

รายงานโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปี 2552

โครงการวิจัย

การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยงในระบบไฟฟ้า
กำลังที่มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยพลังงานลมด้วยตัวสะสมพลังงาน
แม่เหล็กแบบยิ่งยวด



รศ. ดร. อิศระชัย งามหรรุ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการวิจัย: การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยงในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยพลังงานลมด้วยตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด

Abstract

The large penetration of wind farm into interconnected power systems may cause the severe problem of tie-line power oscillations. To suppress power oscillations, the Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) which is able to control active and reactive powers simultaneously, can be applied. On the other hand, several generating and loading conditions, etc., cause system uncertainties. The SMES controller designed without considering system uncertainties may fail to suppress power oscillations. To enhance the robustness of SMES controller against system uncertainties, this paper proposes a robust control design of SMES by taking system uncertainties into account. The inverse additive perturbation is applied to represent the unstructured system uncertainties and included in power system modeling. The configuration of active and reactive power controllers is the first-order lead-lag compensator with single input feedback. To tune the controller parameters, the optimization problem is formulated based on the enhancement of robust stability margin. The particle swarm optimization is used to solve the problem and achieve the controller parameters. Simulation studies in the six-area interconnected power system with wind farms confirm the robustness of the proposed SMES under various operating conditions.

Keywords superconducting magnetic energy storage, power system control, robust control, inverse additive perturbation, wind farm

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานลม SMES เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าในรูปของพลังงานแม่เหล็กในตัวนำยิ่งยวด มีคุณสมบัติพิเศษในการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างรวดเร็ว จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยงเนื่องจากสิ่งรบกวนที่เข้ามาใน ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบใหม่ของ SMES นอกจากนี้เพื่อลดการแกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าในสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง ยังเพิ่มคุณสมบัติความคงทนของตัวควบคุมต่อความไม่แน่นอนในระบบ เช่น ความไม่แน่นอนในค่าของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด เป็นต้น โดยจะประยุกต์ใช้แบบจำลองความไม่แน่นอนระบบชนิด Inverse Additive Perturbation เพิ่มเข้ามาในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง แล้วจึงทำการตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสม เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อปรับปรุงค่าขอบเขตของเสถียรภาพความคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบให้มีค่าสูงขึ้น หลังจากนั้นทำการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมโดยวิธีวิวิธวิธีแล้วจึงทำการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบทั้งในด้านความคงทนและสมรรถนะในการลดการแกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าในสายส่งโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้กันอยู่

คำสำคัญ ตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง การควบคุมแบบคงทน ความไม่แน่นอนของระบบ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้ากังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่... 120326 เลขทะเบียน... 15 ก.พ. 2555 วัน, เดือน, ปี... เลขที่... ๑๖๖๔๐

หน้าสรุปโครงการ

ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าในประเทศเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนความกังวลด้านผลกระทบของการผลิตกำลังไฟฟ้าต่อสิ่งแวดล้อมที่มากขึ้น รวมทั้งแนวโน้มการเปิดเสรีการผลิตไฟฟ้า ทำให้เกิดความสนใจเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (renewable energy sources) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานลมได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นอย่างสูงในประเทศ เนื่องจากในบางพื้นที่ของประเทศนั้นมีศักยภาพเพียงพอในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม อย่างไรก็ตาม ธรรมชาติของลมนั้นมีความไม่แน่นอนกล่าวคือสภาพของลมนั้นมีทั้งแรงและเบา จึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งพลังงานลมนั้นไม่คงที่ แปรเปลี่ยนไปตามสภาพลม ซึ่งเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่นี้จ่ายเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (power oscillations) ที่รุนแรงขึ้นได้จนทำให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้แล้ว อาจทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสูญเสียเสถียรภาพจนเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟ โรงงานอุตสาหกรรมและธุรกิจต่างๆ ตลอดจนเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศได้ จึงมีความจำเป็นต้องหาวิธีแก้ไขปัญหาค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานลม

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานลม SMES เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าในรูปของพลังงานแม่เหล็กในตัวนำยิ่งยวด มีคุณสมบัติพิเศษในการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ได้อย่างรวดเร็ว จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำเสถียรภาพระบบ ขดเซยการเปลี่ยนแปลงของโหลดไฟฟ้า ควบคุมความถี่และแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง ตลอดจนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยงเนื่องจากสิ่งรบกวน (Disturbances) ที่เข้ามาในระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้สิ่งรบกวนระบบคือกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของแหล่งจ่ายพลังงานลมที่จ่ายเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง จนส่งผลเสียต่อเสถียรภาพระบบ

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบใหม่ของ SMES นอกจากเพื่อลดการแกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าในสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง ยังเพิ่มคุณสมบัติความคงทน (Robustness) ของตัวควบคุมต่อความไม่แน่นอนในระบบ (System Uncertainties) เช่น ความไม่แน่นอนในค่าของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด สิ่งรบกวนระบบต่างๆ ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ เป็นต้น โดยจะประยุกต์ใช้แบบจำลองความไม่แน่นอนระบบชนิด Inverse Additive Perturbation เพิ่มเข้ามาในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง แล้วจึงทำการตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสม (Optimization Problem) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อปรับปรุงค่าขอบเขตของเสถียรภาพความคงทน (Robust Stability Margin) ต่อความไม่แน่นอนในระบบให้มีค่าสูงขึ้น หลังจากนั้นทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้ปัญหาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมโดยวิธี Heuristic แล้วจึงทำการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบทั้งในด้านความคงทนและสมรรถนะในการลดการแกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้กันอยู่

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานลมต่อการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เพื่อประยุกต์ใช้ SMES เข้ามาลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งตลอดจนปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีแหล่งจ่ายพลังงานลม
3. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES แบบคงทนโดยพิจารณาผลของความไม่แน่นอนในระบบด้วยวิธีการแทนด้วย Inverse Additive Perturbation

องค์ความรู้ใหม่ที่คาดว่าจะได้จากโครงการวิจัย

1. ผลกระทบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานลมต่อการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะพลวัตและชั่วคราว
2. การประยุกต์ใช้ SMES เข้ามาลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งตลอดจนปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีแหล่งจ่ายพลังงานลม
3. วิธีออกแบบตัวควบคุมโรบัสแบบใหม่ของ SMES ที่เป็นระบบและง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง
4. ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES ที่มีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนในระบบและยังมีโครงสร้างแบบเฟสนำและตามอันดับหนึ่งซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง

ผลกระทบขององค์ความรู้ใหม่ต่อความก้าวหน้าในเชิงวิชาการของสาขาที่ทำการวิจัย

แนวความคิดในการประยุกต์ใช้ SMES เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานลม จะส่งผลกระทบต่อการศึกษาวิชาการด้านการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีแหล่งจ่ายพลังงานที่ไม่แน่นอนเช่นลม แสงอาทิตย์ เป็นต้น นอกจากนี้จะช่วยกระตุ้นและส่งเสริมให้มีการสร้างงานวิจัยใหม่ๆ ขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่น การออกแบบตัวควบคุมโรบัส การประยุกต์ใช้งานการทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายหมุนเวียน การควบคุมเสถียรภาพด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น แล้วยังทำให้เกิดการแข่งขันในการนำเสนอวิธีและแนวคิดใหม่ๆ เพื่อเป็นการสร้างความก้าวหน้าในการทำเสถียรภาพระบบที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

ระเบียบวิธีวิจัย

1. พิจารณาเลือกระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายพลังงานลม ด้วยการศึกษาลึบค้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา
2. สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง SMES แหล่งจ่ายพลังงานลม เป็นต้นขึ้นมาเพื่อใช้วิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบตัวควบคุมโรบัส
3. วิเคราะห์ปัญหาด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาโดยทำการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Linear Analysis) และการวิเคราะห์โหมดการแกว่ง (Modal Oscillation Analysis)
4. พิจารณาเลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของ SMES ในระบบโดยใช้วิธีเรซิดิว (Residue Method)
5. ศึกษาแบบจำลองความไม่แน่นอนในระบบแบบ Inverse Additive Perturbation เพื่อรวมเข้าไปในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง
6. สร้างปัญหาการทำให้เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES และทำการออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัส
7. ทดสอบผลการการทำเสถียรภาพของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของ SMES ที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขนาดใหญ่ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้งานกันอยู่ (Conventional Controller)
8. ทดสอบความคงทนของตัวทำเสถียรภาพระบบที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลังพร้อมกับความไม่แน่นอนในระบบในสถานะต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้งานกันอยู่
9. สรุปผลการศึกษารายละเอียดเพื่อเขียนบทความการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

ผลงานวิจัย

1. วารสารวิชาการระดับนานาชาติ
Issarachai Ngamroo, Cuk Supriyadi Ali Nanda, Sanchai Dechanupaprittha and Yasunori Mitani (2009). Power oscillation suppression by robust SMES in power system with large wind power penetration. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, Vol. 469, Issue 1, 1 January 2009, pp. 44-51. (Impact Factor 2008 = 0.74)
2. การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ
Issarachai Ngamroo, Cuk Supriyadi Ali Nanda, Sanchai Dechanupaprittha and Yasunori Mitani (2009). Stabilization of Tie-Line Power Oscillations by Robust SMES in Interconnected Power System with Large Wind Farms. *IEEE Transmission & Distribution Asia 2009*, October 26-30, Seoul, Korea. (Accepted for presentation)
ตัวบทความได้แนบไว้ในภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยงในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยพลังงานลมด้วยตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กแบบยิ่งยวด

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าในประเทศเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนความกังวลด้านผลกระทบของการผลิตกำลังไฟฟ้าต่อสิ่งแวดล้อมที่มากขึ้น รวมทั้งแนวโน้มการเปิดเสรีการผลิตไฟฟ้า ทำให้เกิดความสนใจเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (renewable energy sources) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานลมได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นอย่างสูงในประเทศ เนื่องจากในบางพื้นที่ของประเทศนั้นมีศักยภาพเพียงพอในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม อย่างไรก็ตาม ธรรมชาติของลมนั้นมีความไม่แน่นอน กล่าวคือสภาพของลมนั้นมีทั้งแรงและเบา จึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งพลังงานลมนั้นไม่คงที่ แปรเปลี่ยนไปตามสภาพลม ซึ่งเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่นี้จ่ายเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (power oscillations) ที่รุนแรงขึ้นได้จนทำให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้แล้ว อาจทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสูญเสียเสถียรภาพจนเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟ โรงงานอุตสาหกรรมและธุรกิจต่างๆ ตลอดจนเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาวิธีแก้ไขปัญหาค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานลม

ผลกระทบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานลมต่อระบบไฟฟ้ากำลัง นั้นได้มีการทำวิจัยในด้านต่างๆ เช่นผลกระทบต่อเสถียรภาพระบบเชิงพลวัต [1-3] เสถียรภาพในสภาวะชั่วขณะ [4-6] เสถียรภาพแรงดัน [7-8] และเสถียรภาพความถี่ [9] เพื่อลดผลกระทบในด้านต่างๆนี้ ได้มีการนำอุปกรณ์ต่างๆเข้ามาประยุกต์ใช้ดังต่อไปนี้ ใน [10-11] ได้มีการนำตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer, PSS) เข้ามาเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบในสภาวะพลวัตของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมซึ่งต่อกับบัสอนันต์ โดย PSS ใน [10] และ [11] ถูกออกแบบด้วยวิธีการควบคุมแบบเปลี่ยนโครงสร้างได้ (variable structure control) และ ตัวชดเชยเฟสนำและตาม (lead/lag compensation) ตามลำดับ เนื่องจาก PSS ในสองงานนี้ถูกออกแบบในระบบไฟฟ้ากำลังเชิงเส้น ผลการหน่วง (Damping effect) ของ PSS นั้นสามารถยอมรับได้ในจุดทำงานที่ใช้ในการออกแบบเท่านั้น เมื่อระบบทำงานในสภาวะอื่นๆ ก็ไม่สามารถรับประกันผลการหน่วงของ PSS ได้ นอกจากนี้โครงสร้างของ PSS ยังเป็นแบบป้อนกลับของตัวแปรสถานะทั้งหมด จึงเป็นการยุ่งยากที่จะนำมาใช้จริงในทางปฏิบัติ

นอกจากนี้ ได้มีการออกแบบตัวควบคุมพิช (pitch control) ของกังหันลมเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทและความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมโดยใช้ตัวควบคุมแบบออปติมัล (optimal control) [12] ตัวควบคุมแบบหลายตัวแปร (multivariable control) [13] ตัวควบคุมแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

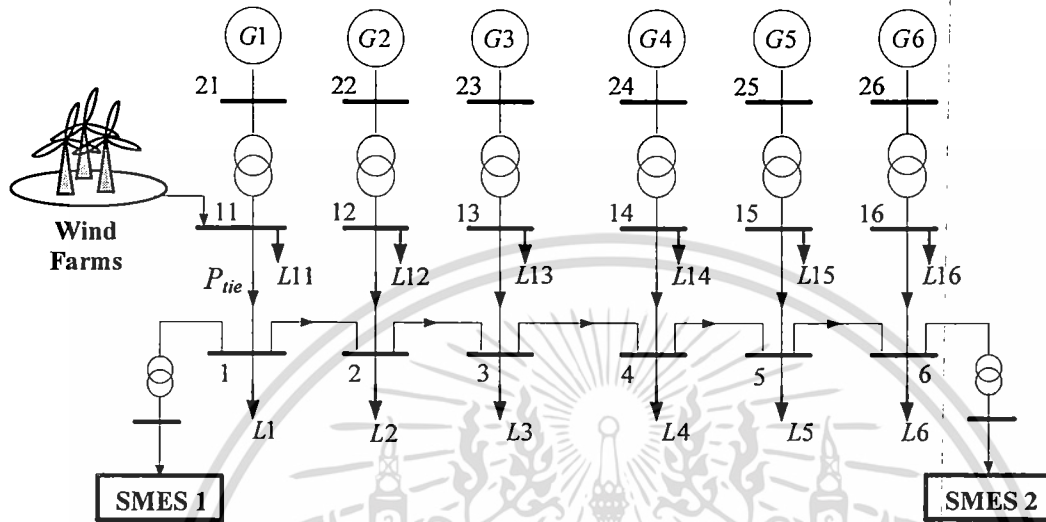
ปรับได้ (adaptive control) [14] ตามลำดับ ส่วนใน [15] โกวเวอร์เนอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดีเซลในระบบไฮบริดพลังงานลมและดีเซลนั้นได้รับการออกแบบโดยวิธีการควบคุมแบบนิวรอลฟัซซี (neural fuzzy control) เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ผลการทำงานของตัวควบคุมใน [12-15] นั้นเป็นที่น่าพอใจ ถึงกระนั้นก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมไม่ได้นำผลของความไม่แน่นอนในระบบเช่น การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ สภาวะต่างๆของการผลิตไฟฟ้าและสภาพโหลดที่เปลี่ยนไป ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ มาพิจารณา ดังนั้น เสถียรภาพความคงทนของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อความไม่แน่นอนในระบบจึงไม่สามารถรับประกันได้

ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ FACTS (Flexible AC Transmission Systems) มาแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานลม ใน [16,17] ตัวควบคุมแบบ PI ได้ถูกออกแบบเป็นตัวควบคุมเสริมให้กับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน (Static Var Compensator, SVC) เพื่อควบคุมแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของระบบกังหันลม ในบทความนี้ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PI นั้นถูกออกแบบโดยไม่ได้พิจารณาผลของความไม่แน่นอนในระบบ ดังนั้นตัวควบคุมนี้อาจจะสูญเสียสมรรถนะการทำงานในสภาวะที่มีความไม่แน่นอนในระบบต่างๆ ได้เนื่องจากไม่สามารถรักษาเสถียรภาพระบบแบบโรบัสต์ไว้ได้ นอกจากนี้ใน [18] ได้มีการประยุกต์นำตัว Static Compensators (STATCOM) เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพระบบกังหันลม ใน [19] ได้นำ STATCOM เข้าไปปรับปรุงค่าขอบเขตของเสถียรภาพระบบในสภาวะชั่วคราวของระบบกังหันลม ใน [18,19] ตัวควบคุมของ STATCOM นั้นถูกออกแบบโดยไม่ได้พิจารณาผลของความไม่แน่นอนในระบบจึงไม่สามารถรับประกันเสถียรภาพระบบอย่างคงทนได้ นอกจากนี้ทั้ง SVC และ STATCOM ยังไม่สามารถแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงกับระบบได้ สมรรถนะในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบจึงไม่สูงมากนัก

