ระยะทางเชิงมุมของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนโรเตอร์เชิงกล (เรเดียน)

เมื่อนำสมการ 2.4 แทนใน 2.1 และนำ  $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$  คูณทั้งสมการจะได้

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m\omega_m - T_e\omega_m \quad (2.5)$$

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.6)$$

เมื่อ  $P_m$  คือ กำลังทางกลที่ได้จากต้นกำลัง (วัตต์)

$P_e$  คือ กำลังทางไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (วัตต์)

โดยปกติแล้ว สมการ 2.6 จะละเลยกำลังสูญเสียในส่วนต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และพบว่าพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุนของโรเตอร์จะไม่คงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุน แต่ในทางปฏิบัติ ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัสเสมอแม้กระทั่งเกิดการรบกวนก็ตาม จึงพิจารณาว่าพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่เสมอ ค่าที่กำหนดโดยผู้ผลิตที่รู้จักกันโดยทั่วไปอีกค่าหนึ่งคือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อย ( $H$ ) ซึ่งมีนิยามคืออัตราส่วนของพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุนเทียบกับพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ 2.7 ดังนี้

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_{sm}^2}{S_{mech}} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $H$  คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและต้นกำลัง (วินาที)

$S_{mech}$  คือ ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (โวลต์แอมแปร์)

นำสมการ 2.7 แทนลงในสมการ 2.6 และเปลี่ยนปริมาณทางกลเป็นทางไฟฟ้าทั้งหมดจะได้

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ระยะทางเชิงมุมของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนโรเตอร์เชิงไฟฟ้า (เรเดียน)

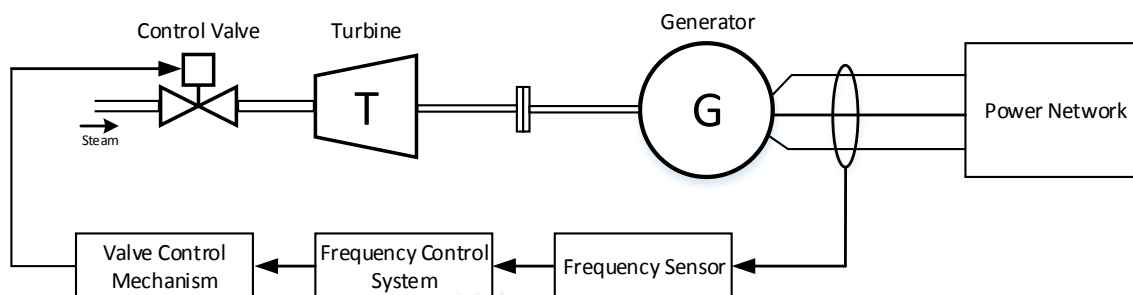
$P_m$  คือ กำลังที่ได้จากต้นกำลัง (ต่อหน่วย)

$P_e$  คือ กำลังที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อหน่วย)

## 2.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาความถี่เชิงพลวัต

แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาความถี่เชิงพลวัตเป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วยแบบจำลองของอุปกรณ์เชิงพลวัตประเภทต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำหน้าที่รักษาความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังให้อยู่ในค่ามาตรฐานเมื่อเกิดการรบกวนเช่น การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตหรือความต้องการใช้ไฟฟ้า ระบบควบคุมความถี่มีสัญญาณป้อนเข้าคือความถี่ของระบบที่เบี่ยงเบนออก

จากค่ามาตรฐาน จากนั้นระบบควบคุมจะแปลงเป็นสัญญาณคำสั่งให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มหรือลดการกำลังการผลิตซึ่ง รูปที่ 2.1 ได้แสดงแบบจำลองของระบบควบคุมความถี่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระบบควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

### 2.2.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เริ่มต้นจากการทำสมการ 2.8 มาทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\Delta P_m$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังทางกล

$\Delta P_e$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังทางไฟฟ้า

เมื่อจัดรูปสมการและพิจารณาให้

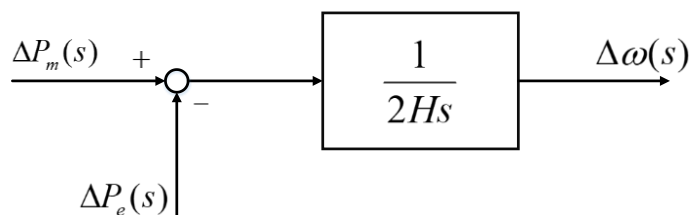
$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\Delta\omega$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ของระบบ

ทำการแปลงลาปลาซสมการ 2.10 จะได้

$$\Delta\omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (2.11)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ 2.10 โดเมนความถี่ สามารถเขียนเป็นแบบจำลองได้ดัง รูปที่ 2.2



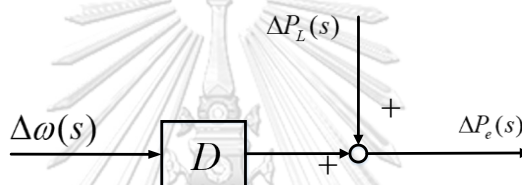
รูปที่ 2.2 แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โหลดในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ โหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่โดยไม่ขึ้นกับความถี่ของระบบ เช่น เครื่องทำความร้อน หลอดไส้ และโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าไม่คงที่โดยขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (2.12)$$

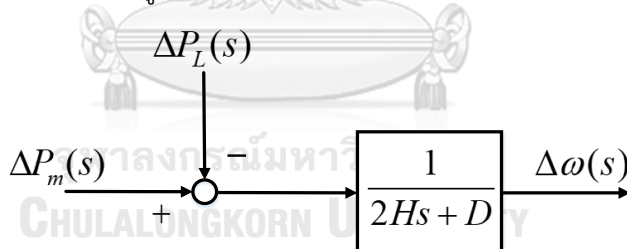
เมื่อ  $\Delta P_L$  คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่  
 $D$  คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของโหลดต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ

โดยที่พจน์แรกแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่ และพจน์หลังแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความถี่ จากสมการ 2.12 เมื่อทำการแปลงลาปลาซจะสามารถเขียนเป็นแบบจำลองได้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองพลวัตของโหลด

จากแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด สามารถใช้หลักการของการควบคุมป้อนกลับ ทำให้แบบจำลองเป็นดังรูปที่ 2.4

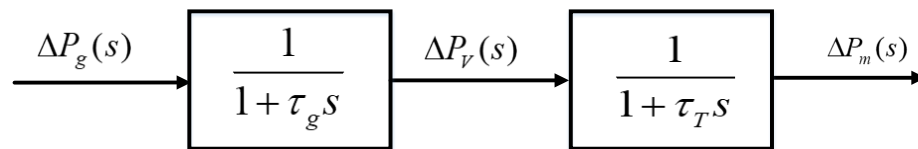


รูปที่ 2.4 แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

## 2.2.2 แบบจำลองต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว

พลังงานกลที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นถูกสร้างจากอุปกรณ์ต้นกำลังซึ่งมีอยู่หลายประเภทเช่น กังหันน้ำ กังหันไอน้ำ กังหันแก๊ส ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ 1) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของกังหันให้อยู่ที่ความเร็วเชิงโรตารีตลอดเวลา อุปกรณ์จะรับสัญญาณความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานและทำหน้าที่เพิ่มหรือลดกำลังกลโดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวาล์วที่ควบคุมการไหลของไอน้ำสำหรับกังหันไอน้ำ หรือเปลี่ยนแปลงมุมของประตูที่ควบคุมการไหลของน้ำสำหรับกังหันน้ำ ( $\Delta P_V$ ) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วจะมีค่าคงที่ทางเวลาอยู่ค่าหนึ่ง ( $\tau_g$ ) 2) ส่วนของต้นกำลัง เช่น กังหันประเภทต่างๆ เมื่ออุปกรณ์ควบคุมความเร็ว

ทำงานแล้ว กำลังกลที่ออกจากกังหันประเภทต่างๆก็จะเปลี่ยนแปลงตามไป แต่จะไม่เกิดขึ้นโดยทันที จะมีความล่าช้าด้วยค่าคงที่ทางเวลาค่าหนึ่ง ( $\tau_T$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทและความซับซ้อนของกังหัน รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองเชิงพลวัตของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วและต้นกำลังทางกลที่มีสัญญาณป้อนเข้าคือ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอ้างอิงที่ควบคุมความเร็วของอุปกรณ์ต้นกำลัง ( $\Delta P_g$ )



รูปที่ 2.5 แบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วและอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกล

ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของต้นกำลังจะทำงานตามกราฟลักษณะครูปดรูปที่ 2.6 กล่าวคือ เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไป กำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามเส้นกราฟลักษณะครูป โดยกำหนดให้ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับค่าคงที่ลักษณะครูป กราฟลักษณะครูปอุดมคติสามารถสมการได้ดังสมการ 2.14 และโมเดลเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าเมื่อรวมแบบจำลองของต้นกำลังและอุปกรณ์ควบคุมต้นกำลังจะได้ดังรูปที่ 2.7

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega \quad (2.13)$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซจะได้สมการ

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \omega(s) \quad (2.14)$$

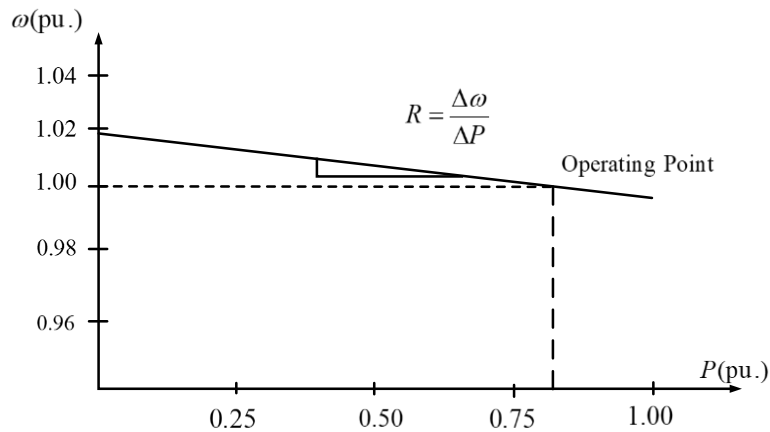
เมื่อ  $\Delta P_g$  คือ การเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิงที่ส่งให้อุปกรณ์ควบคุมต้นกำลัง

$\Delta P_{ref}$  คือ การเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

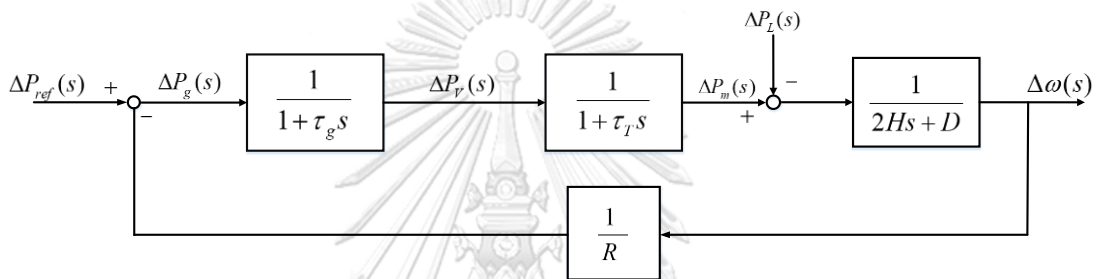
$R$  คือ ลักษณะครูปของอุปกรณ์ควบคุมต้นกำลัง

$\Delta \omega$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ของระบบ

และโมเดลเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าเมื่อรวมแบบจำลองของต้นกำลังและอุปกรณ์ควบคุมต้นกำลังจะได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ลักษณะทรูปอดุมคติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 แบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

### 2.2.3 แบบจำลองสมดุลกำลังไฟฟ้าและความถี่ของระบบ

แบบจำลองความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถนำมาใช้เป็นแบบจำลองความถี่ของระบบได้โดยกำหนดให้ความถี่ของระบบเป็นค่าเดียวกันและค่าตัวแปรต่างๆที่อยู่ในแบบจำลองเป็นค่าตัวแปรของระบบ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบสามารถคำนวณค่าจากสมการ 2.15 และค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของโหลดต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

$$H_{sys} = \frac{\sum_i^{n_g} H_i S_i}{S_{sys}} \tag{2.15}$$

$$D_{sys} = \frac{\sum_i^{n_g} D_i S_i}{S_{sys}} \tag{2.16}$$

เมื่อ  $H_{sys}$  คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ

$D_{sys}$  คือ ค่าการหน่วงของระบบ



$H_i$	คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง
$D_i$	คือ ค่าการหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง
$S_i$	คือ พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง
$S_{sys}$	คือ พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวที่เชื่อมต่อกับระบบ ณ ขณะใดๆ
$n_g$	คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวที่เชื่อมต่อกับระบบ ณ ขณะใดๆ

### 2.3 การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมให้ความถี่ของระบบมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นระบบเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่หลุดออกจากระบบ และการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้าของโหลด การรบกวนอาจจะมีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ก็ได้ การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามการทำงานของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### 2.3.1 การตอบสนองขั้นปฐมภูมิ

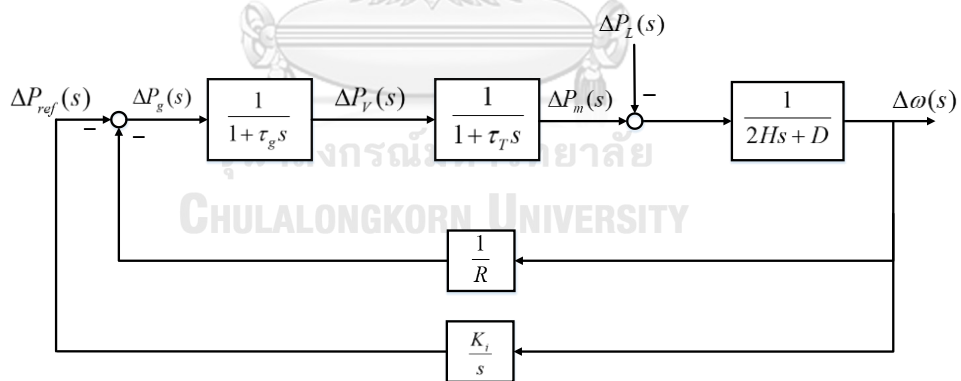
การตอบสนองเชิงความถี่ขั้นปฐมภูมิเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส โดยหลักการคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรักษาสมดุลระหว่างกำลังทางกลและกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ความถี่ของระบบไฟฟ้ามีค่าคงที่ ความถี่ของระบบที่สภาวะคงตัวหลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตอบสนองต่อการรบกวนแล้ว จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่ามาตรฐาน ซึ่งจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่ามาตรฐานนั้น จะขึ้นอยู่กับประเภทของการรบกวน กลไกในการตอบสนองเชิงความถี่ปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 กลไกคือ

1. **โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและต้นกำลัง** เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ณ ขณะนั้น กำลังทางกลมีค่าไม่เท่ากับกำลังทางไฟฟ้า ระบบจะรับหรือจ่ายพลังงานจลน์ที่สะสมอยู่ในโรเตอร์เพื่อชดเชยกำลังทางกลที่ไม่สมดุลกับกำลังทางไฟฟ้า ส่งผลให้ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความถี่ของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไป สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสูง ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ
2. **ลักษณะรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** ลักษณะรูปเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย ดังรูป 2.6 ซึ่งความชันของกราฟดังกล่าวคือค่าคงที่ลักษณะรูป ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 3 – 5 เปอร์เซนต์ จากรูปที่ 2.7 สามารถอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองเชิงความถี่ได้ว่า เมื่อ

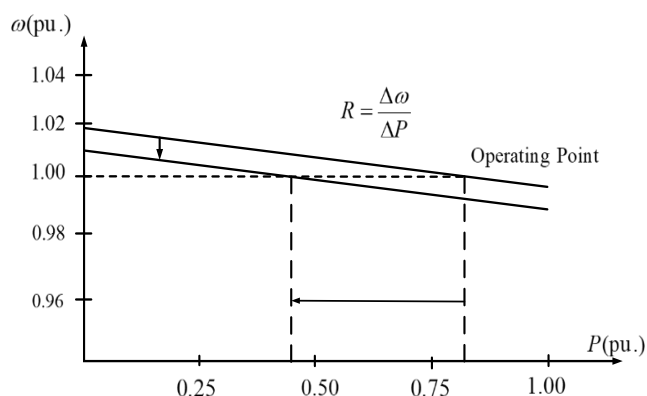
ความถี่มีค่าลดลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยรักษาความถี่ไม่ให้ลดต่ำลงไปมากกว่านี้ นอกจากนี้ลักษณะครุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะควบคุมให้แต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตอบสนองตามสัดส่วนของความถี่ของระบบที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน

### 2.3.2 การตอบสนองขั้นทุติยภูมิ

การตอบสนองเชิงความถี่ขั้นทุติยภูมิเป็นการตอบสนองของระบบควบคุมเพื่อทำให้ความถี่ของระบบกลับเข้าสู่ค่ามาตรฐาน เรียกว่าระบบควบคุมกำลังอัตโนมัติ (Automatic Generation Control: AGC) ซึ่งทำได้โดยการใส่ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) โดยระบบควบคุมจะรับสัญญาณความถี่ที่เบี่ยงเบนไป และ ส่งสัญญาณอ้างอิงใหม่ไปยังแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ปรับกำลังการผลิตตามสัญญาณที่ได้รับจนกระทั่งความถี่กลับเข้าสู่ค่ามาตรฐาน รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองพลวัตของระบบที่มีทั้งการตอบสนองเชิงความถี่ขั้นปฐมภูมิและทุติยภูมิอยู่ด้วย และรูปที่ 2.9 ได้อธิบายกลไกการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการปรับสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $\Delta P_{ref}$ ) ในสถานการณ์ปกติ เมื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์กับระบบไฟฟ้าหลัก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์จะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่เสมอ จากกราฟลักษณะครูปอดมคติ หากต้องการลดกำลังการผลิตลงโดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วเชิงมุมคงที่ สามารถทำได้โดยการปรับเส้นกราฟให้ลดลงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ขั้นปฐมภูมิและทุติยภูมิ



รูปที่ 2.9 ลักษณะทรูพอดมคติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อปรับกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลดลง

## 2.4 ดัชนีชี้วัดการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ

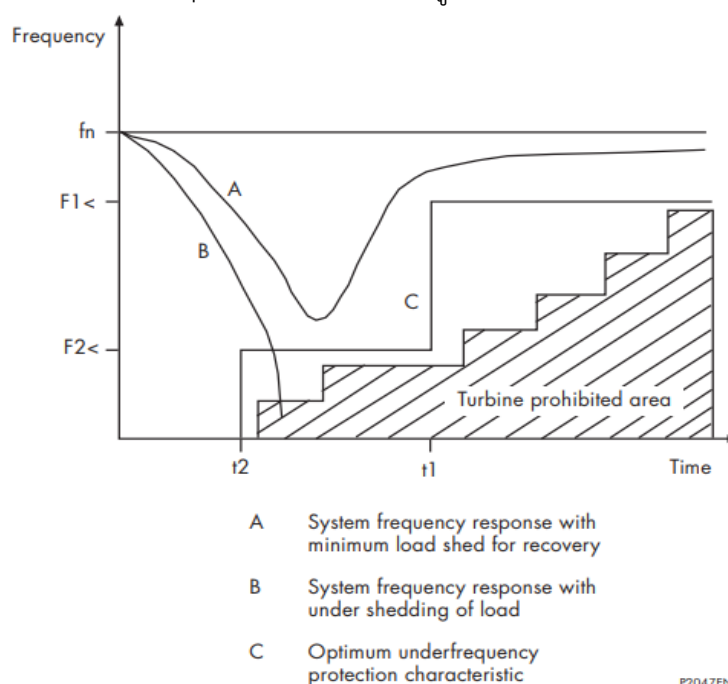
การรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในค่ามาตรฐานถือเป็นเรื่องสำคัญเนื่องจาก หากความถี่ของระบบไฟฟ้าเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานไปจะส่งผลให้เกิดความเสียหาย ทั้งในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า และส่วนของผู้ผลิตไฟฟ้า กล่าวคือในกรณีที่โหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ หากมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานจะทำให้แรงบิดที่ได้ลดลงหรืออาจเกิดความร้อนสูงขึ้นได้ สำหรับโรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นอุปกรณ์หลักในการผลิตกระแสไฟฟ้า หากเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ความถี่ต่ำเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดความเสียหายกับทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากภาวะฟลักซ์แม่เหล็กเกินในแกนเหล็กซึ่งส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูง และเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต้นกำลังเนื่องจากอาจเกิดการสั่นที่รุนแรงหรือเกิดความร้อนสูงเนื่องจากการระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์ต้นกำลังไม่เพียงพอ

