

## รายงานการวิจัย

ระบบมอนิเตอร์และควบคุมแบบคงทนเพื่อทำเสถียรภาพไมโครกริด

**Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization**



รศ. ดร. อิศระชัย งามหรุ

หัวหน้าโครงการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ประจำปีงบประมาณ 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) ระบบมอนิเตอร์และควบคุมแบบคงทนเพื่อทำเสถียรภาพไมโครกริด

(ภาษาอังกฤษ) Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization

ได้รับทุนอุดหนุนจากการวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปี 2553 จำนวนเงิน 59,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2552 ถึง กันยายน 2553

หน่วยงานและผู้ดำเนินการวิจัยพร้อมหน่วยงานที่สังกัดและเลขหมายโทรศัพท์

รศ. ดร. อิศระชัย งามหรุ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทร 02-326-4550

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบมอนิเตอร์และควบคุมกำลังไฟฟ้า เพื่อทำเสถียรภาพแบบคงทนระบบไมโครกริดดังแสดงในรูป โดยไมโครกริดที่พิจารณานั้นประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม แสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง ไมโครเทอร์บายน์ อิเล็กโตรไลเซอร์ RCMS ที่นำเสนอนี้ถูกออกแบบเพื่อไปควบคุมกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่ควบคุมได้ เช่น เซลล์เชื้อเพลิง ไมโครเทอร์บายน์ อิเล็กโตรไลเซอร์ เพื่อไปลดความเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้า ความถี่ระบบ อันเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งผลิตจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่นพลังงานลมและแสงแดด โดยในการออกแบบนั้นจะนำผลของความไม่แน่นอนในระบบไมโครกริด เช่น การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากแหล่งจ่ายและโหลดอย่างไม่สม่ำเสมอ ความผิดพลาดของพารามิเตอร์ระบบ และการจำลองระบบ การทำงานของระบบที่สภาวะต่างๆ เป็นต้น มาพิจารณา หลังจากนั้น จึงใช้หลักการจัดวางรอบการควบคุมแบบ  $H_\infty$  มาสร้างปัญหาการทำให้เหมาะสม เพื่อปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหาแบบฮิวริสติก โดยคาดหวังว่า ระบบมอนิเตอร์และควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ นอกจากมีความสามารถในการทำเสถียรภาพของความถี่ระบบและกำลังไฟฟ้าได้แล้ว ยังมีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนต่างๆ ในระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่มีการนำเสนอมาในงานวิจัยที่ผ่านมา

คำสำคัญ: ไมโครกริด, การควบคุมแบบคงทน, การจัดวางรอบการควบคุมแบบ  $H_\infty$ , วิธีกลุ่มอนุภาค,

## Abstract

This paper proposes a new design of a robust control and monitoring system (RCMS) for robust stabilization of frequency fluctuation in a microgrid (MG) system. In MG system, the power sources consists of wind power (WP), photovoltaic (PV), micro-turbine (MT) and fuel cell (FC). Due to WP, PV and load fluctuations, the frequency stabilization of RCMS is performed by adjusting the power outputs of MT and electrolyzer system (ES) in both islanding and interconnected utility grid operations. The structure of MT and ES controllers is a proportional integral (PI). To enhance the robustness of designed controllers against system uncertainties, controller parameters of MT and ES are concurrently tuned by the particle swarm optimization based on a specified-structure  $H_\infty$  loop shaping control. Simulation results display the effectiveness and robustness of the proposed RCMS against system parameters variation and several operating conditions.

Keywords: Microgrid, robust control,  $H_\infty$  loop shaping control, particle swarm optimization.

RCH

TK

4842

C83

๑๗๖๔๖

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 114553

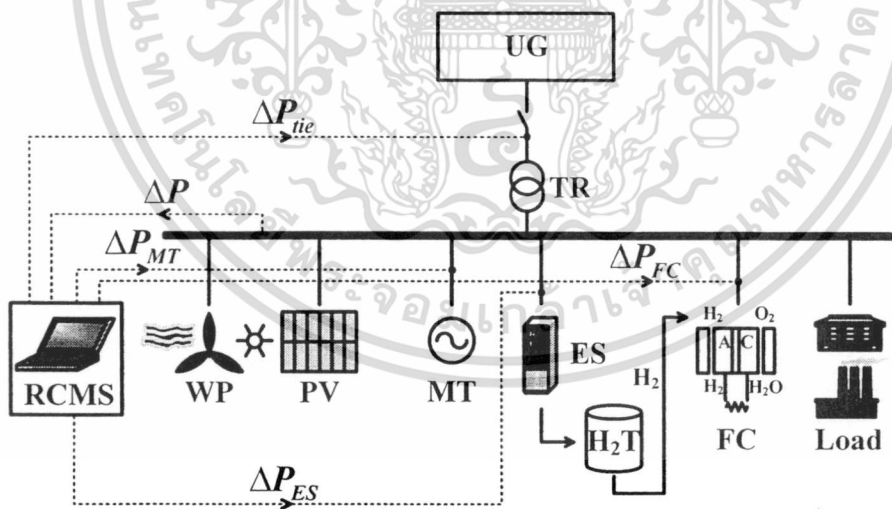
วันเดือนปี..... 21 ส.ค. 2554

12292163

## หน้าสรุปโครงการ

### ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

จากข้อมูลของธนาคารโลก ปัจจุบันยังมีประชากรมากกว่าสองร้อยล้านคนทั่วโลก อาศัยอยู่ในบริเวณที่ไฟฟ้าไม่สามารถเข้าถึงได้ เนื่องมาจากข้อจำกัดในการลงทุน ลักษณะทางภูมิประเทศ ความยุ่งยากอันเนื่องมาจากสิทธิในการครอบครองที่ดินในการวางเสาไฟฟ้าพาดผ่านเข้าไป ตลอดจนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ ระบบไมโครกริด (Microgrid System) หรือระบบไฟฟ้ากำลังอิสระขนาดเล็กซึ่งเป็นนวัตกรรมการจัดการพลังงานวิธีหนึ่งซึ่งได้รับความสนใจอย่างสูงมากในปัจจุบัน โดยการติดตั้งระบบไมโครกริด ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นก็สามารถแก้ไขได้ ไมโครกริดประกอบด้วยกลุ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานเฉพาะที่ (Distributed Generator) แหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน ตัวเก็บพลังงานสะสมที่ใช้เฉพาะที่ (Distributed Energy Storage) และกลุ่มโหลด ไมโครกริดนั้นสามารถทำงานได้อย่างอิสระหรือเมื่อต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนเช่น พลังงานลม แสงอาทิตย์ นั้นมีความไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมานั้นไม่คงที่ ยิ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบเข้าไปอีกทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแหล่งกำเนิดและความต้องการไฟฟ้าเนื่องจากโหลด จึงทำให้เกิดความเบี่ยงเบนความถี่จากค่าปรกติ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของไมโครกริดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไมโครกริดทำงานในสภาวะแยกโดด (Islanding) และเมื่อไมโครกริดต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสายส่งเชื่อมโยง ความเบี่ยงเบนความถี่ในไมโครกริดยังส่งผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอขึ้นในสายส่งอีกด้วย ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอนี้มีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังใหญ่ได้



RCMS : Robust Control & Monitoring System  
 WP : Wind Power  
 MT : Micro-Turbine  
 UG : Utility Grid  
 TR : Transformer

UG : Utility Grid  
 PV : PhotoVoltaic  
 ES : Electrolyser  
 FC : Fuel Cell  
 H<sub>2</sub>T : Hydrogen Tank

รูปแสดงระบบมอนิเตอร์และควบคุมกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอในไมโครกริดที่ใช้ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบมอนิเตอร์และควบคุมกำลังไฟฟ้า (Robust Control & Monitoring System, RCMS) เพื่อทำเสถียรภาพแบบคงทนระบบไมโครกริดที่แสดงในรูปแบบ โดยไมโครกริดที่พิจารณานั้นประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม แสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง ไมโครเทอร์ไบน์ อิเล็กโทรไลเซอร์ RCMS ที่นำเสนอนี้ถูกออกแบบเพื่อไปควบคุมกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่ ควบคุมได้ เช่น เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ไมโครเทอร์ไบน์ (Microturbine) อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) เพื่อไปลดความเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้า ความถี่ระบบ อันเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งผลิตจาก แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่นพลังงานลมและแสงแดด โดยในการออกแบบนั้นจะนำผลของ ความไม่แน่นอนในระบบไมโครกริด (System Uncertainties) เช่น การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก แหล่งจ่ายและโหลดอย่างไม่สม่ำเสมอ ความผิดพลาดของพารามิเตอร์ระบบและการจำลองระบบ การทำงาน ของระบบที่สภาวะต่างๆ เป็นต้น มาพิจารณา หลังจากนั้น จึงใช้หลักการจัดวงจรการควบคุมแบบ  $H_\infty$  ( $H_\infty$  Loop Shaping Control) มาสร้างปัญหาการทำให้เหมาะสม (Optimization Problem) เพื่อปรับพารามิเตอร์ ของตัวควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Search) โดยคาดหวังว่า RCMS ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ นอกจากมีความสามารถในการทำเสถียรภาพของ ความถี่ระบบและกำลังไฟฟ้าได้แล้ว ยังมีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนต่างๆ ในระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับ ตัวควบคุมที่มีการนำเสนอมาในงานวิจัยที่ผ่านมา

### วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาผลกระทบจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ลมและแสงอาทิตย์
2. เพื่อประยุกต์ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ เช่น เซลล์เชื้อเพลิง ไมโครเทอร์ไบน์ อิเลคโตรไลเซอร์ ไปลดความเบี่ยงเบนความถี่และกำลังไฟฟ้า ตลอดจนทำเสถียรภาพระบบไมโครกริด
3. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบระบบมอนิเตอร์และควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบคงทน เพื่อไปควบคุม แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ โดยประยุกต์ใช้หลักการจัดวงจรการควบคุมแบบ  $H_\infty$  และการทำให้เหมาะสมโดยวิธีการค้นหาแบบฮิวริสติก

### องค์ความรู้ใหม่ที่คาดว่าจะได้จากโครงการวิจัย

1. ความเข้าใจในพฤติกรรมในสภาวะพลวัตและชั่วคราวของระบบไมโครกริดที่แสดงออกมาในลักษณะ ต่างๆ ได้แก่การเปลี่ยนแปลงความถี่ กำลังไฟฟ้า เมื่อได้รับผลกระทบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่ สามารถควบคุมได้เช่นพลังงานลมและแสงอาทิตย์ ตลอดจนเมื่อเกิดสภาวะฉุกเฉินต่างๆ
2. วิธีออกแบบระบบมอนิเตอร์และควบคุมโรบัสต์แนวใหม่ โดยพิจารณาความไม่แน่นอนในระบบเข้ามาพิจารณา ในการออกแบบและประยุกต์หลักการของการจัดวงจรการควบคุมแบบ  $H_\infty$  มาสร้างปัญหาการทำให้ เหมาะสมเพื่อปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ เช่น อิเลคโตรไลเซอร์ ไมโครเทอร์ไบน์ เป็นต้น เพื่อนำไปลดการเปลี่ยนแปลงของความถี่และกำลังไฟฟ้าในระบบ ตลอดจนเพิ่มเสถียรภาพของระบบ
3. ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงแบบคงทนของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ซึ่งมีความคงทนสูงต่อ ความไม่แน่นอนในระบบและยังมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระเบียบวิธีวิจัย

1. พิจารณาเลือกระบบไมโครกริดที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไม่ได้ ได้แก่ พลังงานลมแสงอาทิตย์ และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมได้ ได้แก่ ไมโครเทอร์บายน์ อิเล็กโตรไลเซอร์ เป็นต้น ด้วยการศึกษาค้นคว้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา
2. สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบไมโครกริด แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดต่างๆ
3. วิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพระบบที่แสดงออกมาในสภาวะชั่วคราวและพลวัตเมื่อเกิดการรบกวนระบบในรูปแบบต่างๆ เช่น การเกิดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากพลังงานลม แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน การเกิดสภาวะฉุกเฉินต่างๆ เป็นต้น ด้วยการจำลองระบบในโดเมนเวลาด้วยคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาแบบจำลองความไม่แน่นอนในระบบแบบ Normalized Coprime Factorization เพื่อรวมเข้าไปในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง
5. เลือกโครงสร้างตัวควบคุมที่เหมาะสมแล้วจึงสร้างปัญหาการทำให้เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้หลักการของการจัดวางรอบการควบคุมแบบ  $H_\infty$
6. ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธีฮิวริสติก และประยุกต์ใช้เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม
7. ทดสอบผลการทำเสถียรภาพของตัวควบคุมที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้งานกันอยู่ (Conventional Controller)
8. ทดสอบความคงทนของตัวควบคุมที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลังพร้อมกับความไม่แน่นอนในระบบในสภาวะต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้งานกันอยู่
9. สรุปผลการศึกษาวิจัยเพื่อเขียนบทความการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

## ผลงานวิจัย

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, "Application of Electrolyzer System to Enhance Frequency Stabilization Effect of Microturbine in a Microgrid System," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp.7131-7142, 2009.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and T. Chaiyatham, "Robust Frequency Stabilization in a Microgrid System," Proceeding of IEEE Conference on Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific (IEEE T&D 2009), 26-30 October 2009, Seoul, Korea.

บทความทั้งสองได้แนบไว้ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ระบบมอเนเตอร์และควบคุมแบบคงทนเพื่อทำเสถียรภาพไมโครกริด

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก และมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นต่อไปในอนาคต จึงมีความจำเป็นที่จะต้องขยาย และเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเพียงพอ การเชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นไม่เพียงที่จะช่วยปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ยังคงช่วยลดต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งได้อีกด้วย [1] อย่างไรก็ตามจากการสำรวจของธนาคารโลก (world bank) [2] พบว่ามีจำนวนประชากรมากกว่า 2 ล้านคนที่อาศัยอยู่รอบโลกในบริเวณพื้นที่ห่างไกลซึ่งยังไม่ได้เชื่อมต่อเข้ากับกริดการไฟฟ้า (utility grid: UG) เนื่องจากข้อจำกัดในการลงทุนและสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมที่จะติดตั้ง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาที่ระบบไมโครกริด (microgrid: MG) [3-4] จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะแก้ไขปัญหาการติดตั้งระบบไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกล ระบบ MG คือ กลุ่มของหน่วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (distributed generation: DG), หน่วยแหล่งเก็บสะสมแบบกระจาย (distributed storage: DS) และโหลด [5] ระบบ MG สามารถที่จะทำงานอยู่ในโหมดการทำงานแบบแยกอิสระ (islanding) และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า (interconnected utility grid) [6] นอกจากนี้ระบบ MG สามารถช่วยลดปัญหาของภาวะโลกร้อน (global warming) และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เพราะว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ใน MG ส่วนใหญ่แล้วประกอบไปด้วยแหล่งพลังงานทดแทน (renewable energy) เช่น พลังงานลม (wind power: WP), พลังงานแสงอาทิตย์ (photovoltaic: PV) เป็นต้น เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่นำมาใช้ได้อย่างไม่จำกัด และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม [7] ในปัจจุบันนี้มีโครงการที่เกี่ยวกับ ระบบ MG มากมายทั่วโลก เช่น โครงการ consortium for electric reliability technology solutions (CERTS) ในสหรัฐอเมริกา [8], โครงการ aichi, kyotango และ hachinohe ในญี่ปุ่น [9], โครงการ MG ในเซเนกัล [10], โครงการ kythnos island ในกรีซ [11], โครงการ labein ในสเปน [12] เป็นต้น

อย่างไรก็ตามโดยธรรมชาติแล้วพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์มีลักษณะแบบไม่ต่อเนื่อง [13] ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์จึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้เกิดความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าจริง (real power) ในการผลิตไฟฟ้า และโหลด [14] ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ (frequency deviation) ในระบบ MG และการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อม (tie line power deviation) เมื่อระบบ MG เชื่อมต่อเข้ากับกริดการไฟฟ้า ดังนั้นตัวควบคุมความถี่ (frequency controller) จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะนำมาใช้ในการทำเสถียรภาพของระบบ MG ให้อยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาที่ จึงนำไมโครเทอร์ไบน์ (Microturbine, MT) มาประยุกต์ใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปชดเชยในระบบ MG อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด MT อาจจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างไม่เพียงพอ เนื่องจากมีคุณลักษณะการตอบสนองพลวัตทางกลที่ช้า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าคงตัวทางเวลาของกังหัน (turbine) ใน MT จะอยู่ในช่วง 2.0-5.0 วินาที ตามลำดับ [15-16] เพื่อที่จะทำการปรับปรุงผลการควบคุม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ช้าของ MT ดังนั้นจึงนำ (Electrolyser, ES) มาประยุกต์ใช้ในระบบ MG เนื่องจาก ES มีคุณลักษณะการตอบสนองพลวัตที่เร็วโดยสามารถที่จะรับกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระบบ MG ได้อย่างรวดเร็ว [17]

ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำ ES มาใช้ในการปรับปรุงผลการทำเสถียรภาพความถี่ในระบบแบบแยกอิสระ [18-19] นอกจากนี้ใน [20-21] ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุม และติดตามประเมินผล (control and monitoring system: CMS) สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านนอกของ MT และ ES เพื่อปรับปรุงผลการทำเสถียรภาพความถี่ และกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมในระบบ MG ซึ่งในงานวิจัยเหล่านี้สามารถทำเสถียรภาพระบบ MG ได้ดี อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ ตัวควบคุมของ MT และ ES ใน CMS ได้ออกแบบมาสำหรับการทำงานแบบแยกอิสระ และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าโดยไม่คำนึงถึงผลของการควบคุมที่สัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงไม่สามารถยืนยันถึงผลการควบคุมที่สัมพันธ์กันอย่างดีระหว่าง MT และ ES ใน CMS นอกจากนี้ในงานวิจัยเหล่านี้ไม่ได้คำนึงถึงความไม่แน่นอนในระบบที่อาจจะเกิดขึ้นได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ของระบบ, การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต และโหลด เป็นต้น ในการออกแบบตัวควบคุม ความคงทนของตัวควบคุม MT และ ES ต่อความไม่แน่นอนในระบบจึงไม่สามารถที่จะยืนยันได้

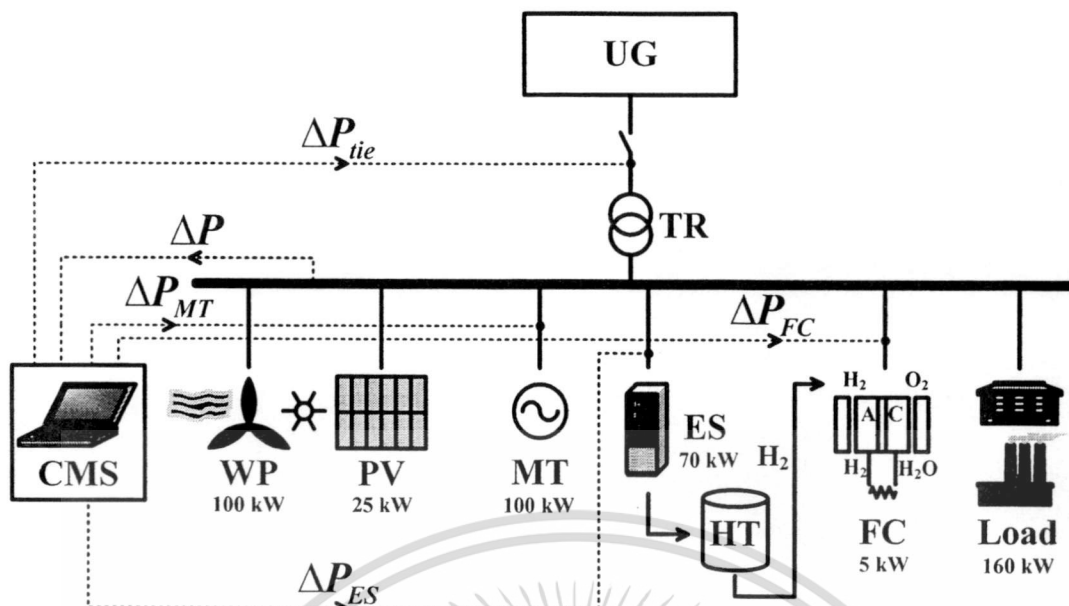
ในการออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสม และคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะ ต่างๆที่ไม่แน่นอนในระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต และโหลด, การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ เป็นต้น นั้นทำได้ยาก เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาการออกแบบนี้ วิธีการออกแบบ  $H_\infty$  [22-23] จึงนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันว่าตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธี  $H_\infty$  นั้นมีจำนวนอันดับ (order) สูงมาก และไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ [24-25]

เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบแบบร่วมกันระหว่างตัวควบคุมแบบคงทนของ MT และ ES ด้วยวิธีการจัดสรรฐานวงรอบ  $H_\infty$  แบบโครงสร้างเฉพาะเจาะจง (Specified-structure  $H_\infty$  loop shaping control method) สำหรับทำเสถียรภาพระบบ MG โครงสร้างของตัวควบคุมแบบคงทนของ MT และ ES คือ แบบพีไอ (Proportional Integral, PI) ส่วนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม MT และ ES ในส่วนการทำงานแบบแยกอิสระ และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าหาค่าอย่างเหมาะสมพร้อมกันด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการทำเสถียรภาพของความถี่ระบบและกำลังไฟฟ้าได้แล้วยังมีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนต่างๆ ในระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่มีการนำเสนอมาในงานวิจัยที่ผ่านมา

## 2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษาและแบบจำลองระบบ

ระบบ MG ในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยพลังงานลม (wind power: WP) 100 kW, พลังงานแสงอาทิตย์ (photovoltaic: PV) 25 kW, ไมโครเทอร์ไบน์ (microturbine: MT) 100 kW, ระบบอิเล็กโทรไลเซอร์ (electrolyzer system: ES) ของ HOGEN<sup>®</sup> 70 kW [26-27], ถังสำหรับบรรจุไฮโดรเจน (hydrogen tank: HT), เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell: FC) 5 kW, ระบบควบคุม และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

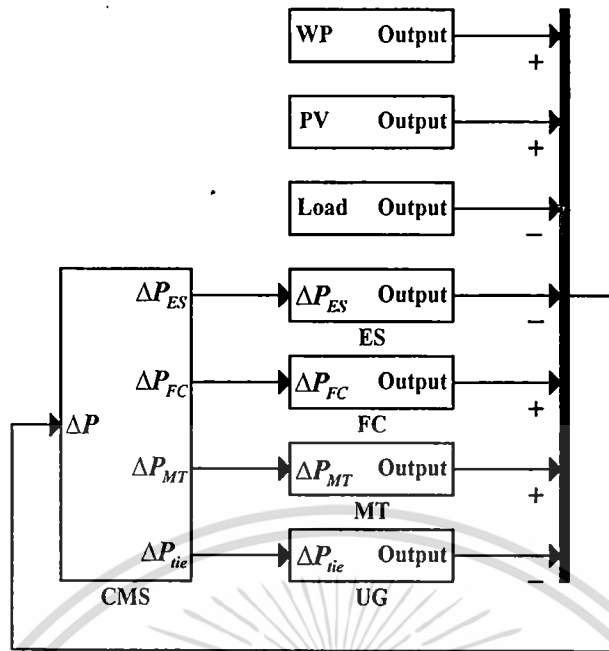


รูปที่ 1 ระบบ MG

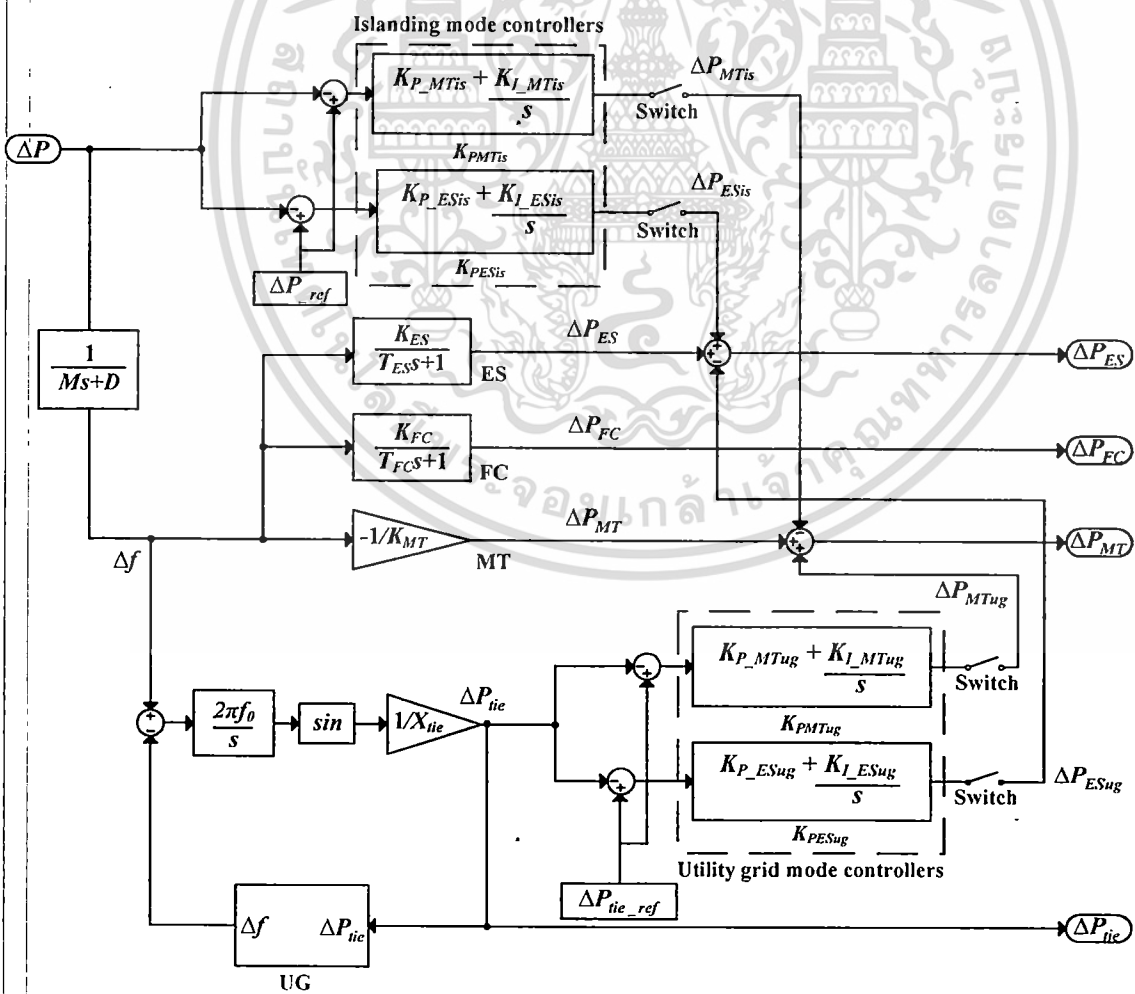
ติดตามประเมินผล (control and monitoring system: CMS), โหลด 160 kW, หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer: TR) และกริดการไฟฟ้า (utility grid: UG) โดยทั่วไปแล้ว MT ใช้เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเมื่อ WP และ PV ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ และ ES นำมาใช้เพื่อผลิตไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) สำหรับเป็นเชื้อเพลิงของ FC ด้วยการรับกำลังไฟฟ้าด้านนอกของ WP และ PV ส่วน H<sub>2</sub> ที่ผลิตโดย ES ได้เก็บไว้ที่ HT โดยระบบ MG ที่ศึกษานี้ได้ออกแบบมาให้มีพิกัดการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 230 kW เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลดในระบบ ส่วน ES ได้ออกแบบมาเพื่อรับกำลังไฟฟ้าของ WP และ PV ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่พิกัด 70 kW โดยปกติแล้วกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก WP และ PV จะมีคุณลักษณะที่ไม่แน่นอน และไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าจริงคือ สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงความถี่ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของความถี่ภายใต้การเชื่อมต่อเข้ากับ UG คือ สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อม เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ควบคุมแบบคงทนของ MT และ ES ที่สัมพันธ์กันใน CMS จึงนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะทำเสถียรภาพในระบบ MG

จากรูปที่ 2 ควบคุมแบบคงทนของ MT และ ES ที่สัมพันธ์กันใน CMS นำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้สัญญาณด้านเข้าป้อนกลับของความไม่สมดุลกำลังไฟฟ้าจริง ( $\Delta P$ ) ในระบบ MG มีค่าน้อยที่สุด บล็อกไดอะแกรมที่ทำให้เป็นเชิงเส้นของ CMS แสดงได้ในรูปที่ 3 ด้านออกกำลังไฟฟ้าของ FC ในบทนี้ได้สมมติให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ขนาด 5 kW และสมมติว่ามีปริมาณเชื้อเพลิง H<sub>2</sub> มากกว่า 50 % ใน HT ซึ่งเพียงพอต่อการทำงานของ FC ตลอดช่วงการจำลองระบบ พารามิเตอร์ของระบบ MG ได้แสดงไว้ตารางที่ 1-7 และคำอธิบายสัญลักษณ์ได้ให้ไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แผนภาพระบบ MG



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมที่ทำให้เป็นเชิงเส้นของ CMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ข้อมูลระบบ MG

System parameter	MG system
$f_0$ (Hz)	50
Base	100
$K_{ES}$	100
$T_{ES}$	60
$K_{MT}$	0.04
$M$	10
$D$	1
$X_{tie}$	0.072

ตารางที่ 2 ข้อมูล WP

Wind power	kW
$P_{WP}$ (initial)	15
$P_{WP}$ (maximum)	100

ตารางที่ 3 ข้อมูล PV

Photovoltaic	kW
$P_{PV}$ (initial)	10
$P_{PV}$ (maximum)	25

ตารางที่ 4 ข้อมูล MT

Microturbine	kW
$P_{MT}$ (initial)	70
$P_{MT}$ (maximum)	100
$P_{MT}$ (minimum)	10

ตารางที่ 5 ข้อมูล FC

Fuel cell	kW
$P_{FC}$ (initial)	5
$P_{FC}$ (maximum)	5
$P_{FC}$ (minimum)	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ข้อมูล ES

Electrolyzer system	kW
$P_{ES}$ (initial)	50
$P_{ES}$ (maximum)	70
$P_{ES}$ (minimum)	30

ตารางที่ 7 ข้อมูลโหลด

Load	kW
$P_L$ (initial)	50

คำอธิบายสัญลักษณ์

$D$	ค่าการหน่วง
$dP_{PV}$	การเปลี่ยนแปลงมาตรฐานของพลังงานแสงอาทิตย์
$dP_{WP}$	การเปลี่ยนแปลงมาตรฐานของพลังงานลม
$f_0$	ความถี่ระบบ
$G$	ระบบที่ระบุ
$ G _{dB,lf}$	ค่าอัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่ระบุ $G$ ที่ย่านความถี่ต่ำ
$G_S$	ระบบที่จัดสรรฐาน
$ G_S _{dB,lf}$	ค่าอัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่จัดสรรฐาน $G_S$ ที่ย่านความถี่ต่ำ
$H_2$	ไฮโดรเจน
HT	ถังสำหรับบรรจุไฮโดรเจน
$K_{ES}$	ค่าอัตราขยายของระบบอิเล็กทรอนิกส์
$K_F$	ค่าอัตราขยายของตัวทำเสถียรภาพ
$K_{FC}$	ค่าอัตราขยายของเซลล์เชื้อเพลิง
$K_{MT}$	ค่าคุณสมบัติ droop ของไมโครเทอร์ไบน์
$K_{PESis}$	ตัวควบคุมแบบคงทนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการทำงานแบบแยกอิสระ
$K_{PESug}$	ตัวควบคุมแบบคงทนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า
$K_{PMTis}$	ตัวควบคุมแบบคงทนของไมโครเทอร์ไบน์ในการทำงานแบบแยกอิสระ
$K_{PMTug}$	ตัวควบคุมแบบคงทนของไมโครเทอร์ไบน์ในการทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า
$M$	ค่าคงตัวความเฉื่อย
$P_{ES}$	ค่าด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดระบบอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_{FC}$	ค่าด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิง
$pf$	ตัวประกอบกำลัง
$P^G$	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิต
$P_{IG}$	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
$P_{in}$	กำลังไฟฟ้าจริงด้านเข้า
$P^L$	โหลดระบบ
$P_L$	กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด
$P_{MT}$	ค่าด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของไมโครเทอร์ไบน์
$P_{PV}$	ค่าด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของพลังงานแสงอาทิตย์
$P_{SG}$	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
$P_{tie}$	กำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อม
$P_{WP}$	ค่าด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของพลังงานลม
$P_{ES}^{ini}$	ค่าเริ่มต้นด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดระบบอิเล็กทรอนิกส์
$P_{FC}^{ini}$	ค่าเริ่มต้นด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิง
$P_{MT}^{ini}$	ค่าเริ่มต้นด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของไมโครเทอร์ไบน์
$P_{ES}^{max}$	ค่าสูงที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดระบบอิเล็กทรอนิกส์
$P_{ES}^{min}$	ค่าต่ำที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดระบบอิเล็กทรอนิกส์
$P_{FC}^{max}$	ค่าสูงที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิง
$P_{FC}^{min}$	ค่าต่ำที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิง
$P_{MT}^{max}$	ค่าสูงที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของไมโครเทอร์ไบน์
$P_{MT}^{min}$	ค่าต่ำที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของไมโครเทอร์ไบน์
$P_{PV}^{max}$	ค่าสูงที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของพลังงานแสงอาทิตย์
$P_{PV}^{min}$	ค่าต่ำที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของพลังงานแสงอาทิตย์
$P_{WP}^{max}$	ค่าสูงที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของพลังงานลม
$P_{WP}^{min}$	ค่าต่ำที่สุดของด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของพลังงานลม
$T_{ES}$	ค่าคงตัวทางเวลาของระบบอิเล็กทรอนิกส์
$T_F$	ค่าคงตัวทางเวลาของตัวทำเสถียรภาพ
$T_{FC}$	ค่าคงตัวทางเวลาของเซลล์เชื้อเพลิง
$W_1, W_2$	ฟังก์ชันน้ำหนัก
$X_{tie}$	รีแอกแตนซ์สายส่งต่อเชื่อม
$\theta$	มุมเฟสที่สัมพันธ์กันระหว่างกริดการไฟฟ้า และระบบไมโครกริด
$\Delta f$	การเปลี่ยนแปลงของความถี่
$\Delta P$	ความไม่สมดุลกำลังไฟฟ้าจริง
$\Delta P_{ES}$	การเปลี่ยนแปลงด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดระบบอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta P_{ESis}$	การเปลี่ยนแปลงในด้านการทำงานแบบแยกอิสระของโหลดระบบอิเล็กทรอนิกส์
$\Delta P_{ESug}$	การเปลี่ยนแปลงในด้านการทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าของโหลดระบบอิเล็กทรอนิกส์
$\Delta P_{FC}$	การเปลี่ยนแปลงด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิง
$\Delta P_{IW}$	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ากักหน้ลมด้านเข้า
$\Delta P_{MT}$	การเปลี่ยนแปลงด้านออกกำลังไฟฟ้าจริงของไมโครเทอร์ไบน์
$\Delta P_{MTis}$	การเปลี่ยนแปลงในด้านการทำงานแบบแยกอิสระของด้านออกไมโครเทอร์ไบน์
$\Delta P_{MTug}$	การเปลี่ยนแปลงในด้านการทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าของด้านออกไมโครเทอร์ไบน์
$\Delta P_{tie}$	การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อม

ดังนั้นสมการปริภูมิสถานะที่ทำให้เป็นเชิงเส้นแสดงได้ดังสมการ

$$\dot{\Delta X} = A\Delta X + B\Delta u \quad (1)$$

$$\Delta Y = C\Delta X + D\Delta u \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{ES}} & 0 & \frac{K_{ES}}{T_{ES}} \\ 0 & 0 & \frac{2\pi f_0}{X_{tie}} \\ \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{D}{M} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta P_{MTis} = K_{PMTis}(s)\Delta P \quad (7)$$

$$\Delta P_{ESis} = K_{PESis}(s)\Delta P \quad (8)$$

$$\Delta P_{MTug} = K_{PMTug}(s)\Delta P_{tie} \quad (9)$$

$$\Delta P_{ESug} = K_{PESug}(s)\Delta P_{tie} \quad (10)$$

$$K_{PMTis}(s) = K_{P\_MTis} + K_{I\_MTis}/s \quad (11)$$

$$K_{PESis}(s) = K_{P\_ESis} + K_{I\_ESis}/s \quad (12)$$

$$K_{PMTug}(s) = K_{P\_MTug} + K_{I\_MTug}/s \quad (13)$$

$$K_{PESug}(s) = K_{P\_ESug} + K_{I\_ESug}/s \quad (14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

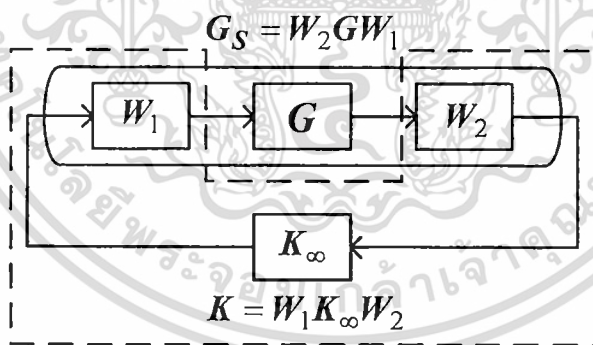
โดยที่  $\Delta X = [\Delta P_{ES} \ \Delta P_{tie} \ \Delta f]^T$  คือ เวกเตอร์สถานะ,  $\Delta P_{ES}$ ,  $\Delta P_{tie}$  และ  $\Delta f$  คือ การเปลี่ยนแปลงของ โหลด ES, กำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อม และความถี่ตามลำดับ, เวกเตอร์เอาต์พุตคือ  $\Delta Y = [\Delta P \ \Delta P_{tie}]^T$ , เวกเตอร์อินพุตคือ  $\Delta u = [\Delta P_{MTis} \ \Delta P_{ESis} \ \Delta P_{MTug} \ \Delta P_{ESug}]^T$ ,  $\Delta P_{MTis}$  และ  $\Delta P_{ESis}$  คือ การเปลี่ยนแปลงในด้านการทำงานแบบแยกอิสระของด้านออก MT และโหลด ES ตามลำดับ,  $\Delta P_{MTug}$  และ  $\Delta P_{ESug}$  คือ การเปลี่ยนแปลงในด้านการทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าของด้านออก MT และโหลด ES ตามลำดับ,  $K_{PMTis}(s)$  และ  $K_{PESis}(s)$  คือ ตัวควบคุมแบบคงทนที่นำเสนอของ MT และ ES ในการทำงานแบบแยกอิสระตามลำดับ,  $K_{PMTug}(s)$  และ  $K_{PESug}(s)$  คือ ตัวควบคุมแบบคงทนที่นำเสนอของ MT และ ES ในการทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าตามลำดับ และระบบใน สมการที่ (1) คือ ระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต และเป็นระบบที่ระบุ  $G$  ส่วนโครงสร้างของตัวควบคุมแบบคงทนของ MT และ ES ในสมการที่ (11)-(14) คือ แบบพีโอ

### 3. วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ

#### 3.1 วิธีควบคุมการจัดสัญญาณวงรอบ $H_\infty$ แบบโครงสร้างเฉพาะเจาะจง

รายละเอียดของขั้นตอนวิธีควบคุมการจัดสัญญาณวงรอบ  $H_\infty$  แบบโครงสร้างเฉพาะเจาะจงอธิบาย ได้ดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 การจัดสัญญาณวงรอบ (loop shaping)



รูปที่ 4 ระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S$  และตัวควบคุมแบบคงทน  $K$

จากรูปที่ 4  $W_1$  คือ ตัวก่อนชดเชย (pre-compensator) และ  $W_2$  คือ ตัวหลังชดเชย (post-compensator) ได้นำมาใช้ในการสร้างรูปร่างของระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S = W_2 G W_1$  ส่วนตัวควบคุมแบบคงทน  $K = W_1 K_\infty W_2$  โดยที่  $K_\infty$  คือ ตัวควบคุม  $H_\infty$

##### 3.1.2 การเลือกค่าฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function selection)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วค่าฟังก์ชันน้ำหนัก  $W_1$  และ  $W_2$  จะเลือกให้อย่างเหมาะสมได้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติของวงรอบเปิดของระบบที่จัดสัญญาณ (open loop of the shaped plant) [28-30] ดังนี้

- มีค่าอัตราขยายวงรอบเปิดที่สูงๆ (large open loop gain) ที่ย่านความถี่ต่ำ (low frequency range) ซึ่งจะส่งผลให้การตามรอยสมรรถนะ (performance tracking) และการต่อต้านสัญญาณรบกวน (disturbance rejection) ระบบได้ดีมากขึ้น .
- มีค่าอัตราขยายวงรอบเปิดที่ต่ำๆ (small open loop gain) ที่ย่านความถี่สูง (high frequency range) ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าเสถียรภาพคงทน (robust stability) ดีขึ้น และสามารถต่อต้านสัญญาณรบกวนตัวตรวจรู้ (sensor noise rejection) ได้ดีมากขึ้น

ในรูปที่ 4 ระบบที่จัดสัญญาณสร้างขึ้นมาจากด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก  $W_1$  และ  $W_2$  ดังนั้นค่าฟังก์ชันน้ำหนัก  $W_1$  และ  $W_2$  กำหนดได้ดังสมการ (15) เพราะวาระบบที่ระบุ  $G$  (nominal plant  $G$ ) คือระบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (single-input single-output: SISO)

$$W_1 = K_W \frac{s+a}{s+b}, W_2 = I \quad (15)$$

โดยที่  $K_W$ ,  $a$  และ  $b$  มีค่ามากกว่าศูนย์ (positive values) และค่า  $W_1$  กำหนดให้เป็นค่าแบบกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน ( $a < b$ ) เพราะวาระบบที่ระบุของระบบวงรอบเปิดเกิดขึ้นที่ย่านความถี่ต่ำ

ส่วนค่าฟังก์ชันน้ำหนัก  $W_1$  และ  $W_2$  ในระบบหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (multi-input single-output: MISO) และระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (multi-input multi-output: MIMO) จะกำหนดได้ดังสมการที่ (16)-(17) ตามลำดับ โดยที่สมการ (16)-(17) นี้จะกล่าวถึงต่อไป

$$W_1 = \begin{bmatrix} K_{W1} \frac{s+a_1}{s+b_1} & 0 \\ 0 & K_{W2} \frac{s+a_2}{s+b_2} \end{bmatrix}, W_2 = I \quad (16)$$

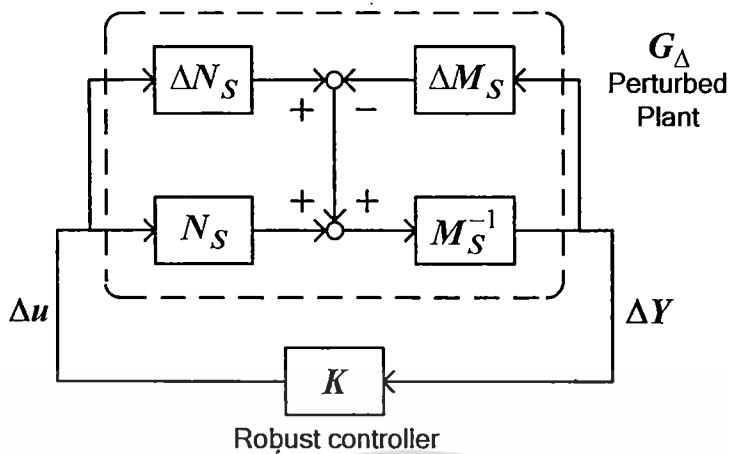
โดยที่  $K_{W1}$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $K_{W2}$ ,  $a_2$  และ  $b_2$  มีค่ามากกว่าศูนย์ และค่า  $W_1$  กำหนดให้เป็นค่าแบบกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน ( $a_1 < b_1$  และ  $a_2 < b_2$ )

$$W_1 = \begin{bmatrix} K_{W1} \frac{s+a_1}{s+b_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{W2} \frac{s+a_2}{s+b_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{W3} \frac{s+a_3}{s+b_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{W4} \frac{s+a_4}{s+b_4} \end{bmatrix}, W_2 = I \quad (17)$$

โดยที่  $K_{W1}$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $K_{W2}$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $K_{W3}$ ,  $a_3$ ,  $b_3$ ,  $K_{W4}$ ,  $a_4$  และ  $b_4$  มีค่ามากกว่าศูนย์ และค่า  $W_1$  กำหนดให้เป็นค่าแบบกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน ( $a_1 < b_1$ ,  $a_2 < b_2$ ,  $a_3 < b_3$  และ  $a_4 < b_4$ )

### 3.1.3 การคำนวณค่าส่วนเพื่อเสถียรภาพคงทน (robust stability margin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 ปัญหาการทำเสถียรภาพคงทน  $H_\infty$

โดยทั่วไปแล้วความไม่แน่นอนในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่ จะเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ, การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต และโหลด เป็นต้น ซึ่งนิยามได้เป็นความไม่แน่นอนในระบบที่ไร้โครงสร้าง (unstructured system uncertainties) และไม่สามารถแสดงด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนั้นวิธีตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factorization) จึงได้นำมาประยุกต์ใช้แทนความไม่แน่นอนในระบบ ส่วนระบบที่จัดสัมฐาน  $G_S$  นั้นได้นิยามในรูปแบบของตัวประกอบเฉพาะร่วมซ้ายทำให้เป็นปรกติ (normalized left coprime factor) ดังสมการ

$$G_S = M_S^{-1} N_S \quad (18)$$

และระบบที่รบกวน  $G_\Delta$  (perturbed plant  $G_\Delta$ ) นิยามได้ดังสมการ

$$G_\Delta = \left\{ (M_S + \Delta M_S)^{-1} (N_S + \Delta N_S) : \left\| \begin{bmatrix} \Delta N_S & \Delta M_S \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq 1/\gamma \right\} \quad (19)$$

โดยที่  $\Delta M_S$  และ  $\Delta N_S$  คือ ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งอธิบายถึงค่าความไม่แน่นอนในระบบ  $G$  ดังนั้นปัญหาการทำเสถียรภาพคงทน  $H_\infty$  สามารถที่จะกำหนดขึ้น มาได้จากค่า  $G_\Delta$  และ  $K$  ดังแสดงในรูปที่ 5 และวัตถุประสงค์ในการออกแบบการควบคุมแบบคงทนนั้นไม่เพียงแต่ที่จะให้มีเสถียรภาพในระบบ  $G$  แล้ว แต่ยังจะให้มีเสถียรภาพในสมาชิกทั้งหมดของ  $G_\Delta$  ด้วย

ในสมการที่ (19) ค่า  $1/\gamma$  คือ ค่าส่วนเผื่อเสถียรภาพคงทน ดังนั้นค่าส่วนเผื่อเสถียรภาพที่มากที่สุดภายใต้ความไม่แน่นอนในระบบนั้น สามารถที่จะคำนวณได้จากค่าที่ต่ำที่สุดของ  $\gamma$  หรือเรียกว่า  $\gamma_{min}$  โดยค่า  $\gamma_{min}$  นั้นแสดงถึงขนาดที่มากที่สุดของความไม่แน่นอนในระบบ ซึ่งค่า  $\gamma_{min}$  คำนวณได้จากสมการ

$$\gamma_{min} = \sqrt{1 + \lambda_{max}(XZ)} \quad (20)$$

โดยที่  $\lambda_{max}(XZ)$  คือ ค่าเจาะจง (eigenvalue) ที่มีค่ามากที่สุดของ  $XZ$  และสำหรับสมการปริภูมิสถานะ (state-space) ที่ต่ำที่สุด  $(A, B, C, D)$  ของ  $G_S$  นั้นค่า  $X$  และ  $Z$  คือผลเฉลยที่มีค่าเป็นบวก ซึ่งคำนวณจากสมการรีกกาตี (Riccati) ดังนี้

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(A - BS^{-1}D^T C)^T X + X(A - BS^{-1}D^T C) - XBS^{-1}B^T X + C^T R^{-1}C = 0 \quad (21)$$

และ

$$(A - BS^{-1}D^T C)Z + Z(A - BS^{-1}D^T C)^T - ZC^T R^{-1}CZ + BS^{-1}B^T = 0 \quad (22)$$

โดยที่  $R = I + DD^T$  และ  $S = I + D^T D$  ดังนั้นค่า  $\gamma_{min}$  ในสมการที่ (20) สามารถคำนวณออกมาได้โดยไม่ต้องคำนวณวิธีวนซ้ำ (iterative method) และเพื่อที่จะยืนยันเสถียรภาพคงทนในระบบ  $G$  ค่าฟังก์ชันน้ำหนักจึงเลือกให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ  $1.0 \leq \gamma_{min} < 4.0$  [28-30]

### 3.1.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

จากรูปที่ 4 ค่า  $W_2 = I$  ดังนั้นค่า  $K_\infty$  สามารถที่จะจัดรูปแบบของสมการได้ใหม่ดังนี้

$$K_\infty = W_1^{-1}K(s) \quad (23)$$

จาก [28-30] ปัจจัย และเงื่อนไขที่จำเป็นของตัวควบคุมแบบคงทน  $K(s)$  คือ

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty \end{bmatrix} (I - G_S K_\infty)^{-1} \begin{bmatrix} I & G_S \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (24)$$

แทนค่าสมการที่ (23) ลงในสมการที่ (24) จะได้

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ W_1^{-1}K(s) \end{bmatrix} (I - G_S W_1^{-1}K(s))^{-1} \begin{bmatrix} I & G_S \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (25)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับเลือกค่าฟังก์ชันน้ำหนัก และหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบคงทนแสดงได้คือ

พารามิเตอร์ตัวควบคุมของ MT และ ES สามารถที่จะออกแบบได้โดยพิจารณาจากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Minimize } \gamma_{min} + \left\| \begin{bmatrix} I \\ W_1^{-1}K(s) \end{bmatrix} (I - G_S W_1^{-1}K(s))^{-1} \begin{bmatrix} I & G_S \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (26)$$

เงื่อนไขบังคับ

$$K_{W1-4,min} < K_{W1-4} < K_{W1-4,max}, a_{1-4,min} < a_{1-4} < a_{1-4,max}$$

$$b_{1-4,min} < b_{1-4} < b_{1-4,max}, a_1 < b_1, a_2 < b_2, a_3 < b_3, a_4 < b_4$$

$$\gamma_{min,min} < \gamma_{min} < \gamma_{min,max}, |G|_{dB,lf} < |G_S|_{dB,lf}$$

$$K_{P\_MTis,min} \leq K_{P\_MTis} \leq K_{P\_MTis,max}, K_{I\_MTis,min} \leq K_{I\_MTis} \leq K_{I\_MTis,max}$$

$$K_{P\_ESis,min} \leq K_{P\_ESis} \leq K_{P\_ESis,max}, K_{I\_ESis,min} \leq K_{I\_ESis} \leq K_{I\_ESis,max}$$

$$K_{P\_MTug,min} \leq K_{P\_MTug} \leq K_{P\_MTug,max}, K_{I\_MTug,min} \leq K_{I\_MTug} \leq K_{I\_MTug,max}$$

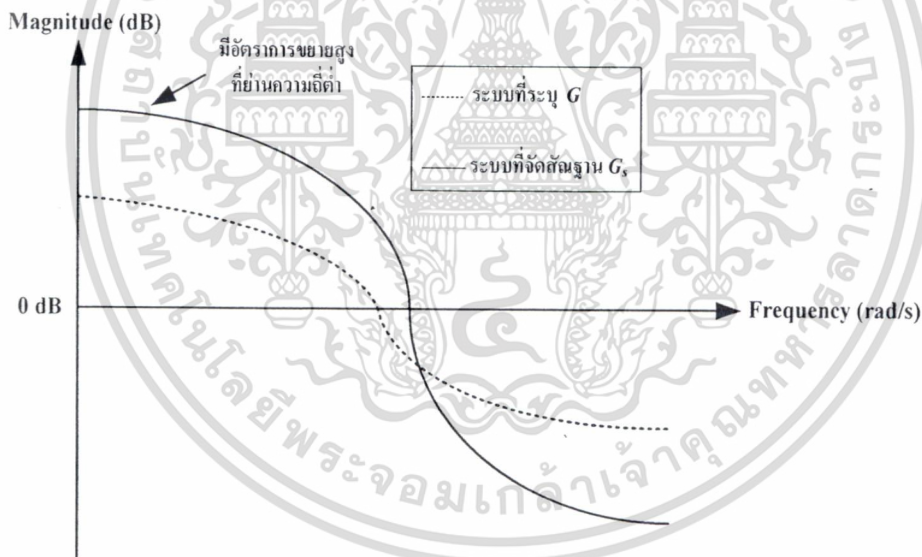
$$K_{P\_ESug,min} \leq K_{P\_ESug} \leq K_{P\_ESug,max}, K_{I\_ESug,min} \leq K_{I\_ESug} \leq K_{I\_ESug,max} \quad (27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โดยที่  $K_{W1-4,min}$ ,  $a_{1-4,min}$ ,  $b_{1-4,min}$  และ  $K_{W1-4,max}$ ,  $a_{1-4,max}$ ,  $b_{1-4,max}$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันน้ำหนักที่ต่ำที่สุด และสูงที่สุดของ MT และ ES ในด้านการทำงานแบบแยกอิสระ และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าตามลำดับ,  $\gamma_{min,min}$  และ  $\gamma_{min,max}$  คือ ค่าต่ำที่สุด และสูงที่สุดของ  $\gamma_{min}$  ตามลำดับ,  $|G|_{dB,f}$  และ  $|G_S|_{dB,f}$  คือ ค่าอัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่ระบุ  $G$  และระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S$  ที่ย่านความถี่ต่ำตามลำดับ,  $K_{P\_MTis,min}$ ,  $K_{I\_MTis,min}$ ,  $K_{P\_ESis,min}$ ,  $K_{I\_ESis,min}$  และ  $K_{P\_MTis,max}$ ,  $K_{I\_MTis,max}$ ,  $K_{P\_ESis,max}$ ,  $K_{I\_ESis,max}$  คือ ค่าต่ำที่สุด และสูงที่สุดของพารามิเตอร์พีไอของ  $K_{PMTis}$  และ  $K_{PESis}$  ตามลำดับ,  $K_{P\_MTug,min}$ ,  $K_{I\_MTug,min}$ ,  $K_{P\_ESug,min}$ ,  $K_{I\_ESug,min}$  และ  $K_{P\_MTug,max}$ ,  $K_{I\_MTug,max}$ ,  $K_{P\_ESug,max}$ ,  $K_{I\_ESug,max}$  คือ ค่าต่ำที่สุด และสูงที่สุดของพารามิเตอร์พีไอของ  $K_{PMTug}$  และ  $K_{PESug}$  ตามลำดับ