เพื่อแก้ปัญหาในข้อบกพร่องต่างๆของงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น โครงการวิจัยนี้เสนอการประยุกต์ใช้ Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) [20,21] ซึ่งสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนเอาต์พุตได้อย่างรวดเร็ว โดยเน้นการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบใหม่ของ SMES นอกจากเพื่อลดการแกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าในสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยง ยังเพิ่มคุณสมบัติความคงทน (Robustness) ของตัวควบคุมต่อความไม่แน่นอนในระบบ (System Uncertainties) เช่น ความไม่แน่นอนในค่าของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด สิ่งรบกวนระบบต่างๆ ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ เป็นต้น โดยจะประยุกต์ใช้แบบจำลองความไม่แน่นอนระบบชนิด Inverse Additive Perturbation เพิ่มเข้ามาในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง แล้วจึงทำการตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสม (Optimization Problem) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อปรับปรุงค่าขอบเขตของเสถียรภาพความคงทน (Robust Stability Margin) ต่อความไม่แน่นอนในระบบให้มีค่าสูงขึ้น หลังจากนั้นทำการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมโดยวิธี Particle Swarm Optimization แล้วจึงทำการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบทั้งในด้านความคงทนและสมรรถนะ

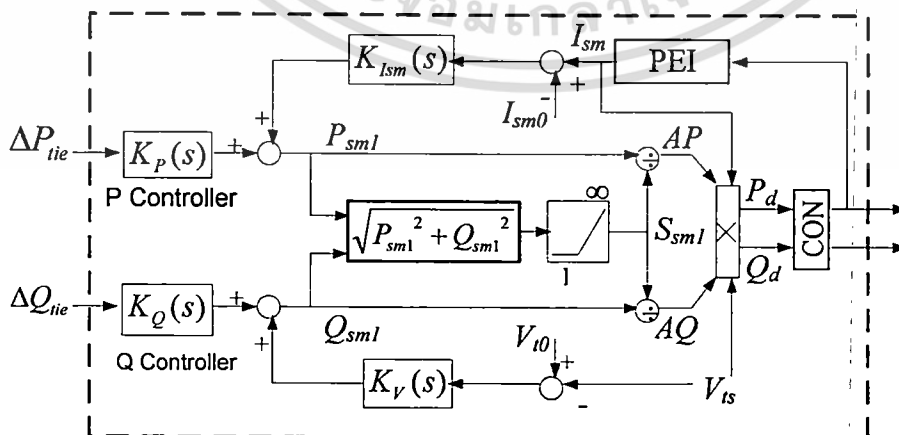
ในการลดการแกว่งไกวของกำลังไฟฟ้าในสายส่งโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้กันอยู่

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษาและแบบจำลองระบบ



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังศึกษา

ระบบไฟฟ้ากำลังศึกษาดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหกเครื่อง [22] มีสัดส่วนของกำลังการผลิตเป็น 20 : 13.5 : 6 : 75 : 40 : 6.75 : 33 เมื่อกำลังไฟฟ้าฐานเป็น 1,000 MVA เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องนั้นแทนด้วยแบบจำลองของ Park อันดับที่ 5 และติดตั้งด้วยตัวกระตุ้น (exciter) และโกเวอร์เนอร์ (governor) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานลมขนาด 450 MW ต่อที่บัส 11 ผลการศึกษาหาตำแหน่งติดตั้งของ SMES ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเรลิติว [23] คือที่บัสที่ 1 และ 6 โดย SMES แต่ละตัวนั้นมีขนาด 800 MJ, 40 kA, 1,000 MVA [24]



รูปที่ 2 แบบจำลอง SMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองของ SMES ซึ่งประกอบไปด้วยตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง $K_p(s)$ และกำลังไฟฟ้าเสมือน $K_Q(s)$ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นตัวชดเชยแบบเฟสนำอันดับที่หนึ่งคือ

$$K_p(s) = K_1 \frac{(1+T_{11}s)}{(1+T_{12}s)} \quad (1)$$

$$K_Q(s) = K_2 \frac{(1+T_{21}s)}{(1+T_{22}s)} \quad (2)$$

สัญญาณอินพุทของ $K_p(s)$ และ $K_Q(s)$ ของ SMES1 และ SMES2 คือการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริง ΔP_{ie} และกำลังไฟฟ้าเสมือน ΔQ_{ie} ในสายส่งระหว่างบัสที่ 11 ถึงบัสที่ 1 และจากบัสที่ 16 ถึง 6 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งสองอย่างเหมาะสมโดยวิธีที่น่าเสนอ

ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถแทน $K_{ism}(s)$ ได้ด้วย

$$K_{ism}(s) = \left(K_p + \frac{1}{T_I s} \right) K_{sm} (I_{sm} - I_{sm0}) \quad (3)$$

ในแบบจำลองนี้ พิจารณาผลของกระแส I_{sm} เนื่องจาก I_{sm} ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะรวมของ SMES อย่างมาก ในทางปฏิบัตินั้นจะไม่ยอมให้ค่ากระแส I_{sm} มีค่าเป็นศูนย์เพื่อป้องกันความไม่ต่อเนื่องของการนำไฟฟ้า ในทางตรงข้าม ถ้าค่า I_{sm} ที่สูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้นั้น อาจทำให้สูญเสียคุณสมบัติตัวนำยิ่งยวด ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่าลิมิตล่างและลิมิตบนของ I_{sm} อยู่ที่ $0.30I_{sm0}$ และ $1.38I_{sm0}$ ตามลำดับ โดยค่าของ I_{sm} สามารถคำนวณได้จากบล็อคของ PEI ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

$$I_{sm} = \sqrt{I_{sm0}^2 - \frac{2E_{out}}{L_{sm} I_{sm,base}^2}} \quad (4)$$

$$E_{out} = \int P_{sm} dt \cdot S_{sm,base} \quad (5)$$

สำหรับ พลังงานสะสมใน SMES และพลังงานสะสมที่สภาวะเริ่มแรกนั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$E_{sm} = E_{sm0} - E_{out} \quad (6)$$

$$E_{sm0} = 0.5 L_{sm} I_{sm0}^2 \cdot I_{sm,base}^2 \quad (7)$$

ส่วน $K_v(s)$ สามารถแสดงได้โดย

$$K_v(s) = K_{vsm} (V_{t0} - V_{ts}) \quad (8)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนที่ต้องการของ SMES สามารถแสดงได้โดย

$$P_d = V_{ts} I_{sm} A_P \quad (9)$$

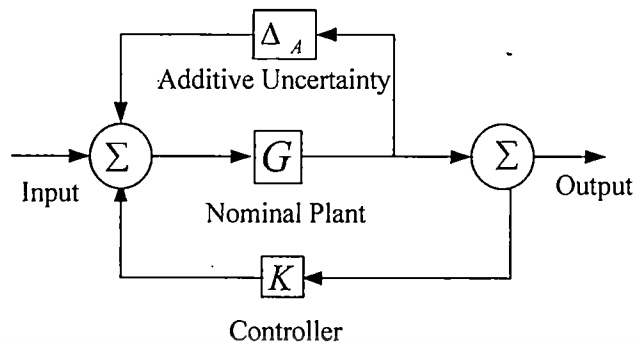
$$Q_d = V_{ts} I_{sm} A_Q \quad (10)$$

ในรูปที่ 2, ค่า P_{sm} และ Q_{sm} แสดงกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์ของ SMES เมื่อแทนคอนเวอร์เตอร์ด้วย

$$CONV = 1/(1+T_c s) \quad (11)$$

โดยค่า T_c เป็นค่าเวลาคงตัวของคอนเวอร์เตอร์

3. วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ



รูปที่ 3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับเมื่อมีผลของ Inverse Additive Uncertainty

เพื่อเพิ่มความคงทน (Robustness) ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนต่อความไม่แน่นอนในระบบ งานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองความไม่แน่นอนแบบ Inverse additive perturbation [25] มาเพื่อสร้างปัญหาการทำให้เหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

พิจารณาระบบควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งมีแบบจำลองความไม่แน่นอนแบบ Inverse additive ดังรูปที่ 3 เมื่อ G เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ K เป็นตัวควบคุมที่ออกแบบ ความไม่แน่นอนของระบบเช่นสถานะการผลิตกำลังไฟฟ้าและโหลด การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ ความไม่เชิงเส้น เป็นต้น สามารถแทนด้วย Δ_A ซึ่งเป็นแบบจำลองของความไม่แน่นอนที่ไม่มีโครงสร้างแบบบวม (Unstructured additive uncertainty model) โดยใช้ Small gain theorem สำหรับความไม่แน่นอนแบบบวมที่เสถียร Δ_A นั้น ระบบจะเสถียรก็ต่อเมื่อ

$$|\Delta_A G / (1 - GK)| < 1 \quad (12)$$

หรือ

$$|\Delta_A| < 1 / |G / (1 - GK)| \quad (13)$$

ทางด้านขวาของสมการ (13) แสดงขนาดของความไม่แน่นอนในระบบ อีกนัยหนึ่งแสดงส่วนเผื่อเสถียรภาพต่อความไม่แน่นอนในระบบ ดังนั้นถ้าทำให้ $|G / (1 - GK)|$ น้อยที่สุด ก็จะทำให้ส่วนเผื่อเสถียรภาพแบบคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบนั้นมีค่ามากที่สุด โดยแนวคิดนี้จึงสามารถตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวควบคุมได้เป็น

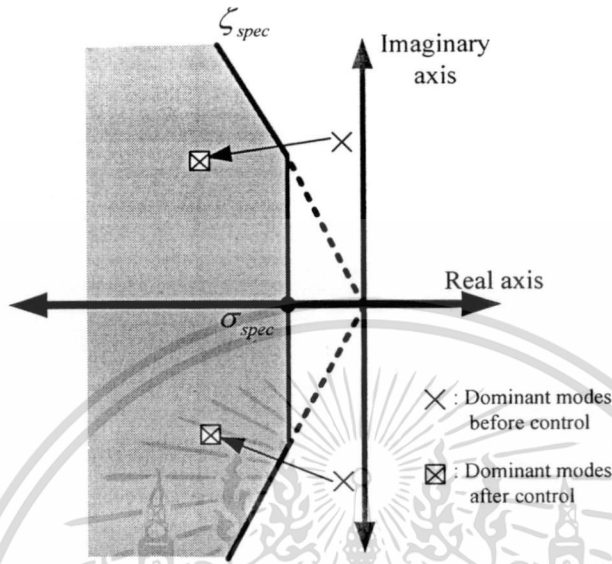
$$\text{Minimize } \|\Delta_A G / (1 - GK)\|_\infty \quad (14)$$

$$\text{Subject to } \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \geq \sigma_{spec}, K_{i,min} \leq K_i \leq K_{i,max},$$

$$T_{ij,min} \leq T_{ij} \leq T_{ij,max}, i=1,2, j=1,2$$

เมื่อ ζ_{spec} และ σ_{spec} เป็นค่าสัดส่วนความหน่วงที่ต้องการและส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะที่ต้องการของโหมตเด่นของการแกว่งระหว่างพื้นที่ ตามลำดับ จุดประสงค์ของการทำให้เหมาะสมคือเพิ่มความคงทนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวควบคุม SMES และ ย้ายตำแหน่งของโหนดเด่นของการแกว่งระหว่างพื้นที่ไปยังบริเวณเสถียรภาพ D (D stability region) ดังแสดงในรูปที่ 4 งานวิจัยนี้จะใช้วิธี Particle Swarm Optimization (PSO) [26] มาเพื่อแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม



รูปที่ 4. บริเวณเสถียรภาพ D

4. ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ SMES

ขนาด 800MJ, 40kA, 1000MVA			
K_p	: 40.0	I_{sm0}	: 0.675 p.u.
T_I	: 0.40	L_{sm}	: 10.0 H
K_{sm}	: 1.00	$S_{sm,base}$: 1,000 MVA
K_{Vsm}	: 1.00	V_{tbase}	: 25 kV
T_c	: 0.01	V_{t0}	: 0.95 p.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 กรณีศึกษา (MVA base = 1000 MVA)

Generator	1. LL ($P_{tie} = 1.5$) (p.u.)	2. NOC ($P_{tie} = 2.3$) (p.u.)	3. HL ($P_{tie} = 3.0$) (p.u.)
G1	$P_G = 8, L1=1.5$ $L11=5+0.5i$	$P_G=12, L1= 2.2$ $L11=7+0.7i$	$P_G=16, L1= 3.0$ $L11=10+1.0i$
G2	$P_G: 5.4, L2=1.0$ $L12=4.2+0.4i$	$P_G= 8.1, L2= 1.5$ $L12 =6.3+0.6i$	$P_G=10.8, L2= 2.0$ $L12 = 8.4+0.8i$
G3	$P_G=2.7, L3= 0.6$ $L13= 2.1+0.2i$	$P_G=4.05, L3=0.9$ $L13=3.2+0.3i$	$P_G= 5.4, L3= 1.2$ $L13=4.2+0.4i$
G4	$P_G=16, L4= 3.0$ $L14=13+1.3i$	$P_G=24, L4=4.5$ $L14=18.5+1.8i$	$P_G= 32, L4= 6$ $L14=26+2.6i$
G5	$P_G=2.7, L5= 0.6$ $L15= 2.1+0.2i$	$P_G= 4.05, L5=0.9$ $L15=3.2+0.3i$	$P_G= 5.4, L5= 1.2$ $L15=4.2+0.4i$
G6	$P_G=11.55, L6= 3.0$ $L16=10.2+1.0i$	$P_G=16.4, L6=4.5$ $L16=15.3+1.5i$	$P_G= 23.2, L6=6.0$ $L16=20.6+2.0i$

NOC : สภาวะการทำงานปกติ LL : สภาวะโหลดน้อย HL : สภาวะโหลดหนัก

พารามิเตอร์ของ SMES นั้นได้ให้ไว้ในตารางที่ 1 สำหรับค่าคงที่สำหรับการทำให้เหมาะสมด้วย PSO นั้น กำหนดดังนี้ $\zeta_{spec} = 0.04$, $\sigma_{spec} = -0.2$, $K_i \in [1 \ 10]$, $T_{ij} \in [0.0001 \ 1]$, จำนวนของอนุภาค = 24, จำนวนรอบการคำนวณ = 100, แพลกเตอร์การเร่ง = 2, ค่าน้ำหนักความเฉื่อย $\omega_{max} = 0.9$ และ $\omega_{min} = 0.4$ ก่อนอื่นทำระบบให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ที่จุดทำงานปกติหรือกรณีที่ 2 ในตารางที่ 2 แล้วจึงทำพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของ SMES ที่คงทน (RSMES) ให้เหมาะสม ผลที่ได้คือ

RSMES1:

$$K_{P1}(s) = 5.788 \frac{(0.7924s + 1)}{(0.1845s + 1)} \quad (15)$$

$$K_{Q1}(s) = 4.492 \frac{(0.7828s + 1)}{(0.2346s + 1)} \quad (16)$$

RSMES2:

$$K_{P2}(s) = 3.452 \frac{(0.8429s + 1)}{(0.1775s + 1)} \quad (17)$$

$$K_{Q2}(s) = 7.229 \frac{(0.7589s + 1)}{(0.2564s + 1)} \quad (18)$$

ในการศึกษานี้ จะทำการเปรียบเทียบความคงทนของ RSMES กับ SMES ซึ่งออกแบบโดยไม่ได้ผลของความไม่แน่นอนในระบบ ซึ่งจะเรียกว่า "CSMES" โดยการออกแบบ CSMES นั้นก็เพื่อให้ได้อัตราส่วนการหน่วงและส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะที่ต้องการให้เหมือนกับในกรณีของ RSMES ปัญหาการทำให้เหมาะสมของ CSMES คือ

$$\text{Minimize } J = \sum_{\zeta \leq \zeta_{spec}} |\zeta_{spec} - \zeta| + \sum_{\sigma \geq \sigma_{spec}} |\sigma_{spec} - \sigma| \quad (19)$$

Subject to $K_{i,min} \leq K_i \leq K_{i,max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{ij,\min} \leq T_{ij} \leq T_{ij,\max}, \quad i=1,2, j=1,2$$

เมื่อจุดประสงค์ของปัญหาการทำให้เหมาะสม นั้นเพื่อที่จะย้ายโหนดเด่นของการแกว่งระหว่างพื้นที่ไปยังบริเวณเสถียรภาพ D ดังแสดงในรูปที่ 4 ผลของการแก้ปัญหาการทำให้เหมาะสม จะได้พารามิเตอร์ของ CSMES ดังนี้