ดังนั้น ในทางปฏิบัติ จะมีระบบการป้องกันการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน (Frequency Relay: 81) เพื่อป้องกันความเสียหายดังกล่าว จะเห็นได้ว่าหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบที่มีความถี่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานเพิ่ม จะเป็นการซ้ำเติมระบบเนื่องจาก ความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการใช้จะมีค่ามากขึ้น ซึ่งสามารถก่อให้เกิดภาวะไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างเนื่องจากระบบเสถียรภาพเชิงความถี่ ระบบป้องกันการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความถี่ผิดปกติในปัจจุบัน จะพิจารณาค่าของปริมาณ 2 ปริมาณคือ

1. ขนาดของความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานเทียบกับเวลา (Frequency Nadir)

## 2. อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลา (Rate of Change of Frequency: RoCoF)

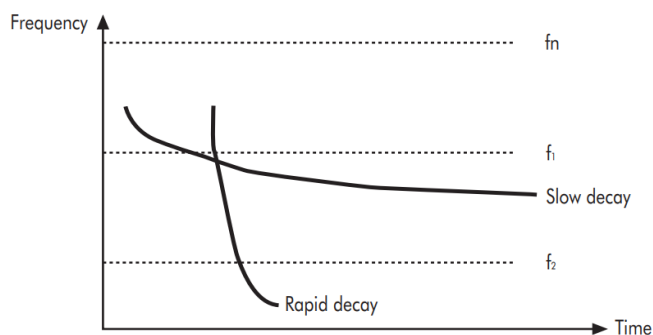
รูปที่ 2.10 แสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันในการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ทั้งสองปริมาณดังกล่าว ซึ่งหากความถี่ในระบบมีค่ามากกว่าเกณฑ์ดังกล่าว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่ถูกปลดออกจากระบบและสามารถช่วยระบบตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งทำให้เสถียรภาพเชิงความถี่ในระบบดีขึ้น โดยปกติ การตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำจะถูกตั้งค่าแบบหน่วงเวลา โดยพิจารณาจากพื้นที่ Turbine prohibited area ดัง รูปที่ 2.10 เป็นหลัก



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างความถี่ของระบบที่เหมาะสมในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

[14]

รูปที่ 2.11 แสดงถึงความถี่ของระบบเมื่อเกิดการรบกวนที่มีขนาดแตกต่างกัน จากรูป ค่า  $f_1$  คือความถี่ที่ตั้งค่าสำหรับอุปกรณ์ป้องกันการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำและค่า  $f_2$  คือค่าความถี่ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นความถี่ Rapid decay มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าเส้น Slow decay มาก โดยจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการรบกวนมีขนาดใหญ่ โดยความถี่ลดลงไปมากกว่าความถี่  $f_2$  ซึ่งจะเกิดความเสียหายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ใช้เวลาในการลดลงเพียงเล็กน้อย การตรวจหาความถี่ในระบบรูปแบบนี้ ควรใช้อุปกรณ์ป้องกันอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลาเป็นอุปกรณ์ป้องกันเนื่องจากสามารถทำนายความถี่ที่อาจจะเปลี่ยนแปลงต่อไปได้เบื้องต้น



รูปที่ 2.11 ความถี่ของระบบเมื่อเกิดการรบกวนที่มีความรุนแรงต่างกัน

[14]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้มาตรฐานของความถี่ในช่วงการทำงานปกติอยู่ที่ 49.5 – 50.5 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [15] แต่เนื่องจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลาดังนี้จึงใช้มาตรฐานของประเทศอังกฤษซึ่งอยู่ที่ 1 เฮิรตซ์ต่อวินาที [16]

### บทที่ 3

การควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

เนื้อหาในบทนี้เป็นแนวคิดเบื้องต้นในการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยเฉพาะช่วยระบบตอบสนองเชิงความถี่ เมื่อความถี่ของระบบเบี่ยงเบนออกไปจากค่ามาตรฐาน แนวคิดหลักที่จะนำมาควบคุมถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักคือควบคุมด้วยสมการการแกว่งและสมการลักษณะดรู๊ป และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

#### 3.1 แนวคิดพื้นฐาน

ความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีค่าคงที่ก็ต่อเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการใช้ และค่าความถี่จะเบี่ยงเบนเมื่อกำลังไฟฟ้าง่ายกว่ามีค่าไม่เท่ากัน ณ เวลาใดๆ ดังนั้นหลักการของการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้าคือการพยายามทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการใช้ การรบกวนในระบบไฟฟ้ามีมากมายหลายรูปแบบเช่น การลัดวงจรในสายส่งกำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบด้วยระบบป้องกันโดยไม่ได้ตั้งใจ เกิดความผิดพลาดที่ส่งผลให้สายบ่อนโหลดต้องปลดวงจร ซึ่งการรบกวนที่กล่าวมา ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมาไม่เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการใช้ทั้งสิ้น

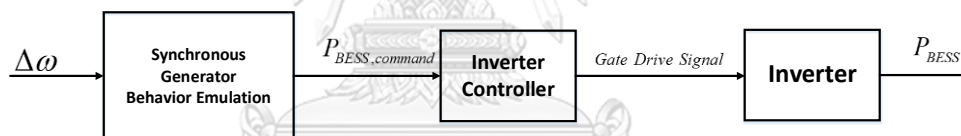
เมื่อเกิดการรบกวนดังกล่าวข้างต้น การตอบสนองเชิงความถี่ระดับปฐมภูมิและทุติยภูมิจะทำงานโดยอัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือนำความถี่กลับมาที่ค่าความถี่มาตรฐาน หรือหมายความว่า กลไกการควบคุมพยายามที่จะเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นให้เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการใช้ เพื่อไม่ให้อุปกรณ์ป้องกันความถี่ต่ำหรือสูงทำงาน ซึ่งจะเป็นการทำให้ความถี่ในระบบแย่งอาจทำให้เกิดไฟดับเป็นวงกว้างได้ ปัญหาหลักของการเดินเครื่องแบบแยกโดดคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช่วยระบบตอบสนองเมื่อความถี่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานทั้งระดับปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีอิทธิพลไม่มากพอที่จะทำให้ความถี่ในระบบไฟฟ้ากลับมาสู่ค่ามาตรฐานในเวลาที่เหมาะสมก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันจะทำงาน สาเหตุหลักของปัญหาข้างต้นก็คือ โหมดความถี่ของระบบแยกโดดมีค่าต่ำ เนื่องจากมีสัดส่วนโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่เชื่อมต่อกับระบบด้วยอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าแบบดั้งเดิมสูง รวมไปถึง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแบบดั้งเดิมมีขนาดเล็กจึงมีโหมดความถี่ต่ำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้้นำแนวคิดที่จะให้แบตเตอรี่ช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบโดยที่แบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อผ่านอินเวอร์เตอร์ หากสามารถควบคุมให้อินเวอร์เตอร์มีพฤติกรรม

เชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส อินเวอร์เตอร์จะสามารถช่วยระบบตอบสนองเมื่อความถี่ของระบบเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน ซึ่งจะทำให้ระบบที่เดินเครื่องแบบแยกโดดมีเสถียรภาพเชิงความถี่ที่ดียิ่งขึ้น

วิธีการควบคุมดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีอย่างง่าย ตามสมการที่ใช้ในการควบคุม โดยวิธีทั้ง 2 วิธีดังกล่าวสามารถนำไปใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ได้ตามแนวคิดดังรูปที่ 3.1 จากสมการทั้ง 2 สมการที่ใช้จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ายที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งถือว่าเป็นสัญญาณคำสั่งให้อินเวอร์เตอร์ ปรับกำลังไฟฟ้าตามค่าคำสั่งที่ได้รับมา โดยเวลาที่ใช้สำหรับการตอบสนองคำสั่งดังกล่าวมีค่าน้อยซึ่งเป็นข้อดีของอินเวอร์เตอร์

ในทางปฏิบัติการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ออกจากอินเวอร์เตอร์สามารถแยกกันได้อย่างอิสระ จากทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันได กำลังไฟฟ้าจริงจะสามารถถูกควบคุมได้ผ่านกระแสอ้างอิงในแนวแกน  $d$  และ กำลังไฟฟ้าเสมือนจะสามารถถูกควบคุมได้ผ่านการกระแสอ้างอิงแนวแกน  $q$  การที่ต้องการให้อินเวอร์เตอร์ช่วยระบบตอบสนองเชิงความถี่มีหลักการเบื้องต้นคืออินเวอร์เตอร์ต้องเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อความถี่ของระบบเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงแนวแกน  $d$  ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะละเลยสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแนวแกน  $q$  เนื่องจากเป็นแนวแกนที่ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน



รูปที่ 3.1 แนวคิดสำหรับการควบคุมแบตเตอรี่ให้ช่วยตอบสนองเชิงความถี่

### 3.2 การควบคุมความถี่ด้วยความเฉื่อยเสมือน

จากสมการการแกว่ง 2.11 ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายพฤติกรรมการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และเมื่อถูกทำให้เป็นเชิงเส้น แปลงลาปลาซ และจัดรูปสมการใหม่ดังสมการ 2.15 จะสามารถนำไปใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้

$$\Delta P_{BESS} = -2H_{inv} \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\Delta P_{BESS}$  คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่เมื่อเกิดการรบกวน

$H_{inv}$  คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยที่ต้องการของแบตเตอรี่

$\Delta\omega$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ของระบบ

จากสมการ 3.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่ในระบบเกิดความเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากค่ามาตรฐาน จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้ายที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงตามความสัมพันธ์

ของสมการ โดยที่ ซึ่งจากสมการ 3.1 จะเปรียบเสมือนว่า อินเวอร์เตอร์ประพุดิตัวเชิงพลวัตที่เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส กล่าวคือ มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยค่าหนึ่งและจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจากระบบเพื่อช่วยรักษาสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการใช้ ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ซับซ้อนขึ้น ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของอินเวอร์เตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา หรือ ตามความเหมาะสมของจังหวะการแกว่งของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

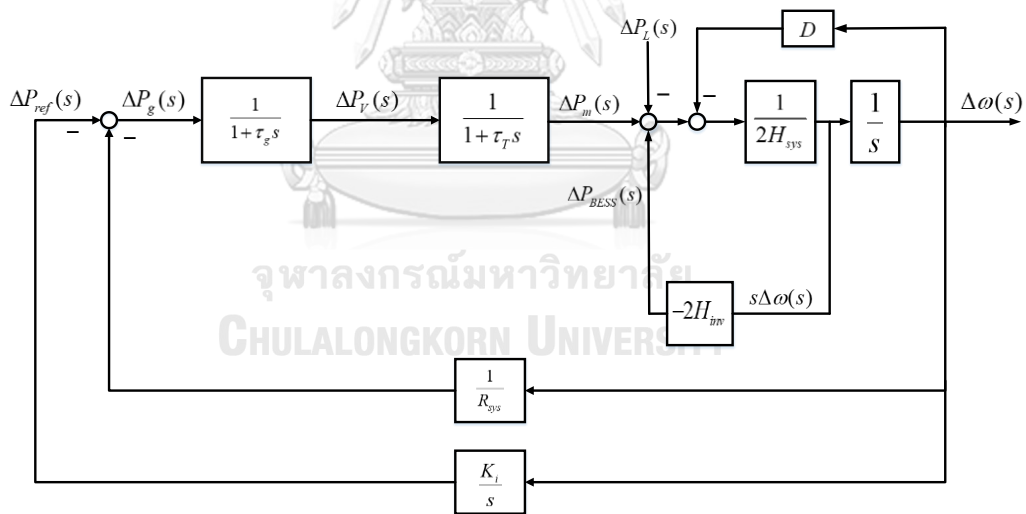
จากสมการ 3.1 เมื่อทำการแปลงลาปลาซจะได้สมการ 3.2

$$\Delta P_{BESS}(s) = -2H_{inv} s \Delta \omega(s) \tag{3.2}$$

จากสมการ 3.2 สามารถเขียนแบบจำลองเชิงพลวัตของอินเวอร์เตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยสมการการแกว่งได้ดังรูปที่ 3.2 และเมื่อนำไปรวมกับแบบจำลองพลวัตของระบบแบบดั้งเดิมจะได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 แบบจำลองพลวัตของแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยสมการการแกว่ง



รูปที่ 3.3 แบบจำลองพลวัตของระบบที่มีแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยสมการการแกว่ง

### 3.3 การควบคุมความถี่ด้วยค่าคงที่ลักษณะรูป

จากสมการ 2.13 เมื่อทำการแปลงลาปลาซ และจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการ 3.3

$$\Delta P_{BESS} = -\frac{1}{R_{inv}} \Delta \omega \tag{3.3}$$

เมื่อ  $\Delta P_{BESS}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่เมื่อเกิดการรบกวน



$R_{inv}$  คือ ค่าคงที่ลักษณะรูปที่ต้องการของแบตเตอรี่

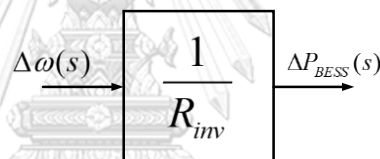
$\Delta\omega$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ในระบบ

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยสมการลักษณะรูปนั้นคล้ายกับการควบคุมด้วยสมการการแกว่ง โดยข้อแตกต่างกันคือ การควบคุมด้วยวิธีนี้ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงตาม ค่าคงที่ลักษณะรูปเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถเปรียบเสมือนว่า อินเวอร์เตอร์ประพุดิตัวเชิงพลวัตเหมือน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสถูกควบคุมด้วยต้นกำลังที่เปลี่ยนแปลงกำลังทางกลตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

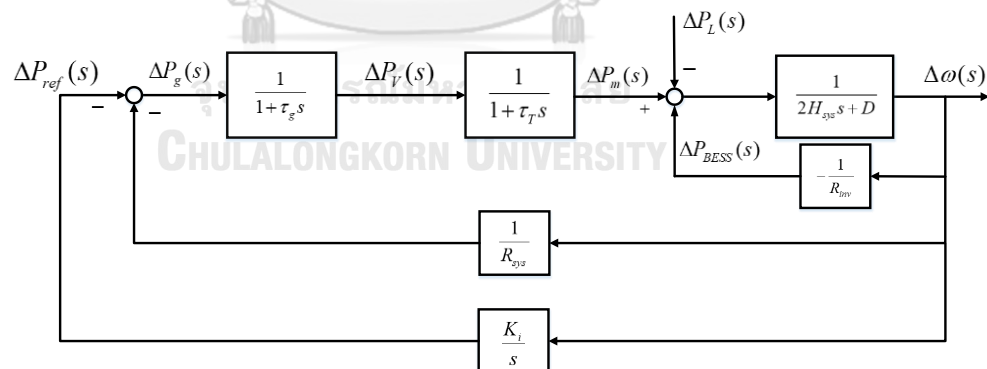
จากสมการ 3.3 เมื่อทำการแปลงลาปลาซจะได้

$$\Delta P_{BESS}(s) = -\frac{1}{R_{inv}(s)} \Delta\omega(s) \quad (3.4)$$

ซึ่งรูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองเชิงพลวัตของอินเวอร์เตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยสมการลักษณะรูป เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถของระบบในการตอบสนองความถี่เมื่อถูกรบกวน และรูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองเชิงพลวัตเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยสมการลักษณะรูปรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 3.4 แบบจำลองพลวัตของแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยสมการลักษณะรูป



รูปที่ 3.5 แบบจำลองของระบบที่มีแบตเตอรี่ถูกควบคุมด้วยสมการลักษณะรูปรวมอยู่ด้วย

### 3.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับระบบด้วยอินเวอร์เตอร์เพิ่มช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะระบบที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ พบว่าวิธีการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์มีหลายรูปแบบ

ขึ้นอยู่กับแนวคิดและสมการที่นำมาใช้ควบคุม โดยสามารถสรุปวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ได้เป็น 4 รูปแบบหลักๆ ดังนี้

### 3.4.1 ควบคุมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

จากงานวิจัย [17, 18] ได้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้พฤติกรรมเชิงพลวัตคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยตรง ดังสมการที่ 3.5 – 3.7 และรูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

$$T_e = M_f i_f \langle i, S(\theta) \rangle \quad (3.5)$$

$$e = \dot{\theta} M_f i_f S(\theta) \quad (3.6)$$

$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f \langle i, C(\theta) \rangle \quad (3.7)$$

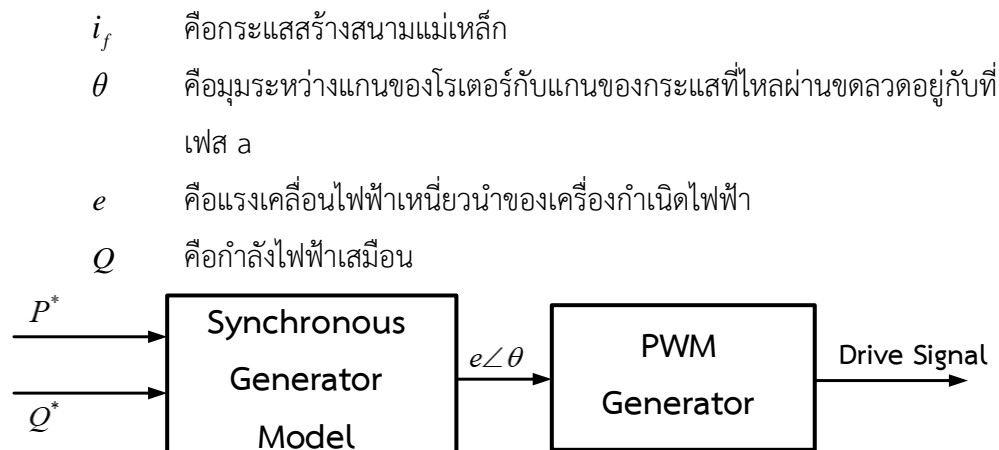
โดยที่

$$i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$S(\theta) = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$C(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

เมื่อ	$i_a$	คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอยู่กับที่เฟส a
	$i_b$	คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอยู่กับที่เฟส b
	$i_c$	คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอยู่กับที่เฟส c
	$M_f$	คือขนาดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดอยู่กับที่กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
	$T_e$	คือแรงบิดทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการควบคุมอินเวอร์เตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

วิธีนี้มีข้อดีคือได้พฤติกรรมเชิงพลวัตของอินเวอร์เตอร์ตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมากที่สุด แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ทรัพยากรในการควบคุมที่สูงและมีโอกาสที่จะสูญเสียเสถียรภาพการควบคุมได้

### 3.4.2 ควบคุมจากสมการการแกว่ง

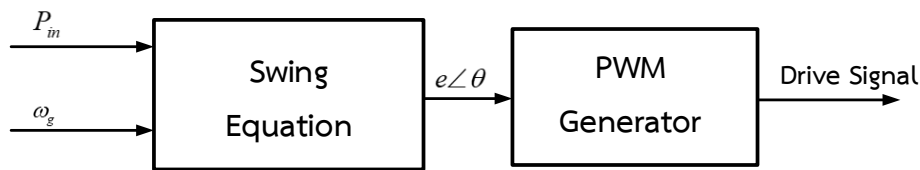
งานวิจัย [19, 20] ใช้วิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยสมการที่ 3.8 แทนการใช้สมการที่แสดงพฤติกรรมเชิงพลวัตทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และสามารถเขียนแผนภาพแสดงการควบคุมดังรูปที่ 3.7

$$P_{in} - P_{out} = J\omega_m \left( \frac{d\omega_m}{dt} \right) + D_p \Delta\omega \quad (3.8)$$