จากสมการที่ (26) ค่าฟังก์ชันน้ำหนักเลือกได้อย่างเหมาะสมโดยการปรับค่า  $\gamma_{min}$  เพื่อที่จะทำให้ค่าอัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S$  มีค่ามากกว่าค่าอัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่ระบุ  $G$  ที่ย่านความถี่ต่ำ ( $|G_S|_{dB,f} > |G|_{dB,f}$ ) โดยมีค่าอัตราการ roll-off ประมาณ 20 dB/decade [28-30] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6

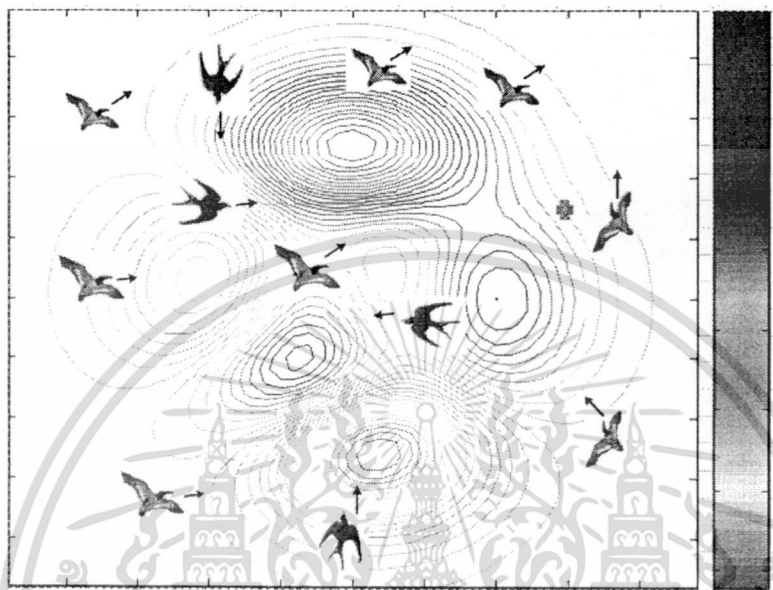


รูปที่ 6 อัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S$  และระบบที่ระบุ  $G$

### 3.2 วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)

วิธี PSO ได้นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart [31] ในปี ค.ศ. 1995 ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมของการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ เช่น ผีเสื้อกลางคืน หรือฝูงปลา เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 7 วิธี PSO เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร (population) แต่ละตัวดำเนินการ เรียกว่า อนุภาค (particle) ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ อนุภาคนี้จะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม และบินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา ในระหว่างบินนั้นแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนย้ายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งโดยอาศัยการอ้างอิงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งอาจจะค้นพบด้วยตัวเอง หรืออนุภาคใกล้เคียง และวิธี PSO ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ง่าย และมีคุณลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ (convergence characteristic) และประสิทธิภาพของการคำนวณที่ดีมาก



รูปที่ 7 หลักการ และแนวคิดพื้นฐานของวิธี PSO

### 3.2.1 องค์ประกอบของวิธี PSO

รายละเอียดขององค์ประกอบวิธี PSO พิจารณาได้ดังต่อไปนี้

กำหนดให้

$g$  คือ มิติ (dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา

$x_j = (x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,g})$  แทนตำแหน่งของอนุภาคที่  $j$

$v_j = (v_{j,1}, v_{j,2}, \dots, v_{j,g})$  แทนอัตราความเร็วสำหรับอนุภาคที่  $j$

$pbest_j = (pbest_{j,1}, pbest_{j,2}, \dots, pbest_{j,g})$  แทนตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหาแล้วของอนุภาคที่  $j$

$gbest_g$  แทนตำแหน่งของอนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด

ดังนั้นการเปลี่ยนความเร็ว และตำแหน่งของแต่ละอนุภาค สามารถคำนวณได้จาก

$$v_{j,g}^{(t+1)} = \omega \cdot v_{j,g}^{(t)} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + c_2 \cdot Rand() \cdot (gbest_g - x_{j,g}^{(t)}) \quad (28)$$

$$x_{j,g}^{(t+1)} = x_{j,g}^{(t)} + v_{j,g}^{(t+1)} \quad (29)$$

โดยที่

$n$  คือ จำนวนอนุภาคในกลุ่ม

$m$  คือ จำนวนตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งหมายถึงว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (iteration) ำนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $v_{j,g}^{(t)}$  คือ ความเร็วของอนุภาคที่  $j$  ในรอบที่  $t$  โดยที่
- $$v_g^{min} \leq v_{j,g}^{(t)} \leq v_g^{max}$$
- $\omega$  คือ แฟกเตอร์น้ำหนักความเฉื่อย (inertial weight factor)
- $c_1, c_2$  คือ ค่าคงที่ของอัตราเร่ง (acceleration constant)
- $rand(), Rand()$  คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง  $[0,1]$
- $x_{j,g}^{(t)}$  คือ ตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาคที่  $j$  ในรอบที่  $t$

ค่า  $v^{max}$  ใช้ในการหาค่าความละเอียดของคำตอบ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้อนุภาคบินผ่านคำตอบที่ดีที่สุดไป แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปก็อาจจะค้นหาไม่ครอบคลุมทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นจากการทดสอบมาแล้ว  $v^{max}$  ควรจะกำหนดค่าประมาณ 10-20 % ของช่วงการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรแต่ละตัว

ค่าคงที่  $c_1$  และ  $c_2$  แทนน้ำหนักของความเร่งของแต่ละอนุภาคผ่านตำแหน่ง  $pbest$  และ  $gbest$  ถ้ามีค่าน้อยเกินไป ในกรณีที่อนุภาคอยู่ห่างจากตำแหน่งเป้าหมายก็อาจจะหมดแรงก่อนถึงเป้าหมาย แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปก็อาจจะบินข้ามเป้าหมายไป ดังนั้นค่า  $c_1$  และ  $c_2$  จากการทดสอบมาแล้ว ควรตั้งไว้ที่ค่า 2.0

การเลือกค่า  $\omega$  ที่เหมาะสมนั้น หาได้จาก

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (30)$$

โดยทั่วไปแล้วค่า  $\omega$  ที่เหมาะสมคือ  $\omega_{max} = 0.9$  และ  $\omega_{min} = 0.4$

### 3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธี PSO

ระเบียบขั้นตอนการดำเนินงานของวิธี PSO แสดงได้ดังรูปที่ 8 ขั้นตอนการดำเนินงานของ วิธี PSO อธิบายได้ดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมดของ PSO และทำการสุ่มค่าเริ่มต้นของจำนวนประชากรของแต่ละอนุภาค โดยตั้งค่า iteration = 1

**ขั้นตอนที่ 2** ทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับแต่ละอนุภาค

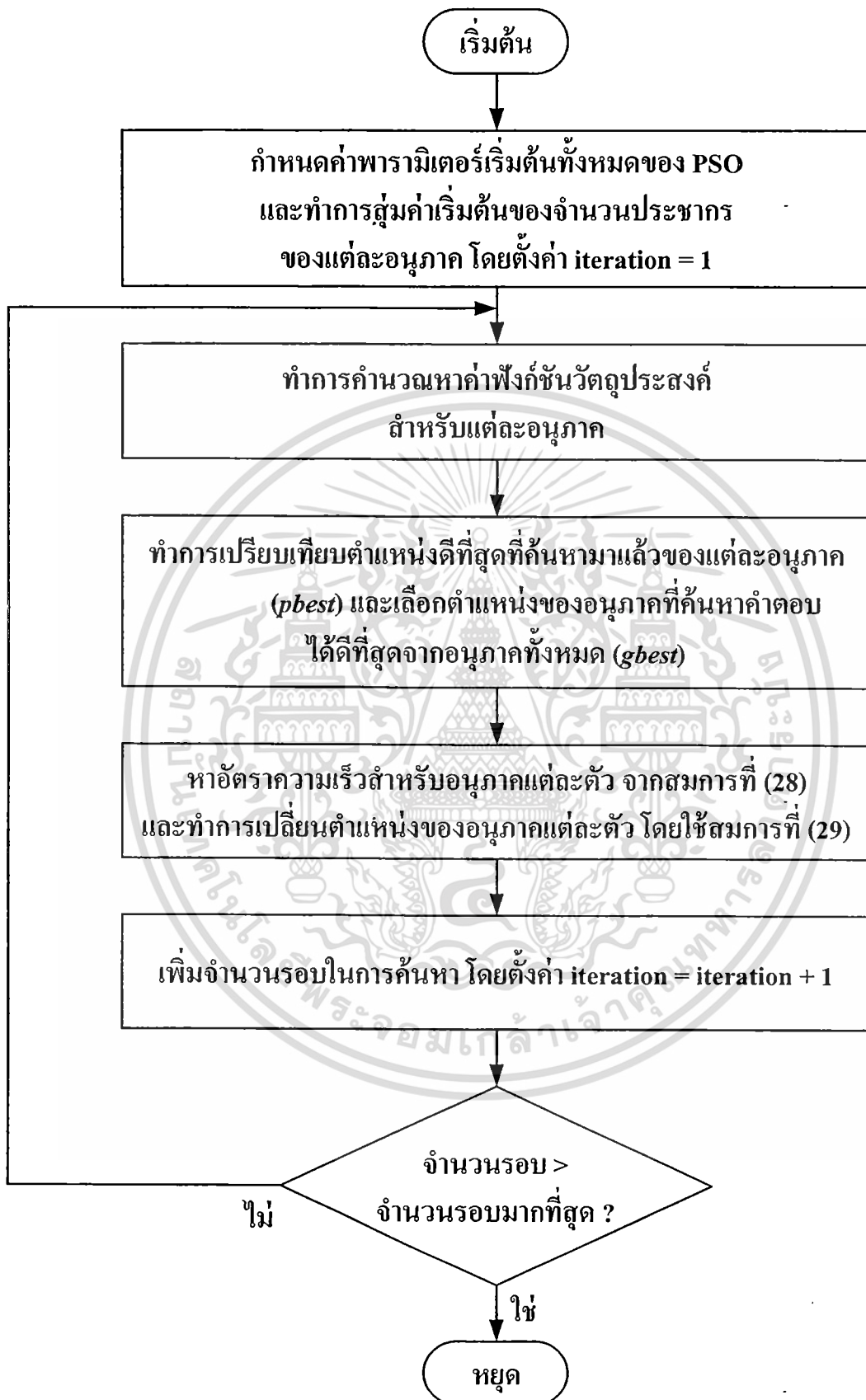
**ขั้นตอนที่ 3** ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของแต่ละอนุภาค ( $pbest$ ) และเลือกตำแหน่งของอนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด ( $gbest$ )

**ขั้นตอนที่ 4** หาอัตราความเร็วสำหรับอนุภาคแต่ละตัว จากสมการที่ (28) และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคแต่ละตัว โดยใช้สมการที่ (29)

**ขั้นตอนที่ 5** เพิ่มจำนวนรอบในการค้นหา โดยตั้งค่า iteration = iteration + 1

**ขั้นตอนที่ 6** ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดดำเนินการ ถ้ายังไม่ตรงตามเงื่อนไข ให้วนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 แต่ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธี PSO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ค่าขอบเขตต่ำที่สุด และสูงที่สุดของพารามิเตอร์ที่ทำการค้นหา และพารามิเตอร์ของวิธี PSO กำหนดได้ดังนี้

$$K_{W1}, K_{W2}, K_{W3}, K_{W4} \in [0.0001 \ 1000], a_1, a_2, a_3, a_4 \in [0.0001 \ 100], b_1, b_2, b_3, b_4 \in [0.0001 \ 100],$$

$$K_{P\_MTis} \in [0.0001 \ 1], K_{I\_MTis} \in [0.0001 \ 1], K_{P\_ESis} \in [0.0001 \ 1], K_{I\_ESis} \in [0.0001 \ 1],$$

$$K_{P\_MTug} \in [0.0001 \ 0.5], K_{I\_MTug} \in [0.0001 \ 0.5], K_{P\_ESug} \in [0.0001 \ 0.5], K_{I\_ESug} \in [0.0001 \ 0.5],$$

$$\gamma_{\min} \in [1 \ 4], \text{จำนวนของอนุภาค} = 50, \text{จำนวนรอบสูงสุด} = 100, c_1 = 2, c_2 = 2, w_{\min} = 0.4 \text{ และ}$$

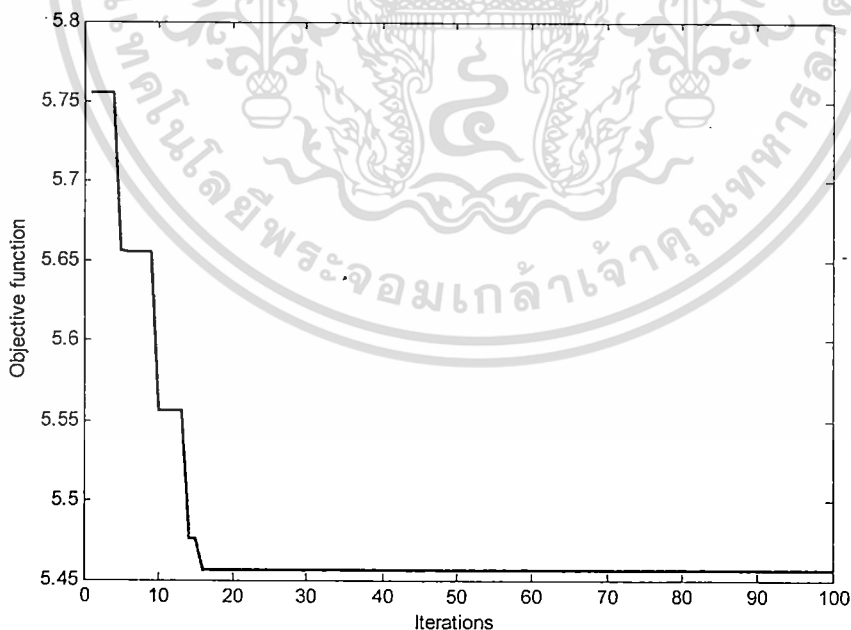
$$w_{\max} = 0.9$$

ดังนั้นค่าฟังก์ชันน้ำหนักเลือกได้อย่างเหมาะสมดังสมการ

$$W_{MTis} = 910.9754 \frac{s+48.9961}{s+96.9381}, W_{ESis} = 806.7562 \frac{s+46.9839}{s+93.9256} \quad (31)$$

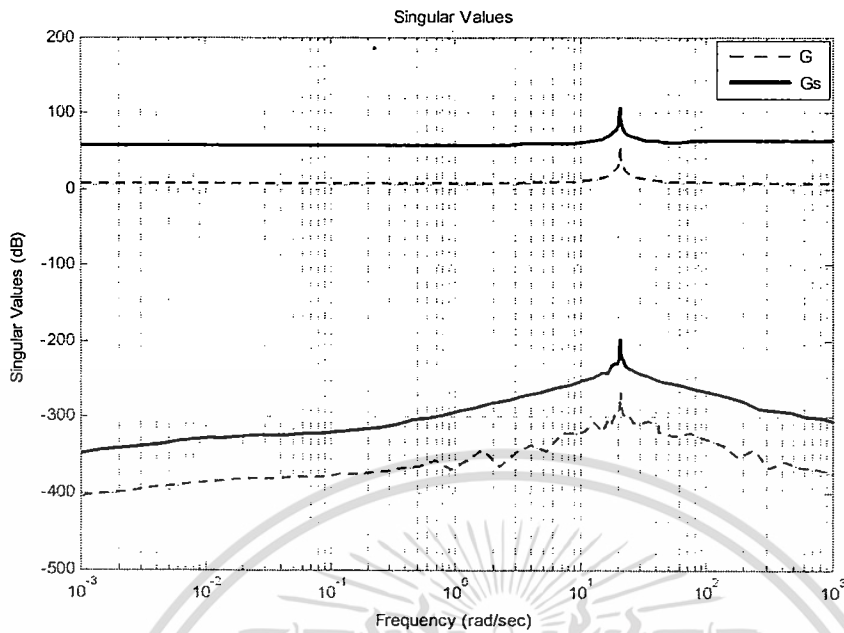
$$W_{MTug} = 889.9907 \frac{s+41.9219}{s+90.9769}, W_{ESug} = 886.9561 \frac{s+44.9197}{s+95.9942} \quad (32)$$

จากสมการที่ (31)-(32) ค่า  $\gamma_{\min}$  เท่ากับ 2.5849 ดังนั้นระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S$  จึงสร้างขึ้นมาได้ กราฟการลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงได้ดังรูปที่ 9 และกราฟอัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S$  และระบบที่ระบุ  $G$  แสดงได้ดังรูปที่ 10 สังเกตว่าที่ย่านความถี่ต่ำระบบที่จัดสัญญาณ  $G_S$  มีค่าอัตราขยายวงรอบเปิดมากกว่าระบบที่ระบุ  $G$  ซึ่งจะทำให้การตามรอยสมรรถนะ และการต่อต้านสัญญาณรบกวนระบบได้ดีมากขึ้น



รูปที่ 9 กราฟการลู่เข้าหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 อัตราขยายวงรอบเปิดของระบบที่จัดสถานะ  $G_s$  และระบบที่ระบุ  $G$

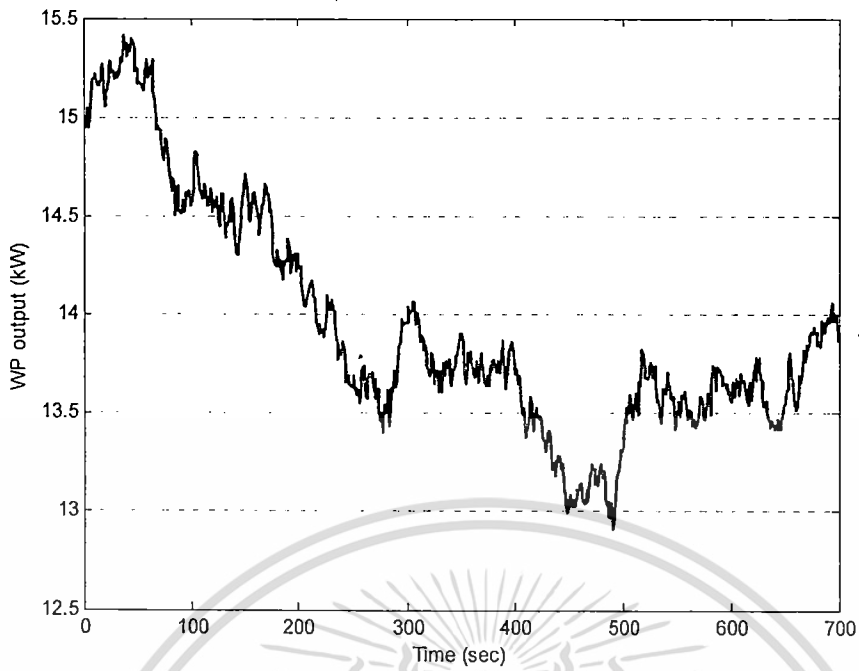
ดังนั้นตัวควบคุมแบบคงทนที่นำเสนอของ MT และ ES (PMT & PES) ในด้านการทำงานแบบแยกอิสระ และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าของ CMS คือ

$$K_{PMTis}(s) = 0.4300 + 0.6607/s, \quad K_{PESis}(s) = 0.4397 + 0.8951/s \quad (33)$$

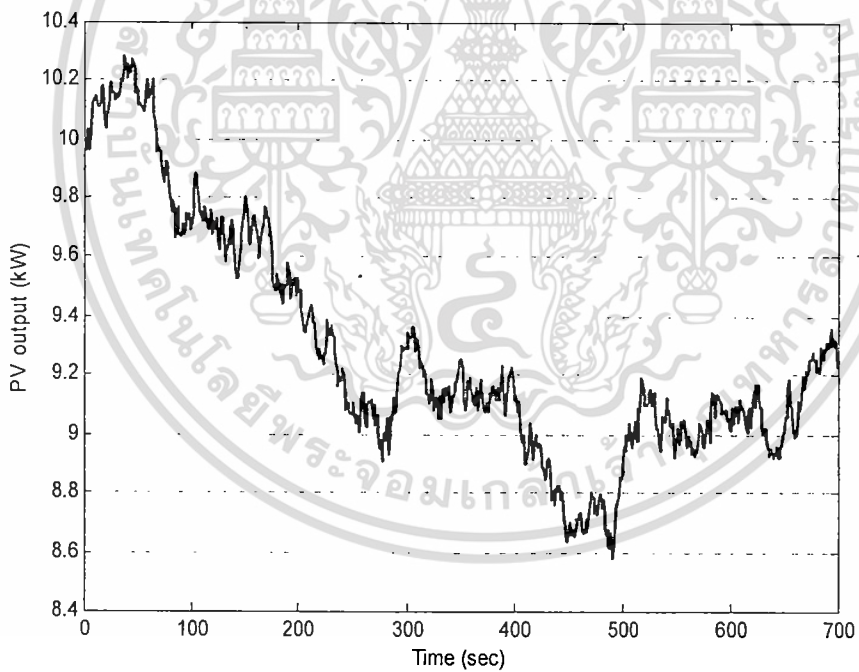
$$K_{PMTug}(s) = 0.1493 + 0.3994/s, \quad K_{PESug}(s) = 0.1500 + 0.3999/s \quad (34)$$

ในการศึกษาการจำลองนั้นความคงทน และผลการทำเสถียรภาพของ PMT & PES ได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมของ MT และ ES ใน [20-21] ซึ่งเรียกว่า CMT & CES ดังนั้นจึงสมมติว่ากำลังไฟฟ้านอกของ WP, PV และ FC ในรูปที่ 11-13 และการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่ม ในรูปที่ 14 ได้ประยุกต์เข้าไปในระบบ MG ภายใต้การทำงานแบบแยกอิสระ และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

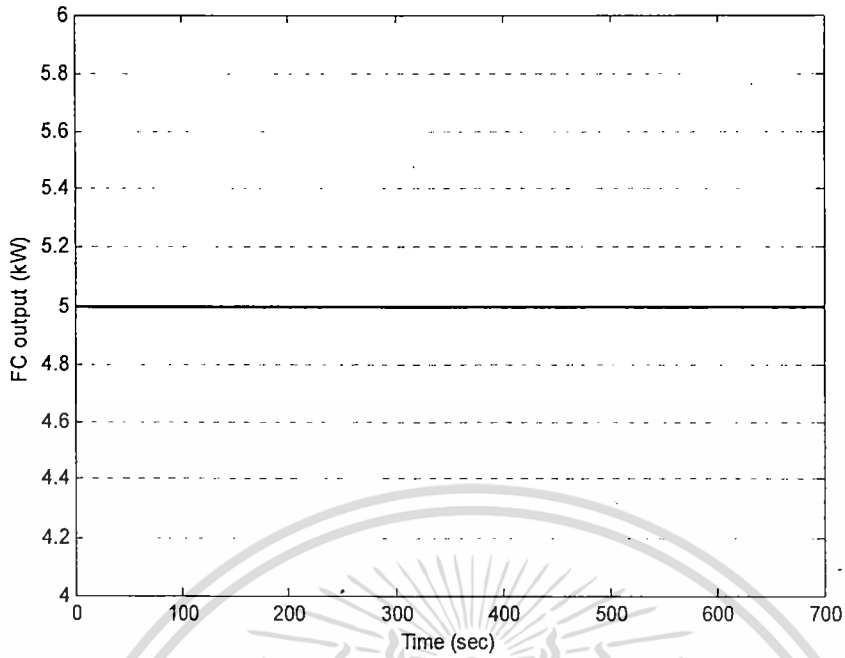


รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าต้านออกของ WP

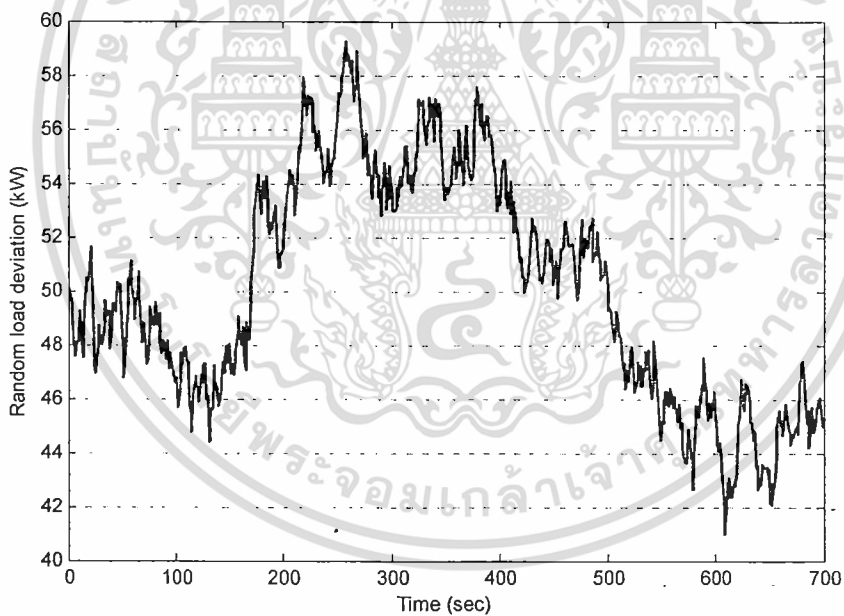


รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าต้านออกของ PV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



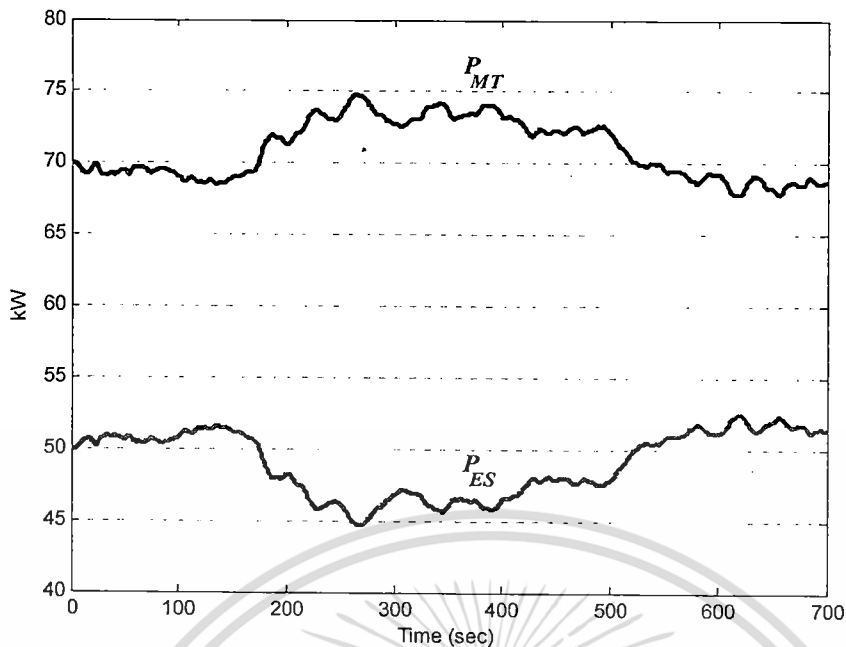
รูปที่ 13 กำลังไฟฟ้าต้านออกของ FC



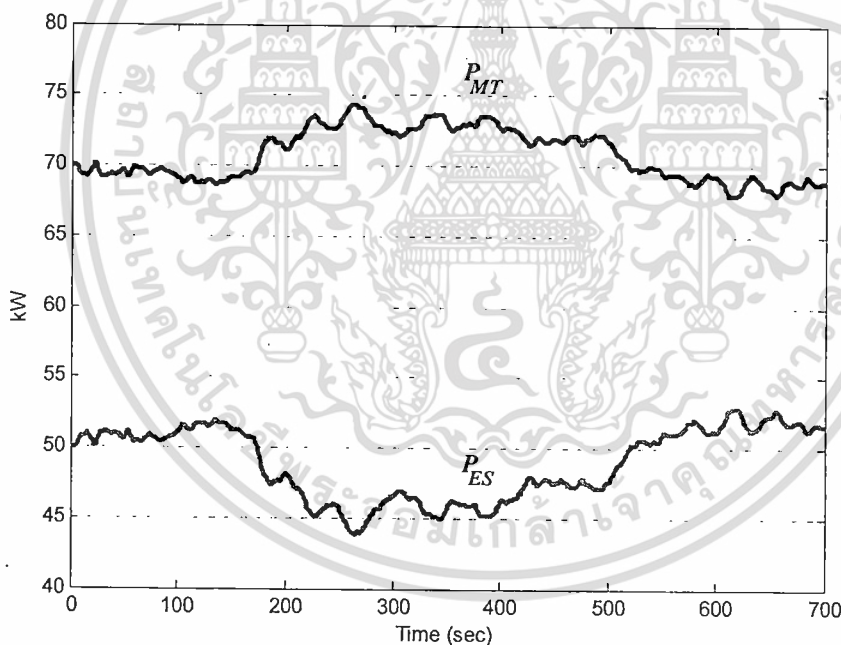
รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่ม