CSMES1:

$$K_{p1}(s) = 5.724 \frac{(0.2898s + 1)}{(0.1908s + 1)} \quad (20)$$

$$K_{q1}(s) = 5.724 \frac{(0.9689s + 1)}{(0.7901s + 1)} \quad (21)$$

CSMES2:

$$K_{p2}(s) = 4.823 \frac{(0.8974s + 1)}{(0.5883s + 1)} \quad (22)$$

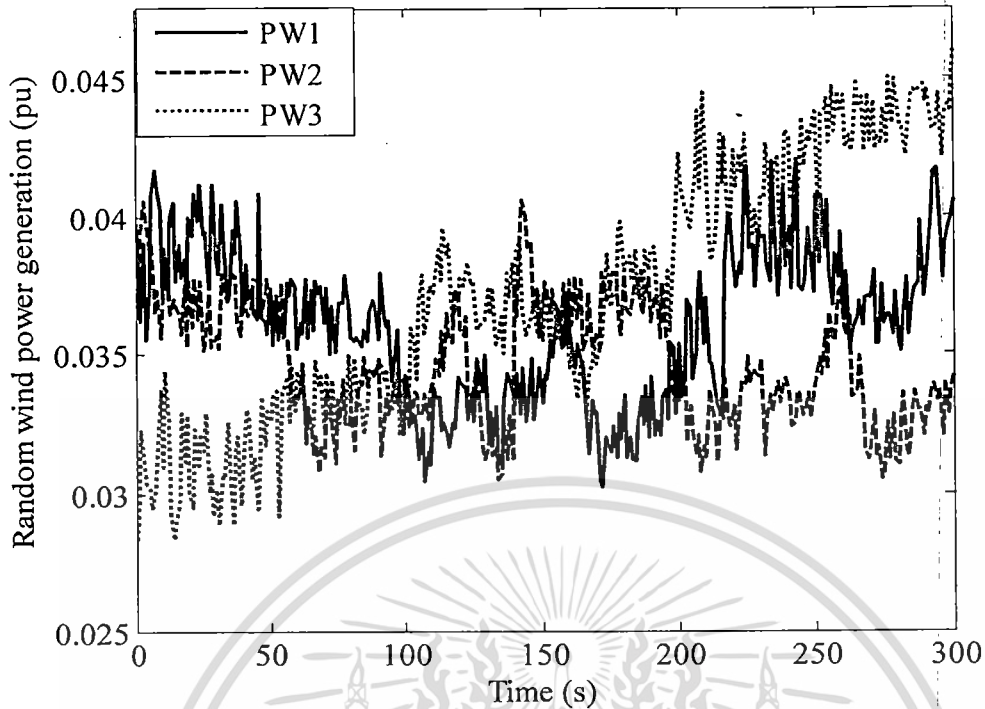
$$K_{q2}(s) = 7.353 \frac{(0.7342s + 1)}{(0.4901s + 1)} \quad (23)$$

ตารางที่ 3 ค่าลักษณะเฉพาะของโหนดเด่นการแกว่งระหว่างพื้นที่

Case	NO SMES	CSMES	RSMES
1 (LL)	$-0.155 \pm 3.90i$	$-0.402 \pm 6.31i$	$-0.381 \pm 6.30i$
	$\zeta = 0.0396$	$\zeta = 0.0635$	$\zeta = 0.0602$
	$-0.117 \pm 2.93i$	-0.255 ± 3.96	$-0.348 \pm 3.89i$
	$\zeta = 0.0400$	$\zeta = 0.0644$	$\zeta = 0.0892$
2 (NOC)	$-0.104 \pm 3.679i$	$-0.321 \pm 6.65i$	$-0.279 \pm 6.63i$
	$\zeta = 0.028$	$\zeta = 0.0481$	$\zeta = 0.042$
	$-0.074 \pm 2.713i$	$-0.218 \pm 3.85i$	$-0.369 \pm 3.78i$
	$\zeta = 0.027$	$\zeta = 0.0567$	$\zeta = 0.097$
3 (HL)	$-0.0361 \pm 3.413i$	$-0.290 \pm 6.81i$	$-0.233 \pm 6.76i$
	$\zeta = 0.011$	$\zeta = 0.0425$	$\zeta = 0.0345$
	$0.1001 \pm 2.387i$	$-0.235 \pm 3.76i$	$-0.456 \pm 3.81i$
	$\zeta = -0.040$	$\zeta = 0.0624$	$\zeta = 0.119$

ตารางที่ 3 แสดงค่าลักษณะเฉพาะและอัตราส่วนการหน่วงของโหนดเด่นของการแกว่งระหว่างสองพื้นที่สำหรับทั้งสามกรณีศึกษา เมื่อไม่มี SMES ค่าอัตราส่วนการหน่วงของทั้งสองโหนดนั้นต่ำมากในกรณีที่ 1 และ 2 ส่วนในกรณีที่ 3 ค่าอัตราส่วนการหน่วงมีค่าเป็นลบ หมายถึงระบบเสถียรภาพในทางตรงกันข้ามนั้น เมื่อติดตั้ง CSMES หรือ RSMES ค่าอัตราส่วนการหน่วงของโหนดการแกว่งทั้งสองเพิ่มขึ้นตามที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

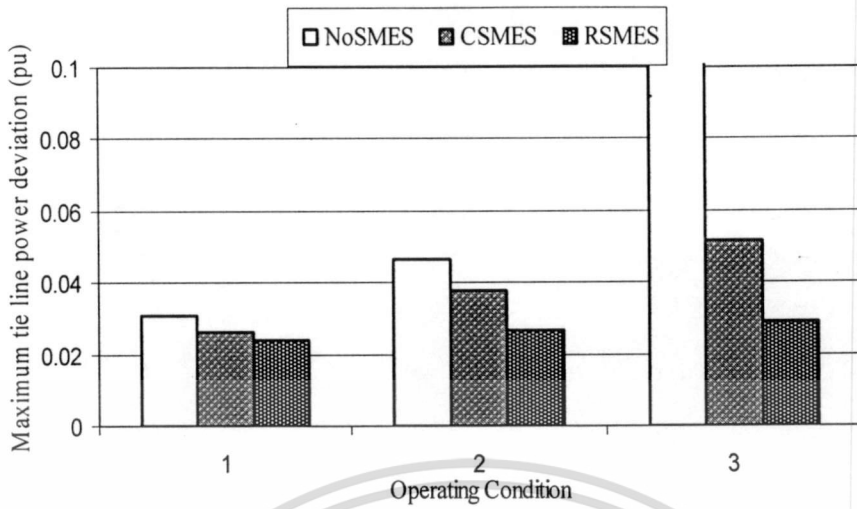


รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลม

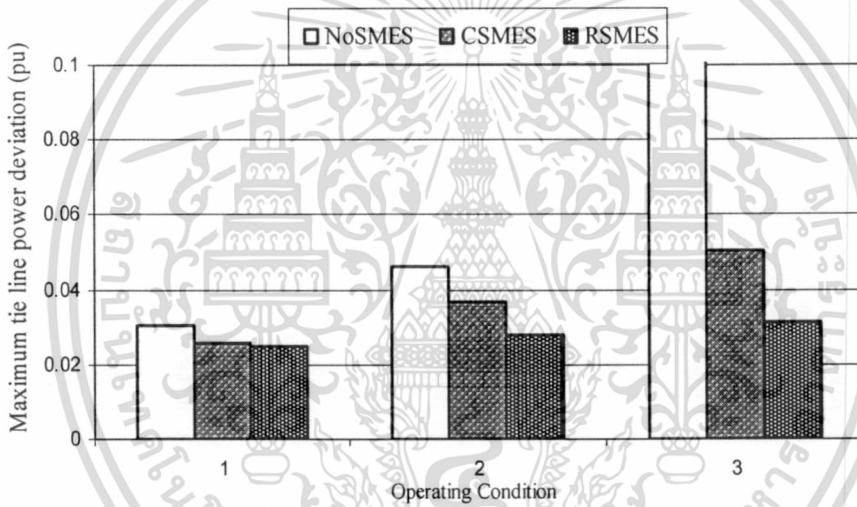
ต่อไปทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์แบบไม่เชิงเส้นของทั้งสามกรณีศึกษาภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลมสามลักษณะ [PW1], [PW2] และ [PW3] ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลมนี้ถูกจ่ายเข้าไปในระบบที่บัส 11

รูปที่ 6, 7 และ 8 แสดงผลเปรียบเทียบของค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (ΔP_{ie}) ในแต่ละกรณีของ PW1, PW2 และ PW3 เมื่อไม่ติดตั้ง SMES ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในกรณีที่ 3 ในทางตรงข้าม CMES หรือ RSMES สามารถลดค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าได้อย่างมาก อย่างไรก็ตาม สมรรถนะของ CSMES ลดลงไปในกรณีที่ 2 และ 3 ส่งผลให้ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในทางตรงกันข้ามนั้น RSMES มีความคงทนสูงต่อสภาวะการทำงานต่างๆ และรูปแบบของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานลมทั้งสามลักษณะ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่สูงสุดแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในกรณีที่ 3 ภายใต้ PW1 ในกรณีที่ไม่มี SMES นั้น เนื่องจากโหมดการแกว่งไม่เสถียร ดังแสดงในตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างสูงมากจนระบบเสียเสถียรภาพ (ไม่ได้แสดงในรูปที่ 9) ในทางตรงข้าม SMES สามารถลดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้างได้อย่างมาก ถึงกระนั้นก็ตาม RSMES นั้นสามารถแสดงผลการหน่วงได้มากกว่า CMES ผลการจำลองนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า RSMES มีความคงทนสูงต่อสภาวะการทำงานและรูปแบบกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมแบบต่างๆ เมื่อเทียบกับ CSMES

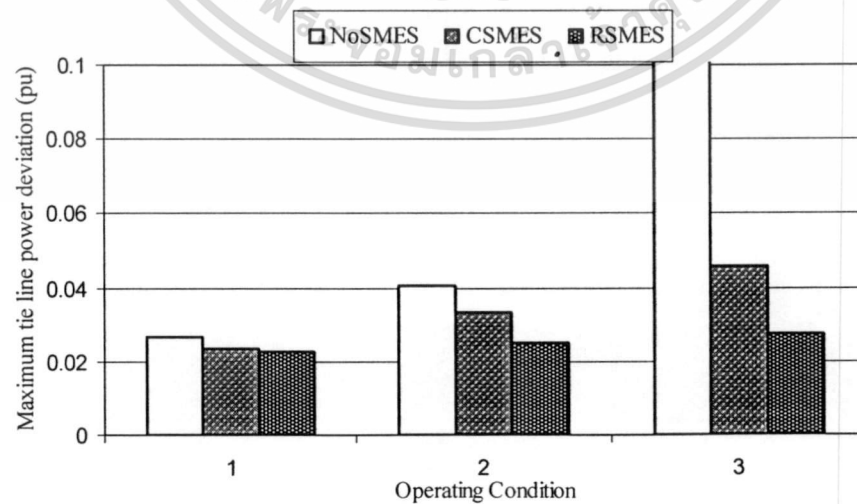
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6. ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกรณี PW1

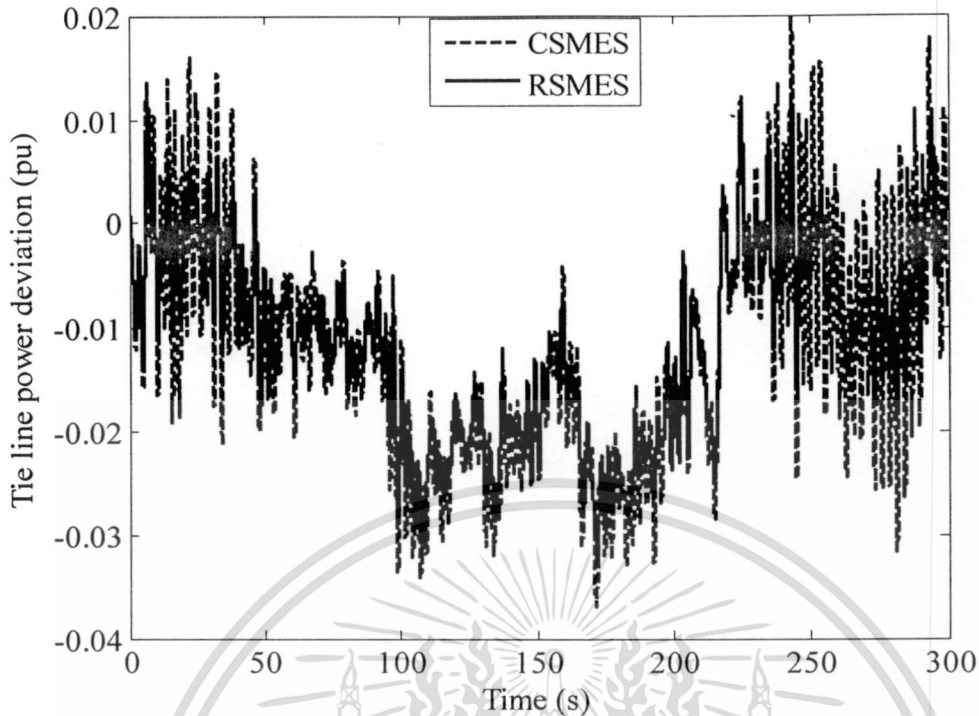


รูปที่ 7. ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกรณี PW2



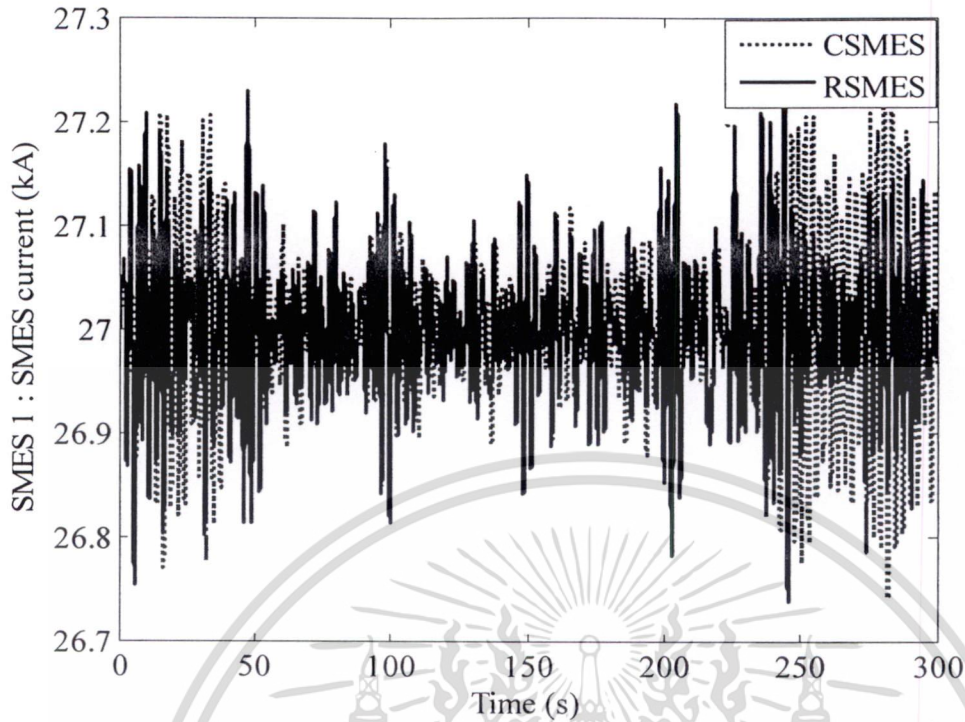
รูปที่ 8. ค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกรณี PW3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

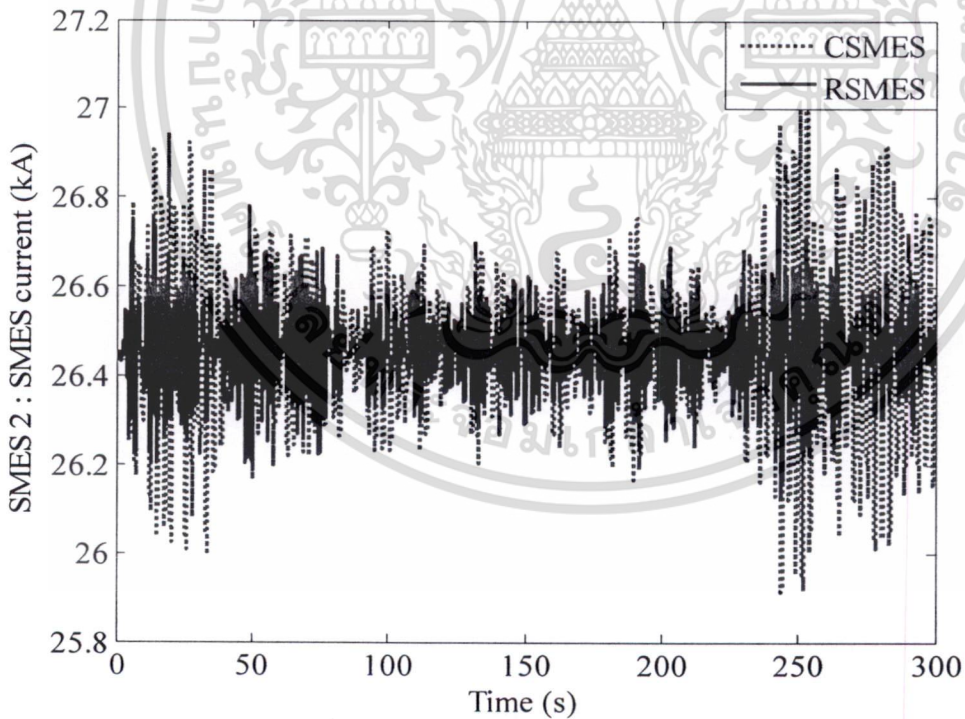


รูปที่ 9. การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายส่งกรณีที่ 3 และ PW1