โดยที่

$$\Delta\omega = \omega_m - \omega_g$$

เมื่อ	$P_{in}$	คือกำลังไฟฟ้าขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
	$P_{out}$	คือกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์
	$\omega_m$	คือความเร็วเชิงมุมเสมือนของอินเวอร์เตอร์
	$\omega_g$	คือความเร็วเชิงมุมอ้างอิง
	$J$	คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน
	$D_p$	คือค่าการหน่วงเสมือน



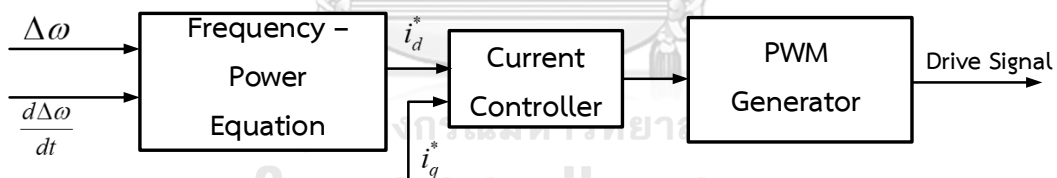
รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการควบคุมอินเวอร์เตอร์จากสมการการแกว่ง

### 3.4.3 ควบคุมจากสมการ ความถี่ – กำลังไฟฟ้า

งานวิจัย [21-23] ใช้สมการ 3.9 ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีลักษณะเด่นคือตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบไฟฟ้าเมื่อความถี่ของระบบไฟฟ้าเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานซึ่งเป็นวิธีที่ตรงไปตรงมาที่สุดสำหรับนำมาช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบไฟฟ้า โดยนำค่า  $P_{out}$  ที่ได้จากสมการที่ 3.9 ไปคำนวณเป็นค่าสัญญาณควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงแกน d ต่อไป

$$P_{out} = K_D \Delta\omega + K_I \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (3.9)$$

- เมื่อ  $P_{out}$  คือกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 $\Delta\omega$  คือการเบี่ยงเบนความถี่ของระบบไฟฟ้า  
 $\frac{d\Delta\omega}{dt}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบเมื่อเทียบกับเวลา  
 $K_D$  คือค่าคงที่สำหรับหน่วงความถี่  
 $K_I$  คือค่าคงที่สำหรับแทนความเฉื่อยเสมือน



รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพการควบคุมอินเวอร์เตอร์จากสมการความถี่ – กำลังไฟฟ้า

### 3.4.4 ควบคุมจากสมการลักษณะรูป

งานวิจัย [24, 25] ได้เสนอวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เลียนแบบพฤติกรรมเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแต่แตกต่างจาก 3 วิธีข้างต้น โดยในการควบคุม ใช้สมการที่ 3.9

$$\omega_g = \omega^* - m_p (p_{out} - p_{in}) \quad (3.9)$$

- เมื่อ  $\omega^*$  คือความถี่อ้างอิง  
 $\omega_g$  คือความถี่ของระบบ  
 $P_{in}$  คือกำลังไฟฟ้าขาเข้าของอินเวอร์เตอร์  
 $P_{out}$  คือกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์

$m_p$  คือค่าคงที่ลักษณะद्रรูป  
การควบคุมนี้เหมาะสมสำหรับใช้เดินเครื่องในรูปแบบแยกโดดโดยเฉพาะและระบบที่ใช้ต้อง  
เป็นระบบที่ค่าอินพีแดนซ์เป็นแบบเหนี่ยวนำ



## บทที่ 4

การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบความเฉื่อยเสมือนเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่

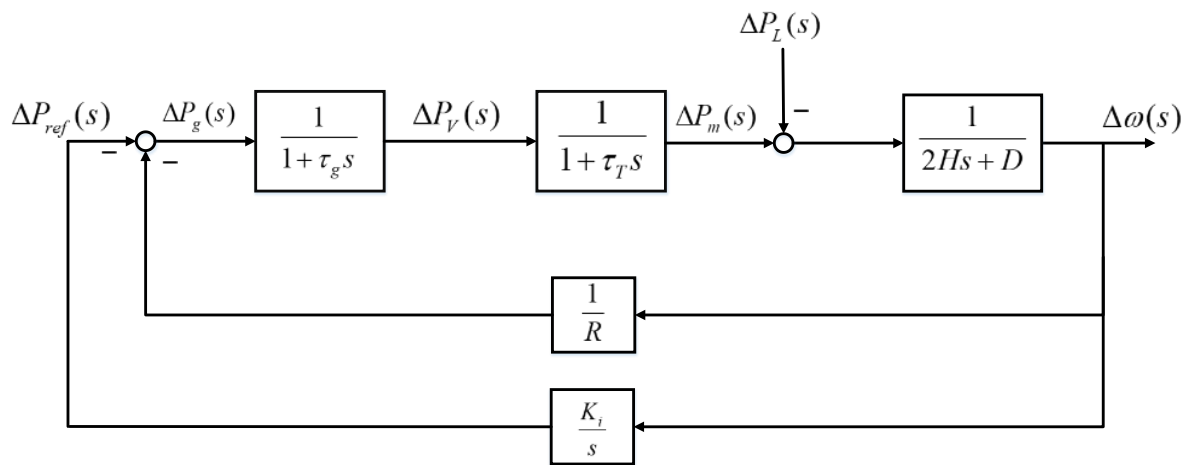
ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาผลกระทบของการเดินเครื่องระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกันและผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบความเฉื่อยเสมือนให้กับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบแยกโดดที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ

### 4.1 การศึกษาผลกระทบจากการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน

การศึกษานี้ต้องการศึกษาผลกระทบจากการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากการมีสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Penetration Level) มากขึ้น ส่งผลให้โรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีเป็นอุปกรณ์หลักเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าน้อยลงเนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ซึ่งไม่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ผลที่ตามมาคือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าลดลงตามสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบไฟฟ้าดังกล่าวจะเป็นระบบไฟฟ้าหลักหรือระบบไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะเดินเครื่องแบบแยกโดดก็ได้

#### 4.1.1 ระบบที่ใช้ศึกษาผลกระทบของการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน

ระบบที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นระบบที่มีโรงไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีเป็นอุปกรณ์หลักและโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และผู้ใช้ไฟฟ้า โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดังตารางที่ 1 โดยกำหนดให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบขณะยังไม่มีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่ออยู่มีค่า 3.46 วินาที และการเชื่อมต่อของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการแทนที่โรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีเป็นอุปกรณ์หลัก และพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบปรากฏในตารางที่ 2 กำหนดให้การรบกวนในระบบคือการทริบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 0.2 ต่อหน่วย



รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ศึกษาผลกระทบของการเดินเครื่องเมื่อระบบไฟฟ้ามีโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ ตารางที่ 1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ

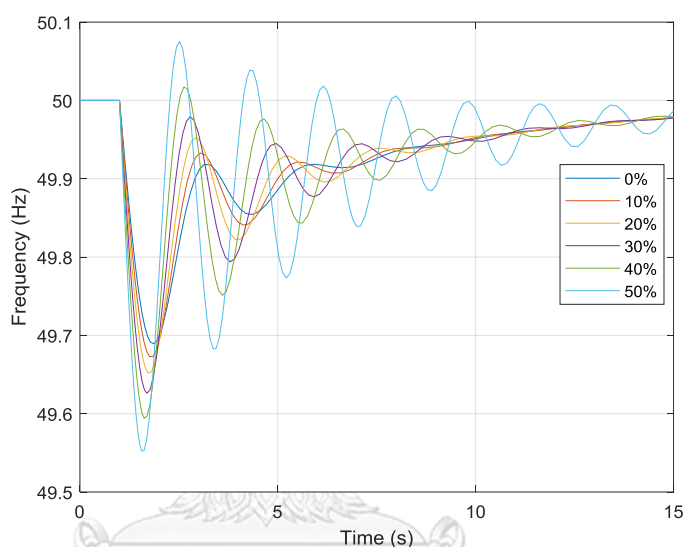
สัดส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (เปอร์เซ็นต์)	โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (วินาที)
0	3.46
10	3.12
20	2.77
30	2.42
40	2.08
50	1.73

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้ามีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ค่าการหน่วงของระบบ ( $D_{sys}$ )	0
ค่าคงที่ลักษณะद्रูปของระบบ ( $R$ )	0.05
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหัน ( $\tau_g$ )	0.5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมกังหัน ( $\tau_T$ )	0.2 วินาที
ค่าคงที่ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ( $K_i$ )	7

#### 4.1.2 ผลการศึกษาผลกระทบ

ผลการศึกษาพบว่าขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่ของระบบที่มีสัดส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูงมีค่ามากกว่าระบบที่มีสัดส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดังแสดงรูปที่ 4.2 และค่าขนาดการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลาถูกสรุปดังตารางที่ 3 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ระบบที่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำลงจากผลของสัดส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้นไปโอกาสที่จะสูญเสียเสถียรภาพสูงกว่าระบบที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่สูงกว่าเมื่อเกิดการรบกวนที่มีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 4.2 ความถี่ของระบบไฟฟ้าเมื่อมีสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 สรุปผลการศึกษาผลกระทบเมื่อเดินเครื่องที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่างกัน

สัดส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด (เฮิรตซ์ต่อวินาที)
0	0.16	0.18
10	0.17	0.20
20	0.18	0.22
30	0.19	0.25
40	0.21	0.29
50	0.23	0.37

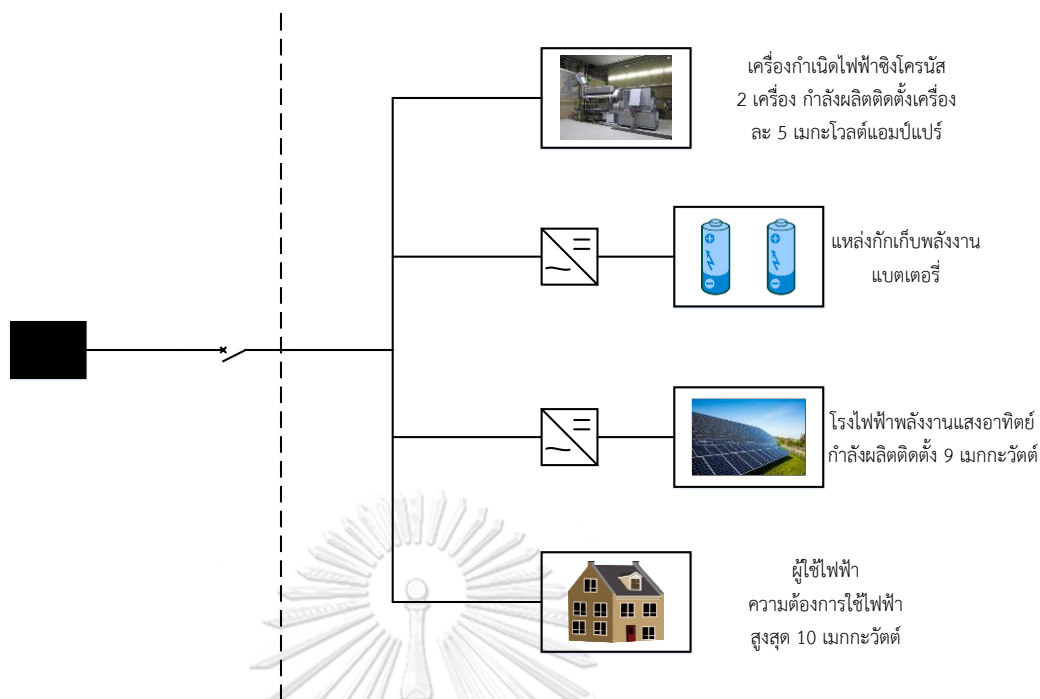


#### 4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบความเฉื่อยเสมือน

จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1 นำมาสู่แนวคิดที่จะออกแบบความเฉื่อยเสมือนให้กับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ โดยในเบื้องต้น จะกำหนดให้แบตเตอรี่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยคงที่ โดยประกอบด้วย 2 การศึกษาตามประเภทของการรบกวน

ระบบที่จะนำมาใช้ในการทดสอบเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็กดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นระบบที่สามารถเดินเครื่องได้ทั้งในสถานะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักและสถานะแยกโดด โดยที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าหลักและระบบขนาดเล็กมีเพียง 1 จุด ระบบไฟฟ้าขนาดเล็กประกอบด้วย 4 ส่วนหลักได้แก่

1. โรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นอุปกรณ์หลักจำนวน 2 เครื่อง กำลังผลิตติดตั้งเครื่องละ 5 เมกะวัตต์แอมป์แปร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่มีโมเมนต์ความเฉื่อย ที่จะช่วยในการรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบ
2. โรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ กำลังผลิตติดตั้ง 9 เมกะวัตต์ เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยแต่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่ปล่อยแก๊สเรือนกระจก
3. แหล่งกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีความเฉื่อยเสมือนเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความถี่ให้กับระบบเมื่อระบบถูกรบกวนด้วยเทคนิค LQR
4. ผู้ใช้ไฟฟ้า มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด 10 เมกะวัตต์



รูปที่ 4.3 วงจรของระบบที่ใช้ศึกษา

ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันและอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของกังหันแต่ละประเภทมีค่าแตกต่างกันตามคุณลักษณะทางกลของต้นกำลัง เช่น กังหันไอน้ำ กังหันน้ำ กังหันแก๊ส และเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น แล้วแต่ระบบที่จะนำมาใช้ศึกษา ในระบบทดสอบนี้ เลือกใช้อุปกรณ์ดังกล่าวแทนโรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง

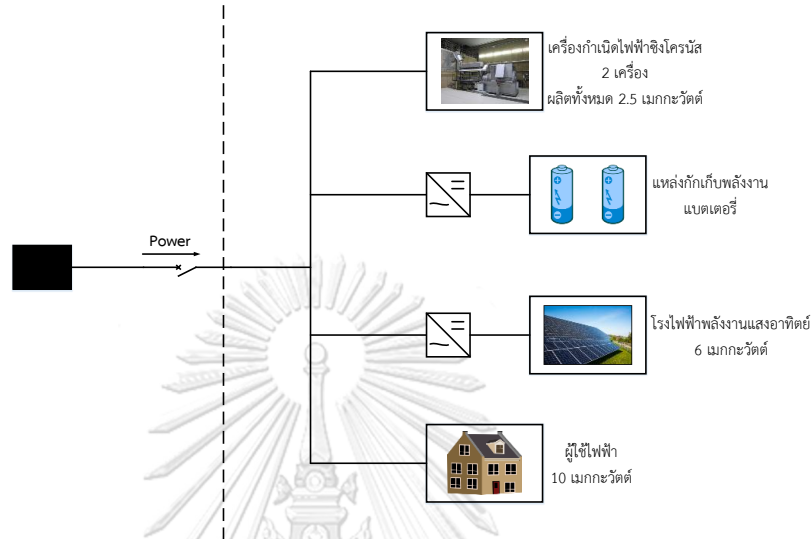
#### 4.2.1 การศึกษาที่ 1 การศึกษาขณะระบบเปลี่ยนผ่านไปสู่อิมิตแยกโดด

##### 4.2.1.1 ระบบที่ใช้ทดสอบในการศึกษาที่ 1

ระบบที่ใช้ทดสอบเบื้องต้นเป็นไปดัง กำหนดให้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานของระบบเท่ากับ 10 เมกะวัตต์แอมแปร์ ผู้ใช้ไฟฟ้ามีขนาด 10 เมกะวัตต์ โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมามีส่วนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2.5 เมกะวัตต์และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 6 เมกะวัตต์ โดยมีสมมติฐานว่า ความเข้มแสงที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับมีค่าคงที่สม่ำเสมอ รวมไปถึงรับกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบหลัก อยู่ 1.5 เมกะวัตต์ และมีแบตเตอรี่เชื่อมต่ออยู่กับระบบโดยทำหน้าที่เฉพาะช่วยระบบรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ขณะเกิดการรบกวนเท่านั้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในตารางที่ 4

สาเหตุที่เลือกระบบทดสอบรูปแบบนี้เนื่องจากเป็นระบบที่มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดขึ้นในประเทศไทยจากนโยบายจากภาครัฐที่สนับสนุนรูปทอปเสรี และโรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่มีเชื้อเพลิงเป็นชีวมวล อย่างไรก็ตาม ระบบทดสอบดังกล่าวยังสามารถแสดงพฤติกรรมพลวัตเชิงความถี่ของ

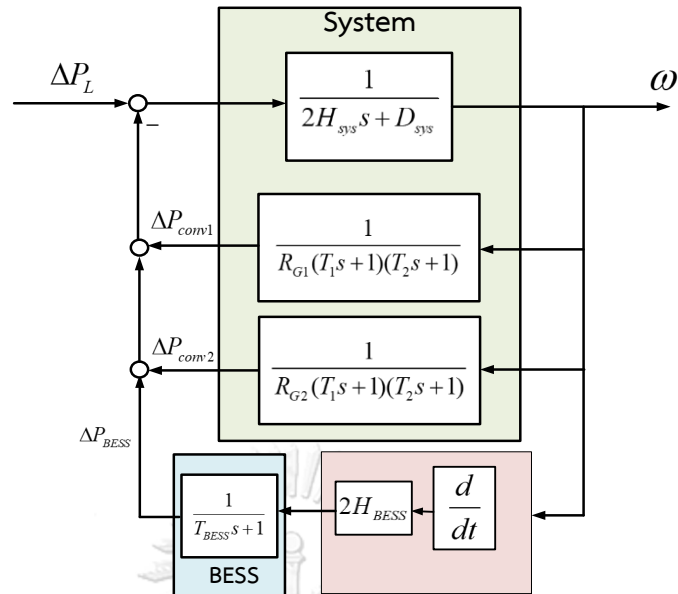
โรงไฟฟ้าขนาดเล็ก (SPP) เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ ถึงแม้จะไม่มีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่ออยู่กับระบบด้วย และมีศักยภาพที่จะเดินเครื่องแบบแยกโดดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้ารายย่อยในกรณีที่ระบบไฟฟ้าหลักไม่พร้อมเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.4 วงจรของระบบทดสอบในการศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการศึกษาที่ 1

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ( $H_{G1}$ )	5 วินาที
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 ( $H_{G2}$ )	5 วินาที
ค่าการหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ( $D_{G1}$ )	0
ค่าการหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 ( $D_{G2}$ )	0
ค่าคงที่ลักษณะครูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 ( $R_{G1}, R_{G2}$ )	0.05
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหัน ( $T_1$ )	0.5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมกังหัน ( $T_2$ )	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของแบตเตอรี่ ( $T_{BESS}$ )	0.01 วินาที
กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน ( $S_{base}$ )	10 เมกะวัตต์แอมป์แปร์



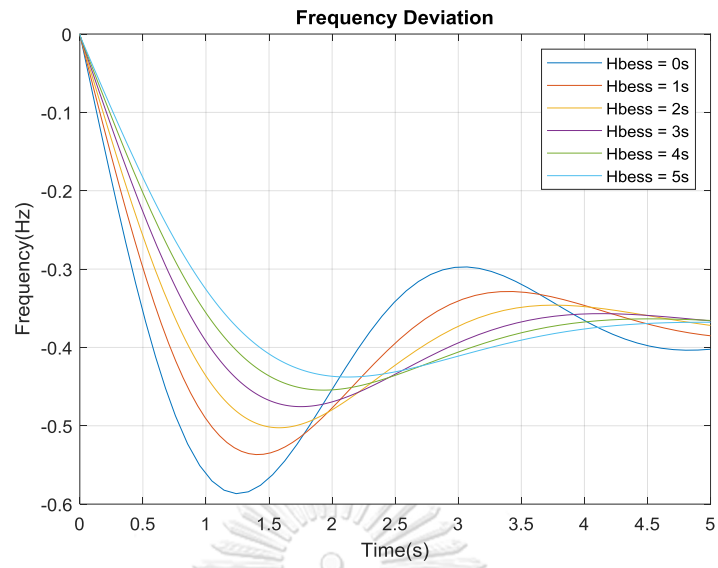
รูปที่ 4.5 แบบจำลองเชิงพลวัตที่ใช้ในการศึกษาที่ 1

แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ใช้ทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.5 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ระบบไฟฟ้าดั้งเดิม ส่วนควบคุมแบตเตอรี่ และแบตเตอรี่ ในกรณีที่ค่าการหน่วงเสมือนของแบตเตอรี่  $D_{BESS}$  มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนคงที่ของแบตเตอรี่สามารถควบคุมได้ผ่านการตั้งค่าตัวแปรค่าความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่  $H_{BESS}$

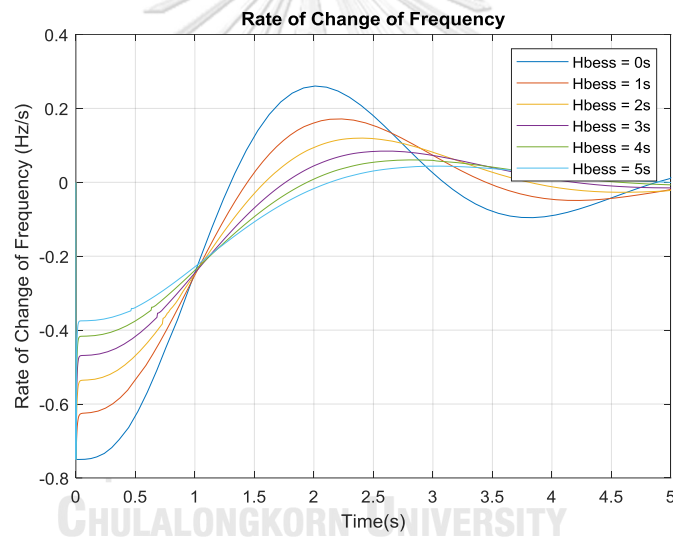
การทดสอบต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนที่กำหนดให้แบตเตอรี่กับพลังงานและค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องใช้ขณะช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ให้ระบบ โดยกำหนดให้การรบกวนคือการทรिปของเซอกิตเบรกเกอร์ขณะที่ระบบรับกำลังไฟฟ้าจากระบบหลัก อยู่ 0.15 ต่อหน่วยที่วินาทีที่ 0

#### 4.2.1.2 ผลการศึกษาที่ 1

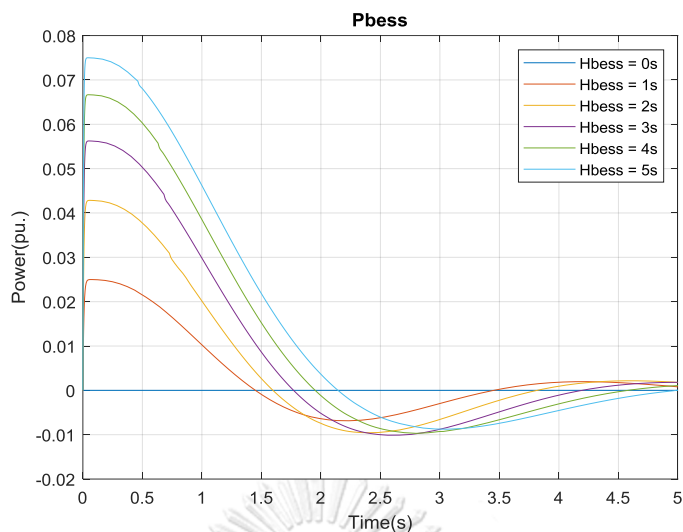
รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงค่าการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวน รูปที่ 4.8 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน และรูปที่ 4.9 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสขณะเกิดการรบกวน โดยกำหนดให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 5 วินาทีคงที่



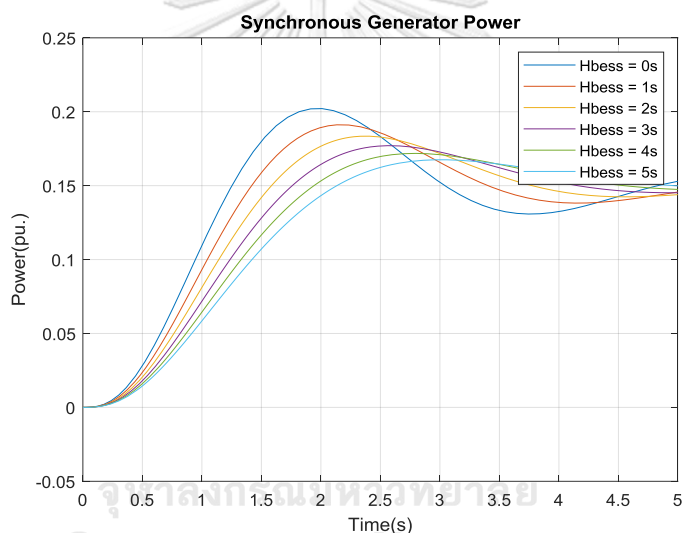
รูปที่ 4.6 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1



รูปที่ 4.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1



รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1



รูปที่ 4.9 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 1

จากรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าหากเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่ออกจากค่ามาตรฐานและอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลามีค่าน้อยลง ซึ่งสรุปได้ว่าแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนมากขึ้น จะส่งให้ระบบมีเสถียรภาพเชิงความถี่เมื่อเกิดการรบกวนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 4.13 สามารถสรุปได้ว่าหากควบคุมให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนคงที่ของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพลังงานของแบตเตอรี่ที่ต้องใช้ในการช่วยระบบรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นเดียวกันดังสรุปในตารางที่ 6 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าหากควบคุมให้แบตเตอรี่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนที่สูงขึ้นจะสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะการ

ตอบสนองเชิงความถี่เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ได้ดีขึ้น แต่ผลที่ตามมาคือขนาดของแบตเตอรี่จะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

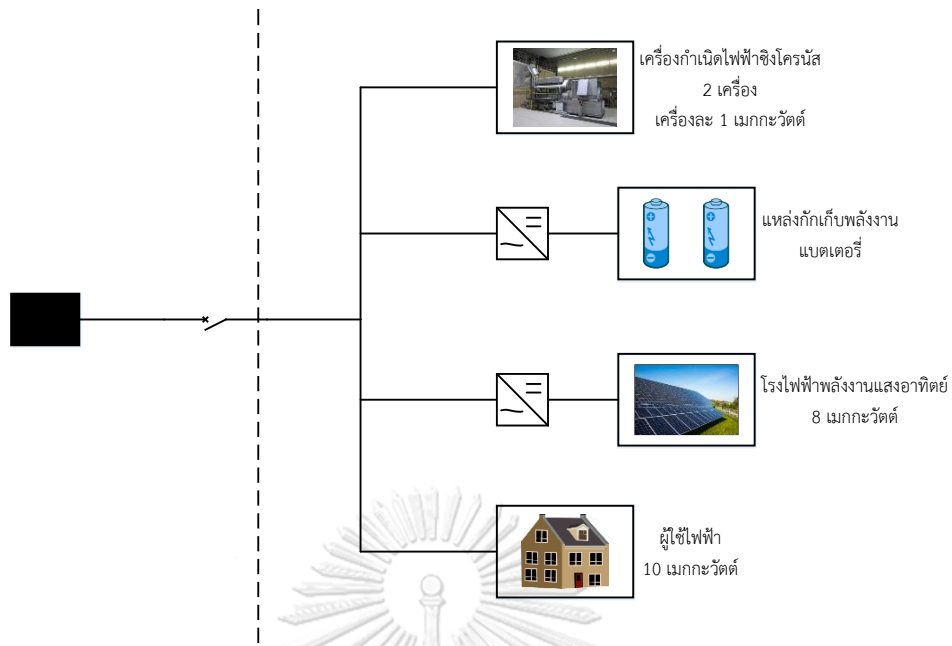
จะสังเกตเห็นจากรูปที่ 4.6 ได้ว่าการเบี่ยงเบนความถี่ของระบบไฟฟ้าเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลไม่กลับเข้าสู่ค่าเดิมก่อนการรบกวน เนื่องจากไม่ได้ใส่การตอบสนองระดับทุติยภูมิเข้าไปในระบบทดสอบ เนื่องจากต้องการศึกษาเฉพาะผลการตอบสนองระดับปฐมภูมิเท่านั้น ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของการศึกษาที่ 1

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน คงที่ของแบตเตอรี่ (วินาที)	ขนาดของการ เบี่ยงเบนความถี่ สูงสุด (เฮิรตซ์)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ (กิโลวัตต์)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
0	0.5866	-	-
1	0.5368	250	1.4352
2	0.5025	428	4.515
3	0.4756	562	6.728
4	0.4545	667	9.296
5	0.4378	750	14.241

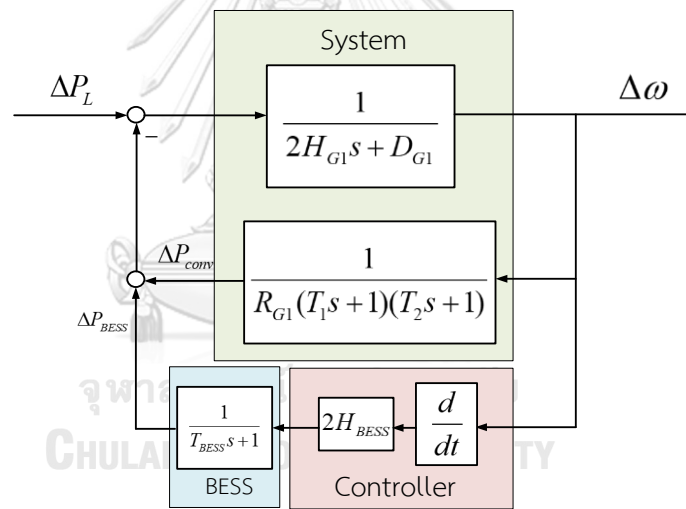
#### 4.2.2 การศึกษาที่ 2 การศึกษาขณะระบบกำลังเดินเครื่องแบบแยกโดด

##### 4.2.2.1 ระบบที่ใช้ทดสอบในการศึกษาที่ 2

รูปที่ 4.10 แสดงวงจรการทดสอบที่ 2 แต่กำหนดให้ระบบเดินเครื่องแบบแยกโดดอยู่ โดยมีจุดทำงานดังนี้ ผู้ใช้ไฟฟ้ามีขนาด 10 เมกะวัตต์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมามีสัดส่วนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง เครื่องละ 1 เมกะวัตต์และโรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ 8 เมกะวัตต์ โดยมีสมมุติฐานว่าความเข้มแสงที่โรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ได้รับมีค่าคงที่สม่ำเสมอ และมีแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับระบบโดยทำหน้าที่เฉพาะช่วยระบบรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ขณะเกิดการรบกวนเท่านั้นและกำหนดให้การรบกวนในการศึกษาที่ 2 นี้คือการทริบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องขณะที่ระบบเดินเครื่องแบบแยกโดดอยู่ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเหมือนกันกับการศึกษาที่ 1 และรูปที่ 4.11 แบบจำลองเชิงพลวัตของการศึกษาที่ 2



รูปที่ 4.10 วงจรของระบบทดสอบในการศึกษาที่ 2

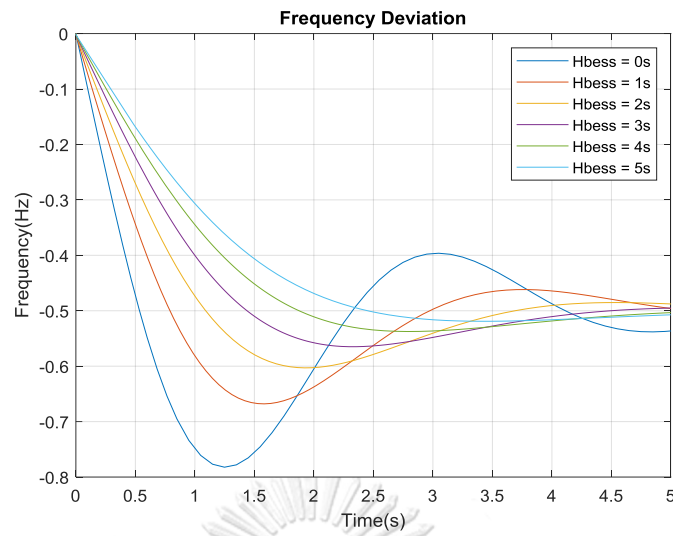


รูปที่ 4.11 แบบจำลองเชิงพลวัตที่ใช้ในการศึกษาที่ 2

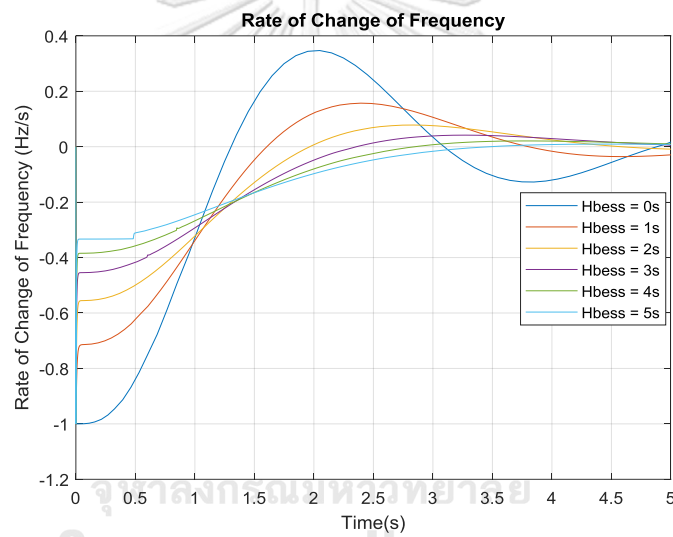
4.2.2.2 ผลการศึกษาที่ 2

รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดงค่าการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวน รูปที่ 4.14 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน และรูปที่ 4.15 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวน โดยกำหนดให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 5 วินาทีคงที่

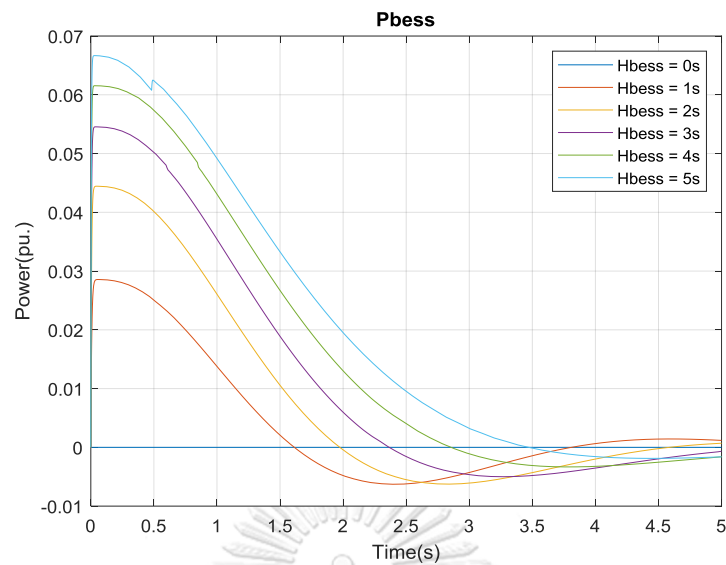




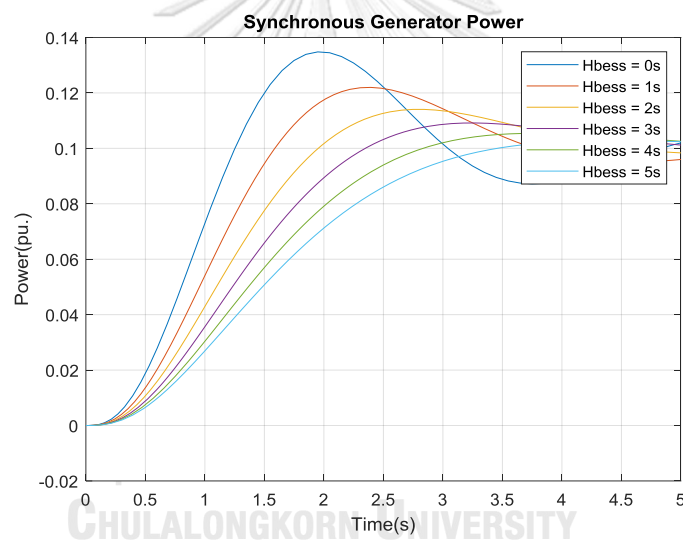
รูปที่ 4.12 การเบี่ยงเบนความถี่ซึ่งขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2



รูปที่ 4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ซึ่งขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2



รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2



รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวนในการศึกษาที่ 2

จากรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าหากเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของ แบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่ออกจากค่ามาตรฐานและอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลามีค่าน้อยลง ซึ่งสรุปได้ว่าแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนมากขึ้น จะส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพเชิงความถี่เมื่อเกิดการรบกวนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 4.13 สามารถสรุปได้ว่า หากควบคุมให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนคงที่ของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพลังงานของแบตเตอรี่ที่ต้องใช้ในการช่วยระบบรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นเดียวกันดังสรุปในตารางที่ 6 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าหากควบคุมให้แบตเตอรี่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนที่สูงขึ้นจะสามารถช่วยเพิ่ม

สมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ได้ดีขึ้น แต่ผลที่ตามมาคือขนาดของแบตเตอรี่จะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของการศึกษาที่ 2

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน คงที่ของแบตเตอรี่ (วินาที)	ขนาดของการ เบี่ยงเบนความถี่ สูงสุด (เฮิรตซ์)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ (กิโลวัตต์)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
0	0.7822	-	-
1	0.6680	286	1.9505
2	0.6030	444	3.6966
3	0.5648	545	8.0391
4	0.5374	615	9.2913
5	0.5190	667	9.0900

## บทที่ 5

การออกแบบความเฉื่อยเสมือนของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค LQR

ทฤษฎีการควบคุมมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการควบคุมที่ดีขึ้น การควบคุมแบบ Linear Quadratic Regulator (LQR) เป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Control Method) ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยมีข้อดีกว่าวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม เช่น วิธีการควบคุม PID กล่าวคือ วิธีดังกล่าวสามารถกำหนดความสำคัญของตัวแปรสถานะและค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการควบคุมได้

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบการประยุกต์ใช้เทคนิค LQR ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรวงนํ้าหนักกับตัวแปรสถานะ และวิธีการนำเทคนิค LQR ไปควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

### 5.1 การกำหนดรูปแบบปัญหา

จากควบคุมแบบ LQR จำเป็นที่จะต้องทำให้แบบจำลองของระบบอยู่ในรูปของปริภูมิสถานะ [26] รูปที่ 5.1 แสดงแนวคิดของการควบคุมด้วยวิธี LQR ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมตัวแปรสถานะ ป้อนกลับวงปิด โดยมีสมการจุดประสงค์ (Objective Function) ดังสมการที่ 5.1 และสมการเงื่อนไขบังคับ (Constraint Equation) ดังสมการ 5.2

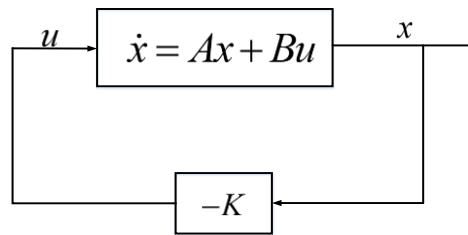
$$\min J = \int_0^{\infty} x^T Q x + u^T R u \, dt \quad (5.1)$$