จากรูปที่ 14 ความต้องการโหลดจะมีค่าสูงมากกว่าการผลิตกำลังไฟฟ้าของ WP และ PV ในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ดังนั้น MT ที่ออกแบบโดยวิธีทั่วไป และวิธีที่นำเสนอ จะทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอเข้าไปในระบบ ในขณะที่ ES ที่ออกแบบโดยวิธีทั่วไป และวิธีที่นำเสนอ จะทำหน้าที่เสมือนเป็นโหลดโดยทำการรับกำลังไฟฟ้าในระบบดังแสดงในรูปที่ 15-16 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



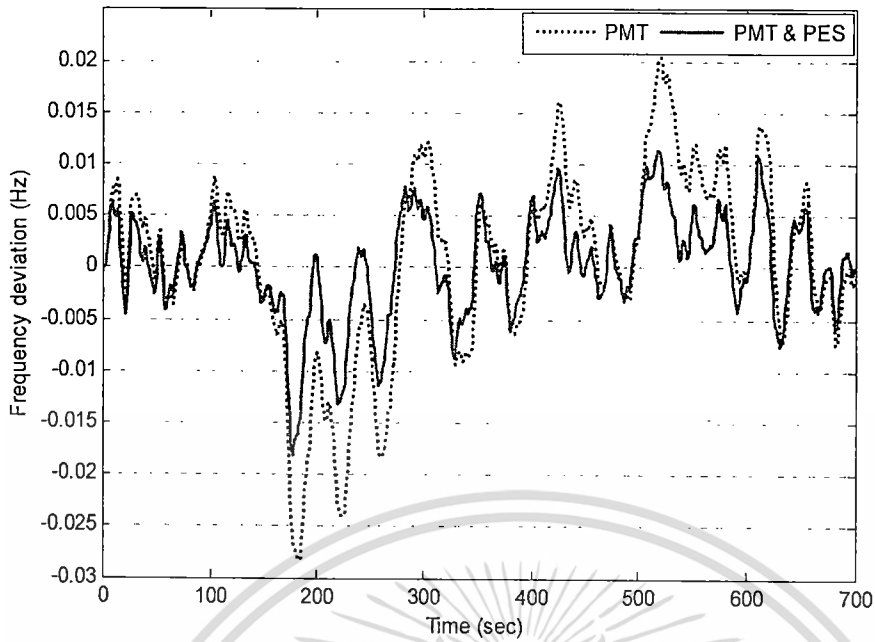
รูปที่ 15 กำลังไฟฟ้าด้านนอกภายใต้การควบคุมของ MT และ ES (วิธีทั่วไป)



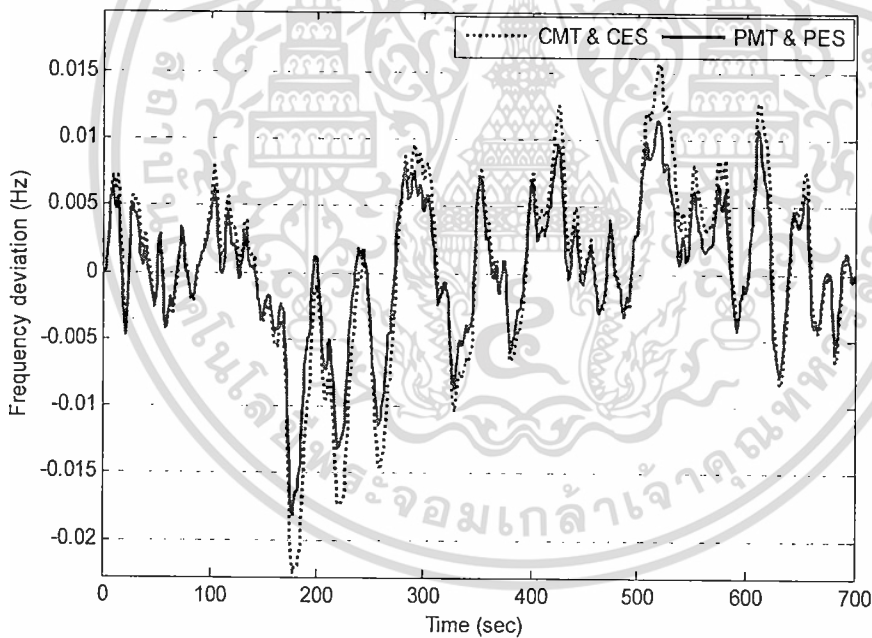
รูปที่ 16 กำลังไฟฟ้าด้านนอกภายใต้การควบคุมของ MT และ ES (วิธีที่นำเสนอ)

ในกรณีของการทำงานแบบแยกอิสระนั้น การเปลี่ยนแปลงความถี่ภายใต้การควบคุมของ PMT และ PMT & PES แสดงได้ดังรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ลดลงได้อย่างมากโดย PMT & PES เมื่อเทียบกับ PMT ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ES สามารถที่จะปรับปรุงผลการทำเสถียรภาพของ MT ได้อย่างมาก และเช่นเดียวกันการเปลี่ยนแปลงความถี่ภายใต้การควบคุมของ CMT & CES และ PMT & PES แสดงได้ดังรูปที่ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความถี่ภายใต้การควบคุมของ PMT และ PMT & PES

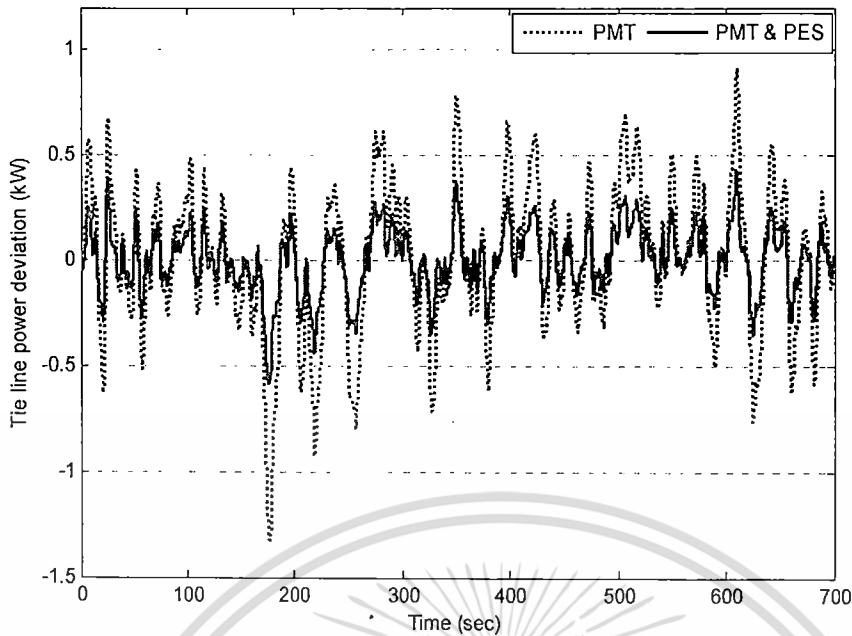


รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความถี่ภายใต้การควบคุมของ CMT & CES และ PMT & PES

จากรูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความถี่ภายใต้การควบคุมของ PMT & PES มีค่าที่ต่ำกว่าการควบคุมของ CMT & CES

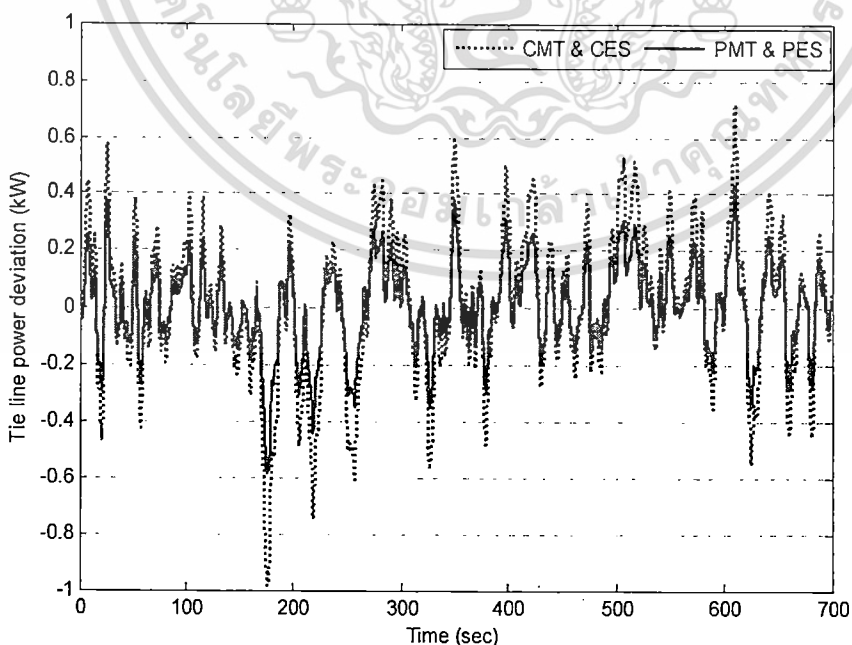
สำหรับเงื่อนไขการทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้านั้น การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมภายใต้การควบคุมของ PMT และ PMT & PES แสดงได้ดังรูปที่ 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมภายใต้  
การควบคุมของ PMT และ PMT & PES

ในรูปที่ 19 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลการทำเสถียรภาพของ PMT & PES สูงกว่าของ PMT และใน  
ทำนองเดียวกันผลการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมภายใต้การควบคุมของ CMT  
& CES และ PMT & PES แสดงได้ดังรูปที่ 20 ผลการทำเสถียรภาพของ CMT & CES ต่ำกว่าของ  
PMT & PES ดังนั้น PMT & PES มีประสิทธิภาพในการควบคุมที่สูงกว่า CMT & CES



รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมภายใต้

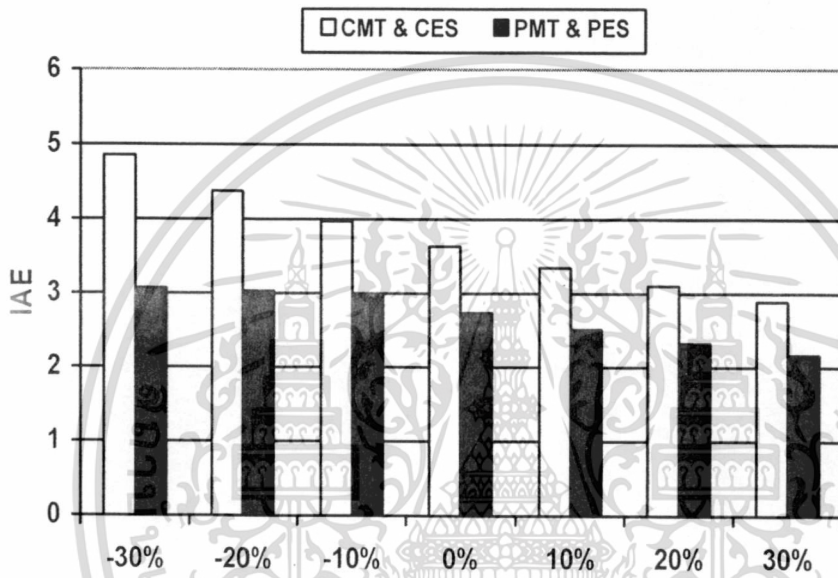
การควบคุมของ CMT & CES และ PMT & PES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

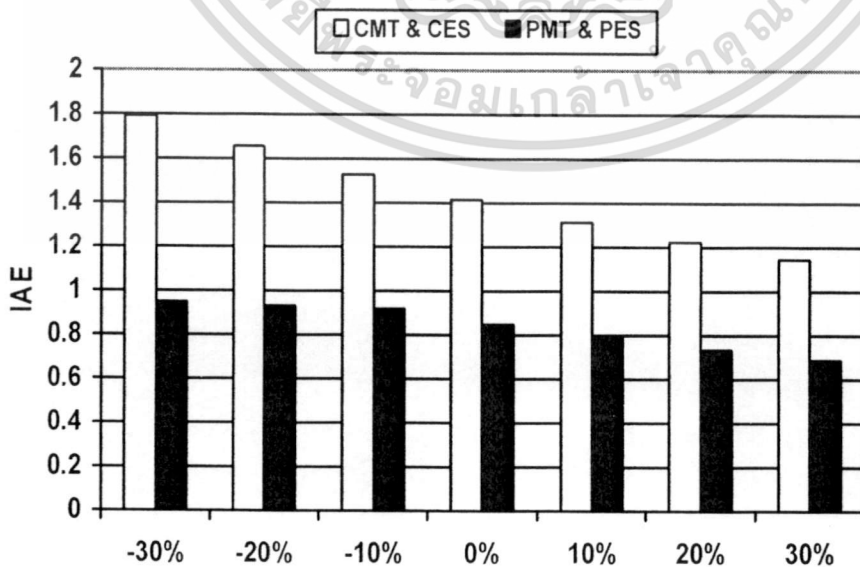
เพื่อที่จะตรวจสอบความคงทนของ PMT & PES ต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบภายใต้การทำงานแบบแยกอิสระ และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้านั้น ค่า IAE ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ ( $\Delta f$ ) และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อม ( $\Delta P_{tie}$ ) ภายใต้กำลังไฟฟ้าด้านออกของ WP, PV และ FC ในรูปที่ 21-23 และการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่มในรูปที่ 14 นิยามได้ดังสมการ

$$\text{IAE of } \Delta f = \int_0^{700} |\Delta f| dt \quad (35)$$

$$\text{IAE of } \Delta P_{tie} = \int_0^{700} |\Delta P_{tie}| dt \quad (36)$$



รูปที่ 21 ค่า IAE ของ  $\Delta f$  ภายใต้การทำงานแบบแยกอิสระ



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 22 ค่า IAE ของ  $\Delta P_{tie}$  ภายใต้การทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 21 แสดงค่า IAE ของ  $\Delta f$  ภายใต้การทำงานแบบแยกอิสระ ในขณะที่พารามิเตอร์ระบบ  $K_{ES}$ ,  $T_{ES}$ ,  $K_{MT}$ ,  $M$  และ  $D$  เปลี่ยนแปลงจาก -30% ถึง 30% จากค่าปกติ ส่วนรูปที่ 22 แสดงค่า IAE ของ  $\Delta P_{tie}$  ภายใต้การทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า ในขณะที่พารามิเตอร์ระบบ  $K_{ES}$ ,  $T_{ES}$ ,  $K_{MT}$ ,  $M$ ,  $D$  และ  $X_{tie}$  เปลี่ยนแปลงจาก -30% ถึง 30% จากค่าปกติ โดยพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงภายใต้การทำงานแบบแยกอิสระ และแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า แสดงได้ดังตารางที่ 8-9 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงภายใต้การทำงานแบบแยกอิสระ

System parameters	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%
$K_{ES}$	70	80	90	100	110	120	130
$T_{ES}$	42	48	54	60	66	72	78
$K_{MT}$	0.028	0.032	0.036	0.040	0.044	0.048	0.052
$M$	7	8	9	10	11	12	13
$D$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3

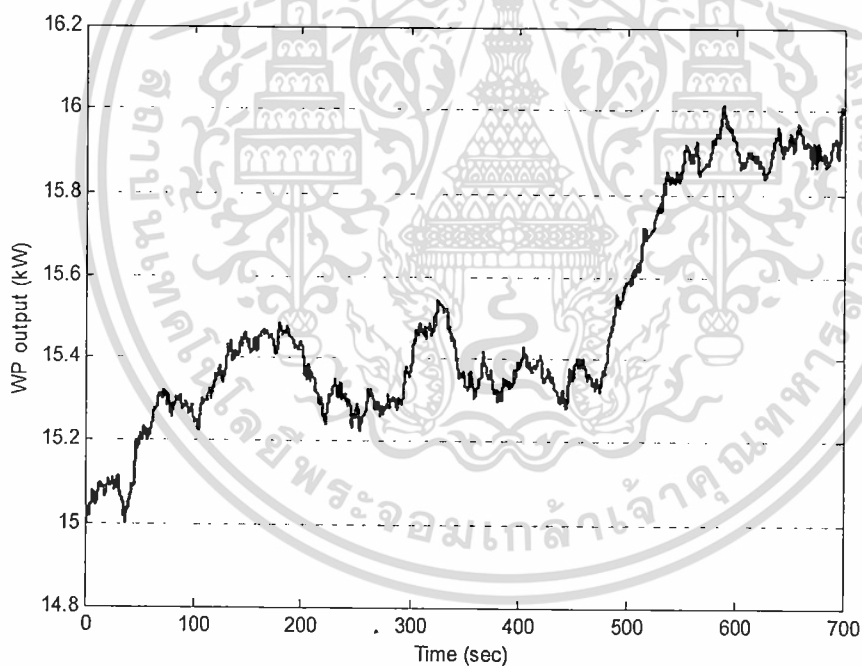
ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงภายใต้การทำงานแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้า

System parameters	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%
$K_{ES}$	70	80	90	100	110	120	130
$T_{ES}$	42	48	54	60	66	72	78
$K_{MT}$	0.028	0.032	0.036	0.040	0.044	0.048	0.052
$M$	7	8	9	10	11	12	13
$D$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
$X_{tie}$	0.0504	0.0576	0.0648	0.0720	0.0792	0.0864	0.0936

จากรูปที่ 21 ค่า IAE ของ CMT & CES เพิ่มขึ้นอย่างมาก ขณะที่พารามิเตอร์ระบบลดลง ในทางตรงกันข้ามการเปลี่ยนแปลงของค่า IAE ในกรณีของ PMT & PES มีค่าที่ต่ำกว่าของ CMT & CES และเช่นเดียวกัน ค่า IAE ของ CMT & CES ในรูปที่ 22 เพิ่มขึ้นสูงมาก เมื่อพารามิเตอร์ระบบลดลง ในทางตรงกันข้าม PMT & PES มีค่าการเปลี่ยนแปลงของ IAE ที่น้อยกว่าของ CMT & CES ดังนั้น PMT & PES มีความคงทนอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ

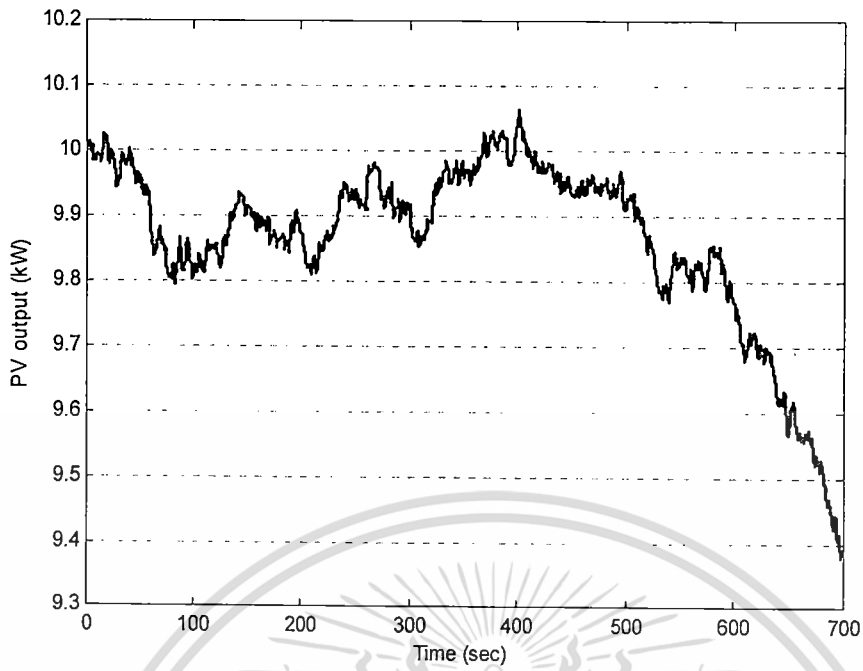
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะทำการทดสอบระบบภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบนั้น จึงได้สมมติว่าระบบ MG ได้ทำงานอยู่ในสภาวะแบบเชื่อมโยงกริดการไฟฟ้าภายใต้กำลังไฟฟ้าด้านออกของ WP, PV และ FC ในรูปที่ 23-25 และการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่มในรูปที่ 26 และที่เวลา  $t = 400$  วินาที ตัวควบคุม MT ในด้านการทำงานแบบแยกอิสระ ( $K_{PMTis}$ ) ได้ปลดออก ในขณะที่ตัวควบคุม  $K_{PESis}$ ,  $K_{PMTug}$  และ  $K_{PESug}$  ยังคงทำงานปกติที่เวลา  $t > 400$  วินาที และในระหว่างการจำลองระบบนั้น พารามิเตอร์  $K_{ES}$ ,  $T_{ES}$ ,  $K_{MT}$ ,  $M$  และ  $X_{tie}$  ลดลง 30% จากค่าปกติ ซึ่งหมายความว่าค่าอัตราขยาย (gain) ของ ES, ค่าคงตัวทางเวลา (time constant) ของ ES, ค่าคุณสมบัติ droop ของ MT, ค่าคงตัวความเฉื่อย (inertia constant) และค่ารีแอกแตนซ์สายส่งต่อเชื่อม (tie line reactance) ลดลง 30% จากค่าปกติ และเช่นเดียวกันค่า  $D$  ได้เปลี่ยนจากการหน่วงที่เป็นค่าบวก (positive damping) 1 เป็นการหน่วงที่เป็นค่าลบ (negative damping) -0.399 โดยที่ การหน่วงที่เป็นค่าลบนั้นสามารถที่จะเกิดขึ้นได้เมื่อระบบ MG ทำงานอยู่ในสภาวะที่ไม่เสถียร (unstable) ผลการจำลองของกำลังไฟฟ้าด้านออกภายใต้การควบคุมของ MT และ ES ใน [20-21], วิธีที่นำเสนอ และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมแสดงได้ดังรูปที่ 27-29 ตามลำดับ :

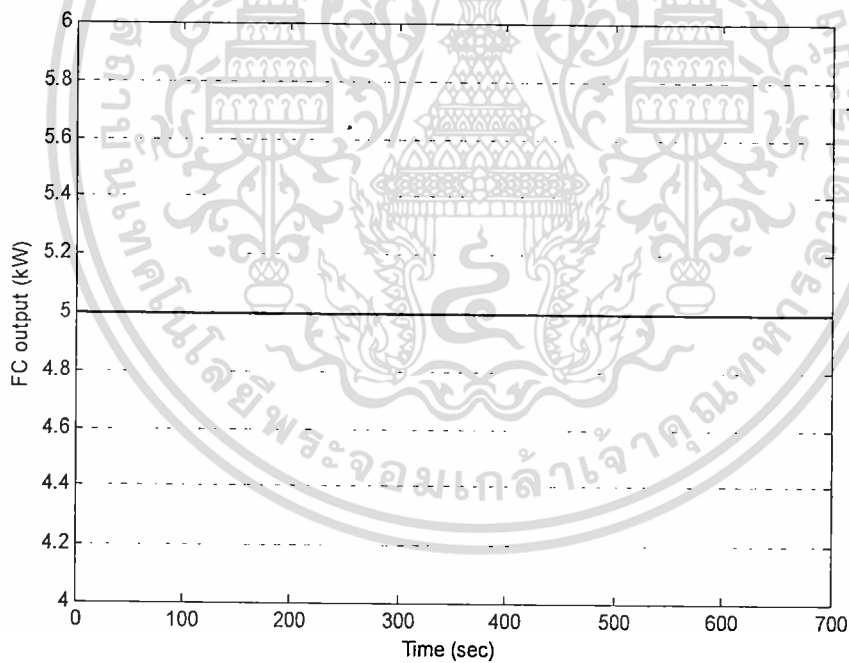


รูปที่ 23 กำลังไฟฟ้าด้านออกของ WP (กรณีเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

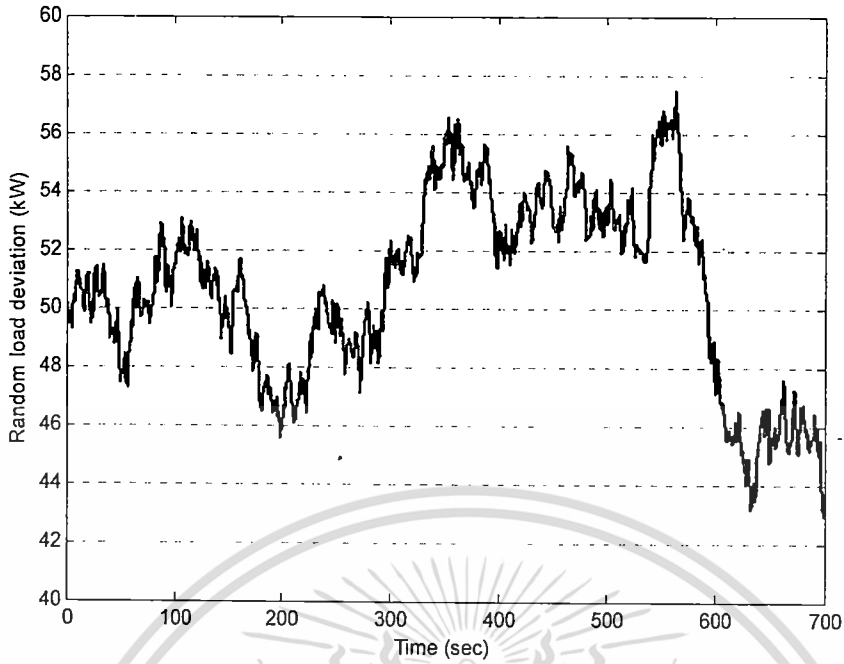


รูปที่ 24 กำลังไฟฟ้าด้านนอกของ PV (กรณีเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ)