รูปที่ 10 และ 11 แสดงกระแสในขดลวดของ SMES1 และ SMES2 ในกรณีที่ 3 ภายใต้ PW2 ตามลำดับ กระแสในขดลวดของ CSMES และ RSMES นั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับ SMES1 นั้น การเปลี่ยนแปลงของกระแสของ RSMES และ CSMES ไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม สำหรับ SMES2 การเปลี่ยนแปลงกระแสของ RSMES นั้นมากกว่าในกรณีของ CSMES แสดงให้เห็นว่า RSMES สามารถแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากับระบบได้อย่างเหมาะสมมากกว่า CSMES ดังนั้น ผลการทำเสถียรภาพของ RSMES จึงสูงกว่า CSMES



รูปที่ 10. กระแสไหลตลอดของ SMES1 ในกรณีที่ 3 ภายใต้ PW2



รูปที่ 11. กระแสไหลตลอดของ SMES2 ในกรณีที่ 3 ภายใต้ PW2

120326

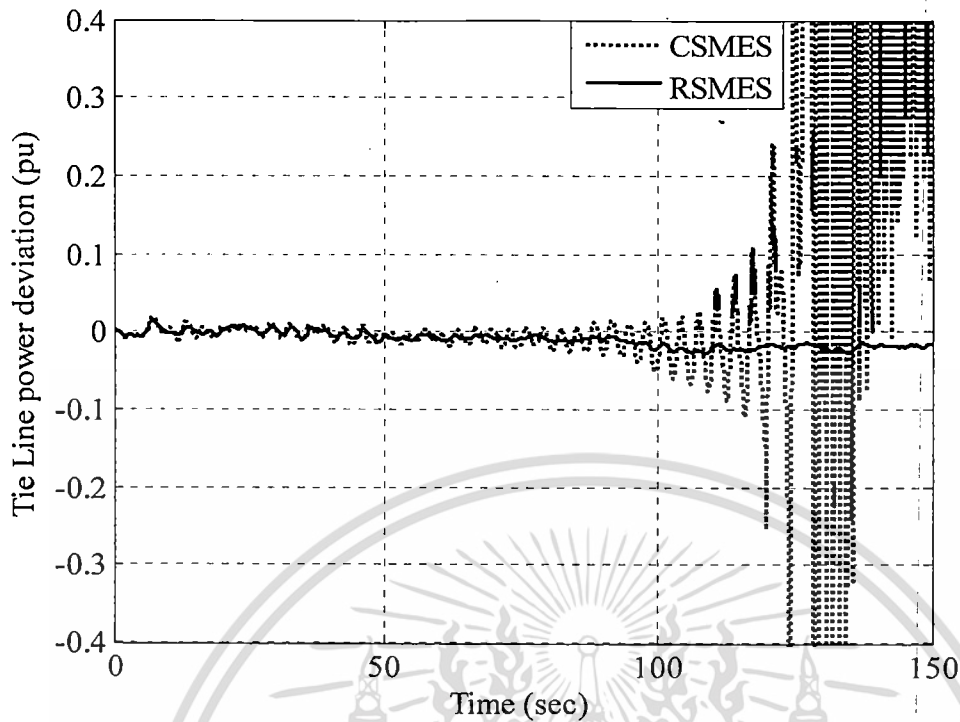
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรณงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของโหมดการแกว่งระหว่างพื้นที่เมื่อกำลังไฟฟ้าในสายส่ง P_{tie} เพิ่มขึ้น

P_{tie}	NO SMES		CSMES		RSMES	
1.50	-0.1170 ± j2.9301i	-0.155 ± 3.9021i	-0.2550 ± 3.9621i	-0.4022 ± 6.3104i	-0.3482 ± 3.8932i	-0.3812 ± 6.3232i
1.63	-0.1292 ± 2.7302i	-0.1437 ± 3.8008i	-0.3667 ± 3.0178i	-0.3345 ± 5.6906i	-0.3978 ± 3.3468i	-0.3556 ± 6.4322i
1.76	-0.1274 ± 2.7301i	-0.1443 ± 3.8116i	-0.3699 ± 3.0189i	-0.3310 ± 5.7345i	-0.3947 ± 3.3435i	-0.3419 ± 6.4719i
1.89	-0.1257 ± 2.7296i	-0.1487 ± 3.8349i	-0.3715 ± 3.0109i	-0.3271 ± 5.7739i	-0.3894 ± 3.3324i	-0.3277 ± 6.5049i
2.02	-0.1202 ± 2.7125i	-0.1479 ± 3.8327i	-0.3711 ± 2.9941i	-0.3228 ± 5.8085i	-0.3836 ± 3.3155i	-0.3142 ± 6.5302i
2.15	-0.1110 ± 2.6911i	-0.1465 ± 3.8273i	-0.3686 ± 2.9678i	-0.3180 ± 5.8384i	-0.3769 ± 3.2922i	-0.3017 ± 6.5482i
2.28	-0.0996 ± 2.6605i	-0.1450 ± 3.8166i	-0.3636 ± 2.9315i	-0.3127 ± 5.8631i	-0.3688 ± 3.2621i	-0.2902 ± 6.5592i
2.41	-0.0849 ± 2.6213i	-0.1425 ± 3.7984i	-0.3555 ± 2.8847i	-0.3069 ± 5.8827i	-0.3587 ± 3.2249i	-0.2795 ± 6.5638i
2.54	-0.0673 ± 2.5753i	-0.1396 ± 3.7754i	-0.3435 ± 2.8268i	-0.3005 ± 5.8969i	-0.3460 ± 3.1803i	-0.2696 ± 6.5619i
2.67	-0.0465 ± 2.5223i	-0.1359 ± 3.7468i	-0.3263 ± 2.7574i	-0.2934 ± 5.9055i	-0.3303 ± 3.1280i	-0.2598 ± 6.5535i
2.80	-0.0227 ± 2.4627i	-0.1312 ± 3.7126i	-0.3029 ± 2.6763i	-0.2856 ± 5.9080i	-0.3109 ± 3.0678i	-0.2493 ± 6.5389i
2.93	0.0288 ± 2.3549i	-0.1281 ± 3.6830i	-0.2719 ± 2.5835i	-0.2770 ± 5.9041i	-0.2873 ± 2.9992i	-0.2402 ± 6.5176i
3.06	0.0621 ± 2.2823i	-0.1206 ± 3.6542i	-0.2410 ± 2.4801i	-0.2676 ± 5.8939i	-0.2681 ± 2.9503i	-0.2296 ± 6.4915i
3.19	0.0832 ± 2.1998i	-0.1107 ± 3.5856i	-0.2155 ± 2.4025i	-0.2571 ± 5.8712i	-0.2492 ± 2.9032i	-0.2197 ± 6.4562i
3.32	0.0990 ± 2.1541i	-0.0978 ± 3.5151i	-0.1649 ± 2.2769i	-0.2458 ± 5.8444i	-0.2254 ± 2.8358i	-0.2132 ± 6.4341i
3.45	0.1358 ± 2.0541i	-0.0829 ± 3.4426i	-0.1217 ± 2.1727i	-0.2389 ± 5.8190i	-0.2010 ± 2.7712i	-0.2056 ± 6.4156i
3.58	0.1693 ± 1.9474i	-0.0663 ± 3.3773i	-0.0708 ± 2.0895i	-0.2302 ± 5.7772i	-0.1732 ± 2.6992i	-0.1981 ± 6.3801i
3.71	0.2050 ± 1.8235i	-0.0449 ± 3.2979i	-0.01018 ± 2.002i	-0.2203 ± 5.7405i	-0.1522 ± 2.6512i	-0.1908 ± 6.3561i
3.84	0.2394 ± 1.6787i	-0.0183 ± 3.2111i	0.0452 ± 1.9017i	-0.2100 ± 5.6915i	-0.1252 ± 2.5902i	-0.1862 ± 6.3373i
4.00	0.2725 ± 1.5020i	0.0143 ± 3.1161i	0.1164 ± 1.7868i	-0.1976 ± 5.6444i	-0.1021 ± 2.5504i	-0.1805 ± 6.3283i

เพื่อที่จะประเมินความคงทนของ CSMES และ RSMES ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะเฉพาะของ โหมดการแกว่งเมื่อเพิ่มค่า P_{tie} จาก 1.5 p.u. จนถึง 4.0 p.u. ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 เห็นว่า ที่ $P_{tie} \geq 3.84$ pu, CSMES สูญเสียสมรรถนะในการทำให้เสถียรภาพและไม่สามารถทำให้โหมดการแกว่งมีความเสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม RSMES นั้นทนทานต่อสภาวะการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สูงขนาดนี้ได้ RSMES สามารถทำให้โหมดการแกว่งมีความเสถียรได้

สุดท้ายนี้ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ $P_{tie} = 3.84$ p.u. ภายใต้ PW1 แสดงในรูปที่ 12 เห็นว่า ผลการจำลองทางเวลาสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะเฉพาะ CSMES ไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ระบบสูญเสียเสถียรภาพ ในขณะที่ RSMES นั้นสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมาก ผลการจำลองนี้ทำให้มั่นใจได้ว่า RSMES ซึ่งออกแบบโดยพิจารณาความไม่แน่นอนในระบบ นั้นมีความคงทนสูงกว่า CSMES อย่างมาก



รูปที่ 12. การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งภายใต้ PW1 เมื่อ $P_{tie} = 3.84$ p.u.

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนำเสนอวิธีการออกแบบ SMES แบบโรบัสต์ต่อความไม่แน่นอนในระบบ เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเนื่องมาจากแหล่งพลังงานลม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- ความไม่แน่นอนในระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่มีโครงสร้างเช่น ความไม่แน่นอนในค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ โครงสร้างของเน็ตเวิร์คเปลี่ยนไป การเป็นต้น นั้นสามารถแทนได้ด้วย Inverse Additive Model ข้อดีของแบบจำลองนี้คือไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของความไม่แน่นอนต่างๆ ในระบบ
- โดยใช้แนวคิดในการปรับปรุงขอบเขตเสถียรภาพของระบบแบบคงทน สามารถตั้งปัญหาการทำให้เหมาะสมของพารามิเตอร์ของ SMES ได้ โดยใช้ PSO พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ SMES สามารถได้มาอย่างอัตโนมัติ
- ผลการจำลองคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า SMES ที่ออกแบบมีสมรรถนะในการลดการแกว่งของการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่เนื่องจากพลังงานลม นอกจากนี้ SMES ที่ออกแบบยังมีคุณสมบัติความคงทนที่สูงต่อความไม่แน่นอนในระบบต่างๆ เช่น สภาวะการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สูง สภาวะกำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานลมรูปแบบต่างๆ เป็นต้น
- ตัวควบคุมที่นำเสนอ这不仅จะมีโครงสร้างเป็นตัวชดเชยอันดับหนึ่งและใช้สัญญาณอินพุตเดียวจึงง่ายต่อการนำไปใช้งานจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. N. Hinrichsen and P. J. Nolan, "Dynamics and stability of wind turbine generators, " *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, 1982, pp. 2640-2648.
- [2] J. G. Sloopweg and W. L. Kling, "The impact of large scale wind power generation on power system oscillations, " *Electric Power Systems Research*, Volume 67, Issue 1, October 2003, pp. 9-20.
- [3] A. Mendonca and J. A. P. Lopes, "Impact of large scale wind power integration on small signal stability," *Proc. of 2005 International Conference on Future Power Systems*.
- [4] P. M. Anderson and A. Bose, "Stability simulation of wind turbine system," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Pas-102, No. 12, 1983,3791-3795.
- [5] V. Akhmatov, H. Knudsen, A. H. Nielsen, J. K. Pedersen and N. K. Poulsen, "Modelling and transient stability of large wind farms," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol 25, 2003, pp. 123-144.
- [6] M. V. A. Nunes, J. A. Pecos Lopes, H. H. Zurn, U. H. Bezerra and R. G. Almeida, "Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional integrated in electrical grids, " *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 4, June 2004, pp. 692-701.
- [7] M. P. Pallson, T. Toftevaag, K. Uhlen, and J. O. G Tande, "Large-scale wind integration and voltage stability limits in regional networks," *Proc. of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 2, pp. 762-769.
- [8] Z. Fengquan, G. Joos and C. Abbey, "Voltage stability in weak connection wind farms," *Proc. of 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2, pp. 1483-1488.
- [9] I. Erlich, K. Rensch and F. Shewarega, "Impact of large power generation on frequency stability," " *Proc. of 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*.
- [10] Y. L. Abdel-Magid, Z. M. Al-Hamouz and J. M. Bakhshwain, "A variable-structure stabilizer for wind turbine generators," *Electric Power Systems Research*, Vol. 33, 1995, pp. 41-48.
- [11] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins, and G. Strbac, "A power system stabilizer for DFIG-based wind generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 2, 2006, pp. 763-772.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] D. Das, S. K. Aditya and D. P. Kothari, "Dynamics of diesel and wind turbine generators on an isolated power system, " *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 21, 1999, pp. 183-189.
- [13] B. Boukhezzer, L. Kupu, H. Siguerdidjane and M. Hand, "Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines," *Renewable Energy*, Vol. 31, 2007, pp. 1273-1287.
- [14] F. Jurado and J. R. Saenz, "An adaptive control scheme for biomass-based diesel-wind system," *Renewable Energy*, Vol. 28, 2003, pp. 45-57.
- [15] F. Jurado and J. R. Saenz, "Neuro-fuzzy control for autonomous wind-diesel systems using biomass," *Renewable Energy*, Vol 27, 2002, pp. 39-56.
- [16] E. S. Abdin and W. Xu, "Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 91-96.
- [17] T. Ahmed, E. Hiraki, M. Nakaoka and O. Noro, "Terminal voltage regulation characteristics by static var compensator for three-phase self-excited induction generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 4, July/August 2004, pp. 978-988."
- [18] Z. Saad-Saoud, M. L. Lisboa, J. B. Ekanayake, N. Jenkins and G. Strbac, "Application of STACOMs to wind farms," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 145, No. 5, 1998, pp. 511-516.
- [19] M. Molinas, S. Vazquez, T. Takaku, J. M. Carrasco, R. Shimada and T. Undeland, "Improvement of transient stability margin in power systems with integrated wind generation using a STATCOM: an experimental verification," *Proc. of 2005 International Conference on Future Power Systems*.
- [20] R.W. Boom and H. Perterson: "A superconducting energy storage for power systems", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.8, 1972, pp.701-703.
- [21] T. Ise, Y. Mitani, and K. Tsuji, "Simultaneous active and reactive power control of superconducting magnetic energy storage to improve power system dynamic performance", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, 1986, pp.143-150.
- [22] Technical Committee of the Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ), Japanese Power System Models, Online available at <http://www.iee.or.jp/pes/model/english/index.html>
- [23] N. Martin and L.T.G Lima: "Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillation in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

large power systems”, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.5, No.4, 1990, pp.1455-1469.