โดยที่

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.2.1)$$

$$u = -Kx \quad (5.2.2)$$

เมื่อ	$Q$	คือ เมตริกซ์แสดงความสำคัญของตัวแปรสถานะ
	$R$	คือ เมตริกซ์แสดงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการควบคุม
	$x$	คือ เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ (State Vector)
	$u$	คือ เวกเตอร์ของสัญญาณขาเข้า (Input Vector)
	$A$	คือ เมตริกซ์พลวัต (Dynamic Matrix)
	$B$	คือ เมตริกซ์ขาเข้า (Input Matrix)
	$K$	คือ เมตริกซ์คงที่ของสัญญาณป้อนกลับ (Constant Feedback Matrix)



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการควบคุมตัวแปรสถานะป้อนกลับวงปิด

ผลลัพธ์ของการคำนวณจากวิธี LQR คือการหาเมตริกซ์  $K$  ที่สอดคล้องกับสมการจุดประสงค์ที่มีการถ่วงน้ำหนักระหว่างความสำคัญของตัวแปรสถานะ (Relative importance of error:  $Q$ ) และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการควบคุม (Expenditure of energy:  $R$ ) โดยสมการข้อจำกัดประกอบด้วยระบบที่ถูกจัดรูปให้อยู่ในรูปของปริภูมิสถานะ และสมการตัวแปรสถานะป้อนกลับ (State feedback) ขั้นตอนการคำนวณมี 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

1. คำนวณหาเมตริกซ์  $P$  จากสมการ reduced-matrix Riccati equation (5.3)

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (5.3)$$

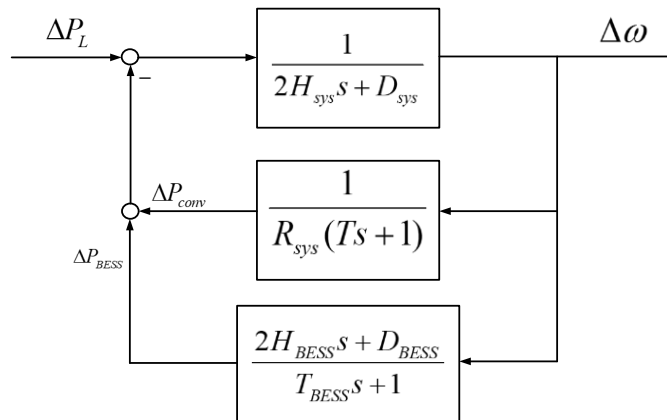
2. คำนวณหา  $K$  จากสมการ 5.4

$$K = R^{-1}B^T P \quad (5.4)$$

โดยเมตริกซ์  $K$  ที่ได้จากการคำนวณจะเป็นเมตริกซ์ที่เป็นค่าคงที่และสอดคล้องกับสมการจุดประสงค์และสมการเงื่อนไขบังคับ

## 5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าแยกโดดให้เหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยหลักการ LQR โดยที่แบบจำลองของระบบที่จะใช้ในการออกแบบวิธีการควบคุมความเฉื่อยเสมือนเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากบทที่ 2 และบทที่ 3 โดยระบบดังกล่าวเป็นระบบไฟฟ้าแยกโดดที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เมื่อถูกควบคุมให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและผู้ใช้ไฟฟ้า แบบจำลองดังรูปที่ 5.2 ซึ่งจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบประกอบด้วย 3 ส่วนคือ แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบดั้งเดิมแบบจำลองเชิงพลวัตของอุปกรณ์ควบคุมอุปกรณ์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และแบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย เพื่อให้สะดวกแก่การออกแบบ จึงได้รวมค่าคงที่ทางเวลาของกังหันและอุปกรณ์ควบคุมความเร็วกังหันเหลือเพียง 1 ตัว



รูปที่ 5.2 แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ใช้บล็อกแบบตัวควบคุม

- เมื่อ  $H_{sys}$  คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ  
 $D_{sys}$  คือ ค่าการหน่วงของระบบ  
 $R_{sys}$  คือ ค่าคงที่ลักษณะรูปของระบบ  
 $T$  คือ ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมต้นกำลังและกังหัน  
 $\Delta P_L$  คือ การรบกวนของระบบ  
 $H_{BESS}$  คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่  
 $D_{BESS}$  คือ ค่าการหน่วงเสมือนของแบตเตอรี่  
 $T_{BESS}$  คือ ค่าคงที่ทางเวลาของแบตเตอรี่

เนื่องจากค่าคงที่ทางเวลาของแบตเตอรี่มีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมต้นกำลังและกังหันรวมกันมาก จึงสามารถละเลยทิ้งไป สมการที่ 5.5 เป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองเชิงพลวัตรูปที่ 5.2 ที่ละเลยค่าคงที่ทางเวลาของแบตเตอรี่

เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการพิจารณาทางคณิตศาสตร์ต่อไป จะกำหนดให้ตัวแปรที่แทนการเบี่ยงเบนความถี่ของระบบไฟฟ้าเป็น  $\omega$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่คือ  $\dot{\omega}$

$$F(s) = \frac{\omega}{\Delta P_L} = \frac{R_{sys} Ts + 1}{R_{sys} \tilde{H} Ts^2 + R_{sys} (\tilde{H} + T)s + R_{sys} \tilde{D} + 1} \quad (5.5)$$

โดยที่

$$\tilde{H} = H_{sys} + H_{BESS} \quad (5.6)$$

$$\tilde{D} = D_{sys} + D_{BESS} \quad (5.7)$$

จากสมการที่ 5.5 สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของปริภูมิสถานะได้ดังสมการที่ 5.8 และ 5.9

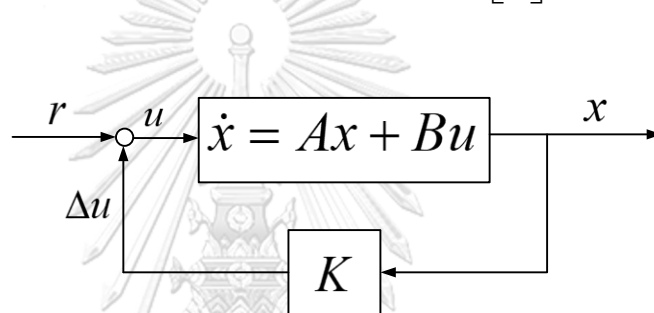
$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \ddot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{R_{sys} \tilde{D} + 1}{R_{sys} \tilde{H} T} & -\frac{\tilde{H} + T}{\tilde{H} T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Delta P_L}{\tilde{H} T} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

### 5.3 การประยุกต์ใช้เทคนิค LQR

จากสมการที่ 5.8 และ 5.9 ซึ่งเป็นสมการที่ถูกจัดอยู่ในรูปปริภูมิสถานะซึ่งมีพฤติกรรมเชิงพลวัตเหมือนกับระบบแยกโดดที่ต้องการศึกษา เมื่อออกแบบตัวควบคุมโดยใช้หลักการ LQR ดังรูปที่ 5.3 โดยที่ต้องการให้สัญญาณขาเข้าเป็นไปตามสมการที่ 5.10 [27] เนื่องจากสมการที่ 5.8 มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ จึงต้องทำสมการที่ 5.8 ให้เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ 5.11

$$\Delta u = \Delta \tilde{H} = \tilde{H} - \tilde{H}_0 = -[K_1 \quad K_2] \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$



รูปที่ 5.3 แบบจำลองการควบคุมตัวแปรสถานะวงจรถที่ เหมาะสมกับการควบคุมความเฉื่อยเสมือน

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \ddot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{R_{sys} \tilde{D}_0 + 1}{R_{sys} \tilde{H}_0 T} & -\frac{\tilde{H}_0 + T}{\tilde{H}_0 T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\Delta P_L}{\tilde{H}_0^2 T} \end{bmatrix} \Delta \tilde{H} \quad (5.11)$$

เมื่อ  $\tilde{H}_0$  คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบก่อนเกิดการรบกวน  
 $\tilde{D}_0$  คือ ค่าการหน่วงของระบบรวมก่อนการรบกวน

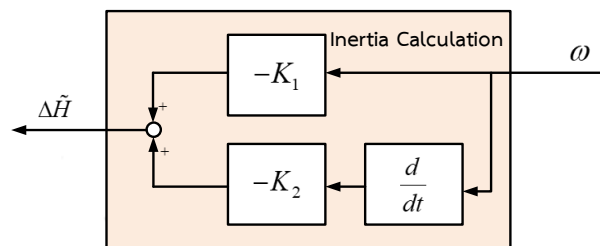
### 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรถ่วงน้ำหนักกับตัวแปรสถานะ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของปริภูมิสถานะกำหนดให้ตัวแปรสถานะดังสมการที่ 5.11 คือ  $\omega$  และ  $\dot{\omega}$  และสัญญาณขาเข้าคือ  $\Delta \tilde{H}$  ดังนั้น ด้วยเทคนิคของ LQR จะมีตัวแปรถ่วงน้ำหนักทั้งหมด 3 ตัวคือตัวแปร  $Q_1$  ซึ่งมีผลต่อตัวแปรสถานะ  $\omega$  ตัวแปร  $Q_2$  ซึ่งมีผลต่อตัวแปรสถานะ  $\dot{\omega}$  และ ตัวแปร  $R$  ซึ่งมีผลต่อตัวแปรสถานะ  $\Delta \tilde{H}$

ตัวแปรถ่วงน้ำหนักทั้ง 3 ตัวกล่าว มีความสัมพันธ์กันในเชิงอัตราส่วน (Relative Relation) ไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน

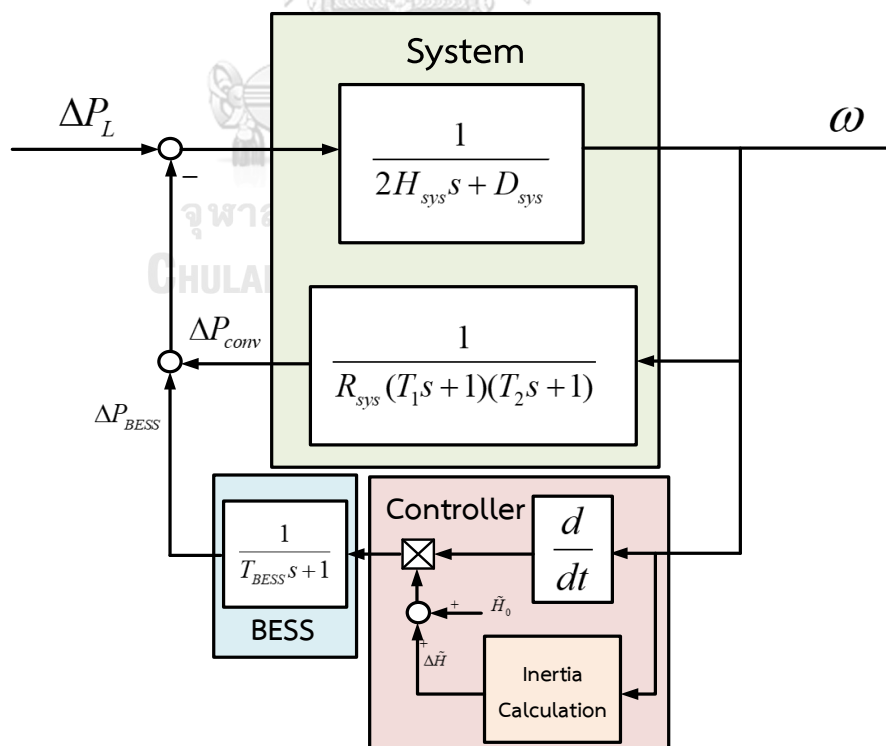
### 5.5 วิธีการนำเทคนิค LQR ไปควบคุมแบตเตอรี่

หลังจากออกแบบระบบให้เหมาะสมกับการประยุกต์เทคนิค LQR รวมไปถึงกำหนดค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้คือจากการออกแบบส่วนควบคุมคือเมตริกซ์  $K$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ และจะเป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในส่วนคำนวณหาค่าความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งสัญญาณขาเข้าของส่วนควบคุมคือการเบี่ยงเบนความถี่ และสัญญาณขาออกของส่วนควบคุมคือการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่



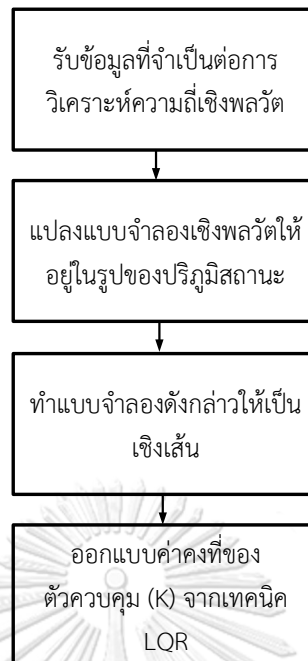
รูปที่ 5.4 ส่วนคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่

ในรูปที่ 5.5 ได้แสดงส่วนของอุปกรณ์ควบคุมแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค LQR รวมไปถึงองค์ประกอบเชิงพลวัตของระบบและของแบตเตอรี่ ที่จะถูกนำไปทดสอบในบทที่ 6 ต่อไป และในรูปที่ 5.6 ได้สรุปวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค LQR



รูปที่ 5.5 แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่แบตเตอรี่ถูกควบคุมด้วยเทคนิค LQR





รูปที่ 5.6 สูตรวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค LQR

## บทที่ 6

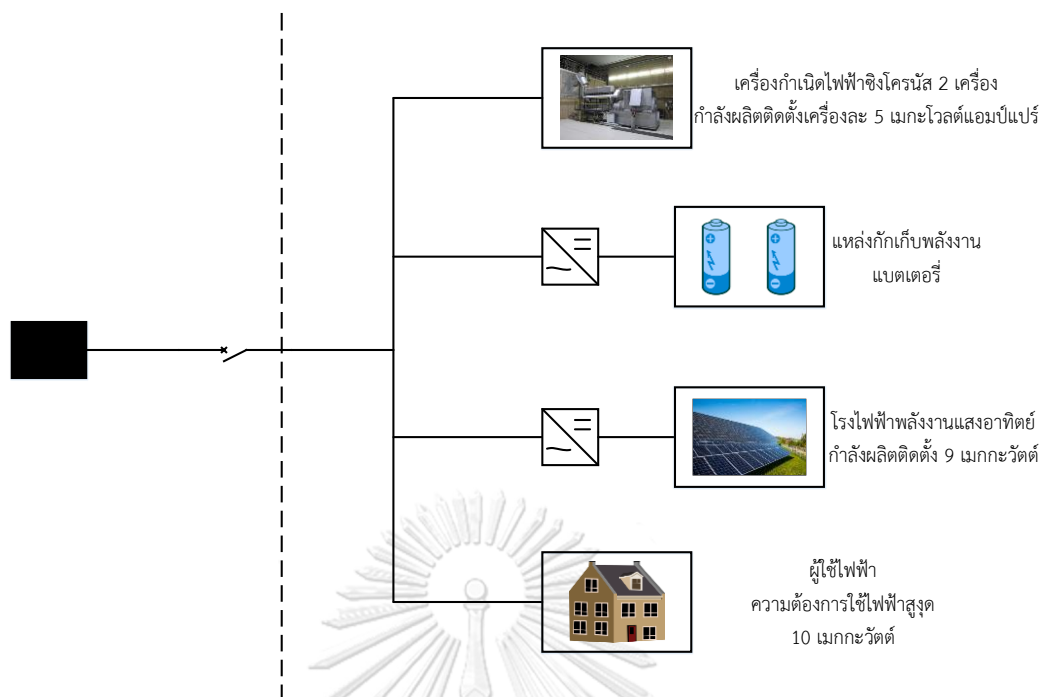
### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่นำแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนด้วยหลักการ LQR มาช่วยระบบไฟฟ้ารักษาเสถียรภาพความถี่ขณะเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 การทดสอบตามประเภทของการรบกวนและพฤติกรรมของระบบ เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย ระบบทดสอบ วิธีทดสอบ ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 6.1 ระบบทดสอบและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ระบบที่จะนำมาใช้ในการทดสอบเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็กดังรูปที่ 6.1 ซึ่งเป็นระบบที่สามารถเดินเครื่องได้ทั้งในสถานะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักและสถานะแยกโดด โดยที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าหลักและระบบขนาดเล็กมีเพียง 1 จุด กำหนดให้ระบบไฟฟ้าหลักมีกำลังการผลิตติดตั้ง 10000 เมกะวัตต์และความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของระบบไฟฟ้าหลักคือ 8000 เมกะวัตต์ และระบบไฟฟ้าขนาดเล็กประกอบด้วย 4 ส่วนหลักได้แก่

5. โรงไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นอุปกรณ์หลัก จำนวน 2 เครื่อง กำลังผลิตติดตั้งเครื่องละ 5 เมกะวัตต์แอมป์แปร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่มีโมเมนต์ความเฉื่อย ที่จะช่วยในการรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบ
6. โรงไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ กำลังผลิตติดตั้ง 9 เมกะวัตต์ เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยแต่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่ปล่อยแก๊สเรือนกระจก
7. แหล่งกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีความเฉื่อยเสมือนเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความถี่ให้กับระบบเมื่อระบบถูกรบกวนด้วยเทคนิค LQR
8. ผู้ใช้ไฟฟ้า มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด 10 เมกะวัตต์



รูปที่ 6.1 วงจรของระบบทดสอบ

ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันและอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของกังหันของแต่ละประเภทมีค่าแตกต่างกันตามคุณลักษณะทางกลของต้นกำลัง เช่น กังหันไอน้ำ กังหันน้ำ และ กังหันแก๊ส เป็นต้น แล้วแต่ระบบที่จะนำมาใช้ศึกษา ในระบบทดสอบนี้ เลือกใช้อุปกรณ์ดังกล่าวแทนโรงไฟฟ้าประเภทชีวมวลซึ่งใช้กังหันไอน้ำเป็นต้นกำลัง

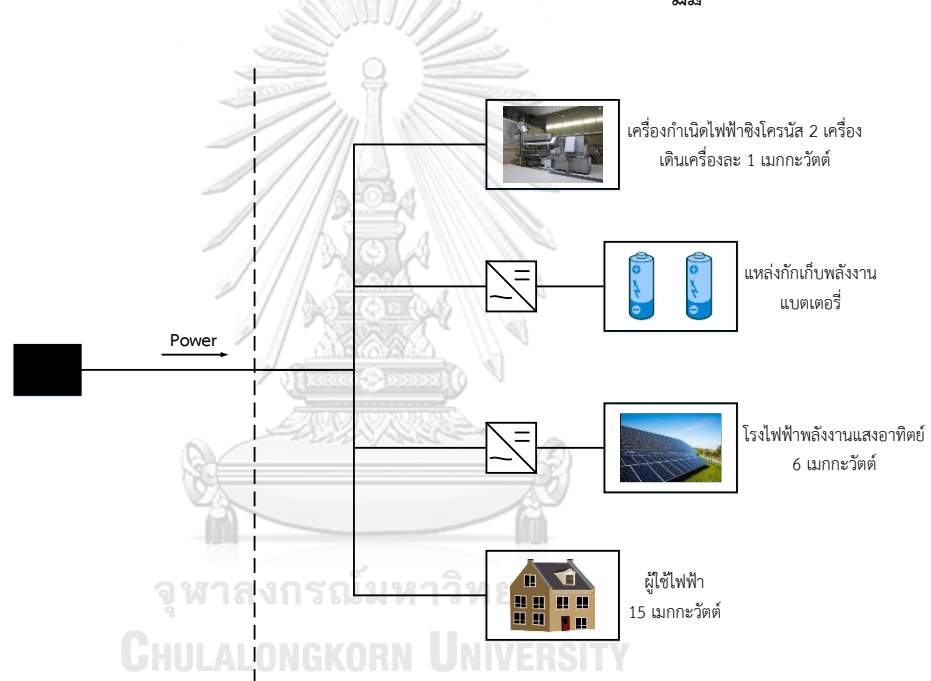
## 6.2 วิธีทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบประกอบด้วย 4 การทดสอบ แบ่งตามประเภทการรบกวนและรูปแบบการเดินเครื่อง ดังนี้