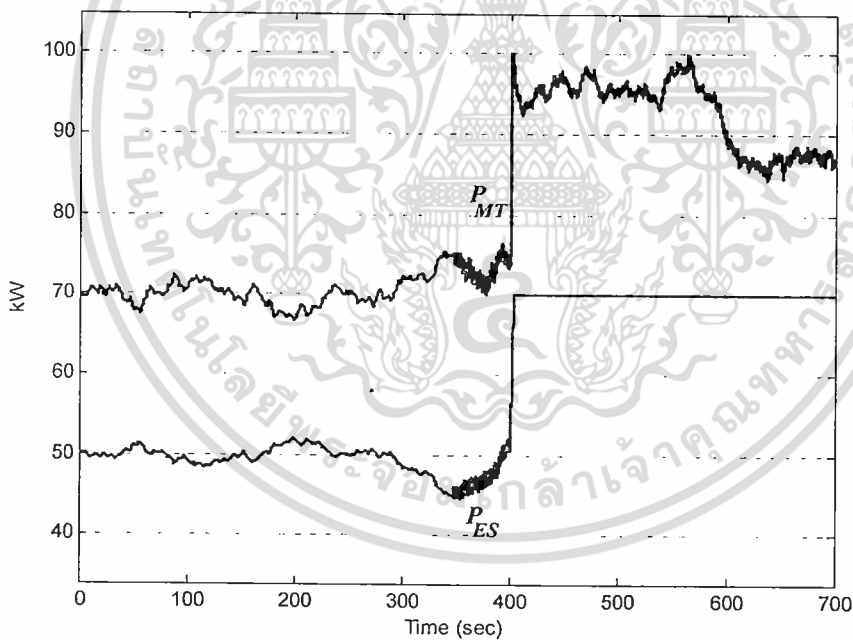


รูปที่ 25 กำลังไฟฟ้าด้านนอกของ FC (กรณีเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

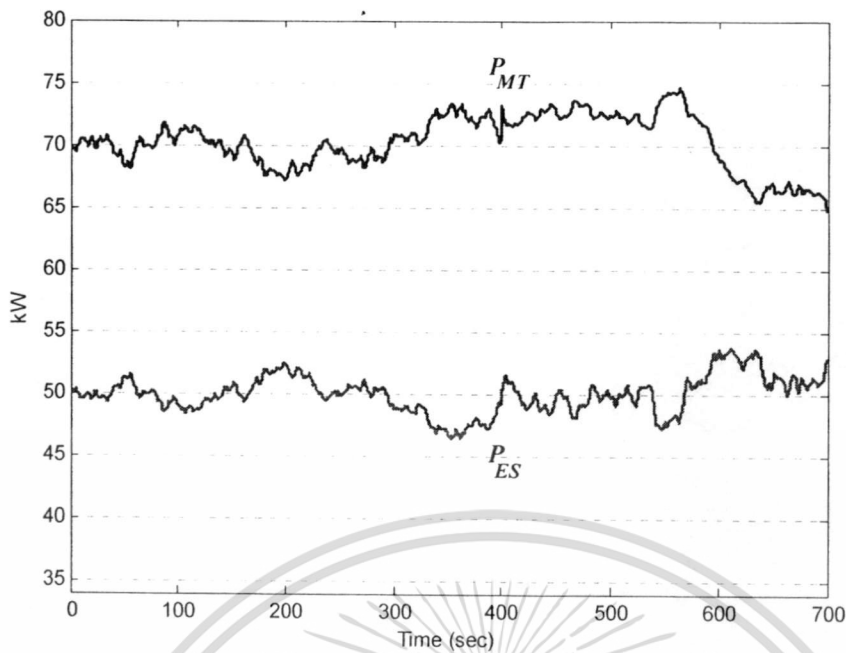


รูปที่ 26 การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่ม (กรณีเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ)

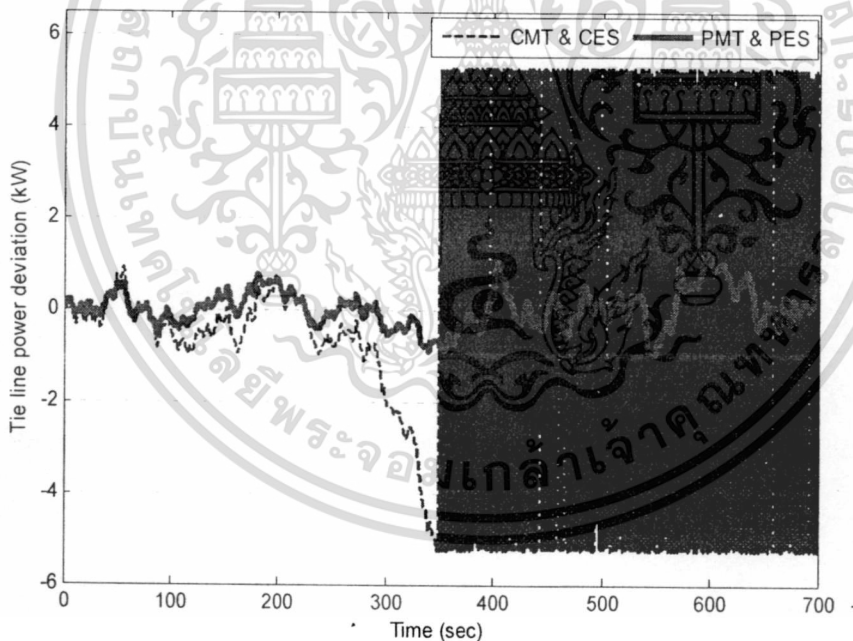


รูปที่ 27 กำลังไฟฟ้าด้านนอกภายใต้การควบคุมของ MT และ ES  
กรณีเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ (วิธีทั่วไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 28 กำลังไฟฟ้าด้านนอกภายใต้การควบคุมของ MT และ ES กรณีเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ (วิธีที่นำเสนอ)



รูปที่ 29 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมภายใต้การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ

รูปที่ 27-28 แสดงว่า PMT & PES สามารถที่จะควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านนอกได้ ในทางตรงกันข้าม CMT & CES ไม่สามารถที่จะจัดการความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าในระบบ MG ได้

ส่วนรูปที่ 29 CMT & CES ไม่สามารถที่จะทำเสถียรภาพของกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมได้ ดังนั้นระบบ MG ที่อยู่ภายใต้การควบคุมของ CMT & CES สูญเสียเสถียรภาพในการควบคุม ในทางตรงกันข้าม PMT & PES มีความคงทนอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ

ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานการณ์ความขัดข้องของตัวควบคุม ดังนั้น PMT & PES สามารถที่จะจัดการกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สายส่งต่อเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งยืนยันถึงความคงทน และผลของการควบคุมที่ดีกว่าของ PMT & PES เมื่อเปรียบเทียบกับ CMT & CES

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนสำหรับทำเสถียรภาพระบบ MG ด้วยวิธีควบคุมการจัดสัญญาณวงรอบ  $H_\infty$  แบบโครงสร้างเฉพาะเจาะจง วิธีตัวประกอบเฉพาะร่วมทำให้เป็นปรกติได้นำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองความไม่แน่นอนในระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต และโหลด, การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ เป็นต้น ส่วนเงื่อนไขของสมรรถนะ และเสถียรภาพคงทนในวิธีควบคุมการจัดสัญญาณวงรอบ  $H_\infty$  กำหนดขึ้นมาเป็นสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์วิธี PSO ได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าเหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมอย่างอัตโนมัติ นอกจากนี้ข้อดีของวิธีการออกแบบที่นำเสนอมีดังต่อไปนี้

- สามารถที่จะหาค่าฟังก์ชันน้ำหนักได้อย่างอัตโนมัติโดยปราศจากการลองผิดลองถูก
- สามารถที่จะลดขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมได้ โดยทำการออกแบบฟังก์ชันน้ำหนักและออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมในขั้นตอนเดียวกัน
- สามารถที่จะแก้ไขปัญหาค่าอันดับที่สูงของตัวควบคุมได้ ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ
- สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีโครงสร้างชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น ตัวชดเชยแบบนำหน้า/ล่าหลัง, พีไอ, พีไอดี เป็นต้น
- สามารถที่จะออกแบบตัวควบคุมที่มีสัญญาณป้อนกลับด้านเข้าด้วยสัญญาณเดียว (single input feedback) ได้

การประยุกต์ใช้ ES เพื่อปรับปรุงผลการทำเสถียรภาพความถี่แบบคงทนของ MT ได้นำเสนอในบทนี้ การออกแบบตัวควบคุมที่สัมพันธ์กันแบบคงทนของ MT และ ES สำหรับการทำให้เสถียรภาพความถี่ในระบบ MG นั้นอยู่บนพื้นฐานของวิธีควบคุมการจัดสัญญาณวงรอบ  $H_\infty$  แบบโครงสร้างเฉพาะเจาะจงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบคงทนของ MT และ ES คือ แบบพีไอ พารามิเตอร์ของตัวควบคุม MT และ ES ใน CMS หาค่าอย่างเหมาะสมแบบพร้อมกันด้วยวิธี PSO ผลการจำลองยืนยันว่า ES สามารถที่จะปรับปรุงผลการทำเสถียรภาพความถี่ในระบบ MG ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ตัวควบคุมแบบคงทนของ MT และ ES ซึ่งออกแบบมาอย่างสัมพันธ์กันมีความคงทนอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ และเงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.A. Pai, D.P. Sen Gupta and K.R. Padiyar, **Small Signal Analysis of Power Systems**, Harrow, UK : Alpha Science International Ltd, 2004.
- [2] T. Ackermann, **Wind Power in Power Systems**, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [3] S'Y. Obara, "**Analysis of a Fuel Cell Micro-Grid with a Small-Scale Wind Turbine Generator**," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp.323-336, 2007.
- [4] S'Y. Obara, "**Equipment Plan of Compound Interconnection Micro-Grid Composed from Diesel Power Plants and Solid Polymer Membrane-Type Fuel Cell**," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp.179-188, 2008.
- [5] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Lse, S. Morozumi, S. Papathanassiou and N. Hatziargyriou, "**Making Microgrids Work**," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 6, pp.40-53, 2008.
- [6] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou and A. Dimeas, "**Microgrids Management**," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 6, pp.54-65, 2008.
- [7] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, **Microgrids and Active Distribution Networks**, London, UK : The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [8] R.H. Lasseter, "**CERTS Microgrid**," IEEE International Conference on System of Systems Engineering, pp.1-5, 2007.
- [9] S. Morozumi, "**Micro-Grid Demonstration Projects in Japan**," IEEE Power Conversion Conference, pp.635-642, 2007.
- [10] H. Camblong, J. Sarr, A.T. Niang, O. Curea, J.A. Alzola, E.H. Sylla and M. Santos, "**Micro-Grids Project, Part 1: Analysis of Rural Electrification with High Content of Renewable Energy Sources in Senegal**," Renewable Energy, Vol. 34, pp.2141-2150, 2009.
- [11] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "**Microgrids**," IEEE Power and Energy Magazine, Vol.5, pp.78-94, 2007.
- [12] M. Barnes, G. Ventakaramanan, J. Kondoh, R. Lasseter, H. Asano, N. Hatziargyriou, J. Oyarzabal and T. Green, "**Real-World Microgrids- an Overview**," IEEE International Conference on System of Systems Engineering, pp.1-8, 2007.
- [13] E.M. Do Sacramento, L.C. De Lima, C.J. Oliveira and T. Nejat Veziroglu, "**A Hydrogen Energy System and Prospects for Reducing Emissions of Fossil Fuels Pollutants in the Ceara´ State—Brazil**," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp.2132-2137, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] S.Y. Obara, **“Load Response Characteristics of a Fuel Cell Micro-Grid with Control of Number of Units,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 31, pp.1819-1830, 2006.
- [15] P. Kundur, **Power System Stability and Control**, McGrawHill, Inc, 1993.
- [16] H. Saadat, **Power System Analysis**, 2<sup>nd</sup> Edition, McGrawHill, Inc, 2004.
- [17] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato and T. Funabashi, **“A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island,”** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, June, pp. 406-414, 2005.
- [18] T. Senjyu, D. Hayashi, N. Urasaki and T. Funabashi, **“Oscillation Frequency Control Based on controller for a Small Power System Using Renewable Energy Facilities in Isolated Island,”** IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp.1-7, 2006.
- [19] D-J. Lee and L. Wang, **“Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations,”** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 1, March, pp. 311-320, 2008.
- [20] X. Li, Y.J. Song and S.B. Han, **“Study on Power Quality Control in Multiple Renewable Energy Hybrid Microgrid System,”** IEEE Power Tech, pp.2000-2005, 2007.
- [21] X. Li, Y.J. Song and S.B. Han, **“Frequency Control in Micro-Grid Power System Combined with Electrolyzer System and Fuzzy PI Controller,”** Journal of Power Sources, Vol. 180, pp.468-475, 2008.
- [22] K. Zhou and J.C. Doyle, **Essential of Robust Control**, Prentice-Hall, 1998.
- [23] F-C. Wang and H-T. Chen, **“Design and Implementation of Fixed-Order Robust Controllers for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell System,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp.2705-2717, 2009.
- [24] Q. Zhao and J. Jiang, **“Robust SVC Controller Design for Improving Power System Damping,”** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, November, pp.1927-1932, 1995.
- [25] M. Parniani and M.R. Iravani, **“Optimal Robust Control Design of Static Var Compensator,”** IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 3, May, pp.301-307, 1998.
- [26] Available at: [<http://www.protonenergy.com/>](http://www.protonenergy.com/).
- [27] Available at: [<http://www.distributed-energy.com/>](http://www.distributed-energy.com/).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] S. Skogestad and I. Postlethwaite, **Multivariable Feedback Control: Analysis and Design**, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley, 2005.
- [29] D.C. McFarlane and K. Glover, **Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions**, Lecture Notes in Control and Information, Springer-Verlag, Berlin, Vo1. 138, 1990.
- [30] D-W. Gu, P.H. Petkov and M.M. Konstantinov, **Robust Control Design with MATLAB**, Springer, 2005.
- [31] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," IEEE Neural Networks, pp.1942-1948, 1995.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

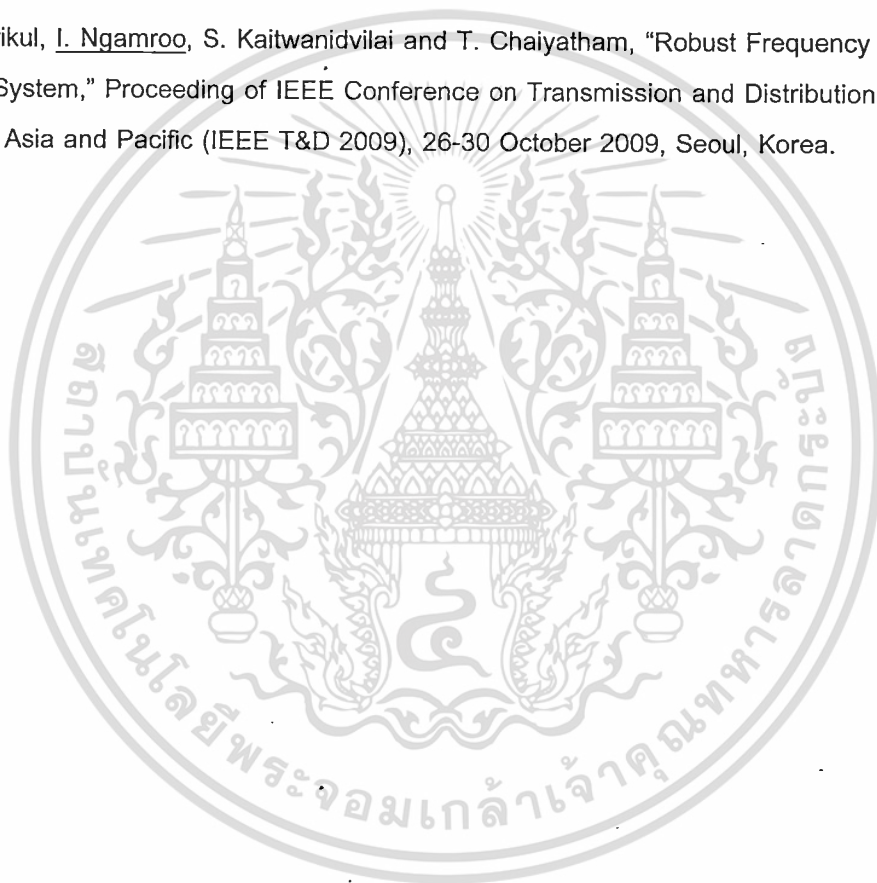
ผลการศึกษาวิจัยจากโครงการนี้ได้รับการตีพิมพ์ดังนี้

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, "Application of Electrolyzer System to Enhance Frequency Stabilization Effect of Microturbine in a Microgrid System," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp.7131-7142, 2009.

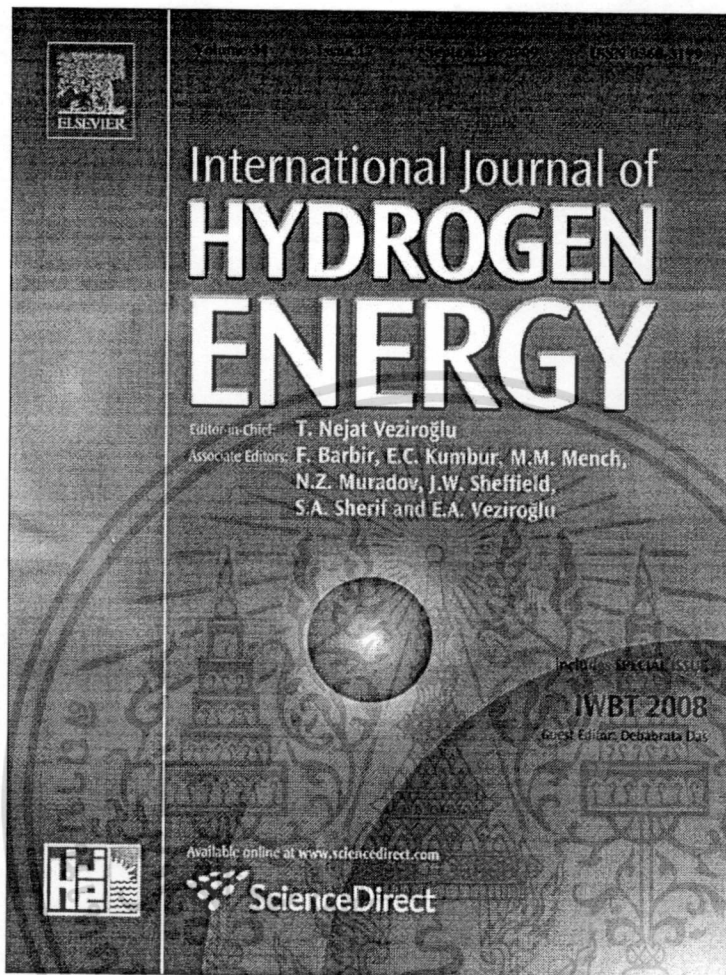
การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and T. Chaiyatham, "Robust Frequency Stabilization in a Microgrid System," Proceeding of IEEE Conference on Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific (IEEE T&D 2009), 26-30 October 2009, Seoul, Korea.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Provided for non-commercial research and education use.  
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

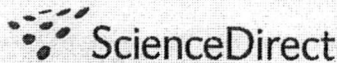
In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>

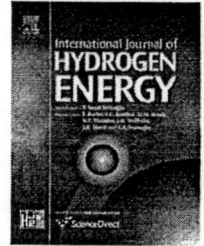
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Available at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



journal homepage: [www.elsevier.com/locate/he](http://www.elsevier.com/locate/he)



Review

# Application of electrolyzer system to enhance frequency stabilization effect of microturbine in a microgrid system

Sitthidet Vachirasricirikul<sup>a,\*</sup>, Issarachai Ngamroo<sup>b</sup>, Somyot Kaitwanidvilai<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
<sup>b</sup>Center of Excellence for Innovative Energy Systems, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:  
 Received 29 March 2009  
 Received in revised form 10 June 2009  
 Accepted 13 June 2009  
 Available online 23 July 2009

Keywords:  
 Electrolyzer system  
 Microturbine  
 Frequency stabilization  
 Microgrid  
 $H_{\infty}$  loop shaping control  
 Particle swarm optimization

ABSTRACT

It is well known that the power output of microturbine can be controlled to compensate for load change and alleviate the system frequency fluctuations. Nevertheless, the microturbine may not adequately compensate rapid load change due to its slow dynamic response. Moreover, when the intermittent power generations from wind power and photovoltaic are integrated into the system, they may cause severe frequency fluctuation. In order to study the fast dynamic response, this paper applies electrolyzer system to absorb these power fluctuations and enhance the frequency control effect of microturbine in the microgrid system. The robust coordinated controller of electrolyzer and microturbine for frequency stabilization is designed based on a fixed-structure  $H_{\infty}$  loop shaping control. Simulation results exhibit the robustness and stabilizing effects of the proposed coordinated electrolyzer and microturbine controllers against system parameters variation and various operating conditions.

Crown Copyright © 2009 Published by Elsevier Ltd on behalf of International Association for Hydrogen Energy. All rights reserved.

## 1. Introduction

According to the World Bank, more than 2 billion people around the world currently live in remote areas that are not yet connected to utility lines due to the limitations of investment costs, right of way difficulties and environment impacts [1]. To tackle this problem, the MG system [2,3] has been widely paid attentions. The MG is a cluster of the DG units, DS units and loads [4]. The MG system can be independently performed in an islanding mode and interconnected to the main utility grid [5]. Nowadays, there are many MG projects around the world such as the Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) project in the United

States [6], the Aichi, Kyotango and Hachinohe MG projects in Japan [7], the MG project in Senegal [8], The Kythnos Island MG in Greece [9], the Labein MG in Spain [10], etc. The studied MG system consists of 100 kW WP, 25 kW PV, 100 kW MT, 5 kW FC, 70 kW ES of HOGEN<sup>®</sup> [11,12], CMS, load and TR connected to the UG. The capacity of MG system which is the possible maximum power generations from all sources in the MG, is equal to 230 kW. Note that ES is treated as the load with maximum absorbed power 70 kW. Here, the initial power generation in the MG is set to 100 kW which consists of 15 kW WP, 10 kW PV, 70 kW MT and 5 kW FC. This power generation balances with total loads 100 kW (50 kW ES and 50 kW load). As the primary power source, WP and PV are designed for

\* Corresponding author. Tel./fax: +66 2326 4550.  
 E-mail address: [sitthidetv@hotmail.com](mailto:sitthidetv@hotmail.com) (S. Vachirasricirikul).  
 0360-3199/\$ – see front matter Crown Copyright © 2009 Published by Elsevier Ltd on behalf of International Association for Hydrogen Energy. All rights reserved.  
 doi:10.1016/j.ijhydene.2009.06.050

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Nomenclature**

MG	microgrid
DG	distributed generation
DS	distributed storage
UG	utility grid
CMS	control and monitoring system
WP	wind power
PV	photovoltaic
MT	microturbine
FC	fuel cell
ES	electrolyzer system
H <sub>2</sub> T	hydrogen tank
TR	transformer
P <sub>WP</sub>	wind power output
P <sub>PV</sub>	PV power output
P <sub>MT</sub>	MT power output
P <sub>FC</sub>	FC power output
P <sub>ES</sub>	load power of ES
P <sub>tie</sub>	tie line power
X <sub>tie</sub>	tie line reactance

$f_0$	system frequency
$\Delta P$	real power unbalance
$\Delta f$	change of frequency
$\Delta P_{MT}$	change of MT power output
$\Delta P_{FC}$	change of FC power output
$\Delta P_{ES}$	change of ES load
$\Delta P_{tie}$	change of tie line power
$K_{PMTis}$	proposed MT controller in islanding operation
$K_{PESis}$	proposed ES controller in islanding operation
$K_{PMTug}$	proposed MT controller in interconnected UG operation
$K_{PESug}$	proposed ES controller in interconnected UG operation
$K_{MT}$	droop property of MT output
$K_{FC}$	gain of FC
$K_{ES}$	gain of ES
$T_{FC}$	time constant of FC
$T_{ES}$	time constant of ES
$M$	inertia constant
$D$	damping coefficient
Base	base capacity

providing the power to load based on the different power demanding levels. In addition, the ES is designed to stabilize the system frequency and tie line power fluctuations. The power supply and demand balance control of the MG system is carried out by CMS. However, due to the lack of power supply from renewable sources, an MT is applied to supply the base load. Normally, the solar and wind energy are intermittent [13]. Consequently, the power production from WP and PV is variable. The real power unbalance in generation and load [14] causes severe frequency fluctuation in the MG system and tie line power fluctuation when the MG system is connected to the UG. To alleviate the frequency fluctuation, the MT is used to supply power for load change. Nevertheless, the MT cannot adequately compensate sudden load change

and improve the severe frequency fluctuation instantaneously. This is because the MT has slow dynamic response due to the mechanical dynamic characteristics of governor and turbine [15-18]. Generally, the time constants of governor and turbine are in range of 0.2-0.5 s and 2.0-5.0 s, respectively [17,18]. To enhance the MT control effect, the ES control objective of HOGEN<sup>®</sup> is not only to build hydrogen for FC, but also to absorb rapid fluctuating power. The ES power consumption of HOGEN<sup>®</sup> can be controlled in the level of millisecond by tuning the pressure in the customer piping system. The electricity of ES is supplied by WP and PV. To solve the fluctuation problems of frequency and tie line power in the MG, the power outputs of MT and ES can be controlled by the CMS [15,16]. However, the controller parameters of MT

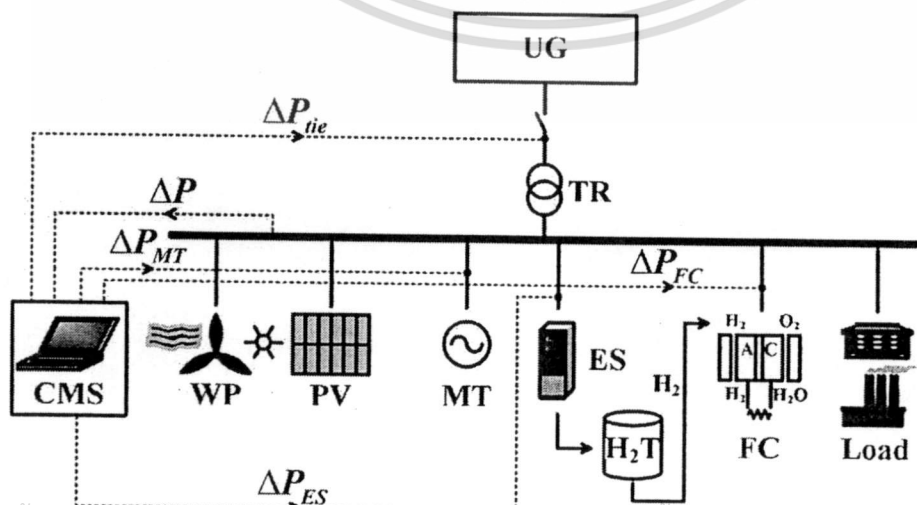


Fig. 1 - A microgrid system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

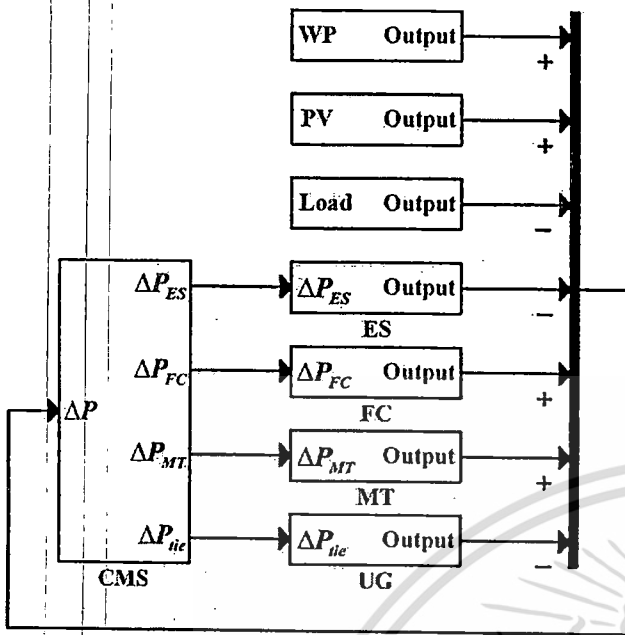


Fig. 2 - Microgrid system diagram.

the system parameters variation, various generations and loadings, etc., in the control design. The robustness of the MT and ES controllers against the system uncertainties cannot be guaranteed.

To improve the robustness and coordinated control effect, an  $H_\infty$  control is one of the sophisticated design techniques [19,20]. Nevertheless, generally the designed  $H_\infty$  controller has a high order and is not easy to implement in real systems. Thus, the practical controller structures such as lead-lag compensator, proportional integral (PI), etc., are preferred because of their simple structure and low-order. However, the tuning of control parameters is very difficult to achieve the high robust controller against system uncertainties.

This paper proposes a new robust design of coordinated MT and ES controllers in CMS for stabilizing MG by using the particle swarm optimization (PSO) [21,22] based fixed-structure  $H_\infty$  loop shaping control. With fast dynamic control response, the ES is applied to enhance the frequency stabilizing effect of MT. The structure of MT and ES controllers is a PI. Based on the improvement of robust stability margin, the PI controller parameters of MT and ES in both the islanding and interconnected UG operations are simultaneously optimized. In the  $H_\infty$  loop shaping control, the performance and robust stability conditions are formulated as the objective function in the optimization problem. The normalized coprime factor [23,24] is used to form system uncertainties. Simulation results display the superior robustness and stabilizing effects of the proposed coordinated MT and ES controllers in comparison with the MT and ES controllers [15].

and ES in Refs. [15,16] are separately designed for the islanding and interconnected UG modes. Hence, it cannot guarantee the well-coordinated control effects of MT and ES. Besides, these research works do not consider system uncertainties such as

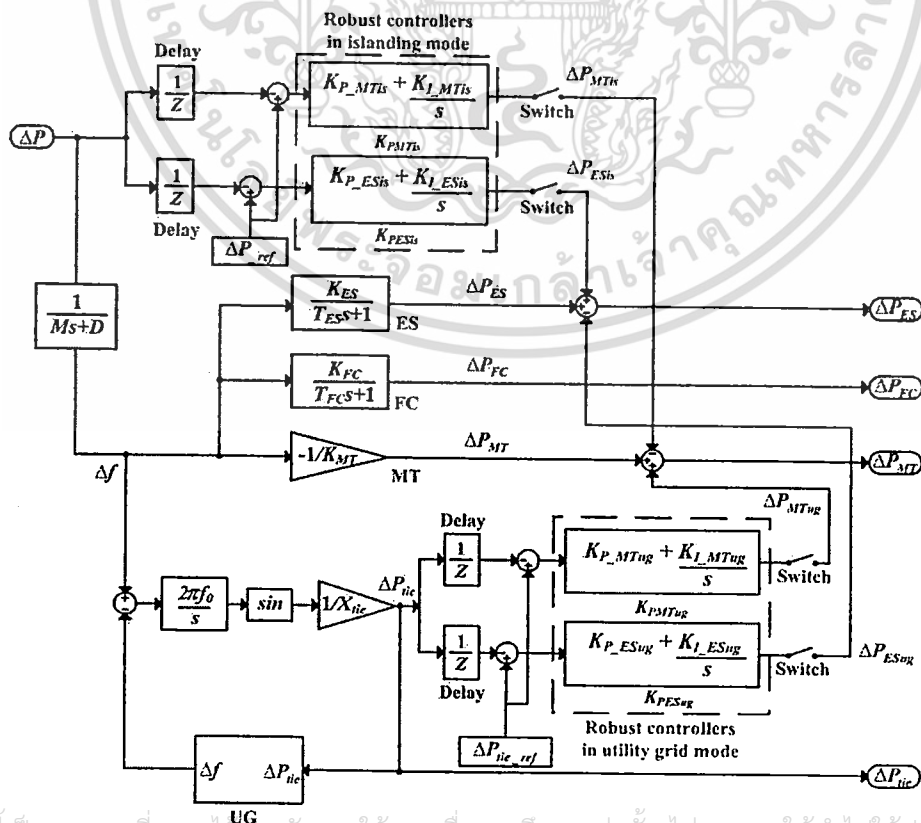


Fig. 3 - Linearized block diagram of CMS.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

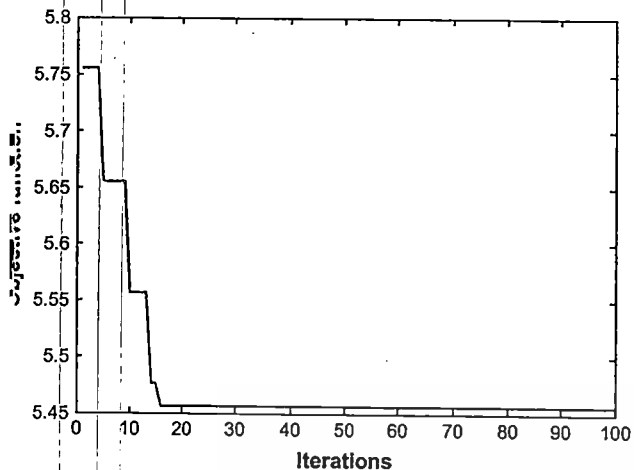


Fig. 4 - Objective function versus iteration.

## 2. Problem formulation

As depicted in Fig. 1, the MG system consists of the WP, PV, MT, ES, H<sub>2</sub>T, FC, CMS, load, TR and UG. The MT is used to supply power to the MG system when the WP and PV cannot sufficiently provide. The ES is utilized to produce hydrogen (H<sub>2</sub>) as a fuel for FC by consuming some power outputs from WP and PV. The generated H<sub>2</sub> is stored in the H<sub>2</sub>T. Naturally, the power generations from WP and PV are very unstable and intermittent. Thus, the real power unbalance causes the frequency fluctuation. Moreover, the frequency fluctuation under the interconnected UG causes the tie line power fluctuation. To solve this problem, the proposed coordinated MT and ES controllers in CMS are applied to stabilize the MG system. Here, the performance of ES is augmented to enhance the frequency stabilization effect of MT. It is supposed that the amount of hydrogen generated by ES in the hydrogen tank has more than 50% of the hydrogen tank capacity [25,26] for operating the FC throughout the test time period. Accordingly, the calculation details of hydrogen production or consumption are not provided in this work.

This paper is organized as follows. First, problem formulation is described in Section 2. Next, Section 3 shows system modeling. Subsequently, Section 4 shows simulation results. Finally, Conclusion is given.

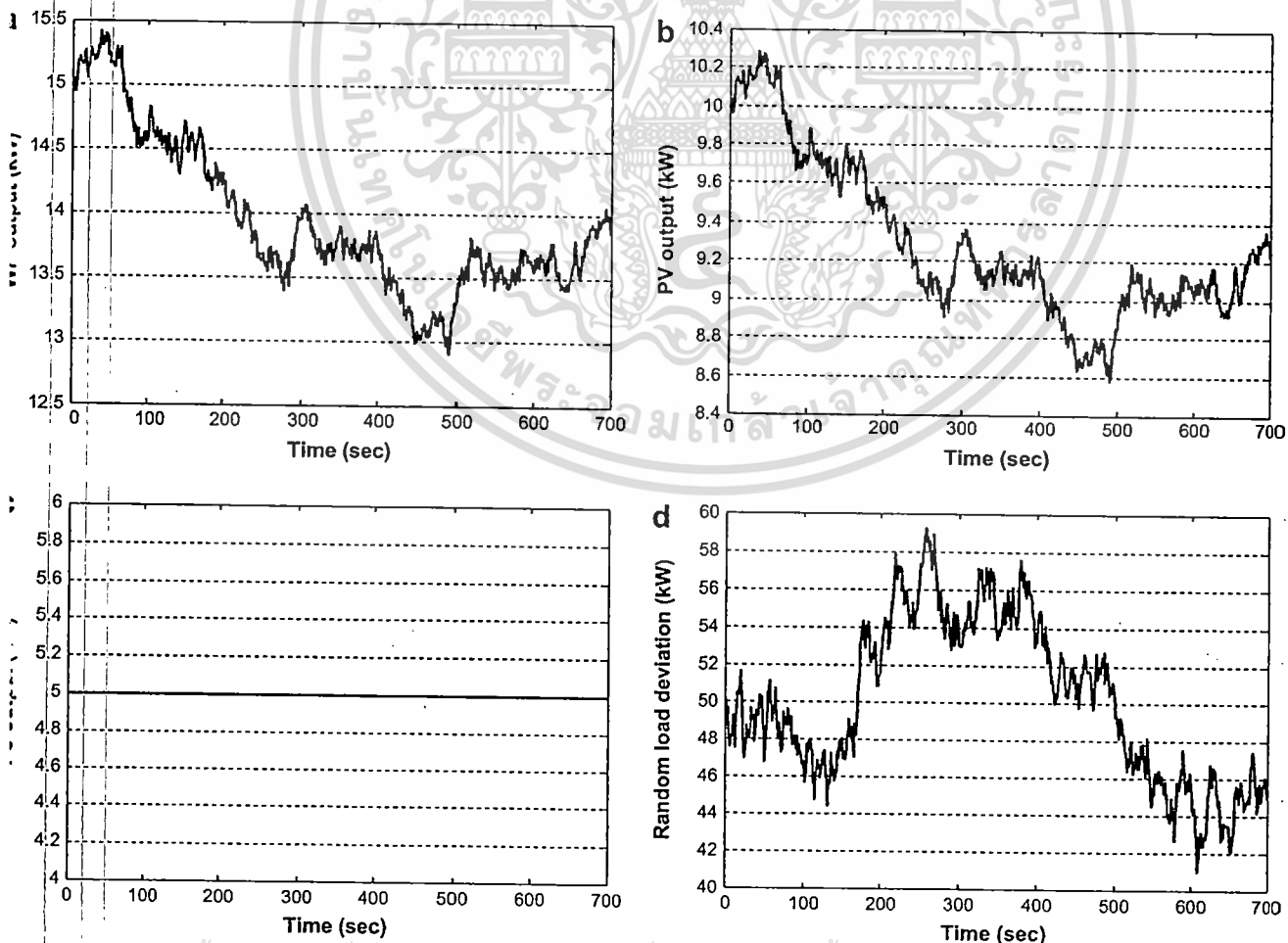


Fig. 5 - (a) WP output. (b) PV output. (c) FC output. (d) Random load deviation (normal case).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

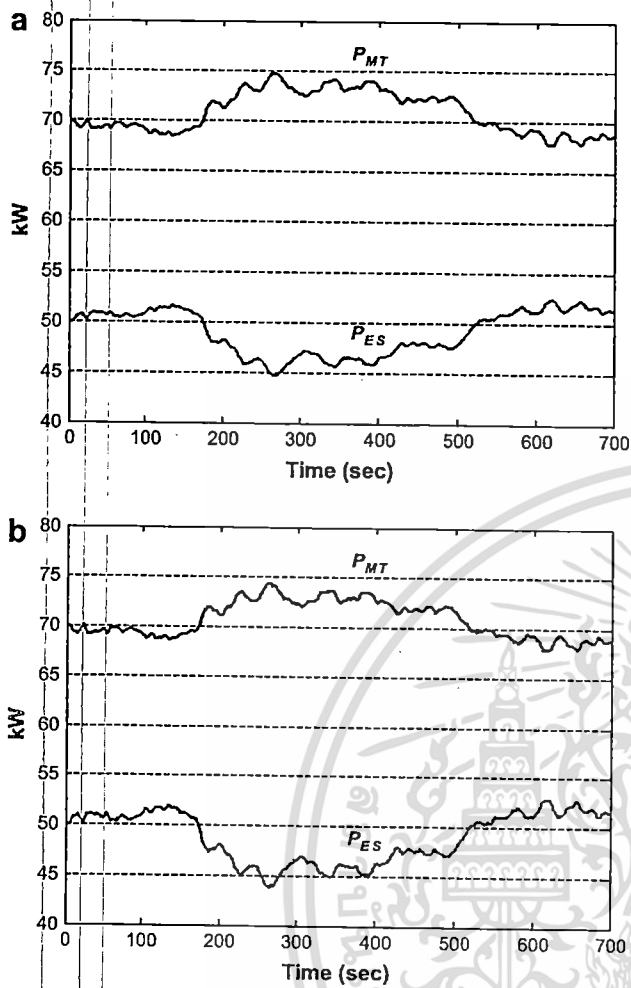


Fig. 6 – (a) Power outputs with the MT and ES controls under normal case (conventional method). (b) Power outputs with the MT and ES controls under normal case (proposed method).

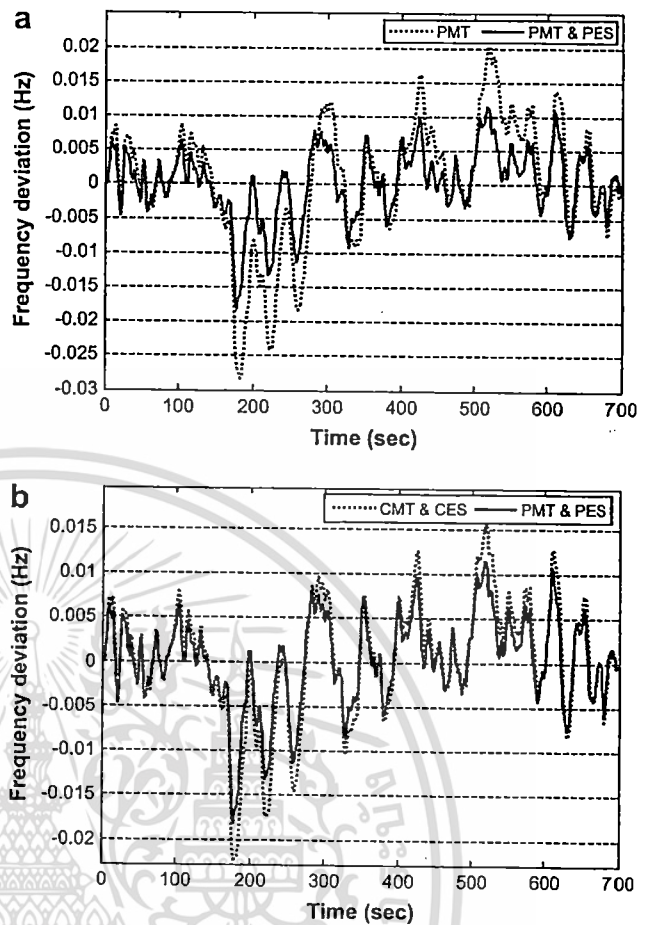


Fig. 7 – (a) Frequency deviation under islanding operation with the controls of PMT and PMT & PES. (b) Frequency deviation under islanding operation with the controls of GMT & CES and PMT & PES.

### 3. System modeling

The MG system diagram is depicted in Fig. 2. The proposed coordinated MT and ES controllers in CMS are utilized to minimize the feedback input signal of the real power unbalance ( $\Delta P$ ) in the MG system. The linearized block diagram of CMS is shown in Fig. 3. The delay times of the islanding and interconnected UG operations in Fig. 3 are for every 5 and 4 s, respectively. Note that the structures of ES and FC are high-order models and have the nonlinear characteristics. Nevertheless, the frequency control problem in electric power systems due to small disturbances can be generally studied in a linearized system [17,18]. Hence, the transfer functions of ES and FC are approximately represented by the first-order transfer function [25,27]. Besides, the descriptions of WP and PV models are explained in Appendix B.

Here, it is considered that the FC power output ( $P_{FC}$ ) is set to a constant value of 5 kW throughout the test time period. Accordingly, the FC power is not used for real-time control of the power unbalance in the MG system. System parameters

are given in Refs. [15,16]. The linearized state equation can be expressed as

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta u \quad (1)$$

$$\Delta Y = C\Delta X + D\Delta u \quad (2)$$

$$\Delta P_{MTis} = K_{PMTis}(s)\Delta P \quad (3)$$

$$\Delta P_{ESis} = K_{PESis}(s)\Delta P \quad (4)$$

$$\Delta P_{MTug} = K_{PMTug}(s)\Delta P_{tie} \quad (5)$$

$$\Delta P_{ESug} = K_{PESug}(s)\Delta P_{tie} \quad (6)$$

$$K_{PMTis}(s) = K_{P_{MTis}} + K_{I_{MTis}}/s \quad (7)$$

$$K_{PESis}(s) = K_{P_{ESis}} + K_{I_{ESis}}/s \quad (8)$$

$$K_{PMTug}(s) = K_{P_{PMTug}} + K_{I_{PMTug}}/s \quad (9)$$

$$K_{PESug}(s) = K_{P_{PESug}} + K_{I_{PESug}}/s \quad (10)$$

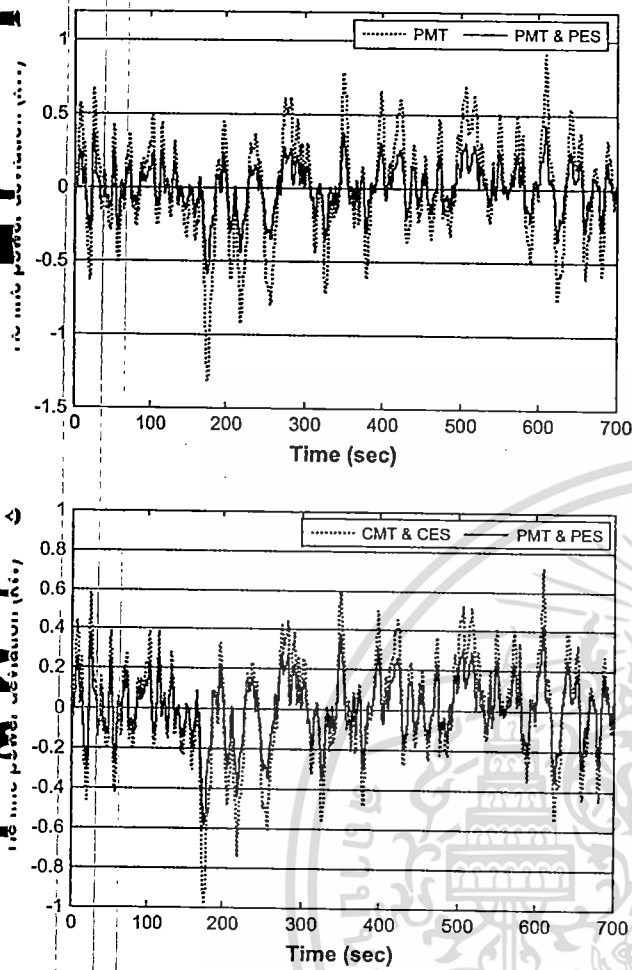


Fig. 8 - (a) Tie line power deviation under interconnected UG operation with the controls of PMT and PMT & PES. (b) Tie line power deviation under interconnected UG operation with the controls of CMT & CES and PMT & PES.

here the state vector  $\Delta X = [\Delta P_{ES} \ \Delta P_{tie} \ \Delta f]^T$ .  $\Delta P_{ES}$ ,  $\Delta P_{tie}$  and  $\Delta f$  are small changes of ES load, tie line power and frequency, respectively. The output vector  $\Delta Y = [\Delta P \ \Delta P_{tie}]^T$ , the control output signal  $\Delta u = [\Delta P_{MTis} \ \Delta P_{ESis} \ \Delta P_{MTug} \ \Delta P_{ESug}]^T$ .  $\Delta P_{MTis}$  and  $\Delta P_{ESis}$  are small changes in the islanding operation of MT output and ES load, respectively.  $\Delta P_{MTug}$  and  $\Delta P_{ESug}$  are small changes in the interconnected UG operation of MT output and ES load, respectively.  $K_{P_{MTis}}(s)$ ,  $K_{P_{ESis}}(s)$  and  $K_{P_{MTug}}(s)$ ,  $K_{P_{ESug}}(s)$  are the proposed MT and ES controllers in the islanding and interconnected UG operations, respectively. Note that all four controllers are performed in the interconnected UG mode while  $K_{P_{MTis}}(s)$  and  $K_{P_{ESis}}(s)$  are operated in the islanding mode. The system (1) is a multi-input multi-output (MIMO) system and referred to the nominal plant G.

The proposed robust controllers are implemented in the MATLAB which consists of the robust controllers in islanding mode ( $K_{P_{MTis}}$  and  $K_{P_{ESis}}$ ) and the robust controllers in utility mode ( $K_{P_{MTug}}$  and  $K_{P_{ESug}}$ ) as shown in Fig. 3. In this paper, the MATLAB program is applied to develop the off-line parameters tuning of the proposed robust controllers based on the fixed-structure  $H_\infty$  loop shaping control. It should be noted that the MATLAB program can be developed to on line

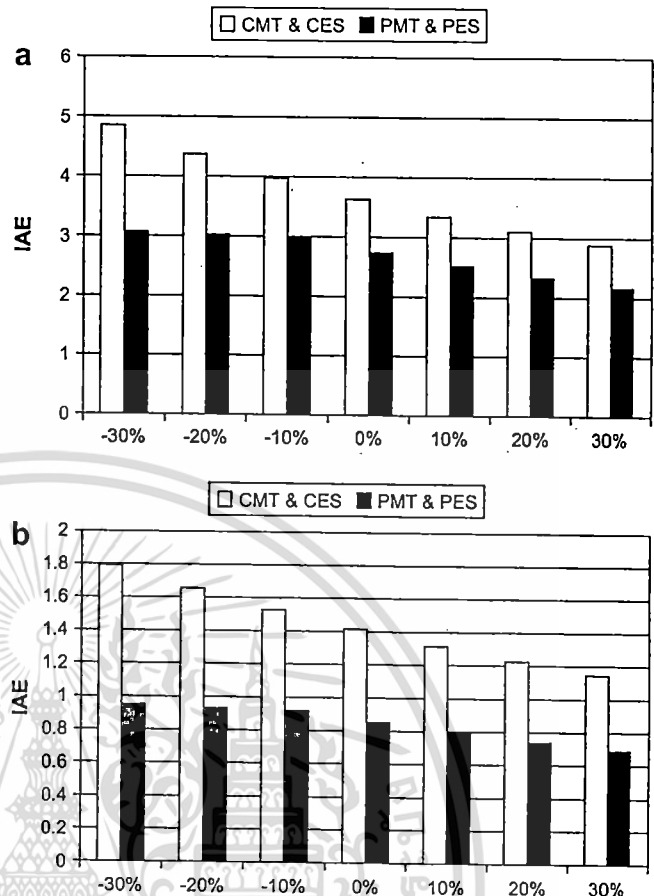


Fig. 9 - (a) IAE of  $\Delta f$  under islanding operation. (b) IAE of  $\Delta P_{tie}$  under interconnected UG operation.

parameters tuning of the controllers. Based on the system generating and loading conditions, the control parameters can be adjusted and implemented in real time [28].

The design description of the relevant control theory such as  $H_\infty$  loop shaping control, PSO is given in Appendix A.

### 4. Simulation results

In this section, robust control design and simulation studied are carried out. The lower and upper bounds of search parameters and PSO parameters are set as follows:  $K_{W1}, K_{W2}, K_{W3}, K_{W4} \in [0.0001 \ 1000]$ ,  $a_1, a_2, a_3, a_4 \in [0.0001 \ 100]$ ,  $b_1, b_2, b_3, b_4 \in [0.0001 \ 100]$ ,  $\gamma_{min} \in [1 \ 4]$ ,  $K_{P_{MTis}} \in [0.0001 \ 1]$ ,  $K_{I_{MTis}} \in [0.0001 \ 1]$ ,  $K_{P_{ESis}} \in [0.0001 \ 1]$ ,  $K_{I_{ESis}} \in [0.0001 \ 1]$ ,  $K_{P_{MTug}} \in$

Table 1 - Changed system parameters under islanding operation.							
System parameters	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%
$K_{ES}$	70	80	90	100	110	120	130
$T_{ES}$	42	48	54	60	66	72	78
$K_{MT}$	0.028	0.032	0.036	0.040	0.044	0.048	0.052
$M$	7	8	9	10	11	12	13
$D$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3

**Table 2 – Changed system parameters under interconnected UG operation.**

System parameters	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%
$K_{ES}$	70	80	90	100	110	120	130
$T_{ES}$	42	48	54	60	66	72	78
$K_{MT}$	0.028	0.032	0.036	0.040	0.044	0.048	0.052
$M$	7	8	9	10	11	12	13
$D$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
$X_{UG}$	0.0504	0.0576	0.0648	0.0720	0.0792	0.0864	0.0936

0.0001 0.5],  $K_{L\_MTug} \in [0.0001 \ 0.5]$ ,  $K_{P\_ESug} \in [0.0001 \ 0.5]$ ,  $\gamma_{ESug} \in [0.0001 \ 0.5]$ , PSO sizes = 50, maximum iterations = 100,  $c_1 = 2$ ,  $c_2 = 2$ ,  $w_{min} = 0.4$  and  $w_{max} = 0.9$ . Thus, the weighting functions are suitably selected as

$$W_{MTis} = 910.9754 \frac{s + 48.9961}{s + 96.9381}, \quad W_{ESis} = 806.7562 \frac{s + 46.9839}{s + 93.9256} \tag{11}$$

$$W_{MTug} = 889.9907 \frac{s + 41.9219}{s + 90.9769}, \quad W_{ESug} = 886.9561 \frac{s + 44.9197}{s + 95.9942} \tag{12}$$

based on these weighting functions, the shaped plant  $G_s$  can be established. This results in  $\gamma_{min} = 2.5849$ . The convergence curve of the objective function is illustrated in Fig. 4.

Consequently, the proposed MT and ES controllers (PMT & PES) in the islanding and interconnected UG operations of CMS are obtained as

$$K_{PMTis}(s) = 0.4300 + 0.6607/s \tag{13}$$

$$K_{PESis}(s) = 0.4397 + 0.8951/s \tag{14}$$

$$K_{PMTug}(s) = 0.1493 + 0.3994/s \tag{15}$$

$$K_{PESug}(s) = 0.1500 + 0.3999/s \tag{16}$$

In simulation study, the robustness and stabilizing effects of PMT & PES are compared with those of CMT & CES in CMS [15]. It is assumed that the WP, PV and FC outputs and the random

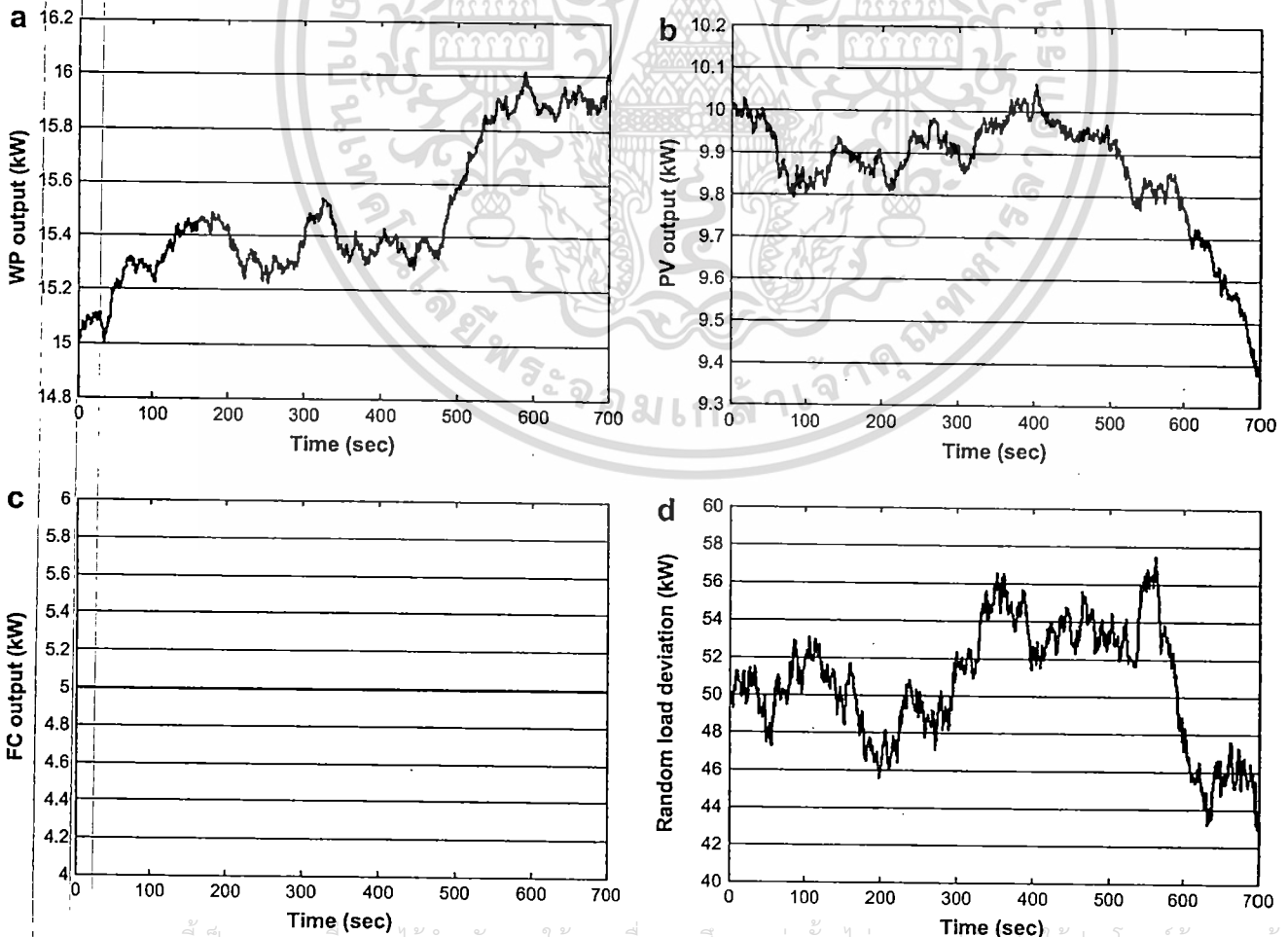


Fig. 10 – (a) WP output. (b) PV output. (c) FC output. (d) Random load deviation (changed system parameters case).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

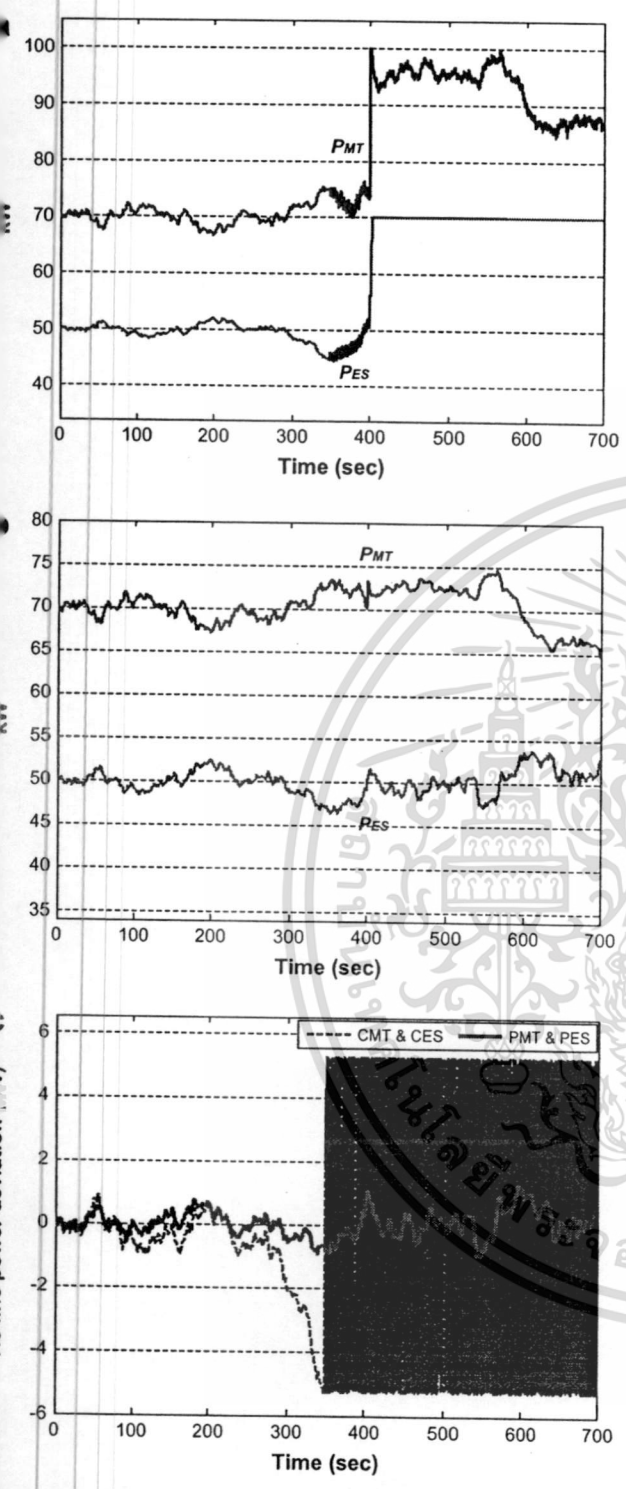


Fig. 11 - (a) Power outputs with the MT and ES controls (conventional method). (b) Power outputs with the MT and ES controls (proposed method). (c) Tie line power deviation with changed system parameters.

while ESs of both methods absorb power from the system as shown in Fig. 6(a) and (b).

In the islanding operation, the frequency deviation under only PMT and PMT & PES controls is demonstrated in Fig. 7(a). The frequency fluctuation is significantly damped by PMT & PES in comparison with only PMT. This shows that the addition of ES highly improves the stabilizing effect of MT. The frequency fluctuation with the coordinated controls of PMT & PES and CMT & CES in the islanding operation is shown in Fig. 7(b). The frequency fluctuation under the control of PMT & PES is lower than that of CMT & CES.

For the interconnected UG operation, the tie line power fluctuation under only PMT and PMT & PES controls is shown in Fig. 8(a). The stabilizing effect of PMT & PES on a tie line power deviation is higher than that of only PMT. With the coordinated controls of PMT & PES and CMT & CES, the tie line power fluctuation is illustrated in Fig. 8(b). The power stabilizing effect of CMT & CES is lower than that of PMT & PES. This indicates the higher coordinated control effect of PMT & PES.

In order to investigate the robustness of PMT & PES against the variation of system parameters in the islanding and interconnected UG operations, the integral absolute error (IAE) of frequency deviation ( $\Delta f$ ) and tie line power deviation ( $\Delta P_{tie}$ ) under the WP, PV and FC outputs and the random load deviation in Fig. 5 are determined as

$$IAE \text{ of } \Delta f = \int_0^{700} |\Delta f| dt \quad (17)$$

$$IAE \text{ of } \Delta P_{tie} = \int_0^{700} |\Delta P_{tie}| dt \quad (18)$$

Fig. 9(a) demonstrates the IAE values of  $\Delta f$  under the islanding operation while system parameters  $K_{ES}$ ,  $T_{ES}$ ,  $K_{MT}$ ,  $M$  and  $D$  are changed from -30% to +30% of the normal values. In Fig. 9(b), the IAE values of  $\Delta P_{tie}$  under interconnected UG operation are calculated while system parameters  $K_{ES}$ ,  $T_{ES}$ ,  $K_{MT}$ ,  $M$ ,  $D$  and  $X_{tie}$  are changed from -30% to +30% of the normal values. The changed parameters under islanding and interconnected UG operations are shown in Tables 1 and 2, respectively.

From Fig. 9(a), the IAE values of CMT & CES highly increase while system parameters decrease. In contrast, the changes of IAE values in the case of PMT & PES are lower than those of CMT & CES. Also, the IAE values of CMT & CES in Fig. 9(b) largely increase when system parameters decrease. On the other hand, the PMT & PES gives a lower change in IAE than CMT & CES. These show that PMT & PES is greatly robust to system parameters variation.

Next, it is supposed that the system is operated in an interconnected UG mode under the WP, PV and FC outputs and the random load deviation as shown in Fig. 10. At  $t = 400$  s, the MT controller ( $K_{PMTis}$ ) in the islanding operation is accidentally disconnected while three controllers ( $K_{PESis}$ ,  $K_{PMTug}$  and  $K_{PESug}$ ) are still operating for  $t > 400$  s in order to investigate the robustness of the remaining controllers under the outage of one controller. During the simulation, it is assumed that  $K_{ES}$ ,  $T_{ES}$ ,  $K_{MT}$ ,  $M$  and  $X_{tie}$  are decreased by 30% from the normal values,  $D$  is changed from 1 to -0.399. This implies that the values of the gain of ES, time constant of ES, droop property of MT, inertia constant and tie line reactance are supposedly decreased by 30% from their normal values. Also,  $D$  is reduced from positive damping to

load deviation in Fig. 5 are applied to the MG system under the islanding and interconnected UG operations. From Fig. 5, the load demand is much higher than the PV and WP power production. Therefore, MTs in both conventional and proposed methods supply the insufficient power to the system

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

negative damping. The negative damping can occur when the MG system is operating at the unstable point. Simulation results of the power outputs with the MT and ES controls and the tie-line power fluctuation are shown in Fig. 11.

Fig. 11(a) and (b) shows power supplied by MTs and power absorbed by ESs in both conventional and proposed methods, respectively. Clearly, the power outputs of PMT & PES can be controlled effectively. On the contrary, the CMT & CES cannot manage the power unbalance in the MG system. Fig. 11(c) explains that the CMT & CES completely fails to stabilize the tie-line power oscillation. The MG system becomes unstable. In contrast, the PMT & PES is robust against system parameters variation and controller outage situation. The PMT & PES successfully alleviates the power fluctuation. This result confirms the superior robustness and coordinated control effects of PMT & PES over the CMT & CES.

5. Conclusions

In this paper, the application of ES to enhance the robust frequency stabilization effects of MT has been presented. The robust coordinated controller design of ES and MT for frequency stabilization is based on a PSO-based fixed-structure  $H_\infty$  loop shaping control. With the PI structure, the proposed robust controller can be easily implemented in real systems. Simulation results confirm that the ES significantly improves the frequency stabilizing effect of MT. In addition, the proposed coordinated MT and ES show the superior robustness against system parameters variation and various operation situations.

Acknowledgements

This work was supported by the Thailand Research Fund under the Basic Research Grant No.BRG5080019 and the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

Appendix A

The proposed control design based on PSO-based fixed-structure  $H_\infty$  loop shaping control is described as follows:

A1 Loop shaping

A pre-compensator ( $W_1$ ) and a post-compensator ( $W_2$ ) in Fig. A1 are employed to form the shaped plant  $G_s = W_2GW_1$ ,

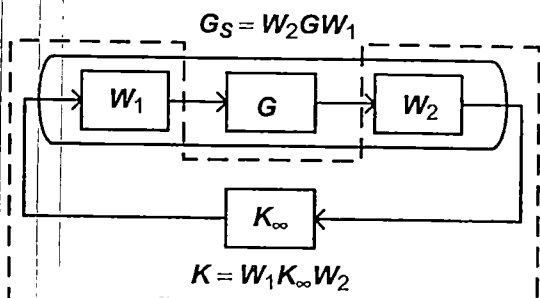


Fig. A1 - Shaped plant  $G_s$  and robust controller  $K$ .

which is enclosed by a solid line. The designed robust controller  $K = W_1K_\infty W_2$  is enclosed by a dotted line where  $K_\infty$  is the  $H_\infty$  controller.

A2 Weighting function selection

In this section, the weighting functions ( $W_1$  and  $W_2$ ) are chosen such that the open loop of the shaped plant has the following conflict properties [23,24]:

- To achieve a good performance tracking and good disturbance rejection, large open-loop gain (normally at low frequency range) is required.
- To achieve a good robust stability and sensor noise rejection, small open-loop gain (normally at high frequency range) is required.

In Fig. A1, the shaped plant is established by weighting functions. Because the nominal plant  $G$  is an MIMO system, the weighting functions are selected as

$$W_1 = \begin{bmatrix} W_{MTis} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{ESis} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{MTug} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{ESug} \end{bmatrix}, \quad W_2 = I$$

$$W_{MTis} = K_{W1} \frac{s + a_1}{s + b_1}, \quad W_{ESis} = K_{W2} \frac{s + a_2}{s + b_2}$$

$$W_{MTug} = K_{W3} \frac{s + a_3}{s + b_3}, \quad W_{ESug} = K_{W4} \frac{s + a_4}{s + b_4} \tag{A1}$$

where  $W_{MTis}$ ,  $W_{ESis}$  and  $W_{MTug}$ ,  $W_{ESug}$  are the weighting functions of MT output and ES load in the islanding and interconnected UG modes, respectively.  $K_{W1}$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $K_{W2}$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $K_{W3}$ ,  $a_3$ ,  $b_3$ ,  $K_{W4}$ ,  $a_4$  and  $b_4$  are positive values, because the peak resonance of the open-loop system occurs in the low frequency range. Therefore,  $W_1$  is set as a high-pass filter ( $a_1 < b_1$ ,  $a_2 < b_2$ ,  $a_3 < b_3$ ,  $a_4 < b_4$ ).

A3  $H_\infty$  robust stabilization problem formulation

In this work, variation of system parameters, generating and loading conditions etc., are defined as unstructured system uncertainties. Because these uncertainties cannot be clearly explained by mathematic equations, the coprime

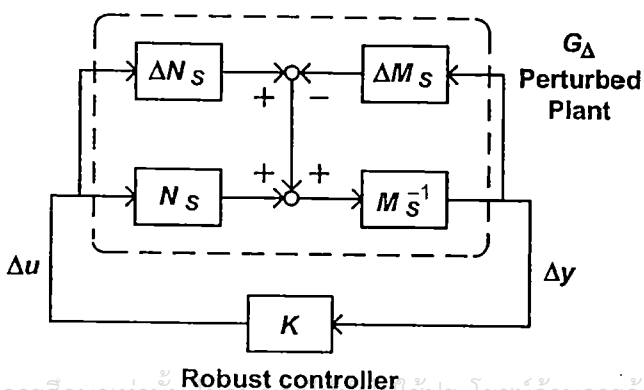


Fig. A2 -  $H_\infty$  robust stabilization problem.

ctorization is used to represent these unstructured uncertainties. A shaped plant  $G_s$  is expressed in the form of normalized left coprime factor  $G_s = M_s^{-1}N_s$ , when the perturbed plant  $G_\Delta$  is defined as

$$\Delta = \left\{ (M_s + \Delta M_s)^{-1}(N_s + \Delta N_s) : \|[\Delta N_s \ \Delta M_s]\|_\infty \leq 1/\gamma \right\} \quad (A2)$$

where  $\Delta M_s$  and  $\Delta N_s$  are stable unknown transfer functions which represent unstructured uncertainties in the nominal plant  $G$ . The  $H_\infty$  robust stabilization problem can be established by  $G_\Delta$  and  $K$  as depicted in Fig. A2. The objective of robust control design is to stabilize not only the nominal plant but also the family of perturbed plant  $G_\Delta$ . In (A2),  $1/\gamma$  is defined as the robust stability margin. The maximum stability margin in the face of system uncertainties is given by the best achievable value of  $\gamma$ . Therefore,  $\gamma_{min}$  implies the largest size of system uncertainties that can exist without destabilizing the closed-loop system in Fig. A2. The value of  $\gamma_{min}$  can be calculated from

$$\gamma_{min} = \sqrt{1 + \lambda_{max}(XZ)} \quad (A3)$$

where  $\lambda_{max}(XZ)$  denotes the maximum eigenvalue of  $XZ$ . For minimal state-space realization  $(A,B,C,D)$  of  $G_s$ , the values of  $X$  and  $Z$  are unique positive solutions to the generalized control algebraic Riccati equation

$$A - BS^{-1}D^TC)^T X + X(A - BS^{-1}D^TC) - XBS^{-1}B^T X + C^T R^{-1}C = 0 \quad (A4)$$

and the generalized filtering algebraic Riccati equation

$$A - BS^{-1}D^TC)Z + Z(A - BS^{-1}D^TC)^T - ZC^T R^{-1}CZ + BS^{-1}B^T = 0 \quad (A5)$$

where  $R = I + DD^T$  and  $S = I + D^T D$ . Note that no iteration on  $\gamma$  is needed to solve for  $\gamma_{min}$ . To ensure the robust stability of the nominal plant  $G$ , the weighting functions are chosen so that  $0 \leq \gamma_{min} < 4.0$  [23,24].

4 Generate the objective function

In Fig. A1,  $K_\infty$  can be determined as follows:

$$K_\infty = W_1^{-1}K(s) \quad (A6)$$

because  $W_2 = I$ , the necessary and sufficient condition of the robust controller  $K(s)$  [23,24] is

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty \end{bmatrix} (I - G_s K_\infty)^{-1} [I \ G_s] \right\|_\infty \leq \gamma \quad (A7)$$

Substitute (A6) in (A7), that is

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ W_1^{-1}K(s) \end{bmatrix} (I - G_s W_1^{-1}K(s))^{-1} [I \ G_s] \right\|_\infty \leq \gamma \quad (A8)$$

therefore, the objective function can be defined as

$$\text{minimize } \gamma_{min} + \left\| \begin{bmatrix} I \\ W_1^{-1}K(s) \end{bmatrix} (I - G_s W_1^{-1}K(s))^{-1} [I \ G_s] \right\|_\infty \quad (A9)$$

Subject to

$$K_{W1-4,min} \leq K_{W1-4} \leq K_{W1-4,max}, \quad a_{1-4,min} \leq a_{1-4} \leq a_{1-4,max}, \\ b_{1-4,min} \leq b_{1-4} \leq b_{1-4,max},$$

$$\gamma_{min,min} \leq \gamma_{min} < \gamma_{min,max}, \quad a_1 < b_1, \quad a_2 < b_2, \quad a_3 < b_3, \\ a_4 < b_4, \quad |G|_{dB,lf} < |G_s|_{dB,lf},$$

$$K_{P\_MTis,min} \leq K_{P\_MTis} \leq K_{P\_MTis,max}, \quad K_{I\_MTis,min} \leq K_{I\_MTis} \\ \leq K_{I\_MTis,max},$$

$$K_{P\_ESis,min} \leq K_{P\_ESis} \leq K_{P\_ESis,max}, \quad K_{I\_ESis,min} \leq K_{I\_ESis} \leq K_{I\_ESis,max},$$

$$K_{P\_MTug,min} \leq K_{P\_MTug} \leq K_{P\_MTug,max}, \quad K_{I\_MTug,min} \leq K_{I\_MTug} \\ \leq K_{I\_MTug,max},$$

$$K_{P\_ESug,min} \leq K_{P\_ESug} \leq K_{P\_ESug,max}, \quad K_{I\_ESug,min} \leq K_{I\_ESug} \\ \leq K_{I\_ESug,max} \quad (A10)$$

where  $K_{W1-4,min}$ ,  $a_{1-4,min}$ ,  $b_{1-4,min}$  and  $K_{W1-4,max}$ ,  $a_{1-4,max}$ ,  $b_{1-4,max}$  are the minimum and maximum of the positive values of MT output and ES load in the islanding and interconnected UG operations, respectively.  $\gamma_{min,min}$  and  $\gamma_{min,max}$  are the minimum and maximum values of  $\gamma_{min}$ , respectively.  $|G|_{dB,lf}$  and  $|G_s|_{dB,lf}$  are the open-loop gains of the nominal plant  $G$  and the shaped plant  $G_s$  at low frequency range, respectively.  $K_{P\_MTis,min}$ ,  $K_{I\_MTis,min}$ ,  $K_{P\_ESis,min}$ ,  $K_{I\_ESis,min}$  and  $K_{P\_MTis,max}$ ,  $K_{I\_MTis,max}$ ,  $K_{P\_ESis,max}$ ,  $K_{I\_ESis,max}$  are the minimum and maximum of PI parameters of  $K_{PMTis}$  and  $K_{PESis}$ , respectively.  $K_{P\_MTug,min}$ ,  $K_{I\_MTug,min}$ ,  $K_{P\_ESug,min}$ ,  $K_{I\_ESug,min}$  and  $K_{P\_MTug,max}$ ,  $K_{I\_MTug,max}$ ,  $K_{P\_ESug,max}$ ,  $K_{I\_ESug,max}$  are the minimum and maximum of PI parameters of  $K_{PMTug}$  and  $K_{PESug}$ , respectively.

In (A9), the weighting functions are selected by tuning the  $\gamma_{min}$  value so that the open-loop gains of the shaped plant  $G_s$  are more than those of the nominal plant  $G$  at the low frequency range and the roll-off rates are approximately 20 dB/decade [23,24].

A5 PSO algorithm

The PSO algorithm [21,22] is described as follows:

1. Specify the parameters of PSO. Initialize a population of the particles with random positions and velocities within upper and lower bound values of the problem space. Set iteration count as  $iter = 1$ .
2. Evaluate the objective function for each particle using (A9).
3. Compare the fitness value of each particle with its best position for particle ( $pbest$ ). The best fitness value among all the  $pbests$  is the best position of all particles in the group ( $gbest$ ).
4. Update the velocity  $v_i$  and position of particle  $x_i$  by

$$v_{i+1} = w \cdot v_i + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest - x_i) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest - x_i) \quad (A11)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (A12)$$

$$w = w_{max} - ((w_{max} - w_{min})/iter_{max}) \cdot iter \quad (A13)$$

where  $c_1$  and  $c_2$  are the cognitive and social acceleration factors, respectively.  $rand_1$  and  $rand_2$  are the random

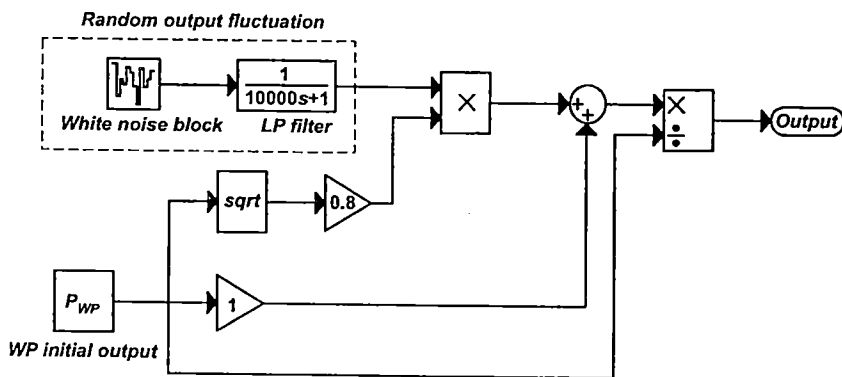


Fig. B1 - WP model.

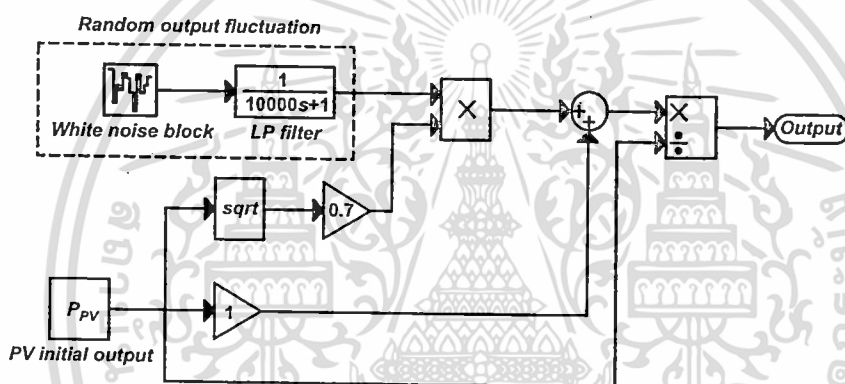


Fig. B2 - PV model.

numbers of range (0,1).  $w$  is inertia weight factor.  $w_{min}$  and  $w_{max}$  are the minimum and maximum inertia weight factors, respectively.  $iter$  and  $iter_{max}$  are the iteration count and maximum iteration, respectively.

5. Increment iteration for a step ( $iter = iter + 1$ ).
6. When the maximum number of iterations is arrived, stop the process. Otherwise go to process 2.

### Appendix B

In this paper, the standard deviations of WP and PV are mathematically evaluated as [15,16]:

$$\sigma_{P_{WP}} = 0.8 \sqrt{P_{WP}} \quad (B1)$$

$$\sigma_{P_{PV}} = 0.7 \sqrt{P_{PV}} \quad (B2)$$

The WP and PV models [15,16] are exhibited in Figs. B1 and B2, respectively. The WP and PV standard deviations in (B1) and (B2) are multiplied by a random output fluctuation derived from the white noise block with a low pass filter in MATLAB/SIMULINK in order to evaluate the random power fluctuation.

### REFERENCES

- [1] Ackermann T. Wind power in power systems. John Wiley & Sons, Ltd; 2005.
- [2] Obara S'Y. Analysis of a fuel cell micro-grid with a small-scale wind turbine generator. International Journal of Hydrogen Energy 2007;32:323-36.
- [3] Obara S'Y. Equipment plan of compound interconnection micro-grid composed from diesel power plants and solid polymer membrane-type fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy 2008;33:179-88.
- [4] Kroposki B, Lasseter R, Lse T, Morozumi S, Papathanassiou S, Hatziargyriou N. Making microgrids work. IEEE Power and Energy Magazine 2008;6:40-53.
- [5] Katiraei F, Iravani R, Hatziargyriou N, Dimeas A. Microgrids management. IEEE Power and Energy Magazine 2008;6:54-65.
- [6] Lasseter RH. CERTS microgrid. IEEE International Conference on System of Systems Engineering; 2007. p. 1-5.
- [7] Morozumi S. Micro-grid demonstration projects in Japan. IEEE Power Conversion Conference; 2007. p. 635-42.
- [8] Camblong H, Sarr J, Niang AT, Curea O, Alzola JA, Sylla EH, et al. Micro-grids project, part 1: analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal. Renewable Energy 2009;34:2141-50.
- [9] Hatziargyriou N, Asano H, Iravani R, Marnay C. Microgrids. IEEE Power and Energy Magazine 2007;5:78-94.