- [24] S. Dechanupaprittha, K. Hongesombut, M. Watanabe, Y. Mitani, and I. Ngamroo: “Stabilization of tie-line power flow by robust SMES controller for interconnected power system with wind farms”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.17, No.2, 2007, pp.2365-2368.
- [25] P. Gu, H.r. Petkov, M.M. Konstantinov, *Robust control design with MATLAB*, Springer, 2005, 14-20.
- [26] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” *Proc. IEEE International Conference Neural Networks*, Vol.1, 1995, pp.1942–1948.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

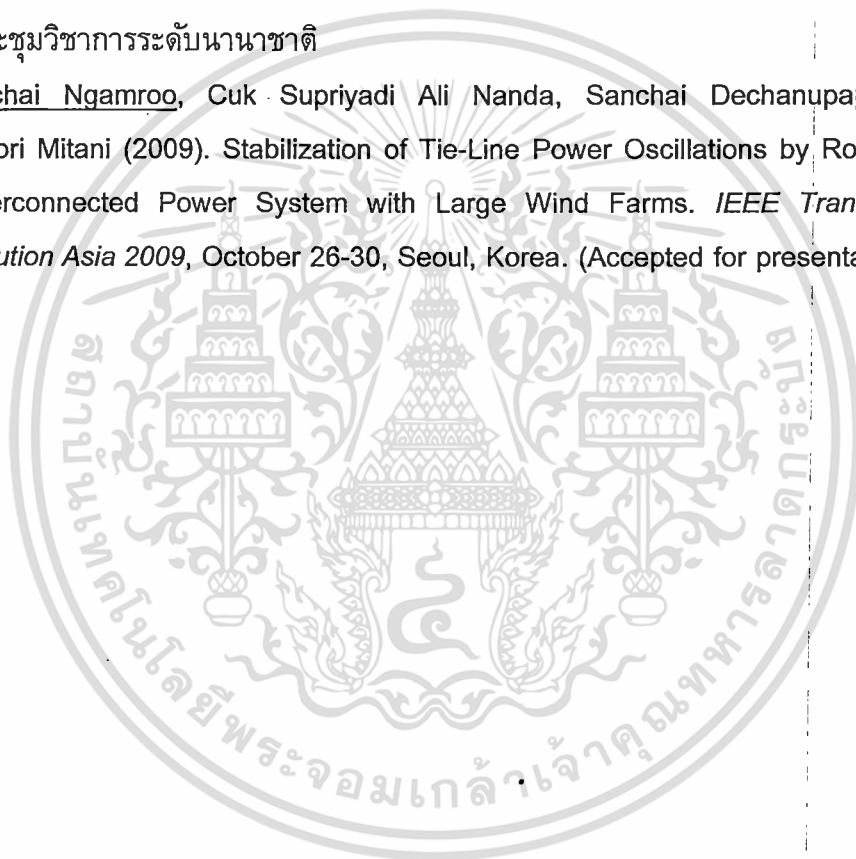
ผลการศึกษาวิจัยจากโครงการนี้ได้รับการตีพิมพ์ดังนี้

1. วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

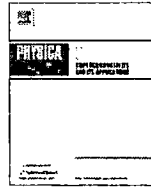
Issarachai Ngamroo, Cuk Supriyadi Ali Nanda, Sanchai Dechanupaprittha and Yasunori Mitani (2009). Power oscillation suppression by robust SMES in power system with large wind power penetration. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, Vol. 469, Issue 1, 1 January 2009, pp. 44-51. (Impact Factor 2008 = 0.74)

2. การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Issarachai Ngamroo, Cuk Supriyadi Ali Nanda, Sanchai Dechanupaprittha and Yasunori Mitani (2009). Stabilization of Tie-Line Power Oscillations by Robust SMES in Interconnected Power System with Large Wind Farms. *IEEE Transmission & Distribution Asia 2009*, October 26-30, Seoul, Korea. (Accepted for presentation)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Power oscillation suppression by robust SMES in power system with large wind power penetration

Ssarachai Ngamroo^{a,*}, A.N. Cuk Supriyadi^a, Sanchai Dechanupaprittha^b, Yasunori Mitani^b

^aElectrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
^bGraduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Fukuoka 804-8550, Japan

ARTICLE INFO

Article history:
 received 15 August 2008
 received in revised form 26 October 2008
 accepted 5 November 2008
 available online 24 November 2008

ACS:
 4.70.+p
 4.71.–b

Keywords:
 superconducting magnetic energy storage
 power system control
 robust control
 inverse additive perturbation
 wind farm

ABSTRACT

The large penetration of wind farm into interconnected power systems may cause the severe problem of tie-line power oscillations. To suppress power oscillations, the superconducting magnetic energy storage (SMES) which is able to control active and reactive powers simultaneously, can be applied. On the other hand, several generating and loading conditions, variation of system parameters, etc., cause uncertainties in the system. The SMES controller designed without considering system uncertainties may fail to suppress power oscillations. To enhance the robustness of SMES controller against system uncertainties, this paper proposes a robust control design of SMES by taking system uncertainties into account. The inverse additive perturbation is applied to represent the unstructured system uncertainties and included in power system modeling. The configuration of active and reactive power controllers is the first-order lead–lag compensator with single input feedback. To tune the controller parameters, the optimization problem is formulated based on the enhancement of robust stability margin. The particle swarm optimization is used to solve the problem and achieve the controller parameters. Simulation studies in the six-area interconnected power system with wind farms confirm the robustness of the proposed SMES under various operating conditions.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

At present, the penetration of wind power generations into power systems highly increases because of low impact to environment and infinite availability. Nevertheless, the wind power is unpredictable and intermittent in nature. The fluctuation of wind power generation may lead to a severe problem of tie-line power oscillations [1–4]. Additionally, the power oscillations due to wind power may violate the transmission capability margin and deteriorate the system stability [5,6].

To overcome this problem, a superconducting magnetic energy storage (SMES), which is able to supply and absorb active and reactive power simultaneously [7,8], can be applied. In the past, SMES has been used to solve many problems in power systems such as an improvement of power system dynamics [9,10], a frequency control in interconnected power systems [11,12], an enhancement of power quality [13], a stabilization of sub-synchronous oscillation in the turbine-generator [14], a load leveling [15], etc. On the other hand, various generating and loading conditions, wind power fluctuations, variation of system parameters and system nonlinearities, etc., result in unstructured system uncertainties.

The SMES controller designed without taking system uncertainties into account may fail to operate and stabilize the power system.

To improve the robustness of the SMES controller against system uncertainties, this paper focuses on a robust controller design of SMES using the inverse additive perturbation [16]. Unstructured system uncertainties are represented by the inverse additive perturbation model and included in the system modeling. The structure of active and reactive power controllers is the first-order lead–lag compensator. Controller parameters are optimized by particle swarm optimization (PSO) [17] based on the improvement of the robust stability margin of the control system. Simulation studies are carried out in the six-area interconnected power system with large wind farms. Simulation results under various operating conditions such as heavy line flow, light line flow and wind power fluctuations, confirm that the robustness of the proposed SMES is superior to that of the SMES designed without considering robustness.

2. Study system and modeling

A six-area interconnected power system in Fig. 1 is used as the study system. The area capacity ratio for areas 1–6 is 20:13.5:6:75:40:6.75:33 with a 1000 MVA base. Each area is represented by a 5-state transient model [18]. It is equipped with a sim-

* Corresponding author.
 E-mail address: ngamroo@gmail.com (I. Ngamroo).

Nomenclature

$K_P(s)$	SMES active power controller	K_{Vsm}	gain of SMES voltage controller
$K_Q(s)$	SMES reactive power controller	V_{t0}	initial value of a terminal bus voltage of a SMES unit (p.u.)
$K_{ism}(s)$	SMES coil current controller	V_{ts}	bus voltage of SMES (p.u.)
$K_V(s)$	SMES voltage controller	P_d	desired active power output of SMES (p.u.)
K_1	gain of active power controller	Q_d	desired reactive power output of SMES (p.u.)
K_2	gain of reactive power controller	AP	active power fraction
T_{11}, T_{12}	time constants of the active power controller (s)	AQ	reactive power fraction
T_{21}, T_{22}	time constants of the reactive power controller (s)	CONV	converter
ΔP_{tie}	active power deviation (p.u.)	T_c	time constant of converter (s)
ΔQ_{tie}	reactive power deviation (p.u.)	K_i	gain of SMES controller
K_P	proportional gain of PI controller	T_{ij}	time constant of SMES controller (s)
T_i	time constant of PI controller (s)	$\ \cdot \ _\infty$	infinite norm of transfer function
K_{sm}	gain of SMES coil controller	ζ	actual damping ratio of the dominant inter-area oscillation mode
I_{sm}	SMES coil current (p.u.)	ζ_{spec}	desired damping ratio of the dominant inter-area oscillation mode
I_{sm0}	initial value of SMES coil current (p.u.)	σ	actual real part of the eigenvalue
E_{out}	SMES energy output (J)	σ_{spec}	desired real part of the eigenvalue
L_{sm}	SMES coil inductance (H)	$K_{i,max}$	maximum gain of power controller
$I_{sm,base}$	SMES current base (A)	$K_{i,min}$	minimum gain of power controller
P_{sm}	SMES active power output (p.u.)	$T_{ij,max}$	maximum time constant
Q_{sm}	SMES reactive power output (p.u.)	$T_{ij,min}$	minimum time constant
$S_{sm,base}$	SMES MVA base		
V_{base}	system base voltage		
E_{sm}	energy stored in a SMES unit (J)		
E_{sm0}	initial energy stored in a SMES unit (J)		

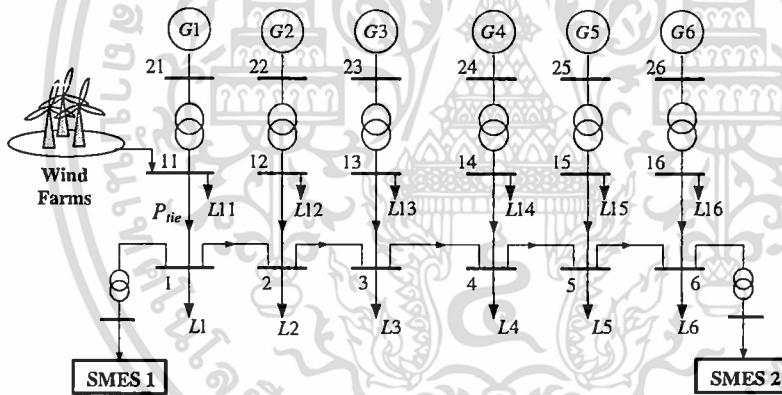


Fig. 1. Six-area interconnected power system with wind farms.

plified exciter and governor [18]. For the study purpose, the electric power is transferred from areas 1–6. The wind farm is located at bus 11 in area 1 with maximum generating capacity 450 MW. In this study, the wind farm is modeled by the random power source. Based on the residue method [19], the suitable locations of two SMESs are selected at bus 1 and bus 6. Each SMES has a specification of 800 MJ, 40 kA, 1000 MVA [19].

Fig. 2 shows the SMES model with simultaneous active and reactive power (P - Q) modulation control scheme [20]. In the model, K_P and $K_Q(s)$ are represented by

$$K_P(s) = K_1 \frac{(1 + T_{11}s)}{(1 + T_{12}s)} \quad (1)$$

$$K_Q(s) = K_2 \frac{(1 + T_{21}s)}{(1 + T_{22}s)} \quad (2)$$

The input signals of active and reactive power controllers of SMES1 and SMES2 are ΔP_{tie} and ΔQ_{tie} in a tie-line from bus 11 to bus 1 and from bus 16 to bus 6, respectively. In this paper, gains and time constants of both controllers are optimized by the proposed method.

As shown in Fig. 2, $K_{ism}(s)$ can be represented by

$$K_{ism}(s) = \left(K_P + \frac{1}{T_I s} \right) K_{sm} (I_{sm} - I_{sm0}) \quad (3)$$

In the SMES model, the effect of I_{sm} is considered, since the dynamic behavior of I_{sm} significantly affects the overall performance of SMES. In practice, I_{sm} is not allowed to reach zero to prevent the possibility of discontinuous conduction under unexpected disturbances. On the other hand, high I_{sm} which is above the maximum allowable limit, may lead to loss of superconducting properties. Based on the hardware operational constraints, the lower and upper coil current limits are considered and assigned as $0.30I_{sm0}$ and $1.38I_{sm0}$, respectively. Here, I_{sm} can be calculated from the PEI block which has a relation as

$$I_{sm} = \sqrt{I_{sm0}^2 - \frac{2E_{out}}{L_{sm}I_{sm,base}^2}} \quad (4)$$

$$E_{out} = \int P_{sm} dt \cdot S_{sm,base} \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

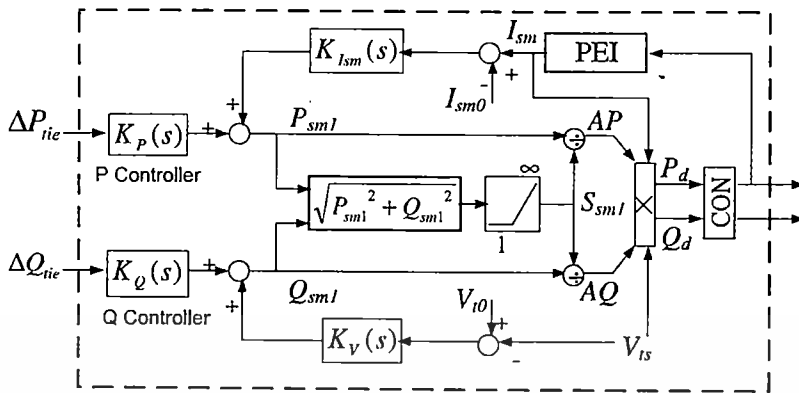


Fig. 2. SMES with active and reactive (P-Q) controllers.

Subsequently, the energy stored in a SMES unit and the initial energy stored can be determined by

$$E_{sm} = E_{sm0} - E_{out} \tag{6}$$

$$I_{sm0} = 0.5L_{sm}I_{sm0}^2 \cdot I_{sm,base}^2 \tag{7}$$

Besides, $K_V(s)$ can be represented by

$$K_V(s) = K_{Vsm}(V_{t0} - V_{ts}) \tag{8}$$

The desired active and reactive power outputs of SMES can be expressed as

$$P_d = V_{ts}I_{sm}AP \tag{9}$$

$$Q_d = V_{ts}I_{sm}AQ \tag{10}$$

From Fig. 2, P_{sm} and Q_{sm} are the output of the SMES controlled converter (CONV). The converter transfer function can be represented by the first-order time-lag compensator as

$$CONV = 1/(1 + T_c s) \tag{11}$$

Proposed robust control design

To improve the robustness of active and reactive power controllers against system uncertainties, the inverse additive perturbation [16] is applied to formulate the optimization problem of controller parameters.

The feedback control system with inverse additive perturbation is depicted in Fig. 3. G is the nominal plant. K is the designed controller. System uncertainties such as various generating and loading conditions, variation of system parameters and nonlinearities, etc., are represented by Δ_A which is the unstructured additive

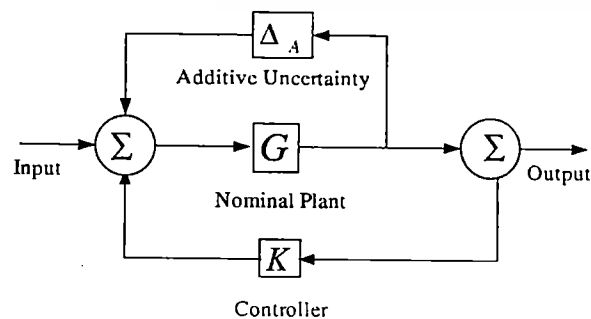


Fig. 3. Feedback system with inverse additive perturbation.

uncertainty model. Based on the small gain theorem, for a stable additive uncertainty Δ_A , the system is stable if

$$|\Delta_A G/(1 - GK)| < 1 \tag{12}$$

Then,

$$|\Delta_A| < 1/|G/(1 - GK)| \tag{13}$$

The right hand side of (13) implies the size of system uncertainties or the robust stability margin against system uncertainties. By minimizing $|G/(1 - GK)|$, the robust stability margin of the closed-loop system is maximum. This concept can be applied as the optimization problem as

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & J = \|G/(1 - GK)\|_{\infty} \\ \text{Subject to } & \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \geq \sigma_{spec}, K_{i,min} \leq K_i \leq K_{i,max} \\ & T_{ij,min} \leq T_{ij} \leq T_{ij,max}, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2 \end{aligned} \tag{14}$$

ζ_{spec} and σ_{spec} are desired damping ratio and desired real part of the eigenvalue corresponding to the dominant inter-area oscillation mode, respectively. The objective of the optimization is not only to improve the robustness of the SMES but also to move the dominant inter-area oscillation modes to the D-stability region as shown in Fig. 4. This optimization problem is solved by PSO [17].

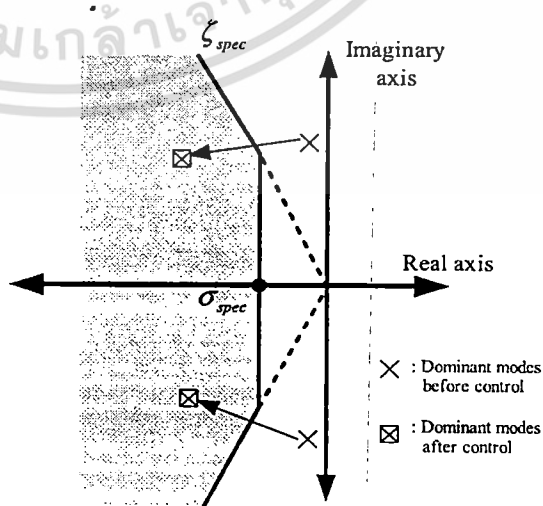


Fig. 4. D-stability region.

Table 1
SMES parameters.

Capacity: 800 MJ, 40 kA, 1000 MVA	
K_p : 40.0	I_{sm0} : 0.675 p.u.
T_f : 0.40	L_{sm} : 10.0 H
K_{sm} : 1.00	$S_{sm,base}$: 1000 MVA
K_{vsm} : 1.00	V_{base} : 25 kV
T_c : 0.01	V_{t0} : 0.95 p.u.

4. Simulation studies

The parameters of SMES model in Fig. 2 are given in Table 1. For control parameters optimization of SMES by PSO, the design specification and ranges of search parameters are set as follows: $\zeta_{spec} = 0.04$, $\sigma_{spec} = -0.2$, $K_i \in [1 \ 10]$, $T_{ij} \in [0.0001 \ 1]$, number of particles = 24, maximum iterations = 100, acceleration factors = 2, and the inertia weights $\omega_{max} = 0.9$ and $\omega_{min} = 0.4$. First, the linearized power system is formulated based on the normal operating condition (Case 2) in Table 2. By optimizing control parameters in the linearized system using PSO, the active and reactive power controllers of the robust SMES which is referred to as "RSMES", are obtained as

RSMES1:

$$K_{P1}(s) = 5.788 \frac{(0.7924s + 1)}{(0.1845s + 1)} \tag{15}$$

$$K_{Q1}(s) = 4.492 \frac{(0.7828s + 1)}{(0.2346s + 1)} \tag{16}$$

RSMES2:

$$K_{P2}(s) = 3.452 \frac{(0.8429s + 1)}{(0.1775s + 1)} \tag{17}$$

$$K_{Q2}(s) = 7.229 \frac{(0.7589s + 1)}{(0.2564s + 1)} \tag{18}$$

The robustness of RSMES is compared with the SMES designed without considering the robustness which is referred as "CSMES". CSMES is designed to yield the damping ratio and the real part of the dominant inter-area mode same as the design specification of RSMES. Based on [21], the optimization problem of CSMES is formulated as

$$\text{Minimize } J = \sum_{\zeta < \zeta_{spec}} |\zeta_{spec} - \zeta| + \sum_{\sigma \geq \sigma_{spec}} |\sigma_{spec} - \sigma| \tag{19}$$

$$\text{Subject to } K_{i,min} \leq K_i \leq K_{i,max}$$

$$T_{ij,min} \leq T_{ij} \leq T_{ij,max}, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2$$

Note that the objective of the optimization (19) is to move the dominant inter-area oscillation modes to the D-stability region as shown in Fig. 4. Solving (19) by PSO, the active and reactive power controllers of CSMES are obtained as

CSMES1:

$$K_{P1}(s) = 5.724 \frac{(0.2898s + 1)}{(0.1908s + 1)} \tag{20}$$

$$K_{Q1}(s) = 5.724 \frac{(0.9689s + 1)}{(0.7901s + 1)} \tag{21}$$

CSMES2:

$$K_{P2}(s) = 4.823 \frac{(0.8974s + 1)}{(0.5883s + 1)} \tag{22}$$

$$K_{Q2}(s) = 7.353 \frac{(0.7342s + 1)}{(0.4901s + 1)} \tag{23}$$

Table 3 shows the eigenvalues and damping ratios of two dominant inter-area oscillation modes for three case studies. Without SMES, the damping ratios of two oscillation modes are very poor in cases 1 and 2 and become unstable in case 3 with heavy tie-line flow. On the other hand, the damping ratio and the real part of two oscillation modes are achieved by both CSMES and RSMES in all cases.

Table 2
Case studies (MVA base = 1000 MVA).

Generation	1. LL ($P_{tie} = 1.5$) (p.u.)	2. NOC ($P_{tie} = 2.3$) (p.u.)	3. HL ($P_{tie} = 3.0$) (p.u.)
G1	$P_G = 8, L1 = 1.5, L11 = 5 + 0.5i$	$P_G = 12, L1 = 2.2, L11 = 7 + 0.7i$	$P_G = 16, L1 = 3.0, L11 = 10 + 1.0i$
G2	$P_G = 5.4, L2 = 1.0, L12 = 4.2 + 0.4i$	$P_G = 8.1, L2 = 1.5, L12 = 6.3 + 0.6i$	$P_G = 10.8, L2 = 2.0, L12 = 8.4 + 0.8i$
G3	$P_G = 2.7, L3 = 0.6, L13 = 2.1 + 0.2i$	$P_G = 4.05, L3 = 0.9, L13 = 3.2 + 0.3i$	$P_G = 5.4, L3 = 1.2, L13 = 4.2 + 0.4i$
G4	$P_G = 16, L4 = 3.0, L14 = 13 + 1.3i$	$P_G = 24, L4 = 4.5, L14 = 18.5 + 1.8i$	$P_G = 32, L4 = 6, L14 = 26 + 2.6i$
G5	$P_G = 2.7, L5 = 0.6, L15 = 2.1 + 0.2i$	$P_G = 4.05, L5 = 0.9, L15 = 3.2 + 0.3i$	$P_G = 5.4, L5 = 1.2, L15 = 4.2 + 0.4i$
G6	$P_G = 11.55, L6 = 3.0, L16 = 10.2 + 1.0i$	$P_G = 16.4, L6 = 4.5, L16 = 15.3 + 1.5i$	$P_G = 23.2, L6 = 6.0, L16 = 20.6 + 2.0i$

NOC: normal operating condition, LL: light load, HL: heavy load, P_G : generation (p.u.), L_i : load at bus i (p.u.), base: 1000 MVA.

Table 3
Eigenvalues of dominant inter-area oscillation modes.

Case	No SMES	CSMES	RSMES
Case 1 (LL)	$-0.155 \pm 3.90i$	$-0.402 \pm 6.31i$	$-0.381 \pm 6.30i$
	$\zeta = 0.0396$	$\zeta = 0.0635$	$\zeta = 0.0602$
	$-0.117 \pm 2.93i$	-0.255 ± 3.96	$-0.348 \pm 3.89i$
	$\zeta = 0.0400$	$\zeta = 0.0644$	$\zeta = 0.0892$
Case 2 (NOC)	$-0.104 \pm 3.679i$	$-0.321 \pm 6.65i$	$-0.279 \pm 6.63i$
	$\zeta = 0.028$	$\zeta = 0.0481$	$\zeta = 0.042$
	$-0.074 \pm 2.713i$	$-0.218 \pm 3.85i$	$-0.369 \pm 3.78i$
	$\zeta = 0.027$	$\zeta = 0.0567$	$\zeta = 0.097$
Case 3 (HL)	$-0.0361 \pm 3.413i$	$-0.290 \pm 6.81i$	$-0.233 \pm 6.76i$
	$\zeta = 0.011$	$\zeta = 0.0425$	$\zeta = 0.0345$
	$0.1001 \pm 2.387i$	$-0.235 \pm 3.76i$	$-0.456 \pm 3.81i$
	$\zeta = -0.040$	$\zeta = 0.0624$	$\zeta = 0.119$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

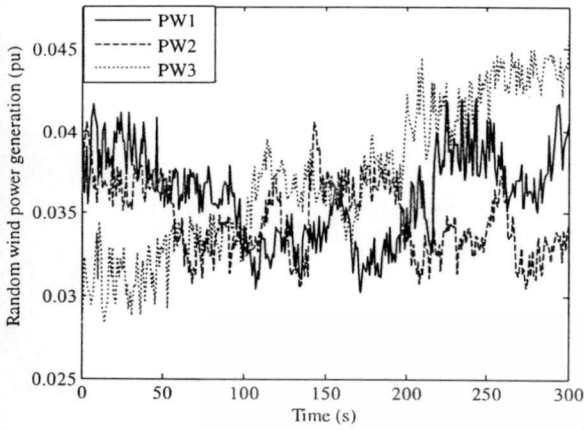


Fig. 5. Wind power generations.

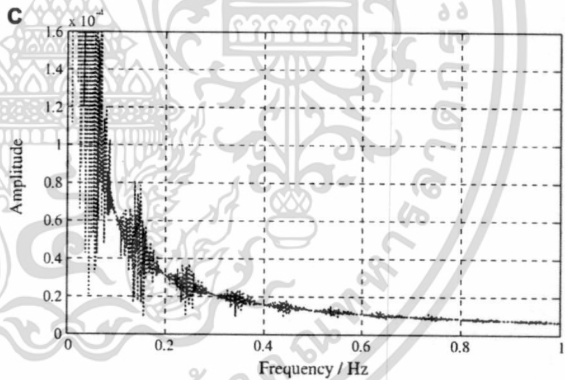
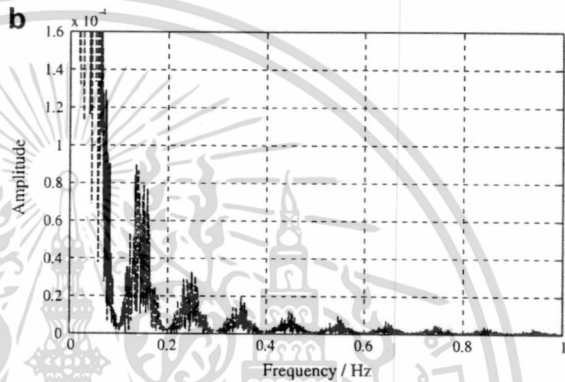
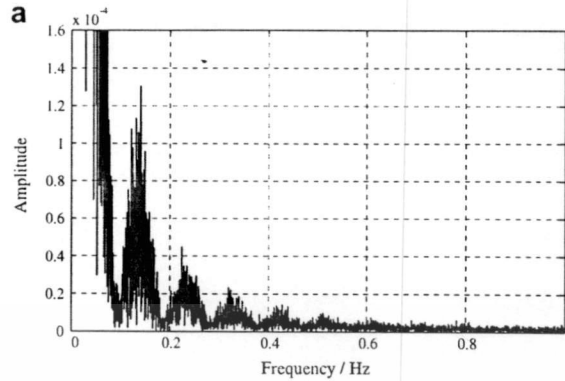


Fig. 6. Frequency component of wind patterns: (a) PW1; (b) PW2 and (c) PW3.

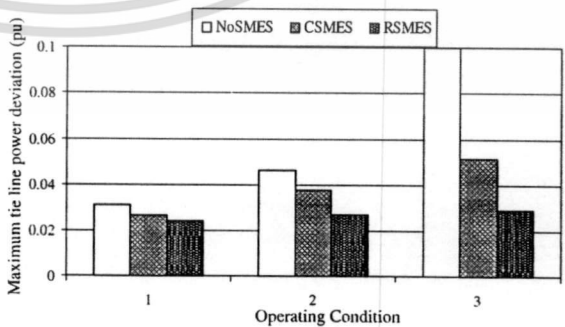


Fig. 7. Maximum tie-line power deviation in case of wind power PW1.

Next, nonlinear simulations of three case studies in Table 2 are carried out under three patterns of wind power generations [PW1], [PW2] and [PW3] as depicted in Fig. 5. Each pattern of wind power is injected to bus 11. To show the frequency components of wind patterns, Fast Fourier Transform (FFT) is applied. As a result, the frequency components of each wind pattern can be shown in Fig. 6. It can be observed that the frequency components of all wind patterns are dominantly in the low frequency range which is in the same range of inter-area power oscillation (0.2–0.8 Hz). As a result, the power fluctuation from wind farms may activate the inter-area oscillation modes with weak damping and cause severe oscillation.

Figs. 7–9 show the comparison of the maximum tie-line power deviation (P_{tie}) in case of PW1, PW2 and PW3, respectively. Without SMES, the maximum power deviation is very large especially in case 3. In contrast, the maximum power deviation is effectively suppressed by either CSMES or RSMES. However, CSMES is quite sensitive to operating conditions in cases 2 and 3. The maximum power deviation highly increases in cases 2 and 3. On the other hand, RSMES is very robust to any operating condition and wind pattern. The maximum power deviation rarely changes. Fig. 10 shows tie-line power deviation of case 3 with wind PW1. Without SMES, since one dominant mode is unstable as shown in Table 3, the tie-line power gradually increases and eventually diverges (not shown here). On the contrary, the power fluctuation is significantly alleviated by SMES. Nevertheless, RSMES provides more damping effects than CSMES. These results signify that the robust stabilizing effect of RSMES against wind power fluctuations is much superior to that of CSMES.

Next, the frequency components of tie-line power deviations are analyzed by FFT in case of wind power PW2. Fig. 11 shows the comparison FFT results of tie-line power deviation in case 3 with wind power PW2. In the left figure, the amplitude of dominant frequency in case of No SMES is much higher than those of CSMES and RSMES. This implies that the amplitude of tie-line power deviation is very high and severe. The right figure shows the enlarged amplitude of dominant frequency. Clearly, the RSMES is able to reduce the amplitude significantly in comparison to the CSMES.

To evaluate the robustness of SMES, the peak amplitude of FFT result of tie-line power deviation under three operating conditions is considered. Figs. 12–14 show the comparison of the peak amplitude of FFT result of tie-line power deviation in cases PW1, PW2 and PW3, respectively. Without SMES, the peak frequency characteristic is very large especially in case 3. In contrast, the peak frequency characteristic is effectively suppressed by either CSMES

or RSMES. However, CSMES is quite sensitive to operating conditions in cases 2 and 3. The peak frequency characteristic highly in-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

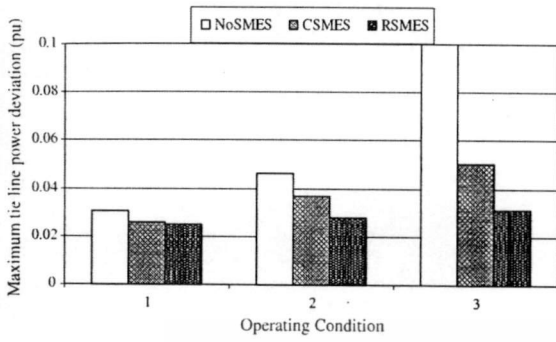


Fig. 8. Maximum tie-line power deviation in case of wind power PW2.

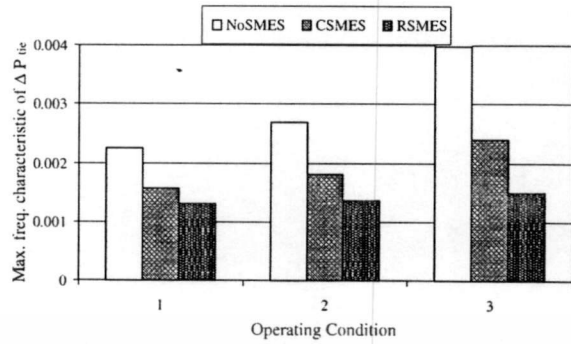


Fig. 12. Peak amplitude of FFT result of tie-line power deviation for PW1.

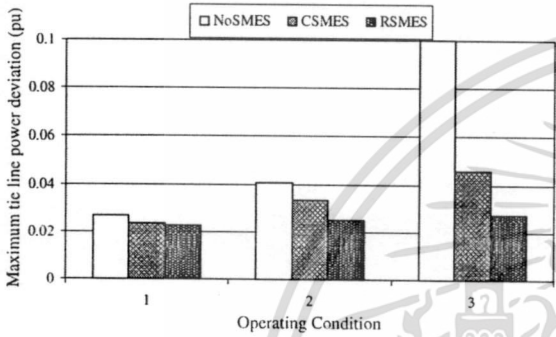


Fig. 9. Maximum tie-line power deviation in case of wind power PW3.

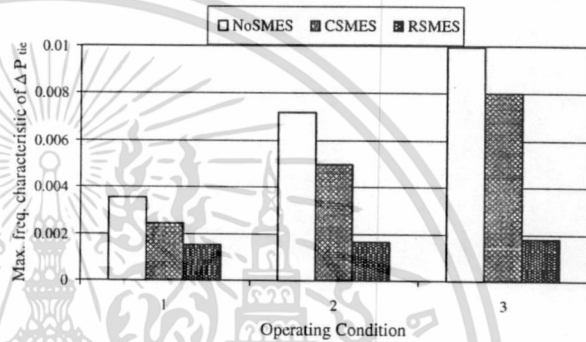


Fig. 13. Peak amplitude of FFT result of tie-line power deviation for PW2.

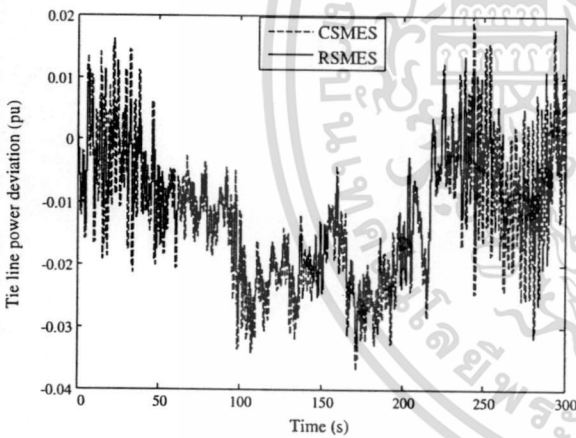


Fig. 10. Tie-line power deviation in case 3 with wind power PW1.

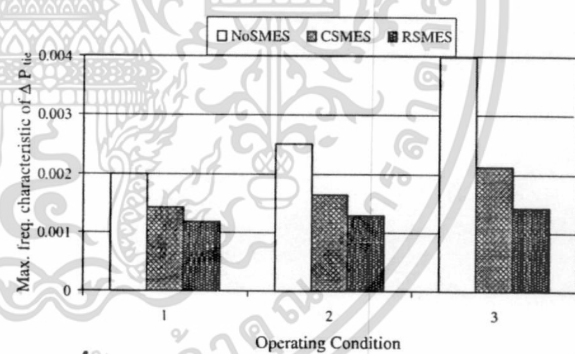


Fig. 14. Peak amplitude of FFT result of tie-line power deviation for PW3.

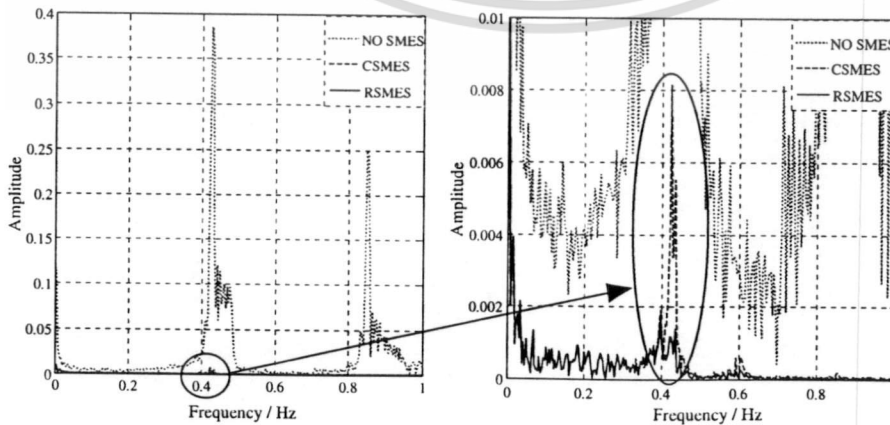


Fig. 11. FFT result of frequency components of tie-line power deviation with PW2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

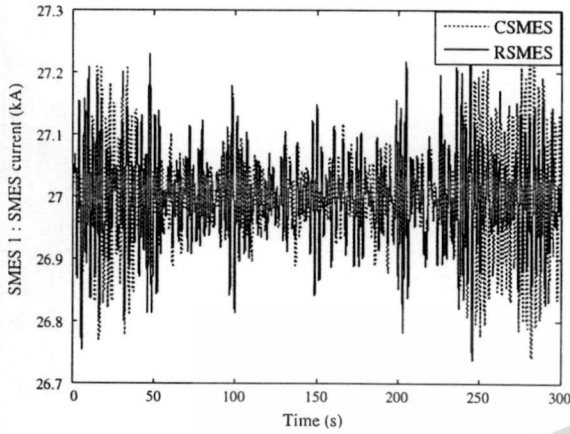


Fig. 15. SMES1 coil current in case 3 with wind power PW2.

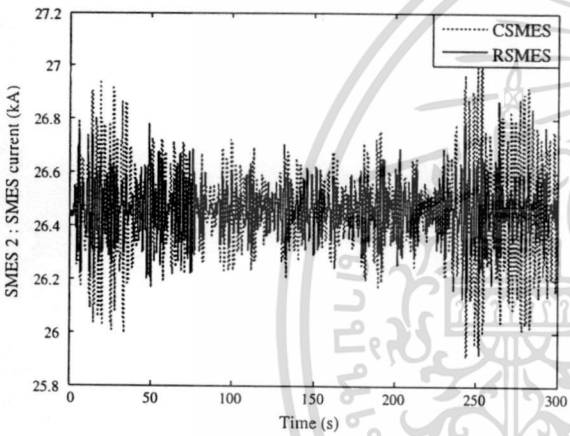


Fig. 16. SMES2 coil current in case 3 with wind power PW2.

The coil currents of SMES1 and SMES2 in case 3 with wind power PW2 are shown in Figs. 15 and 16, respectively. Both coil currents of CSMES and RSMES can properly remain within the allowable limits. For SMES1, the current fluctuation of RSMES is almost the same as that of CSMES. However, in case of SMES2, the current fluctuation of RSMES is much lower than that in case of CSMES. This indicates that RSMES can appropriately supply and receive electrical energy with power system. Accordingly, the stabilizing effect of tie-line power flow by RSMES is superior to that of CSMES.

To evaluate the robustness of both CSMES and RSMES, the eigenvalue analysis is carried out when P_{tie} is varied from 1.5 p.u. to 4.0 p.u. as shown in Table 4. Not only the design operating condition, CSMES is able to stabilize the dominant modes at a wide range of operating conditions. Nevertheless, at the very high power flow condition $P_{tie} \geq 3.84$ p.u., CSMES which is designed without considering robustness, loses stabilizing effect. It can not stabilize the oscillation mode anymore. On the other hand, RSMES is very robust to this condition. It can robustly stabilize both dominant modes.

Finally, to investigate the eigenvalue result, nonlinear simulation with wind power PW1 when $P_{tie} = 3.84$ p.u. is performed and shown in Fig. 17. Clearly, simulation result is consistent with

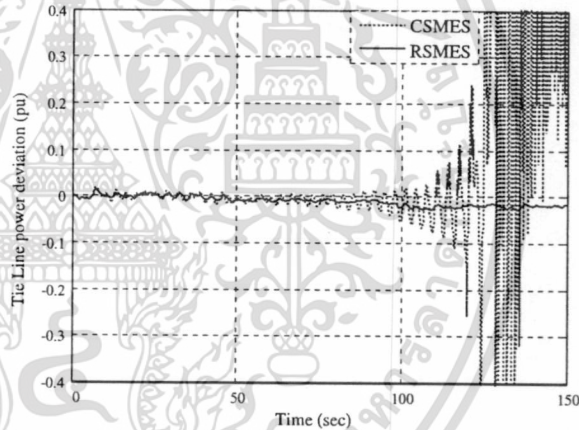


Fig. 17. Tie-line power deviation with wind power PW1 when $P_{tie} = 3.84$ p.u.

increases in cases 2 and 3. On the other hand, RSMES is very robust to any operating condition and wind pattern. The peak frequency characteristic rarely changes.

Table 4

Change in inter-area oscillation modes again variation of P_{tie} .

P_{tie}	No SMES		CSMES		RSMES	
1.50	-0.1170 + j2.9301i	-0.155 ± 3.9021i	-0.2550 ± 3.9621i	-0.4022 ± 6.3104i	-0.3482 ± 3.8932i	-0.3812 ± 6.3232i
1.63	-0.1292 + 2.7302i	-0.1437 + 3.8008i	-0.3667 + 3.0178i	-0.3345 + 5.6906i	-0.3978 + 3.3468i	-0.3556 + 6.4322i
1.76	-0.1274 + 2.7301i	-0.1443 + 3.8116i	-0.3699 + 3.0189i	-0.3310 + 5.7345i	-0.3947 + 3.3435i	-0.3419 + 6.4719i
1.89	-0.1257 + 2.7296i	-0.1487 + 3.8349i	-0.3715 + 3.0109i	-0.3271 + 5.7739i	-0.3894 + 3.3324i	-0.3277 + 6.5049i
2.02	-0.1202 + 2.7125i	-0.1479 + 3.8327i	-0.3711 + 2.9941i	-0.3228 + 5.8085i	-0.3836 + 3.3155i	-0.3142 + 6.5302i
2.15	-0.1110 + 2.6911i	-0.1465 + 3.8273i	-0.3686 + 2.9678i	-0.3180 + 5.8384i	-0.3769 + 3.2922i	-0.3017 + 6.5482i
2.28	-0.0996 + 2.6605i	-0.1450 + 3.8166i	-0.3636 + 2.9315i	-0.3127 + 5.8631i	-0.3688 + 3.2621i	-0.2902 + 6.5592i
2.41	-0.0849 + 2.6213i	-0.1425 + 3.7984i	-0.3555 + 2.8847i	-0.3069 + 5.8827i	-0.3587 + 3.2249i	-0.2795 + 6.5638i
2.54	-0.0673 + 2.5753i	-0.1396 + 3.7754i	-0.3435 + 2.8268i	-0.3005 + 5.8969i	-0.3460 + 3.1803i	-0.2696 + 6.5619i
2.67	-0.0465 + 2.5223i	-0.1359 + 3.7468i	-0.3263 + 2.7574i	-0.2934 + 5.9055i	-0.3303 + 3.1280i	-0.2598 + 6.5535i
2.80	-0.0227 + 2.4627i	-0.1312 + 3.7126i	-0.3029 + 2.6763i	-0.2856 + 5.9080i	-0.3109 + 3.0678i	-0.2493 + 6.5389i
2.93	0.0288 + 2.3549i	-0.1281 + 3.6830i	-0.2719 + 2.5835i	-0.2770 + 5.9041i	-0.2873 + 2.9992i	-0.2402 + 6.5176i
3.06	0.0621 + 2.2823i	-0.1206 + 3.6542i	-0.2410 + 2.4801i	-0.2676 + 5.8939i	-0.2681 + 2.9503i	-0.2296 + 6.4915i
3.19	0.0832 + 2.1998i	-0.1107 + 3.5856i	-0.2155 + 2.4025i	-0.2571 + 5.8712i	-0.2492 + 2.9032i	-0.2197 + 6.4562i
3.32	0.0990 + 2.1541i	-0.0978 + 3.5151i	-0.1649 + 2.2769i	-0.2458 + 5.8444i	-0.2254 + 2.8358i	-0.2132 + 6.4341i
3.45	0.1358 + 2.0541i	-0.0829 + 3.4426i	-0.1217 + 2.1727i	-0.2389 + 5.8190i	-0.2010 + 2.7712i	-0.2056 + 6.4156i
3.58	0.1693 + 1.9474i	-0.0663 + 3.3773i	-0.0708 + 2.0895i	-0.2302 + 5.7772i	-0.1732 + 2.6992i	-0.1981 + 6.3801i
3.71	0.2050 + 1.8235i	-0.0449 + 3.2979i	-0.01018 + 2.002i	-0.2203 + 5.7405i	-0.1522 + 2.6512i	-0.1908 + 6.3561i
3.84	0.2394 + 1.6787i	-0.0183 + 3.2111i	0.0452 + 1.9017i	-0.2100 + 5.6915i	-0.1252 + 2.5902i	-0.1862 + 6.3373i
4.00	0.2725 + 1.5020i	0.0143 + 3.1161i	0.1164 + 1.7868i	-0.1976 + 5.6444i	-0.1021 + 2.5504i	-0.1805 + 6.3283i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

eigenvalue result. CSMES is not capable of damping the tie-line oscillation while RSMES can significantly alleviate the oscillation. These results confirm that the RSMES designed with considering system uncertainties is much superior to the CSMES in terms of robustness.

5. Conclusions

This paper presents a robust SMES controller design based on inverse additive perturbation in interconnected power systems with wind farms. To improve the robustness of the SMES controller against system uncertainties, the unstructured system uncertainties represented by inverse additive perturbation have been included in the system modeling. The configuration of active and reactive power controllers is the practical first-order lead/lag compensator with single input. Control parameters of power controllers are optimized based on the enhancement of the robust stability margin. Simulation results in the six-area interconnected power system with wind farms confirm that the robustness of the proposed SMES under various situations such as heavy line flow, light line flow and wind power fluctuations is much superior to that of the SMES designed without considering robustness.

Acknowledgement

This work was supported by the Thailand Research Fund under the Basic Research Grant No. BRG5080019.

References

- [1] S.A. Lone, M.U. Mufti, *J. Power Sources* 163 (2006) 604–605.
- [2] J.G. Sootweg, W.L. Kling, *Elect. Power Syst. Res.* 67 (2003) 9–20.
- [3] R.D. Fernández, R.J. Mantz, P.E. Battaio, *Renew. Energy* 32 (2007) 1676–1688.
- [4] R.D. Fernandez, P.E. Battaio, R.J. Mantz, *Int. J. Hydrogen Energy* 33 (2008) 3543–3548.
- [5] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [6] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, *Embedded generation*, IEE Power Energy Series, vol. 31, 2000.
- [7] R.W. Boom, H. Perterson, *IEEE Trans. Magn.* 8 (1972) 701–703.
- [8] H.J. Boenig, J.F. Hauer, *IEEE Trans. Power Appl. Syst.* 10 (1985) 302–309.
- [9] M.G. Rabbani, J.B.X. Devotta, S. Elangovan, *Energy Convers. Manage.* 39 (1998) 931–942.
- [10] J.B.X. Devotta, M.G. Rabbani, *Energy Convers. Manage.* 41 (2000) 493–504.
- [11] S.C. Tripathy, *Energy Convers. Manage.* 38 (1997) 919–930.
- [12] I. Ngamroo, *Energy Convers. Manage.* 46 (2005) 3060–3090.
- [13] X. Chu, X. Jiang, Y. Lai, X. Wu, W. Liu, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 11 (2001) 1769–1772.
- [14] J.B.X. Devotta, M.G. Rabbani, S. Elangovan, *Energy Convers. Manage.* 40 (1999) 23–37.
- [15] M.K. Abdelsalam, R.W. Boom, H.A. Perterson, *IEEE Trans. Magn.* 23 (1987) 3275–3277.
- [16] P. Gu, H.r. Petkov, M.M. Konstantinov, *Robust control design with MATLAB*, Springer, 2005. pp. 14–20.
- [17] J. Kennedy, R.C. Eberhart, in: *IEEE International Conference on Neural Network*, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948.
- [18] J. Machowski, J. Bialek, J.R. Bumby, *Power System Dynamics and Stability*, John Wiley, 1997. pp. 346–350.
- [19] N. Martin, L.T.G Lima, *IEEE Trans. Power Syst.* 5 (1990) 1455–1469.
- [20] S. Dechanupaprittha, K. Hongesombut, M. Watanabe, Y. Mitani, I. Ngamroo, *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.* 9 (2008).
- [21] Y.L. Abdel-Magid, M.A. Abido, *IEEE Trans. Power Syst.* 18 (2003) 1125–1132.

Program

* The Program may be modified before the final version become available.

Date/Time	Schedule	Room	
Oct. 26 (Mon.)	17:00-18:00	Registration	
	18:00-20:00	Welcome Reception	
Oct. 27 (Thu.)	09:30-09:50	Registration	
	10:00-12:00	Opening Ceremony & Keynote Speech	
	12:00-13:30	Lunch	
	14:00-15:00	Plenary Session	
	15:00-16:00	Special Session I - Advanced Data Mining Techniques for Power System Operation and Planning	
	16:00-18:00	Poster Session	
Oct. 28 (Wed.)	07:30-08:30	Author's Breakfast	
	10:00-12:00	Oral Session - Application Software for Power Systems & Cyber Security - Distributed Generation & Measurement and Control Systems & SCADA - Integration of Wind Generation and Other Renewables - Power Market	
		Lunch	
		13:30-15:40	Special Session II - Micro grid and Power Quality Enhancement
		16:00-18:00	Poster Session
	07:30-08:30	Author's Breakfast	
Oct. 29 (Thu.)	10:00-12:00	Oral Session - Power Quality Issues in Distribution Systems - Protective Relaying & Substation and Distribution Automation - System Reliability and Security & Safety, Maintainance, and Operation - Smart grid & Other Related Areas	
		Lunch	
		13:30-15:45	Oral Session - System Stability and Control - Transformers, Circuit Breaker, Cables, Insulators, Switchgear, Fuses, Towers, Poles and Conductors - Transmission and Distribution System Planning and Implementation
		15:45-17:00	Special Session III - Power IT
18:00-20:30	Banquet		
Oct. 30 (Fri.)	13:30-18:00	Technical Tour	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYSTEM STABILITY AND CONTROL

Tuesday, 27 October; 4:00 PM-6:00 PM

Room 208

Chair:

PAPER AND AUTHORS

- **D20090222-24, A Study on Load Frequency Control Combining a PID controller and a Disturbance Observer**
 - ✓ S. Shibasaki, Waseda University
 - ✓ H. Ohnishi, Waseda University
 - ✓ S. Iwamoto, Waseda University
- **D20090227-53, Interarea-oscillation Transient Stability ATC Calculation Based on Single Machine Equivalent**
 - ✓ S. Tabuchi, Waseda University
 - ✓ S. Iwamoto, Waseda University
 - ✓ J. Wakisaka, Waseda University
 - ✓ H. Hosogoe, Tohoku Electric Power Company
 - ✓ Y. Ichikawa, Tohoku Electric Power Company
- **D20090227-60, The Development of Single-Phase MJ81 Electric Switch Point Machine**
 - ✓ J. Baek, Korea Railroad Research Institute
 - ✓ Y. Kim, Korea Railroad Research Institute
- **D20090302-95, Stabilization of Tie-Line Power Oscillations by Robust SMES in Interconnected Power System with Large Wind Farms**
 - ✓ I. Ngamroo, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 - ✓ C. Nanda, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 - ✓ S. Dechanupaprittha, Kyushu Institute of Technology
 - ✓ Y. Mitani, Kyushu Institute of Technology
- **D20090303-102 Approach on Optimal Generation and Load Control for Enhancing Voltage Stability Margin**
 - ✓ S. Jang, Konkuk University
 - ✓ S. Choo, Konkuk University
 - ✓ J. Lee, Konkuk University
 - ✓ J. Park, Konkuk University
 - ✓ J. Shin, Konkuk University
- **D20090317-133, Frequency Control by Coordination Control of Wind Turbine Generator and Battery using H-infinity Control**
 - ✓ A. Uehara, University of the Ryukyus
 - ✓ T. Senjyu, University of the Ryukyus
 - ✓ A. Yona, University of the Ryukyus
 - ✓ T. Funabashi, Meidensha Corporation
- **D20090321-144, Governor-Response Power Flow (GRPF) Based Long-term Voltage Stability Simulation**
 - ✓ Y. Kim, Seoul National University of Technology
 - ✓ H. Song, Seoul National University of Technology
 - ✓ B. Lee, Korea University
- **D20090330-189, A Study on Stability Enhancement of Large Scale Systems Using H_infinity Control Based on Dynamic Reduction**
 - ✓ B. Lee, University of Incheon
- **D20090331-212, Design of Optimal Fuzzy Logic-PID Controller using Bee Colony Optimization for Frequency Control in An Isolated Wind-Diesel System**
 - ✓ S. Vachirasricirikul, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 - ✓ T. Chaiyatham, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 - ✓ I. Ngamroo, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 - ✓ S. Pothiya, Thammasat University
- **D20090331-222, Power System Transient Stability Enhancement by Coordinated Operation of EVA and SPS**

Your paper is not registered. So please send to us by 20 Sep.

 - ✓ J. Kim, Korea Power Exchange
 - ✓ S. Kim, Korea Power Exchange
 - ✓ J. Cho, Korea Power Exchange

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stabilization of Tie-Line Power Oscillations by Robust SMES in Interconnected Power System with Large Wind Farms

I. Ngamroo¹, Cuk Supriyadi A.N.¹, S. Dechanupaprittha², Y. Mitani²

Abstract—This paper proposes a robust controller design of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for stabilization of interconnected power systems with wind farms. The inverse additive perturbation is applied to represent system uncertainties such as variation of system parameters, several generating and loading conditions etc. The structure of active and reactive power controllers of SMES is the first-order lead-lag compensator. To tune the controller parameters, the optimization problem is formulated based on the enhancement of additive stability margin. The particle swarm optimization is used to solve for controller parameters. Simulation studies in a six-area interconnected power system with wind farms confirm the robustness of the proposed SMES against various system operating conditions.

Index Terms—superconducting magnetic energy storage, power system stabilization, wind farms, robust control, system uncertainties, inverse additive perturbation

I. INTRODUCTION

NOWADAYS, the penetration of wind power generations into power systems increases significantly. Due to the intermittence in nature of wind, the power output fluctuations from wind power generations may cause a severe problem of low frequency oscillation in interconnected power systems and deteriorate the system stability [1]. To stabilize power oscillation, a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) which is able to control active and reactive power simultaneously [2], can be used. On the other hand, various generating and loading conditions, variation of system parameters etc., result in system uncertainties. The SMES controller [2] designed without considering system uncertainties fails to damp the power oscillation.

To enhance the robustness of the SMES controller against system uncertainties, this paper proposes a robust controller design of SMES for stabilization of interconnected power system with wind farms. In the mathematical modeling, system uncertainties are represented by inverse additive perturbation [3]. The structure of active and reactive power

controllers is the first-order lead-lag compensator. Controller parameters are optimized by particle swarm optimization (PSO) based on the improvement of the robust stability margin of the closed-loop control system. Simulation studies are carried out in a six-area interconnected power system with wind farms. Simulation results under various situations confirm that the proposed SMES is superior to that of the SMES designed without considering robustness.

II. STUDY SYSTEM AND MODELING

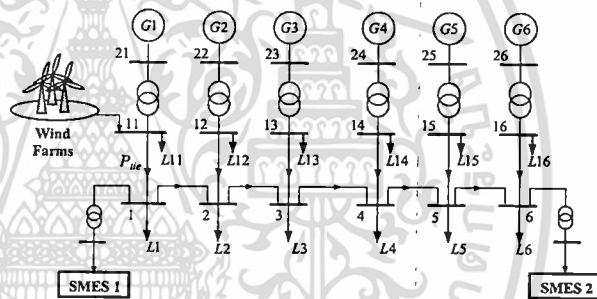


Fig. 1. Six-area interconnected power system with wind farms.

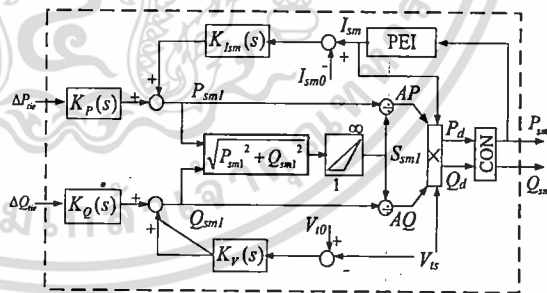


Fig. 2. SMES with active and reactive (P-Q) controllers.

A six-area interconnected power system in Fig. 1 is used as the study system. The area capacity ratio for areas 1 to 6 is 20 : 13.5 : 6 : 75 : 40 : 6.75 : 33 with a 1,000 MVA base [4]. Each area is represented by a 5-state transient model. It is equipped with a simplified exciter and governor. For the study purpose, the electric power is transferred from areas 1 to 6. The wind farm is located at bus 11 in area 1 with maximum generating capacity 450 MW. In this study, the wind farm is modeled by the random power source. Based on the residue method [5], the suitable locations of two SMESs are selected

This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

I. Ngamroo and Cuk Supriyadi A.N. are with Center of Excellence for Innovative Energy Systems, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (e-mail: ngamroo@gmail.com).

S. Dechanupaprittha and Y. Mitani are with Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Fukuoka 804-8550, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

at bus 1 and bus 6. Each SMES has a specification of 800 MJ, 40 kA, 1,000 MVA [6].

Fig.2 shows the SMES model with simultaneous active and reactive power modulation control scheme [6]. In the model, $K_p(s)$ and $K_Q(s)$ are the active and reactive power controllers, respectively, which are represented by

$$K_p(s) = K_1(1 + T_{11}s)/(1 + T_{12}s) \quad (1)$$

$$K_Q(s) = K_2(1 + T_{21}s)/(1 + T_{22}s) \quad (2)$$

where, K_1 and K_2 are gains of active and reactive power controller, T_{11} and T_{12} are time constants of the active power controller, T_{21} and T_{22} are time constants of the reactive power controller. The input signals of active and reactive power controllers of SMES1 and SMES2 are ΔP_{tie} and ΔQ_{tie} in a tie-line from bus 11 to bus 1 and from bus 16 to bus 6, respectively. In this paper, gains and time constants of both SMES controllers are optimized by the proposed control design.

As shown in Fig.2, $K_{ism}(s)$ which is the SMES coil current controller, can be represented by

$$K_{ism}(s) = \left(K_p + \frac{1}{T_i s} \right) K_{sm} (I_{sm} - I_{sm0}) \quad (3)$$

where, K_p is the proportional gain, T_i is the time constant (s), K_{sm} is a SMES coil controller gain; I_{sm} is a SMES coil current (pu); I_{sm0} is an initial value of SMES coil current (pu). In the SMES model, the effect of I_{sm} is considered, since the dynamic behavior of I_{sm} significantly affects the overall performance of SMES. In practice, I_{sm} is not allowed to reach zero to prevent the possibility of discontinuous conduction under unexpected disturbances. On the other hand, high I_{sm} , which is above the maximum allowable limit, may lead to loss of superconducting properties. Based on the hardware operational constraints, the lower and upper coil current limits are considered and assigned as $0.30I_{sm0}$ and $1.38I_{sm0}$, respectively. Here, I_{sm} can be calculated from the PEI block which has a relation as

$$I_{sm} = \sqrt{I_{sm0}^2 - 2E_{out}/(L_{sm} I_{sm,base}^2)} \quad (4)$$

$$E_{out} = \int P_{sm} dt \cdot S_{sm,base} \quad (5)$$

where, E_{out} is the SMES energy output, (J); L_{sm} is the SMES coil inductance (H); $I_{sm,base}$ is the SMES current base, (A); P_{sm} is the SMES active power output and $S_{sm,base}$ is the SMES MVA base, (MVA). Subsequently, the energy stored in the SMES unit (E_{sm}) and the initial energy stored (E_{sm0}) can be determined by

$$E_{sm} = E_{sm0} - E_{out} \quad (6)$$

$$E_{sm0} = 0.5L_{sm}I_{sm0}^2 \cdot I_{sm,base}^2 \quad (7)$$

Besides, $K_v(s)$ which is the voltage controller, can be represented by

$$K_v(s) = K_{vsm} (V_{i0} - V_{is}) \quad (8)$$

where, K_{vsm} is the controller gain; V_{i0} is an initial value of a

terminal bus voltage of SMES unit (pu); and V_{is} is a bus voltage of SMES (pu).

The desired active and reactive power output of SMES (P_d and Q_d) can be expressed as

$$P_d = V_{is} I_{sm} AP \quad (9)$$

$$Q_d = V_{is} I_{sm} AQ \quad (10)$$

where, AP and AQ are the active and reactive power fractions, respectively. The SMES active and reactive power outputs (P_{sm} and Q_{sm}) are the output of the SMES controlled converter (CONV). The converter can be represented by the first-order time-lag compensator as

$$CONV = 1/(1 + T_c s) \quad (11)$$

where T_c is the time constant of converter (s).

III. PROPOSED ROBUST SMES CONTROLLER DESIGN

To enhance the robustness of active and reactive power controllers against system uncertainties, the inverse additive perturbation [3] is applied to formulate the optimization problem of controller parameters.

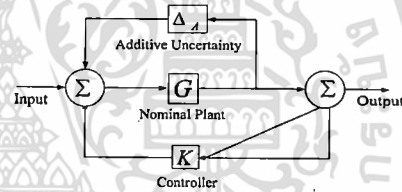


Fig. 3 Feedback system with inverse additive perturbation.

The feedback control system with inverse additive perturbation is shown in Fig.3. G is the nominal plant. K is the designed controller. For system uncertainties such as various generating and loading conditions, variation of system parameters and nonlinearities etc., they are represented by Δ_A which is the unstructured additive uncertainty model. Based on the small gain theorem, for a stable additive uncertainty Δ_A , the system is stable if

$$\|\Delta_A G / (1 - GK)\|_\infty < 1 \quad (12)$$

then,

$$\|\Delta_A\|_\infty < 1/\|G/(1 - GK)\|_\infty \quad (13)$$

The right hand side of (13) implies the size of system uncertainties or the robust stability margin against system uncertainties. By minimizing $\|G/(1 - GK)\|_\infty$, the robust stability margin of the closed-loop system is maximum. This concept can be applied as the optimization problem as

$$\text{Minimize } \|G/(1 - GK)\|_\infty \quad (14)$$

$$\text{Subject to } \zeta \geq \zeta_{spec}, \sigma \leq \sigma_{spec}$$

$$K_{i,min} \leq K_i \leq K_{i,max}$$

$$T_{j,min} \leq T_j \leq T_{j,max}, \quad i=1,2, \quad j=1,2$$

where ζ and ζ_{spec} are the actual and desired damping ratio of the dominant inter-area oscillation mode, respectively; σ and

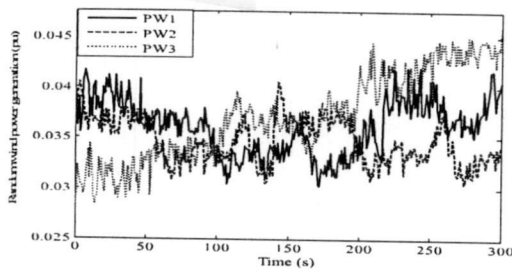


Fig. 5. Wind power generations.

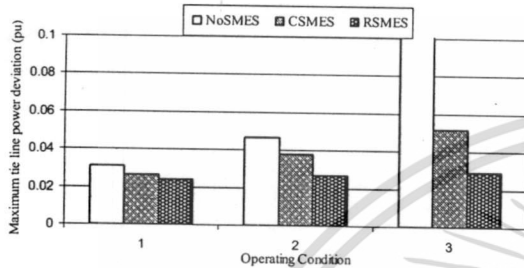


Fig. 6. Maximum tie-line power deviation with wind PW1.

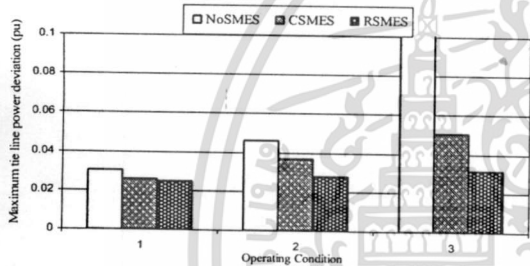


Fig. 7. Maximum tie-line power deviation with wind PW2.

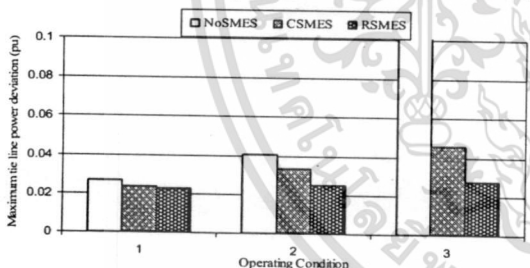


Fig. 8. Maximum tie-line power deviation with wind PW3.

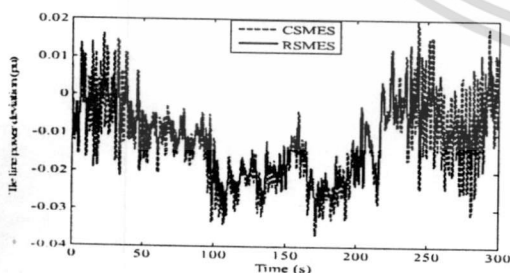


Fig. 9. Tie line power deviation in case 3 with wind PW1.

is very large especially in case 3. In contrast, the maximum power deviation is effectively suppressed by either CSMES or RSMES. However, CSMES is quite sensitive to operating

conditions in cases 2 and 3. The maximum power deviation highly increases in cases 2 and 3. On the other hand, RSMES is very robust to any operating condition and wind pattern. The maximum power deviation rarely changes. Figure 9 shows tie-line power deviation of case 3 with wind PW1. RSMES provides more damping effects than CSMES.

Finally, the results of eigenvalue analysis when $P_{tie} = 3.84$ p.u. with CSMES and RSMES are $+0.0452 + 1.9017i$ and $-0.1252 + 2.5902i$, respectively. Nonlinear simulation result with wind power PW1 shown in Fig. 10 is consistent with eigenvalue result. CSMES is not capable of damping the tie-line oscillation while RSMES can significantly alleviate the oscillation. These results confirm that the RSMES designed with considering system uncertainties is much superior to the CSMES in terms of robustness.

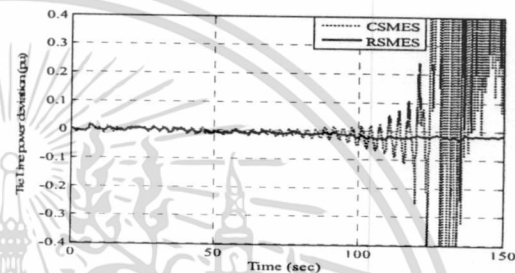


Fig. 10. Tie line power deviation with PW1, $P_{tie} = 3.84$ p.u.

V. CONCLUSIONS

A robust SMES controller design based on inverse additive perturbation for stabilization of an interconnected power system with wind farms has been proposed. System uncertainties are represented by the inverse additive model. The control parameters of active and reactive power controllers are optimized by PSO. Simulation studies under various generating and loadings, heavy line flow, weak load and wind power fluctuations and system faults confirm that the robustness of the proposed SMES is much superior to that of SMES designed without considering robustness.

VI. REFERENCES

- [1] J. G. Sloopweg and W. L. Kling, "The impact of large scale wind power generation on power system oscillations," *Electric Power Systems Research*, vol. 67, no. 1, pp. 9–20, 2003.
- [2] Y. Mitani, K. Tsuji, and Y. Murakami, "Application of superconducting magnetic energy storage to improve power system dynamic performance," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 1418–1425, 1988.
- [3] P. Gu, Hr. Petkov. *Robust control design with MATLAB*. Springer, 2005.
- [4] Technical Committee of the Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ), Japanese Power System Models, Online available at: <http://www.iee.or.jp/pes/model/english/index.html>
- [5] N. Martin and L.T.G. Lima, "Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillation in large power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1455–1469, 1990.
- [6] S. Dechanupaprittha, K. Hongesombut, M. Watanabe, Y. Mitani and I. Ngamroo, "A heuristic-based design of robust SMES controller taking system uncertainties into consideration", *IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 1, pp.255-267, 2006.
- [7] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proc. IEEE Inter. Conference Neural Networks*, vol.1, pp.1942–1948, 1995.
- [8] Y.L. Abdel-Magid and M.A. Abido, "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms", *IEEE Trans. Power Sys* o. 3, pp.1125-1132, 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้