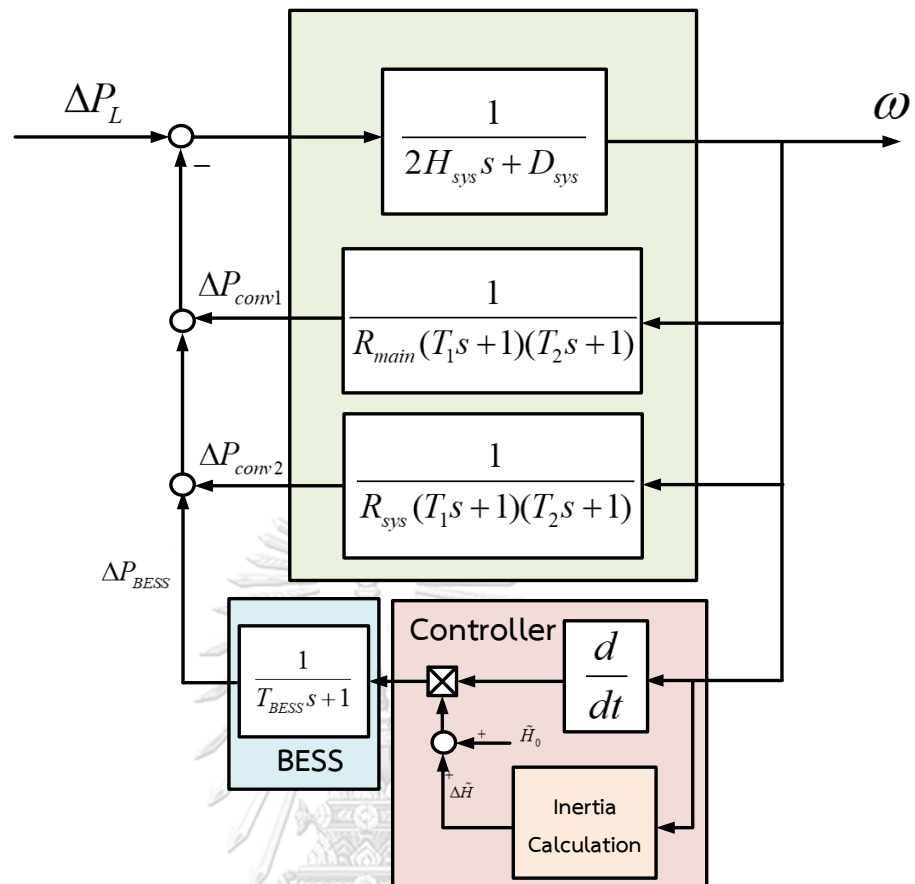
1. การทริปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กขณะที่เดินเครื่องแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก (Grid – connected mode)
2. การทริปของเซอกิตเบรกเกอร์เชื่อมต่อขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังรับกำลังไฟฟ้าเข้า
3. การทริปของเซอกิตเบรกเกอร์เชื่อมต่อขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าออก
4. การทริปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กขณะที่เดินเครื่องแบบแยกโดด (Islanding mode)

### 6.2.1 การทดสอบที่ 1 การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่อกับระบบหลัก

การรบกวนในการทดสอบนี้คือเกิดการทริปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 1 เครื่องในระบบขนาดเล็กที่ยังคงเชื่อมต่ออยู่กับระบบหลักอยู่ โดยที่จุดทำงานขณะการรบกวนมีค่าดังนี้ กำลังการผลิตจากระบบไฟฟ้าหลัก 8000 เมกะวัตต์ กำลังการผลิตจากระบบทดสอบ 10 เมกะวัตต์ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 2 เครื่อง ผลิตเครื่องละ 1 เมกะวัตต์ และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิต 6 เมกะวัตต์ และในระบบทดสอบมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า 10 เมกะวัตต์ โดยรูปที่ 6.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 1 และรูปที่ 6.3 แสดงแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ใช้ในการทดสอบที่ 1 โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 7 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบที่ใช้ทดสอบมีค่า 9.95 วินาทีเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานของระบบ

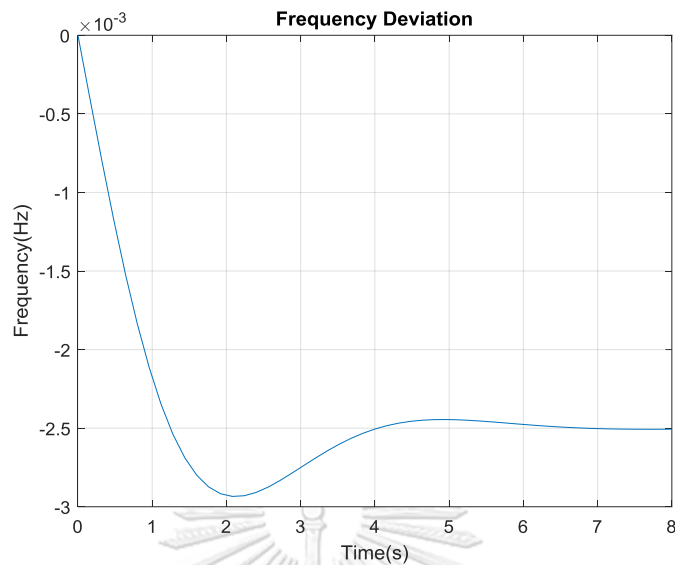


รูปที่ 6.2 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 1

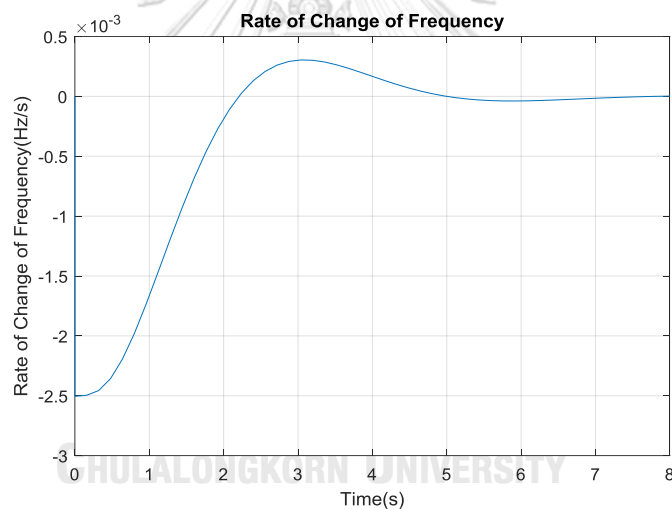


รูปที่ 6.3 แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ใช้ในการทดสอบที่ 1  
ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 1

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบไฟฟ้าหลัก ( $H_{main}$ )	10 วินาที
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก ( $H_{sys}$ )	5 วินาที
ค่าการหน่วงของระบบไฟฟ้าหลัก ( $D_{main}$ )	0
ค่าการหน่วงของไฟฟ้าระบบ ( $D_{sys}$ )	
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่ก่อนการรบกวน ( $H_{BESS}$ )	0 วินาที
ค่าการหน่วงเสมือนของแบตเตอรี่ ( $D_{BESS}$ )	0
ค่าคงที่ลักษณะรูปของระบบไฟฟ้าหลัก ( $R_{main}$ )	0.05
ค่าคงที่ลักษณะรูปของระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก ( $R_{sys}$ )	0.05
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหัน ( $T_1$ )	0.5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมกังหัน ( $T_2$ )	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของแบตเตอรี่ ( $T_{BESS}$ )	0.01 วินาที



รูปที่ 6.4 การเบี่ยงเบนความถี่ของระบบขณะยังไม่มีแบตเตอรี่ของการทดสอบที่ 1

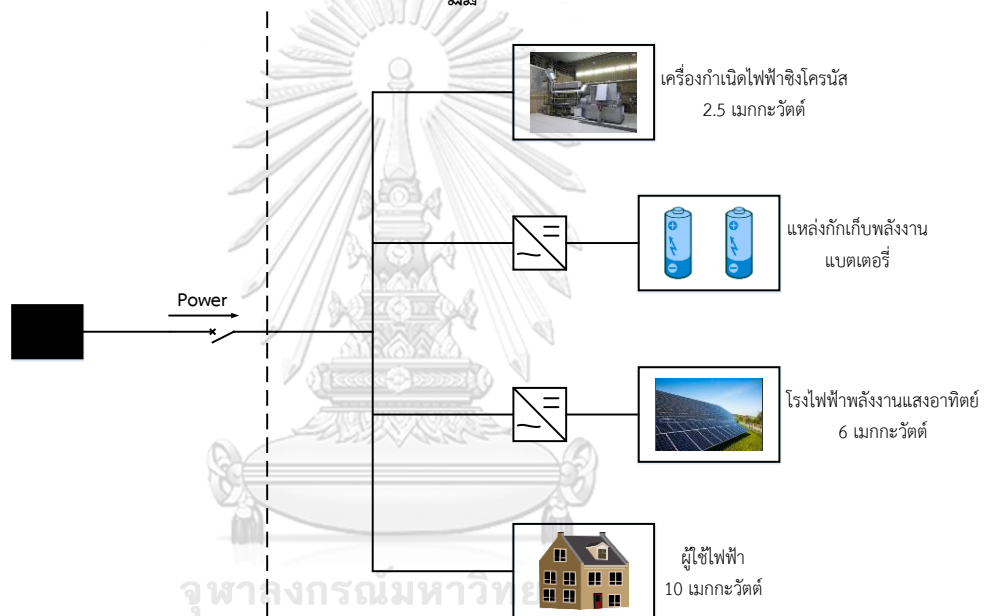


รูปที่ 6.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบขณะยังไม่มีแบตเตอรี่ของการทดสอบที่ 1

รูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 แสดงการเบี่ยงเบนและอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของการทดสอบที่ 1 ขณะระบบกับเก็บพลังงานแบตเตอรี่ยังไม่ทำงาน ซึ่งขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดมีค่า 2.9 มิลลิเฮิรตซ์ และ ขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุดมีค่า 2.5 มิลลิเฮิรตซ์ต่อวินาที ซึ่งทั้ง 2 ค่ามีค่าน้อยมากเนื่องจากระบบทดสอบเชื่อมต่อกับระบบใหญ่อยู่ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้แบตเตอรี่ในการเพื่อสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่

## 6.2.2 การทดสอบที่ 2 การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังรับกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนผ่านไปสู่อโหมตแยกโดด

การรบกวนในการทดสอบระบบคือเกิดการทริบของเซอกิตเบรกเกอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าขนาดเล็กและระบบไฟฟ้าหลักที่วินาทีที่ 0 โดยจุดทำงานขณะนั้นคือ ระบบขนาดเล็กรับกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบไฟฟ้าหลักอยู่ 1.5 เมกะวัตต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องผลิตทั้งหมด 2.5 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิต 6 เมกะวัตต์ และความต้องการใช้ไฟฟ้า 10 เมกะวัตต์ ดังวงจรรูปที่ 6.6 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบปรากฏในตารางที่ 8 และรูปที่ 6.7 แสดงแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบทดสอบที่ 2 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบที่ใช้ทดสอบมีค่า 5 วินาทีเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานของระบบ

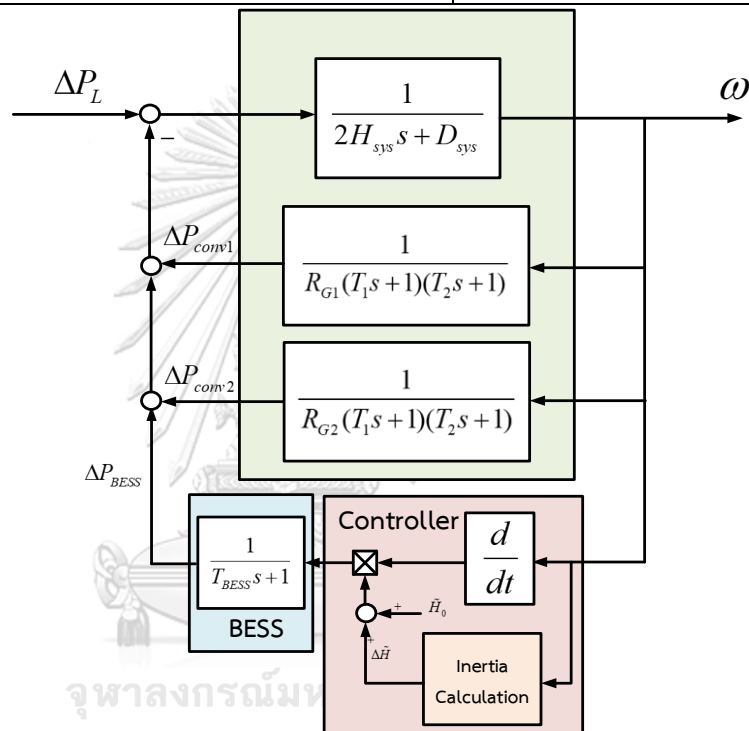


รูปที่ 6.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 2

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 2

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ( $H_{G1}$ )	5 วินาที
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 ( $H_{G2}$ )	5 วินาที
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ ( $H_{sys}$ )	5 วินาที
ค่าการหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ( $D_{G1}$ )	0
ค่าการหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 2 ( $D_{G2}$ )	0
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่ก่อนการรบกวน ( $H_{BESS}$ )	0 วินาที

ค่าการหน่วงเสมือนของแบตเตอรี่ ( $D_{BESS}$ )	0
ค่าคงที่ลักษณะรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 ( $R_{G1}, R_{G2}$ )	0.05
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหัน ( $T_1$ )	0.5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมกังหัน ( $T_2$ )	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของแบตเตอรี่ ( $T_{BESS}$ )	0.01 วินาที
กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน ( $S_{base}$ )	10 เมกะวัตต์แอมป์แปร์



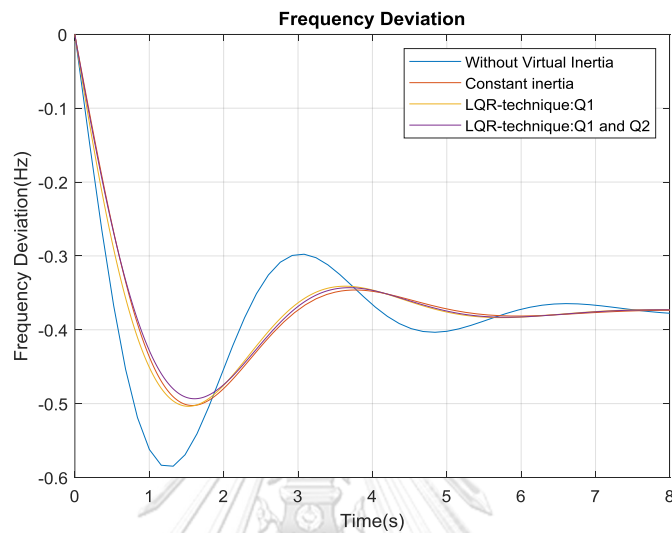
รูปที่ 6.7 แบบจำลองเชิงพลวัตของการทดสอบที่ 2

การทดสอบนี้ถูกแบ่งออกเป็น 4 กรณีย่อยคือ กรณีที่ 2.1 ไม่ควบคุมให้แบตเตอรี่มีความเฉื่อยเสมือน กรณีที่ 2.2 ควบคุมให้แบตเตอรี่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนคงที่ 2 วินาที กรณีที่ 2.3 ควบคุมแบตเตอรี่ให้มีความเฉื่อยเสมือนด้วยเทคนิค LQR โดยปรับเฉพาะตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_1$  และ กรณีที่ 2.4 ควบคุมแบตเตอรี่ให้มีความเฉื่อยเสมือนด้วยเทคนิค LQR โดยปรับตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_1$  และ  $Q_2$  โดยค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักปรากฏดังตารางที่ 9 ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักของการทดสอบที่ 2

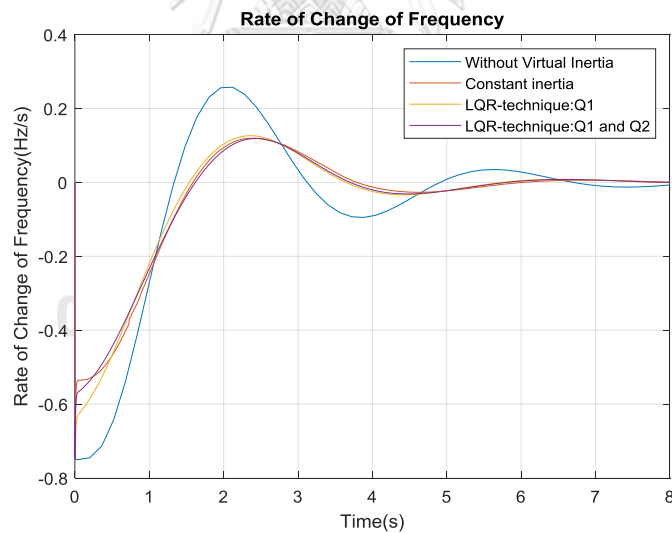
	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก
	$Q_1$	$Q_2$	$R$
กรณี 2.1	-	-	-



กรณี 2.2	-	-	-
กรณี 2.3	800000	1	1
กรณี 2.4	800000	100000	1

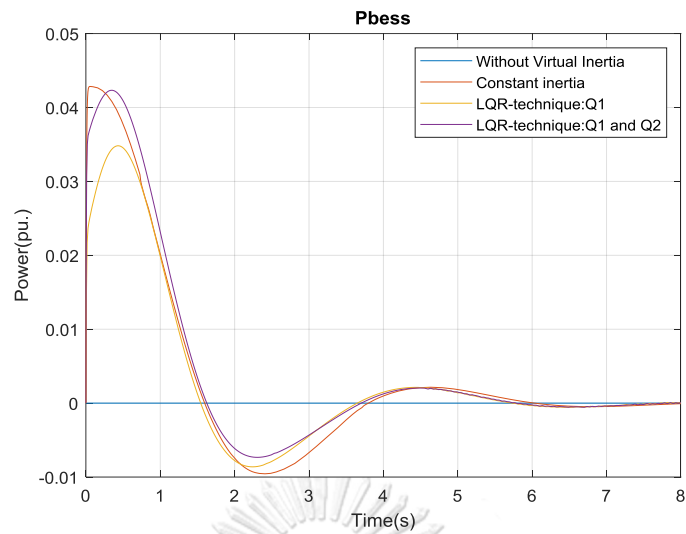


รูปที่ 6.8 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2

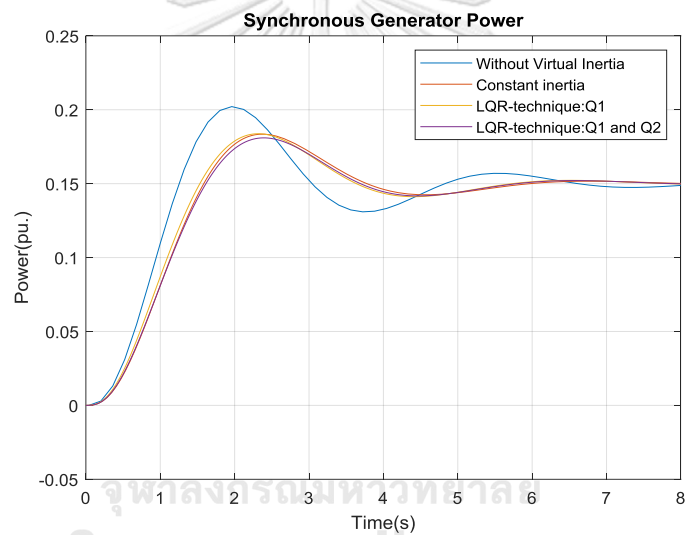


รูปที่ 6.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2

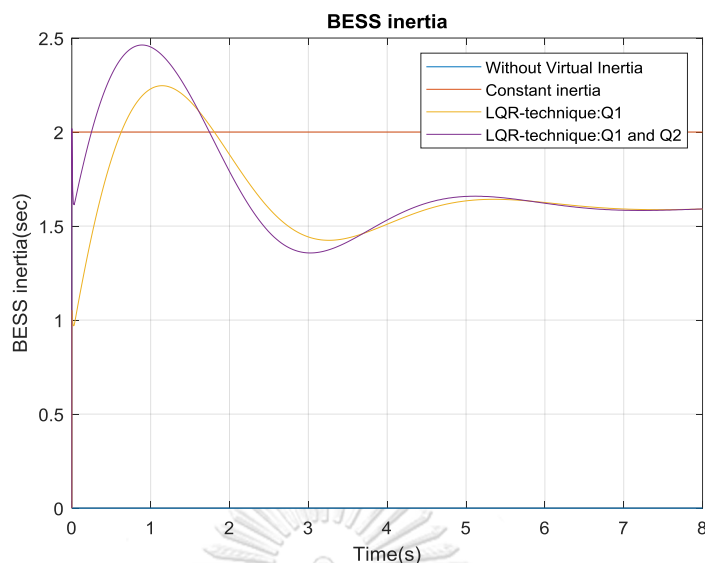
รูปที่ 6.8 แสดงการเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของทั้ง 4 กรณีย่อยในการทดสอบที่ 2 พบว่า กรณีที่ 2.1 ขนาดของความถี่ที่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 0.5866 เฮิรตซ์ กรณีที่ 2.2 ขนาดของความถี่ที่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 0.5025 เฮิรตซ์ กรณีที่ 2.3 และ 2.4 มีค่า 0.5009 เฮิรตซ์ และ 0.4913 เฮิรตซ์ตามลำดับ และ รูปที่ 6.9 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2



รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2



รูปที่ 6.11 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2



รูปที่ 6.12 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 2

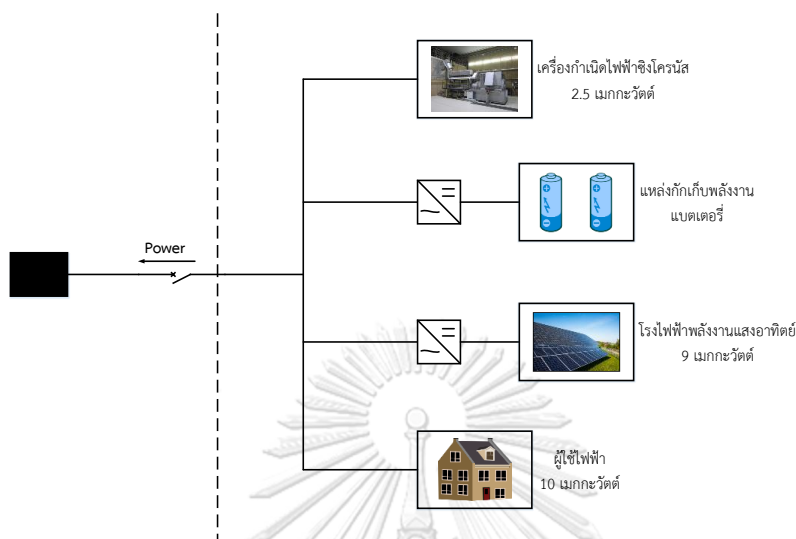
รูปที่ 6.10 แสดงกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน และ รูปที่ 6.11 แสดงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวน รูปที่ 6.12 แสดงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนในการทดสอบที่ 3 ถูกสรุปในตารางที่ 10 ตารางที่ 10 ตารางสรุปผลการทดสอบที่ 2

รูปแบบการทดสอบ	การเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (เฮิรตซ์ต่อวินาที)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
กรณี 2.1	-0.5866	-0.73	-	-
กรณี 2.2	-0.5025	-0.5620	428 (จ่าย)	4.515 (จ่าย)
กรณี 2.3	-0.5009	-0.6331	360 (จ่าย)	5.658 (จ่าย)
กรณี 2.4	-0.4913	-0.5723	432 (จ่าย)	7.136 (จ่าย)

**6.2.3 การทดสอบที่ 3** การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนผ่านไปสู่โหมดแยกโดด

การรบกวนในการทดสอบระบบนี้คล้ายกับการทดสอบที่ 2 แต่แตกต่างกันที่ ณ ขณะที่เกิดการรบกวน โดยมีจุดทำงานดังนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องกำลังการผลิตรวม 2.5 เมกะ

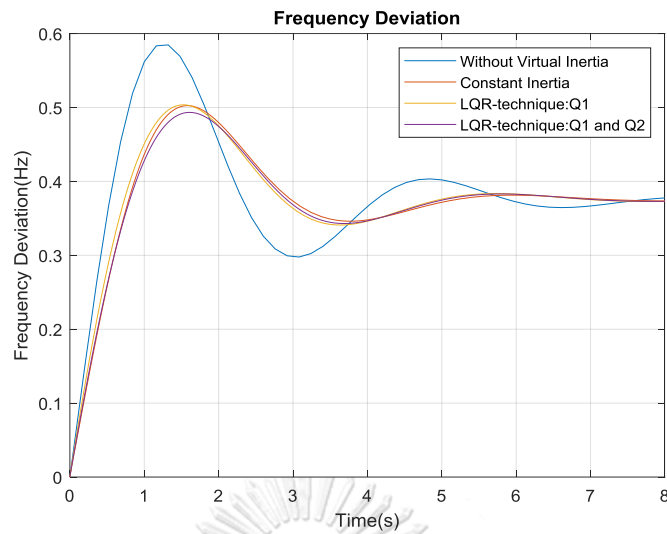
วัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิต 9 เมกะวัตต์ ความต้องการใช้ไฟฟ้า 10 เมกะวัตต์ ดังนั้นระบบแยกโอดกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบหลัก 0.15 เมกะวัตต์ ดังวงจรรูปที่ 6.13 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบมีค่าเท่ากับกับการทดสอบที่ 2



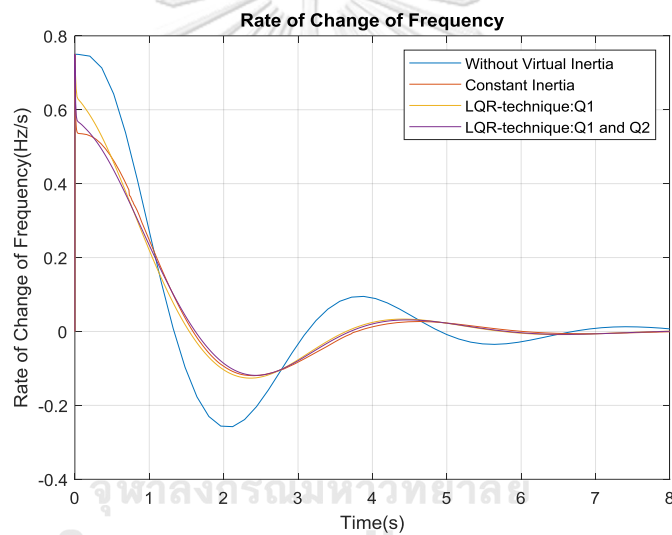
รูปที่ 6.13 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 3

การทดสอบนี้ถูกแบ่งออกเป็น 4 กรณีย่อยคือ กรณีที่ 3.1 ไม่ควบคุมให้แบตเตอรี่มีความเฉื่อยเสมือน กรณีที่ 3.2 ควบคุมให้แบตเตอรี่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนคงที่ 2 วินาที กรณีที่ 3.3 ควบคุมแบตเตอรี่ให้มีความเฉื่อยเสมือนด้วยเทคนิค LQR โดยปรับเฉพาะตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_1$  และ กรณีที่ 3.4 ควบคุมแบตเตอรี่ให้มีความเฉื่อยเสมือนด้วยเทคนิค LQR โดยปรับตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_1$  และ  $Q_2$  โดยค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักปรากฏดังตารางที่ 11 ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักของการทดสอบที่ 3

	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก $Q_1$	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก $Q_2$	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก $R$
กรณี 3.1	-	-	-
กรณี 3.2	-	-	-
กรณี 3.3	800000	1	1
กรณี 3.4	800000	100000	1

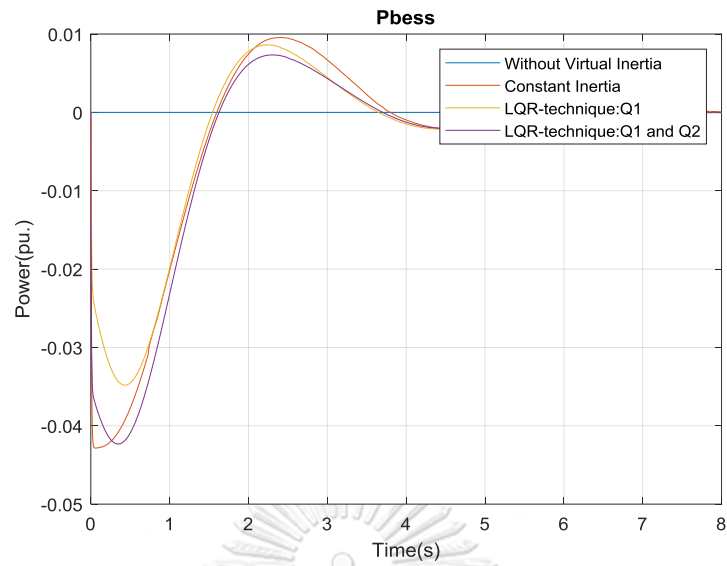


รูปที่ 6.14 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3

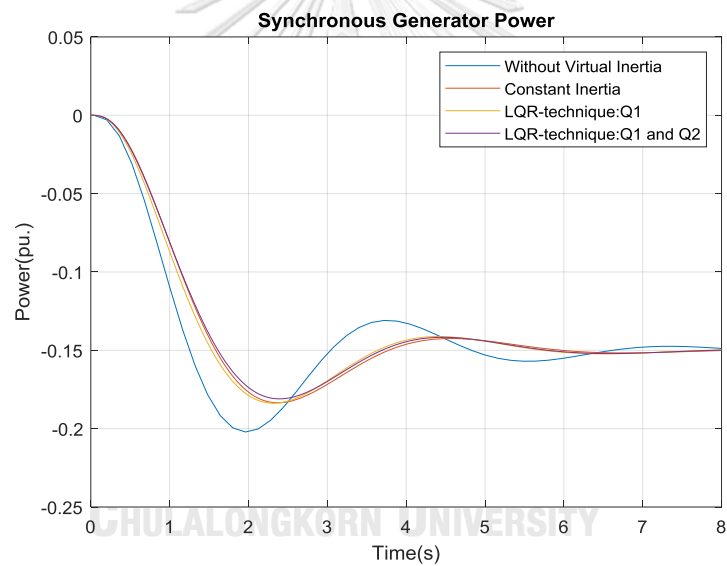


รูปที่ 6.15 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3

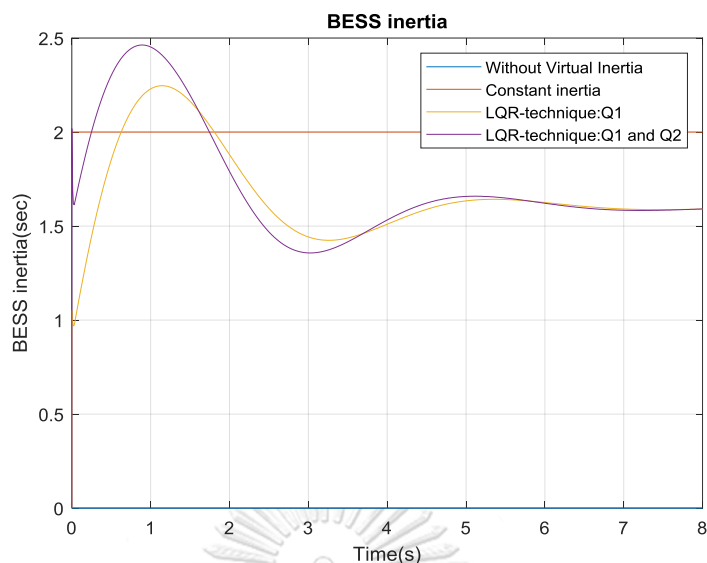
รูปที่ 6.14 แสดงการเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของทั้ง 4 กรณีย่อยในการทดสอบที่ 3 พบว่า กรณีที่ 3.1 ขนาดของความถี่ที่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 0.5866 เฮิรตซ์ กรณีที่ 3.2 ขนาดของความถี่ที่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 0.5025 เฮิรตซ์ กรณีที่ 3.3 และ 3.4 มีค่า 0.5009 เฮิรตซ์ และ 0.4913 เฮิรตซ์ตามลำดับ และ รูปที่ 6.15 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3



รูปที่ 6.16 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3



รูปที่ 6.17 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3



รูปที่ 6.18 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 3

รูปที่ 6.16 แสดงกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน และ รูปที่ 6.17 แสดงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวน และ รูปที่ 6.18 แสดงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนในการทดสอบที่ 3 ถูกสรุปในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ตารางสรุปผลการทดสอบที่ 3

รูปแบบการทดสอบ	การเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (เฮิรตซ์ต่อวินาที)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
กรณี 3.1	+0.5866	+0.7300	-	-
กรณี 3.2	+0.5025	+0.5620	428 (รับ)	4.515 (รับ)
กรณี 3.3	+0.5009	+0.6331	360 (รับ)	5.658 (รับ)
กรณี 3.4	+0.4913	+0.5723	432 (รับ)	7.136 (รับ)

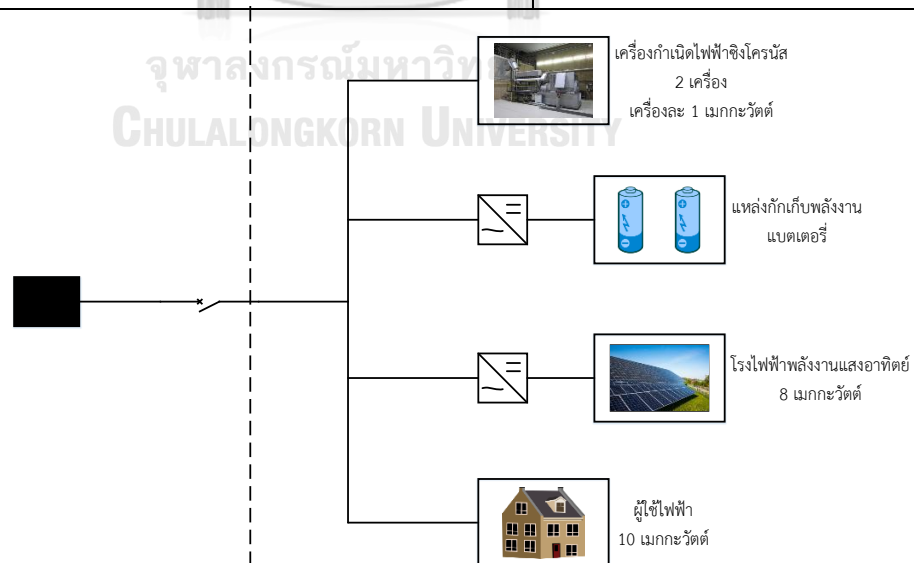
#### 6.2.4 การทดสอบที่ 4 การทดสอบขณะระบบไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังเดินเครื่องแบบแยกโดด

การรบกวนในการทดสอบนี้คือการทริบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องขณะที่ระบบกำลังเดินเครื่องแบบแยกโดด ซึ่งส่งผลให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบแยกโดดลดลงจาก 5 วินาทีเป็น 2.5 วินาที ขณะเกิดการรบกวน โดยที่มีจุดทำงานดังนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 2 เครื่อง

เดินเครื่องละ 1 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิต 8 เมกะวัตต์ ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 13 และรูปที่ 6.20 แสดงแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในการทดสอบที่ 4 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบที่ใช้ทดสอบมีค่า 2.5 วินาทีเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานของระบบ

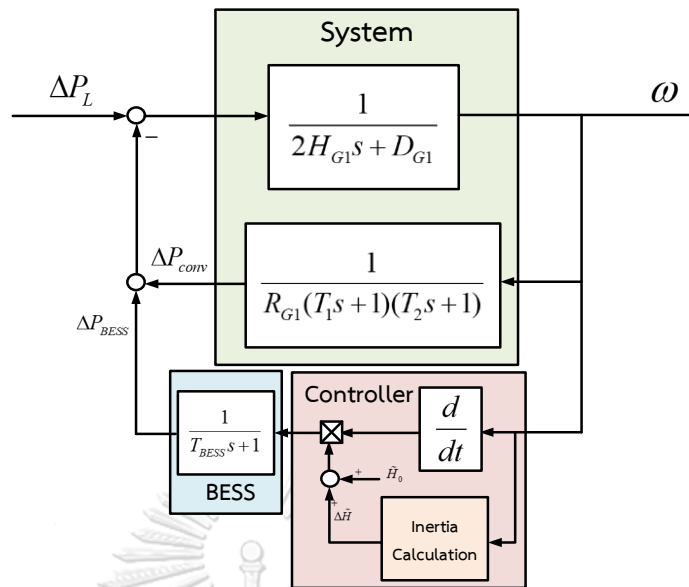
ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 4

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ( $H_{G1}$ )	5 วินาที
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ ( $H_{sys}$ )	2.5 วินาที
ค่าการหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 ( $D_{G1}$ )	0
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่ก่อนการรบกวน ( $H_{BESS}$ )	0 วินาที
ค่าการหน่วงเสมือนของแบตเตอรี่ ( $D_{BESS}$ )	0
ค่าคงที่ลักษณะรูปของระบบ ( $R_{G1}$ )	0.05
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหัน ( $T_1$ )	0.5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมกังหัน ( $T_2$ )	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของแบตเตอรี่ ( $T_{BESS}$ )	0.01 วินาที
กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน ( $S_{base}$ )	10 เมกะวัตต์แอมป์แปร์



รูปที่ 6.19 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 4

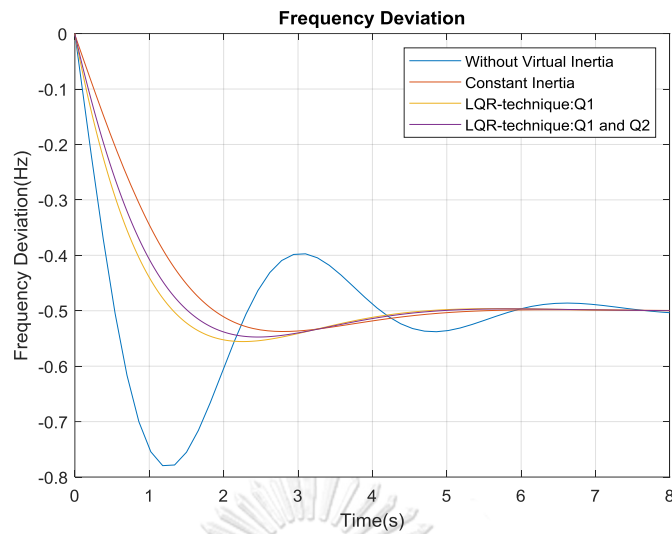




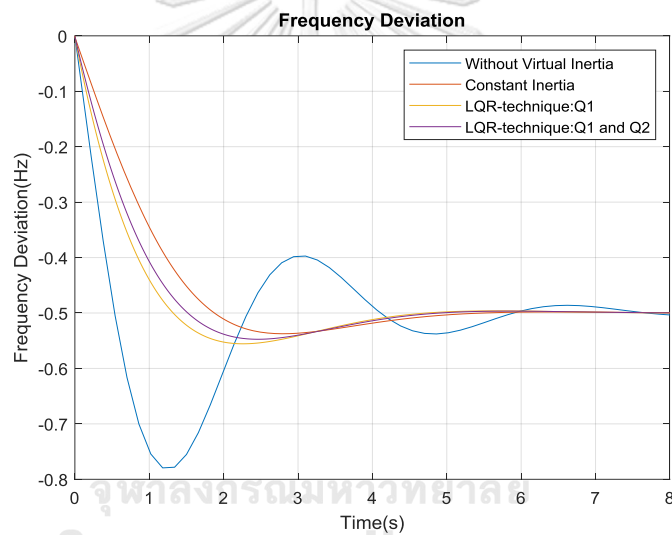
รูปที่ 6.20 แบบจำลองเชิงพลวัตของการทดสอบที่ 4