- [0] Barnes M, Ventakaramanan G, Kondoh J, Lasseter R, Asano H, Hatziaargyriou N, et al. Real-world microgrids – an overview. IEEE International Conference on System of Systems Engineering; 2007. p. 1-8.
- 1] Available from: <<http://www.protonenergy.com>>.
- 2] Available from: <<http://www.distributed-energy.com>>.
- 3] Do Sacramento EM, De Lima LC, Oliveira CJ, Veziroglu T Nejat. A hydrogen energy system and prospects for reducing emissions of fossil fuels pollutants in the Ceara state – Brazil. International Journal of Hydrogen Energy 2008;33: 2132-7.
- 4] Obara S. Load response characteristics of a fuel cell micro-grid with control of number of units. International Journal of Hydrogen Energy 2006;31:1819-30.
- 5] Li X, Song YJ, Han SB. Study on power quality control in multiple renewable energy hybrid microgrid system. IEEE PowerTech 2007:2000-5.
- 6] Li X, Song YJ, Han SB. Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller. Journal of Power Sources 2008;180:468-75.
- 7] Kundur P. Power system stability and control. McGrawHill, Inc; 1993.
- 8] Saadat H. Power system analysis. 2nd ed. McGrawHill, Inc; 2004.
- 9] Zhou K, Doyle JC. Essential of robust control. Prentice-Hall; 1998.
- 10] Wang F-C, Chen H-T. Design and implementation of fixed-order robust controllers for a proton exchange membrane fuel cell system. International Journal of Hydrogen Energy 2009;34:2705-17.
- [21] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. IEEE International Conference on Neural Networks 1995:1942-8.
- [22] Gaing ZL. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. IEEE Transactions on Energy Conversion 2004;19:384-91.
- [23] Mcfarlane DC, Glover K. Robust controller design using normalized coprime factor plant descriptions. In: Lecture notes in control and information sciences, vol. 138. Berlin: Springer-Verlag; 1990.
- [24] Skogestad S, Postlethwaite I. Multivariable feedback control: analysis and design. 2nd ed. John Wiley; 2005.
- [25] Senjyu T, Nakaji T, Uezato K, Funabashi T. A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island. IEEE Transactions on Energy Conversion 2005;20:406-14.
- [26] Sasaki K, Kitai T, Maoka T, Aoki T, Ueno M, Kuwabara T, et al. On the voltage drop of phosphoric acid fuel cell due to its on-off operation. The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan 1998;118-B:1450-6.
- [27] Lee D-J, Wang L. Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations. IEEE Transactions on Energy Conversion 2008;23:311-20.
- [28] Hiyama T, Ueno A. Development of real time power system simulator in matlab/simulink environment. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000;4:2096-100.

# Robust Frequency Stabilization in A Microgrid System

S. Vachirasricirikul\*, I. Ngamroo\*, S. Kaitwanidvilai\*\* and T. Chaiyatham\*

**Abstract**— This paper proposes a new design of a robust control and monitoring system (RCMS) for robust stabilization of frequency fluctuation in a microgrid (MG) system. In MG system, the power sources consists of wind power (WP), photovoltaic (PV), microturbine (MT) and fuel cell (FC). Due to WP, PV and load fluctuations, the frequency stabilization of MG is performed by adjusting the power outputs of MT and electrolyzer system (ES) in both islanding and interconnected microgrid operations. The structure of MT and ES controllers is proportional integral (PI). To enhance the robustness of designed controllers against system uncertainties, controller parameters of MT and ES are concurrently tuned by the particle swarm optimization based on a specified-structure  $H_\infty$  loop shaping control. Simulation results display the effectiveness and robustness of the proposed RCMS against system parameters variation and several operating conditions.

**Index Terms**— Microgrid, robust control,  $H_\infty$  loop shaping control, particle swarm optimization.

## I. INTRODUCTION

CURRENTLY, the microgrid (MG) system which is a cluster of the distributed generation (DG) units, distributed storage (DS) units and loads has been paid attention around the world because the MG can be operated independently in an islanding mode and also connected to the utility grid [1]. Especially, the MG is powerful to supply power to the rural areas which are not still connected with the main utility grid. In this paper, wind power (WP), photovoltaic (PV), microturbine (MT), electrolyzer system (ES), fuel cell (FC), hydrogen tank ( $H_2T$ ), control and monitoring system (CMS), load, transformer (TR) and utility grid (UG) are integrated into the MG. The ES is used to absorb the power output and generate hydrogen ( $H_2$ ) for FC. Normally, the power generations of WP and PV are very intermittent as well as load fluctuations. Thus, the real power imbalance of generation and load causes the frequency fluctuation problem. To overcome these problems, the

supercapacitor or the dynamic UPS are considered to response a sudden load change. However, the supercapacitor [2] is best suited for short-term low power (< 100 kW) applications. In addition, the dynamic UPS is suitable to response the rapid load deviation in the short time periods. Also, the price of dynamic UPS is highly costly. Recently, the CMS is applied to manage the real power mismatch of generation and load. In [3-4], the CMS is applied to damp the frequency and tie line power fluctuations in MG by controlling the power outputs of MT and ES. However, the control parameters of MT and ES are separately tuned for islanding and interconnected UG operations. Hence, the CMS cannot guarantee the well coordinated control effect. Besides, these works do not take system uncertainties such as the system parameters variation etc., into account. Therefore, the robustness of CMS against system uncertainties cannot be guaranteed. The CMS with coordinated controllers with high robustness is expected.

To tackle this problem, this paper proposes the new design of robust control and monitoring system (RCMS) for stabilization of frequency fluctuation in a MG system. The RCMS is used to control the power outputs of MT and ES. The structure of MT and ES controllers is the proportional integral (PI). To enhance the robustness and well coordinated control effect of MT and ES, the particle swarm optimization (PSO) [5] based on a specified  $H_\infty$  loop shaping control is utilized. The normalized coprime factor [6] is applied to model system uncertainties. Based on an improvement of robust stability margin, the PI controller parameters of MT and ES in both islanding and interconnected UG modes are simultaneously optimized. Simulation results demonstrate the superior frequency stabilizing effects of RCMS in comparison with the CMS in [3-4].

## II. SYSTEM MODELING

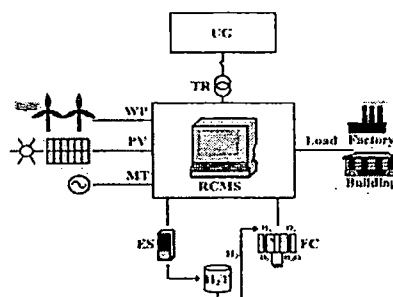


Fig. 1. A MG system.

In Fig.1, a MG system includes the WP, PV, MT, ES,  $H_2T$ , FC, RCMS, load, TR and UG. The ES is applied to consume

This work was supported by the Thailand Research Fund under the Basic research Grant No.BRG5080019 and the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and T. Chaiyatham are with the Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand (e-mail: thidstv@hotmail.com, ngamroo@gmail.com, t.chaiyatham@hotmail.com).

S. Kaitwanidvilai is with the Center of Excellence for Innovative Energy Systems, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand (e-mail: drsomyotk@gmail.com).

power output and build  $H_2$  as fuel for FC. The MT is 1 to supply power to system when WP and PV cannot provide. The WP, PV and load fluctuations cause a frequency deviation problem. To stabilize MG, the RCMS is designed to minimize the real power unbalance of generation and load ( $\Delta P$ ). The block diagram of MG system is illustrated in Fig. 2. System parameters are given in [3-4]. The linearized block of RCMS is shown in Fig. 3. Note that the gain and time constants of FC are given in [7].

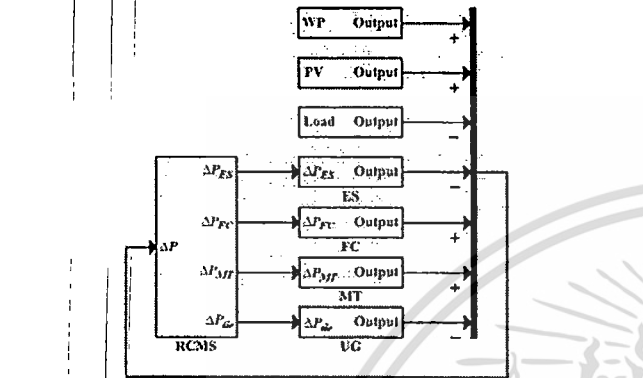


Fig. 2. A diagram of MG system.

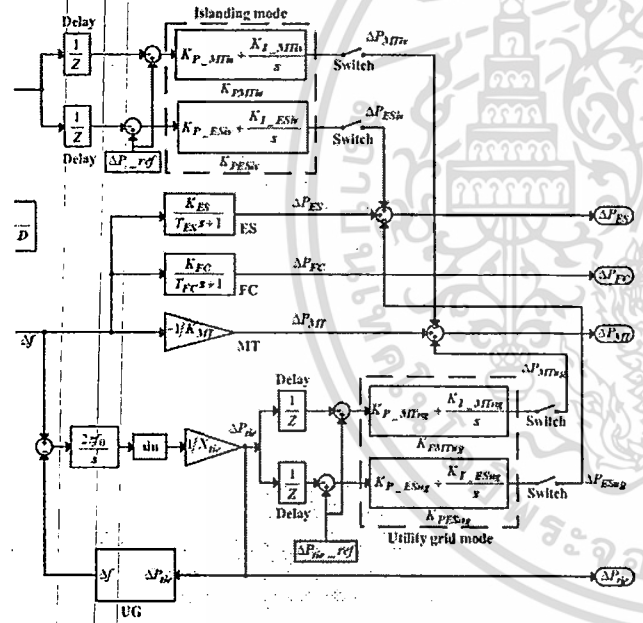


Fig. 3. Linearized block diagram of RCMS.

From Fig. 3, the linearized state can be expressed as

$$\dot{\Delta X} = A\Delta X + B\Delta u \quad (1)$$

$$\Delta Y = C\Delta X + D\Delta u \quad (2)$$

$$\Delta P_{MTis} = K_{PMTis}(s)\Delta P \quad (3)$$

$$\Delta P_{ESis} = K_{PESis}(s)\Delta P \quad (4)$$

$$\Delta P_{MTug} = K_{PMTug}(s)\Delta P_{tie} \quad (5)$$

$$\Delta P_{ESug} = K_{PESug}(s)\Delta P_{tie} \quad (6)$$

$$K_{PMTis}(s) = K_{P\_MTis} + K_{I\_MTis}/s \quad (7)$$

$$K_{PESis}(s) = K_{P\_ESis} + K_{I\_ESis}/s \quad (8)$$

$$K_{PMTug}(s) = K_{P\_MTug} + K_{I\_MTug}/s \quad (9)$$

$$K_{PESug}(s) = K_{P\_ESug} + K_{I\_ESug}/s \quad (10)$$

where the state vector  $\Delta X = [\Delta P_{ES} \ \Delta P_{FC} \ \Delta P_{tie} \ \Delta f]^T$ .  $\Delta P_{ES}$ ,  $\Delta P_{FC}$ ,  $\Delta P_{tie}$  and  $\Delta f$  are changes of ES load, FC power output, tie line power and frequency, respectively. The output vector  $\Delta Y = [\Delta P \ \Delta P_{tie}]^T$ , the control output signal  $\Delta u = [\Delta P_{MTis} \ \Delta P_{ESis} \ \Delta P_{MTug} \ \Delta P_{ESug}]^T$ .  $\Delta P_{MTis}$  and  $\Delta P_{ESis}$  are changes of MT output and ES load in the islanding operation, respectively.  $\Delta P_{MTug}$  and  $\Delta P_{ESug}$  are changes of MT output and ES load in the interconnected UG operation, respectively.  $K_{PMTis}(s)$ ,  $K_{PESis}(s)$  and  $K_{PMTug}(s)$ ,  $K_{PESug}(s)$  are the designed MT and ES controllers in the islanding and interconnected UG modes, respectively. Note that the  $K_{PMTis}(s)$  and  $K_{PESis}(s)$  are performed in islanding mode while all four controllers are operated in interconnected UG mode. The system (1) is a multi-input multi-output (MIMO) system and referred to the nominal plant  $G$ .

### III. THE PROPOSED METHOD

The proposed method is described as follows:

#### A. Formulate the shaped plant $G_s$

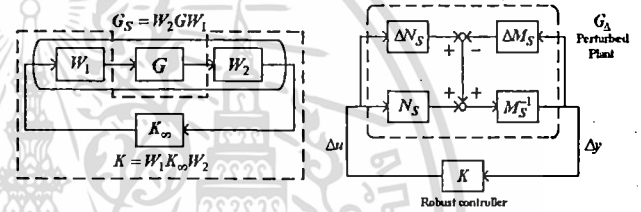


Fig. 4. Shaped plant  $G_s$  and robust controller  $K$ .

Fig. 5.  $H_\infty$  robust stabilization problem.

In Fig. 4, the shaped plant  $G_s = W_2GW_1$  is enclosed by a solid line. The proposed robust controller  $K = W_1K_robustW_2$  is enclosed by a dotted line.  $K_robust$  is the  $H_\infty$  controller.

#### B. Selection of the weighting functions

The shaped plant ( $G_s$ ) in Fig. 4 can be established by choosing the weighting functions as

$$W_1 = \begin{bmatrix} W_{MTis} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{ESis} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{MTug} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{ESug} \end{bmatrix}, W_2 = I$$

$$W_{MTis} = K_{W1} \frac{s+a_1}{s+b_1}, W_{ESis} = K_{W2} \frac{s+a_2}{s+b_2}$$

$$W_{MTug} = K_{W3} \frac{s+a_3}{s+b_3}, W_{ESug} = K_{W4} \frac{s+a_4}{s+b_4} \quad (11)$$

where  $W_{MTis}$  and  $W_{ESis}$  are the weighting functions of MT output and ES load in the islanding mode, respectively.  $W_{MTug}$  and  $W_{ESug}$  are the weighting functions of MT output and ES load in the interconnected UG modes, respectively.  $K_{W1}$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $K_{W2}$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $K_{W3}$ ,  $a_3$ ,  $b_3$ ,  $K_{W4}$ ,  $a_4$  and  $b_4$  are the positive values. Because the peak of resonance is in the low frequency range. So,  $W_1$  is set as a high-pass filter ( $a_1 < b_1$ ,  $a_2 < b_2$ ,  $a_3 < b_3$ ,  $a_4 < b_4$ ).

#### C. Evaluate the robust stability margin of the system

In this work, variation of system parameters, generating and loading conditions etc., are defined as unstructured

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

tem uncertainties. Because these uncertainties cannot clearly represented by mathematic equations, the coprime factorization is utilized to represent these unstructured uncertainties. A shaped plant  $G_s$  is expressed in form of malized left coprime factor  $G_s = M_s^{-1}N_s$ , when the perturbed plant  $G_\Delta$  is determined as follow:

$$G_\Delta = \left\{ (M_s + \Delta M_s)^{-1} (N_s + \Delta N_s) : \left\| \begin{bmatrix} \Delta N_s & \Delta M_s \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq 1/\gamma \right\} \quad (12)$$

ere  $\Delta M_s$  and  $\Delta N_s$  are stable unknown transfer functions which represent unstructured uncertainties in the nominal plant. The  $H_\infty$  robust stabilization problem can be established by and  $K$  as shown in Fig.5. The objective of robust control sign is to stabilize not only the nominal plant  $G$  but also the stability of perturbed plant  $G_\Delta$ . In (12),  $1/\gamma$  is defined as the robust stability margin. The maximum stability margin in the presence of system uncertainties is given by the lowest achievable value of  $\gamma$ . Therefore,  $\gamma_{min}$  implies the largest size of system uncertainties that can exist without destabilizing the closed-loop system in Fig.5. The value of  $\gamma_{min}$  can be easily calculated

$$\gamma_{min} = \sqrt{1 + \lambda_{max}(XZ)} \quad (13)$$

ere  $\lambda_{max}(XZ)$  denotes the maximum eigenvalue of  $XZ$ . For nominal state-space realization  $(A, B, C, D)$  of  $G_s$ , the values of  $X$  and  $Z$  are unique positive solutions to the generalized control algebraic Riccati equation

$$(A - BS^{-1}D^TC)^T X + X(A - BS^{-1}D^TC) - XBS^{-1}B^T X + C^T R^{-1}C = 0 \quad (14)$$

and the generalized filtering algebraic Riccati equation

$$(A - BS^{-1}D^TC)Z + Z(A - BS^{-1}D^TC)^T - ZC^T R^{-1}CZ + BS^{-1}B^T = 0 \quad (15)$$

ere  $R = I + DD^T$  and  $S = I + D^T D$ . Note that no iteration on  $\gamma$  is needed to solve for  $\gamma_{min}$ . In order to ensure the robust stability of the nominal plant, the weighting function is selected so that  $1 \leq \gamma_{min} < 4.0$  [6].

Generate the objective function

From Fig.4,  $K_\infty$  can be defined as

$$K_\infty = W_1^{-1}K(s) \quad (16)$$

ecause  $W_2 = I$ . The necessary and sufficient condition of the robust controller  $K(s)$  [6] is

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty \end{bmatrix} (I - G_s K_\infty)^{-1} \begin{bmatrix} I & G_s \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (17)$$

ubstitute (16) in (17), the objective function is

$$\text{Minimize} \left\| \begin{bmatrix} I \\ W_1^{-1}K(s) \end{bmatrix} (I - G_s W_1^{-1}K(s))^{-1} \begin{bmatrix} I & G_s \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (18)$$

bject to

$$\begin{aligned} K_{P,I\_MTis,min} &< K_{P,I\_MTis} < K_{P,I\_MTis,max}, \\ K_{P,I\_ESis,min} &< K_{P,I\_ESis} < K_{P,I\_ESis,max}, \\ K_{P,I\_MTug,min} &< K_{P,I\_MTug} < K_{P,I\_MTug,max}, \\ K_{P,I\_ESug,min} &< K_{P,I\_ESug} < K_{P,I\_ESug,max} \end{aligned} \quad (19)$$

here  $K_{P,I\_MTis,min}$  and  $K_{P,I\_MTis,max}$  are the minimum and maximum parameters of PI controller of MT output in the islanding mode, respectively.  $K_{P,I\_ESis,min}$  and  $K_{P,I\_ESis,max}$  are the minimum and maximum parameters of PI controller of ES load in the islanding mode, respectively.  $K_{P,I\_MTug,min}$  and

$K_{P,I\_MTug,max}$  are the minimum and maximum parameters of PI controller of MT output in the interconnected UG mode, respectively.  $K_{P,I\_ESug,min}$  and  $K_{P,I\_ESug,max}$  are the minimum and maximum parameters of PI controller of ES load in the interconnected UG mode, respectively.

#### E. PSO algorithm

The PSO algorithm [5] is explained as follows:

1. Specify the parameters of PSO. Initialize a population of the particles with random positions and velocities.
2. Evaluate the objective function in (18) for each particle.
3. Compare the fitness value of each particle with it's the best position for particle ( $pbest$ ). The best fitness value among all the  $pbests$  is the best position of all particles in the group ( $gbest$ ).

4. Update the velocity  $v_i$  and position of particle  $x_i$  by

$$v_{i+1} = w.v_i + c_1.rand_1.(pbest - x_i) + c_2.rand_2.(gbest - x_i) \quad (20)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (21)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (22)$$

where  $c_1$  and  $c_2$  are the cognitive and social acceleration factors, respectively.  $rand_1$  and  $rand_2$  are the random numbers of range (0,1), respectively.  $w$  is the inertia weight factor.  $w_{min}$  and  $w_{max}$  are the minimum and maximum of inertia weight factors, respectively.  $iter$  and  $iter_{max}$  are the iteration count and maximum iteration, respectively.

5. When the maximum number of iterations is arrived, stop the process. Otherwise go to process 2.

#### IV. SIMULATION RESULTS

From (11), the weighting functions are properly chosen as

$$\begin{aligned} W_{MTis} &= 910.9754 \frac{s+48.9961}{s+96.9381}, W_{ESis} = 806.7562 \frac{s+46.9839}{s+93.9256} \\ W_{MTug} &= 889.9907 \frac{s+41.9219}{s+90.9769}, W_{ESug} = 886.9561 \frac{s+44.9197}{s+95.9942} \end{aligned} \quad (23)$$

Thus, the shaped plant ( $G_s$ ) can be established. Because  $\gamma_{min}$  is 2.5849. The searching parameters and PSO parameters are set as follows:  $K_{P\_MTis} \in [0.0001 \ 1]$ ,  $K_{I\_MTis} \in [0.0001 \ 1]$ ,

$$K_{P\_ESis} \in [0.0001 \ 1], K_{I\_ESis} \in [0.0001 \ 1], K_{P\_MTug} \in [0.0001 \ 0.5],$$

$$K_{I\_MTug} \in [0.0001 \ 0.5], K_{P\_ESug} \in [0.0001 \ 0.5], K_{I\_ESug} \in [0.0001 \ 0.5],$$

PSO sizes = 50, maximum iterations = 100,  $c_1 = 2$ ,  $c_2 = 2$ ,  $w_{min} = 0.4$  and  $w_{max} = 0.9$ . Hence, the proposed MT and ES controllers (PMT & PES) in the sides of islanding and interconnected UG modes of RCMS are

$$\begin{aligned} K_{PMTis} &= 0.4300 + \frac{0.6607}{s}, K_{PESis} = 0.4397 + \frac{0.8951}{s} \\ K_{PMTug} &= 0.1493 + \frac{0.3994}{s}, K_{PESug} = 0.1500 + \frac{0.3999}{s} \end{aligned} \quad (24)$$

In this simulation, PMT & PES in RCMS is compared with CMT & CES in CMS [3-4]. It is assumed that the MG system is performed under the WP and PV outputs and random load change in Figs.6-7. Fig.8 shows the frequency fluctuation under islanding operation. It is found that the damping characteristic of PES and PMT is lower than PMT & PES.

tie line power deviation under interconnected UG operation is illustrated in Fig.9. The tie line power oscillation of PMT & PES in Fig.9 is higher than PMT & PES. These indicate the well coordinated control of PMT & PES.

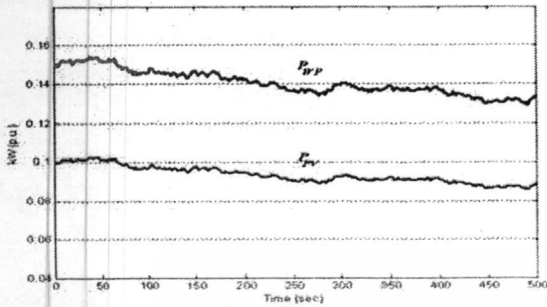


Fig. 6. The WP and PV outputs.

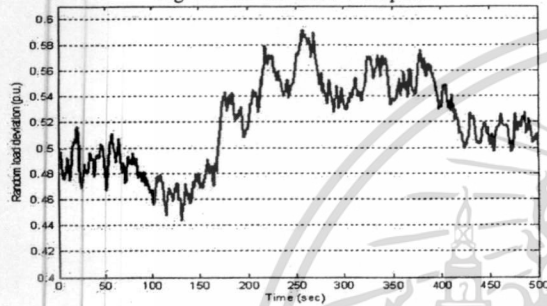


Fig. 7. Random load change.

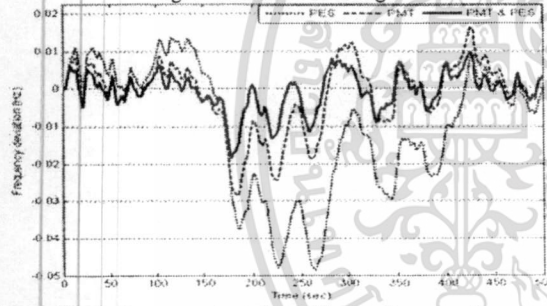


Fig. 8. Frequency deviation with islanding operation.

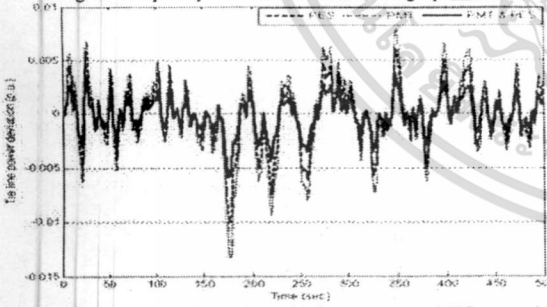


Fig. 9. Tie line power deviation with interconnected UG operation.

In the case of changed system parameters, it is supposed that the MG system under the WP and PV outputs and random load change in Figs.6-7 is unstable since  $D$  is changed from 1 to  $-0.158$ ,  $K_{FC}$  and  $M$  are decreased by 20%,  $T_{FC}$  is increased by 20% from the normal values. During simulation, it is assumed that the MT controller ( $K_{PMTUG}$ ) is initially operated under the interconnected UG operation and suddenly disconnected at  $t = 250$  s. Fig.10 shows that the FC power output of CMT & CES drops to the minimum power output. In contrast, the FC power output of PMT & PES is more than CMT & CES. Note that the minimum and maximum power outputs of FC are 0.02 and 0.05 kW (p.u.), respectively [3-4].

Fig.11 exhibits that CMT & CES fails to suppress the tie line power fluctuation because the PI control parameters of MT and ES in CMS are not designed based on the system uncertainties. On the contrary, PMT & PES designed by taking the unstructured system uncertainties into account is greatly robust against the system parameters variation and the controller outage situation. This result confirms the superior robustness and coordinated control effect of the proposed RCMS over the CMS in [3-4].

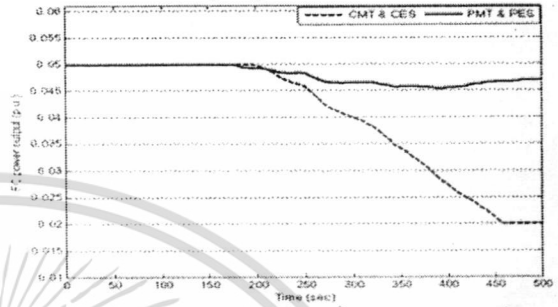


Fig. 10. FC power output (changed system parameters).

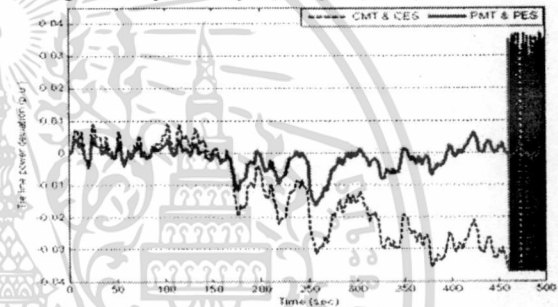


Fig. 11. Tie line power deviation (changed system parameters).

## V. CONCLUSION

The design of RCMS for MG stabilization has been presented in this paper. The PSO-based specified-structure  $H_\infty$  loop shaping control is applied to concurrently adjust the PI controller parameters of MT and ES in islanding and interconnected UG operations. The designed PI controller is highly robust against the variation of system parameters and easy to implement in real system. Simulation results confirm the superior robustness and stabilizing effect of the proposed RCMS under different situations.

## VI. REFERENCES

- [1] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Lse, S. Morozumi, S. Papathanassiou and N. Hatziaergiriou, "Making microgrids work," IEEE Power and Energy Magazine, Vol.6, Issue.3, pp.40-53, 2008.
- [2] M.U.D. Mufti, S.A. Lone, S.J. Iqbal, M. Ahmad and M. Ismail, "Super-capacitor based energy storage system for improved load frequency control," Electric power systems research, pp.226-233, 2009.
- [3] X. Li, Y.J. Song and S.B. Han, "Study on power quality control in multiple renewable energy hybrid microgrid system," IEEE Inter. Conf. Power Tech, pp.2000-2005, 2007.
- [4] X. Li, Y.J. Song and S.B. Han, "Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller," Journal of Power Sources, pp.468-475, 2008.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in Proc. IEEE Inter. Conf. Neural Networks, Vol.1, pp.1942-1948, 1995.
- [6] D.C. McFarlane and K. Glover, *Robust controller design using normalized coprime factor plant descriptions*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer-Verlag, Berlin, Vol.138, 1990.
- [7] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato and T. Funabashi, "A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island," IEEE Trans. on Energy Conversion, pp.406-414, 2005.