การทดสอบนี้ถูกแบ่งออกเป็น 4 กรณีย่อยคือ กรณีที่ 4.1 ไม่ควบคุมให้แบตเตอรี่มีความเฉื่อยเหมือน กรณีที่ 4.2 ควบคุมให้แบตเตอรี่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเหมือนคงที่ 4 วินาที กรณีที่ 4.3 ควบคุมแบตเตอรี่ให้มีความเฉื่อยเหมือนด้วยเทคนิค LQR โดยปรับเฉพาะตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_1$  และ กรณีที่ 4.4 ควบคุมแบตเตอรี่ให้มีความเฉื่อยเหมือนด้วยเทคนิค LQR โดยปรับตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_1$  และ  $Q_2$  โดยค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักปรากฏดังตารางที่ 14 ตารางที่ 14 ตารางแสดงค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักของการทดสอบที่ 4

	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก $Q_1$	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก $Q_2$	ค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก $R$
กรณี 4.1	-	-	-
กรณี 4.2	-	-	-
กรณี 4.3	1250000	1	1
กรณี 4.4	1250000	100000	1

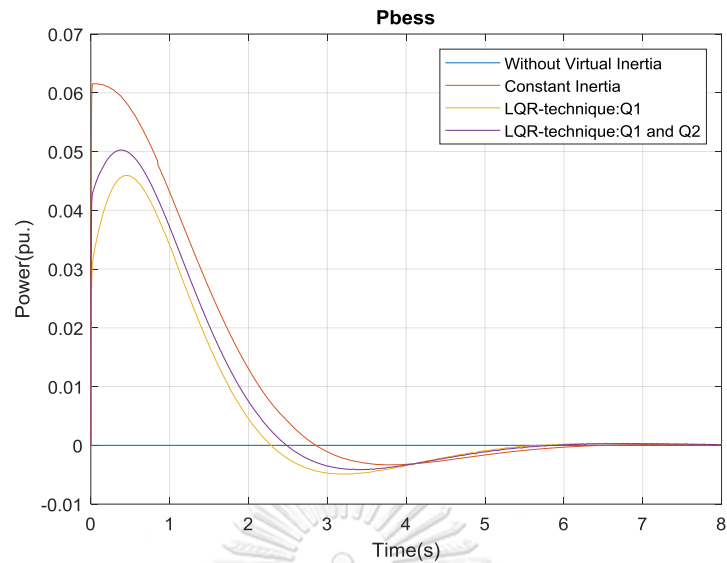


รูปที่ 6.21 การเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4

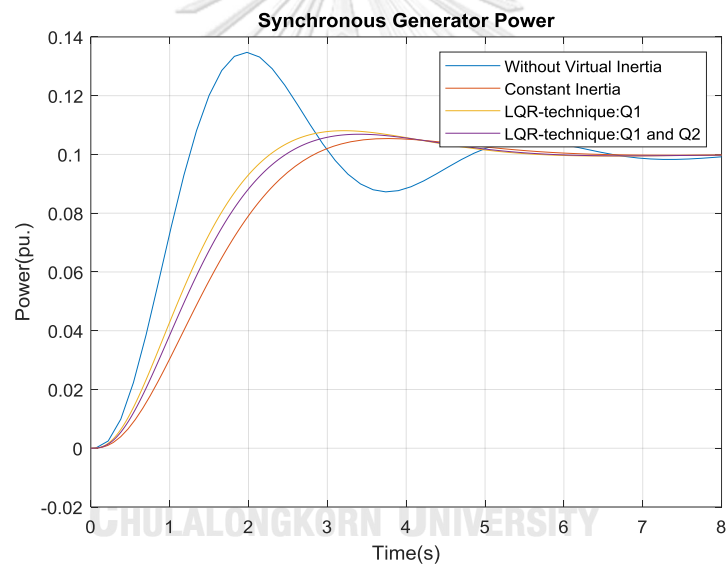


รูปที่ 6.22 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4

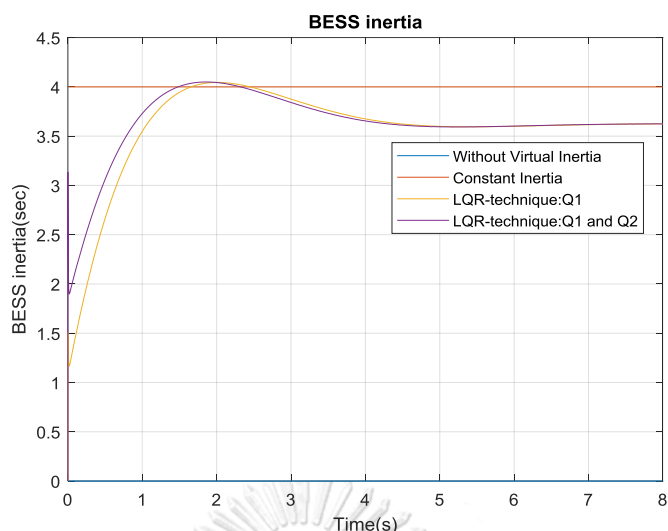
รูปที่ 6.21 แสดงการเบี่ยงเบนความถี่ขณะเกิดการรบกวนของทั้ง 4 กรณีย่อยในการทดสอบที่ 4 พบว่า กรณีที่ 4.1 ขนาดของความถี่ที่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 0.7802 เฮิรตซ์ กรณีที่ 4.2 ขนาดของความถี่ที่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 0.5374 เฮิรตซ์ กรณีที่ 4.3 และ 4.4 มีค่า 0.5560 เฮิรตซ์ และ 0.5464 เฮิรตซ์ตามลำดับ และ รูปที่ 6.22 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4



รูปที่ 6.23 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4



รูปที่ 6.24 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4



รูปที่ 6.25 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนของการทดสอบที่ 4

รูปที่ 6.23 แสดงกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน รูปที่ 6.24 แสดงกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเกิดการรบกวน และ รูปที่ 6.25 แสดงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวน ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของแบตเตอรี่ขณะเกิดการรบกวนในการทดสอบที่ 4 ถูกสรุปใน ตารางที่ 15 ตารางที่ 15 ตารางสรุปผลการทดสอบที่ 4

รูปแบบการทดสอบ	การเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (เฮิรตซ์ต่อวินาที)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
กรณี 4.1	-0.782	-1.02	-	-
กรณี 4.2	-0.5374	-0.3911	615 (จ่าย)	9.2913 (จ่าย)
กรณี 4.3	-0.556	-0.6911	459 (จ่าย)	5.5667 (จ่าย)
กรณี 4.4	-0.5464	-0.5900	502 (จ่าย)	11.596 (จ่าย)

### 6.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ 1 พบว่า กรณีที่เดินเครื่องระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเชื่อมต่อกับระบบหลักอยู่ พบว่าเมื่อเกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่าน้อยมาก จึงไม่มีความจำเป็นให้แบตเตอรี่ทำงานเพื่อเพิ่มสมรรถนะการ

ตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบ เนื่องจากระบบหลักมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่สูงมากและการรบกวนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก

จากผลการทดสอบที่ 2 - 4 พบว่าเมื่อนำแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนด้วยเทคนิค LQR พบว่าแบตเตอรี่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดในขณะช่วยระบบตอบสนองเชิงความถี่น้อยกว่าการนำแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนคงที่ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยเทคนิค LQR มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาให้เหมาะสมกับความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ

จากผลการทดสอบในกรณีย่อยของการทดสอบที่ 2 - 4 เมื่อปรับตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_2$  เพื่อให้ขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลาน้อยลงพบว่า ขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่มีค่าลดลงไปด้วยเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากค่าขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่และขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลามีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน

จากผลการทดสอบที่ 2 - 4 ได้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยเทคนิค LQR สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบได้ ไม่ว่าจะการรบกวนจะทำให้ความถี่ของระบบเพิ่มขึ้นหรือน้อยลง กล่าวคือ หากการรบกวนทำให้ค่าความถี่ของระบบมีค่าน้อยลง แสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมาน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการใช้ แบตเตอรี่จะทำให้ที่ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบเพื่อช่วยรักษาสมดุลกำลังไฟฟ้า ในทำนองเดียวกัน หากการรบกวนทำให้ค่าความถี่ของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการใช้ แบตเตอรี่จะทำหน้าที่ช่วยรับกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าเพื่อช่วยรักษากำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกัน

จากการทดสอบพบว่าแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมด้วยหลักการ LQR สามารถเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ได้ เมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบหรือรูปแบบการรบกวนเปลี่ยนแปลงไปเช่นดังการทดลองที่ 4 แต่จะต้องปรับค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักใหม่ให้มีความเหมาะสม

วิธีการควบคุมแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค LQR มีข้อดีคือสามารถควบคุมค่าขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเทียบกับเวลาได้อย่างเป็นอิสระผ่านการปรับค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก ซึ่งแตกต่างจากวิธีที่ควบคุมแบตเตอรี่ให้มีโมเมนต์ความเฉื่อยคงที่

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการควบคุมเทคนิค LQR มีความเหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อการเกิดรบกวนในระบบขนาดใหญ่เนื่องจากมีขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีขนาดที่สูง อย่างไรก็ตามในบางกรณีที่มีขนาดของการรบกวนไม่ใหญ่มากนัก การปรับตัวแปรถ่วงน้ำหนัก  $Q_1$  เพียงตัวแปรเดียวมีความเพียงพอที่จะทำให้ขนาดการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่อยู่ในค่ามาตรฐาน ซึ่งสามารถลดการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบก็กเก็บพลังงานแบตเตอรี่และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

บทนี้จะประกอบด้วยผลการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยในอนาคต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 7.1 บทสรุป

ปัจจุบันนี้ ระบบไฟฟ้าบางรูปแบบที่มีความสามารถที่จะเดินเครื่องแบบแยกโดดเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าในสถานการณ์ที่ระบบไฟฟ้าหลักไม่พร้อมที่จะเชื่อมต่อกับความผิดพลาดต่าง ๆ หนึ่งในปัญหาที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่ระบบไฟฟ้าดังกล่าวจะเดินเครื่องแบบแยกโดดคือปัญหาเสถียรภาพเชิงความถี่เมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ขึ้นในระบบ เช่น สายส่งกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันระหว่างระบบไฟฟ้าหลักและระบบไฟฟ้าแยกโดดถูกทริปขณะรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีปริมาณมาก เมื่อเทียบกับกำลังการผลิตและความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบแยกโดดเมื่อเกิดการรบกวน ความถี่ของระบบไฟฟ้าแยกโดดจะเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานเนื่องจากหลายปัจจัย แต่หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญคือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยดังกล่าว สามารถถูกจำลองขึ้นมาได้ด้วยระบบกับเก็บพลังงานแบบเตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมเชิงพลวัตที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ ดังนั้นแบบเตอร์จึงสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส นอกจากนี้แบบเตอร์ยังสามารถตอบสนองได้รวดเร็วกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหลายเท่าเนื่องจากอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้รวดเร็วกว่าอุปกรณ์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาก

อย่างไรก็ตามขนาดของแบบเตอร์ที่จะติดตั้งในระบบไฟฟ้าแยกโดดถือเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่จะพิจารณาในการออกแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบเตอร์ด้วยเทคนิค LQR เพื่อลดกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ให้กับระบบแยกโดด โดยสามารถนำไปประยุกต์กับระบบไฟฟ้าที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะเดินเครื่องนำรูปแบบแยกโดดโดยทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบแยกโดด คือ

- ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ  $H_{sys}$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นอุปกรณ์หลัก

- ค่าการหน่วงของระบบ  $D_{sys}$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นอุปกรณ์หลักเช่นเดียวกัน
  - ค่าคงที่ลักษณะรูปของระบบแยกโดด
  - ค่าคงที่ทางเวลาที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสระหว่างการตอบสนองเชิงความถี่ขั้นปฐมภูมิ
2. พิจารณาหาขนาดของการรบกวนที่มากที่สุดที่จะเป็นไปได้ โดยอาจเป็นกรณีที่สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักหรือ ซึ่งขนาดของการรบกวนคือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า หรือการทริบของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใหญ่ที่สุด หรือ การทริบของสายป้อนที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด
  3. ออกแบบตัวควบคุมแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค LQR โดยปรับค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักจนกระทั่งขนาดของการเบี่ยงเบนความถี่และขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่อยู่ในค่ามาตรฐาน
  4. ใช้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ช่วยเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบขณะเกิดการรบกวนเป็นตัวกำหนดพิกัดและขนาดของแบตเตอรี่
  5. ในกรณีที่วัตถุประสงค์ของการติดตั้งแบตเตอรี่มีมากกว่าช่วงเพิ่มสมรรถนะเชิงความถี่สามารถนำข้อมูลจากข้อ 4 ไปพิจารณาร่วมด้วยเช่น state of charge (SOC) ของแบตเตอรี่

## 7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีหาค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักด้วยหลักการ trial and error ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการหาค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก แต่ค่าที่ใช้อาจจะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นในอนาคตควรหาวิธีกำหนดค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมมากขึ้น
2. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มีเฉพาะค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน อย่างไรก็ตาม ในอนาคต อาจจะออกแบบค่าการหน่วงเสมือนของแบตเตอรี่จะถูกควบคุมเช่นเดียวกันกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยด้วย

3. วิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการ LQR ในการออกแบบตัวควบคุมแบตเตอรี่ ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ที่ความถี่ของระบบอาจจะไม่ถี่เข้าหรือระบบสูญเสียเสถียรภาพ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาปัจจัยด้านนี้ให้รอบคอบด้วย
4. จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ (C- rate) ที่ต้องใช้ขณะช่วยตอบสนองเชิงความถี่ให้กับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กขณะเกิดการรบกวนมีค่าสูงมาก ซึ่งอาจไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงานประเภทอื่นอาจจะเหมาะสมกว่าระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่



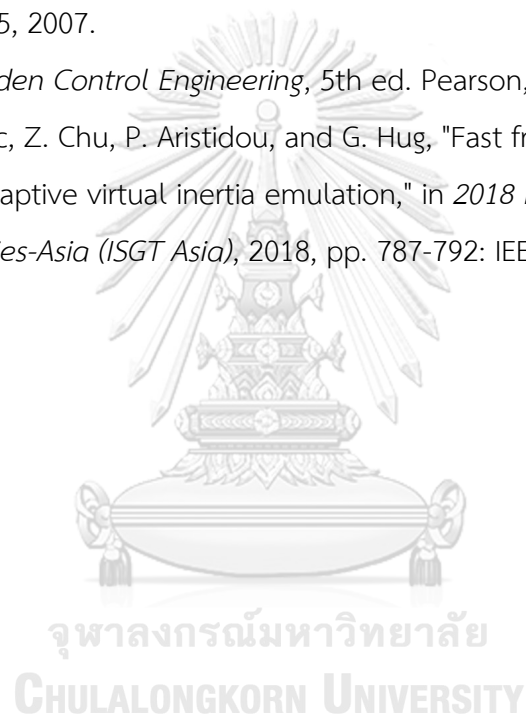


## บรรณานุกรม

- [1] G. Suphahathanukul, Chirapongsananurak, P., Hoonchareon, N., "Impacts of Low Inertia on Power System Frequency Stability with High PV Penetration," presented at the The 41st Electrical Engineering Conference (EECON-41), Ubon Ratchathani, 2018.
- [2] A. Ulbig, T. S. Borsche, and G. J. I. P. V. Andersson, "Impact of low rotational inertia on power system stability and operation," vol. 47, no. 3, pp. 7290-7297, 2014.
- [3] R. Yan and T. K. Saha, "Cascading contingencies in low inertia power systems: Frequency response challenges and a potential solution," in *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2017, pp. 1-5: IEEE.
- [4] P. F. Frack *et al.*, "Control strategy for frequency control in autonomous microgrids," vol. 3, no. 4, pp. 1046-1055, 2015.
- [5] J. Fang, H. Li, Y. Tang, and F. J. I. T. o. P. E. Blaabjerg, "Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters," vol. 33, no. 10, pp. 8488-8499, 2017.
- [6] L. Toma *et al.*, "On the virtual inertia provision by BESS in low inertia power systems," in *2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 2018, pp. 1-6: IEEE.
- [7] N. Soni, S. Doolla, and M. C. J. I. t. o. p. d. Chandorkar, "Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia," vol. 28, no. 3, pp. 1830-1838, 2013.
- [8] G. Delille, B. Francois, and G. J. I. T. o. s. e. Malarange, "Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia," vol. 3, no. 4, pp. 931-939, 2012.
- [9] Y. Ma, P. Yang, Y. Wang, S. Zhou, and P. He, "Frequency control of islanded microgrid based on wind-PV-diesel-battery hybrid energy sources," in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, pp. 290-294: IEEE.

- [10] F. M. Uriarte, C. Smith, S. VanBroekhoven, and R. E. J. I. T. o. P. S. Hebner, "Microgrid ramp rates and the inertial stability margin," vol. 30, no. 6, pp. 3209-3216, 2015.
- [11] B.-I. Crăciun, T. Kerekes, D. Séra, R. J. I. J. o. E. Teodorescu, and S. T. i. P. Electronics, "Frequency support functions in large PV power plants with active power reserves," vol. 2, no. 4, pp. 849-858, 2014.
- [12] S. M. Ashabani and Y. A.-R. I. J. I. T. o. S. G. Mohamed, "A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer," vol. 3, no. 3, pp. 1291-1301, 2012.
- [13] *IEEE guide for AC Generator Protection*, IEEE C37, 2006.
- [14] Alstom, "Technical Manual Generator Protection Relay Alstom P543," ed, 2015.
- [15] (2560). ข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า (*Operation Code*).
- [16] P. energy, "Rate of Change of Frequency (ROCOF) Review of TSO and Generator Submissions Final report," 2013.
- [17] Q.-C. Zhong and G. J. I. T. o. i. e. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, 2010.
- [18] Q.-C. J. I. P. E. M. Zhong, "Virtual Synchronous Machines: A unified interface for grid integration," vol. 3, no. 4, pp. 18-27, 2016.
- [19] K. Sakimoto, Y. Miura, and T. Ise, "Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function," in *8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia*, 2011, pp. 1498-1505: IEEE.
- [20] J. Alipoor, Y. Miura, T. J. I. j. o. E. Ise, and s. t. i. p. electronics, "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia," vol. 3, no. 2, pp. 451-458, 2014.
- [21] M. Torres and L. A. Lopes, "Virtual synchronous generator control in autonomous wind-diesel power systems," in *2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, 2009, pp. 1-6: IEEE.
- [22] M. Van Wesenbeeck, S. De Haan, P. Varela, and K. Visscher, "Grid tied converter with virtual kinetic storage," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009, pp. 1-7: IEEE.

- [23] T. V. Van *et al.*, "Virtual synchronous generator: An element of future grids," in *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010, pp. 1-7: IEEE.
- [24] F. Katiraei and M. R. J. I. t. o. p. s. Iravani, "Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units," vol. 21, no. 4, pp. 1821-1831, 2006.
- [25] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. J. I. T. o. p. e. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," vol. 22, no. 2, pp. 613-625, 2007.
- [26] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Pearson, 2010.
- [27] U. Markovic, Z. Chu, P. Aristidou, and G. Hug, "Fast frequency control scheme through adaptive virtual inertia emulation," in *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 2018, pp. 787-792: IEEE.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กรณ์ สุภหัตถานุกุล
วัน เดือน ปี เกิด	8 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	2016 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2019 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพมหานคร
ผลงานตีพิมพ์	Impacts of Low Inertia on Power System Frequency Stability with High PV Penetration, Suphahathanukul, G., Chirapongsananurak, P., Hoonchareon, N., The 41st Electrical Engineering Conference (EECON-41) 2018.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY