

การควบคุมความถี่ของโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบสร้างกริดที่ควบคุมด้วยวิธีการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน

Frequency Regulation of Distribution Networks Using Grid-Forming Inverter with Virtual Synchronous Generator Control

มาริสวิไล ฮาร่า และ วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล

Marisivilai Hara and Watcharin Srirattanawichaikul*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Thailand

*Corresponding Author E-mail: watcharin.s@cmu.ac.th

Received: 7/09/25, Revised: 4/10/25, Accepted: 6/10/25

บทคัดย่อ

ปัญหาจากการเพิ่มขึ้นของแหล่งพลังงานหมุนเวียนในระบบโครงข่ายไฟฟ้าคือทำให้ความถี่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าลดลง ซึ่งได้มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเท่านั้น และเป็นกลไกสำคัญในการรักษาสมดุลกำลังโดยชดเชยส่วนต่างที่เกิดขึ้นเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของแหล่งพลังงานหมุนเวียนให้สร้างความถี่เสมือนที่เรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน จากผลการจำลองพบว่าเมื่อระบบไฟฟ้าเสียสมดุลกำลังจากโหลดที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วและเพิ่มกำลังเอาต์พุตได้ทันที ความถี่ของระบบจึงอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ ผลตอบสนองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน อินเวอร์เตอร์แบบสร้างกริด ความถี่เสมือน ระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่

Abstract

The problem caused by the increasing share of renewable energy sources (RES) in the grid is the reduction of inertia. Inertia in a grid comes only from synchronous generators and is essential for maintaining power balance by responding to sudden changes. This article presents a control method for RES inverters to create virtual inertia, known as a virtual synchronous generator (VSG). Simulation results show that when the grid becomes unbalanced due to a sudden load increase, the VSG responds quickly and adjusts its output power to meet the load. As a result, the grid frequency stays within the acceptable range. These results show that the VSG can maintain frequency stability in grids with a high share of RES.

Keywords: Virtual Synchronous Generator, Grid-Forming Inverter, Virtual Inertia, Low Inertia Power System, Rate of Change of Frequency

1. บทนำ

การเชื่อมต่อแหล่งพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีส่วนที่น้อยลงเมื่อเทียบกับกำลังผลิต ความถี่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามาจากการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในโรงไฟฟ้าแบบดั้งเดิมเท่านั้น ระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนในอัตราส่วนที่สูงจึงเรียกว่าระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ [1] ความถี่มีความจำเป็นในการรักษาสมดุลกำลังของระบบไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพด้วย ความถี่ยวบยาบจนถึงปริมาณพลังงานจลน์ที่สำรองอยู่ในระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดเหตุไม่คาดคิดที่ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่สอดคล้องกับโหลดจนสูญเสียสมดุลกำลังจะทำให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าเบี่ยงเบนไปจากค่าที่กำหนดไว้ กรณีที่ปริมาณผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด พลังงานจลน์ที่สะสมไว้ในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าและจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าทันที ส่วนกรณีที่มีปริมาณผลิตเกินความต้องการของโหลดส่วนเกินจะถูกเก็บกักเข้าไปในโรเตอร์ในรูปของพลังงานจลน์ ระบบไฟฟ้าที่ความถี่ไม่เพียงพอจะไม่สามารถรักษาสมดุลกำลังเบื้องต้นโดยความถี่ได้ ทำให้ความถี่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าที่กำหนดไว้ในมากและรวดเร็ว ส่งผลให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Rate of Change of Frequency: ROCOF) ที่สูงจนอาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานโดยไม่จำเป็นและระบบไฟฟ้าเสียความสมดุลมากขึ้น ทำให้เกิดความผิดปกติอย่างต่อเนื่อง (Cascading Failure) จนสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด ดังเช่นเหตุการณ์ไฟดับครั้งใหญ่เมื่อเดือนเมษายน พ.ศ. 2568 ที่ประเทศสเปนและโปรตุเกสที่ส่งผลกระทบต่อผู้คนหลายล้านคน เหตุการณ์ไฟดับดังกล่าวเกิดจากไฟฟ้ายลowsเกินขีดจำกัดในภาคใต้ของสเปน ซึ่งในขณะที่เกิดเหตุไฟดับนั้นมียางงานว่าสัดส่วนของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงาน

หมุนเวียนสูงถึงร้อยละ 70 [2] ความถี่ที่ไม่เพียงพอทำให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สูงจนทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกปลดออกไปอย่างต่อเนื่องทั่วทั้งโครงข่ายไฟฟ้า [3] เหตุการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงของระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนจำนวนมากและความสำคัญของความถี่ในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

การแก้ปัญหาความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นจำนวนมากนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีที่สร้างความถี่เสมือน (Virtual Inertia: VI) ให้แก่ระบบไฟฟ้าโดยการควบคุมอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเรียกว่า การควบคุมความถี่เสมือน (Virtual Inertia Control: VIC) [4] การควบคุมความถี่เสมือนมีแนวคิดหลักคือควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อแหล่งพลังงานหมุนเวียนให้ระบบไฟฟ้ามองเห็นเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยการจำลองการตอบสนองทางความถี่ (Inertial Response) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการควบคุมความถี่เสมือนที่แตกต่างกันหลายประเภท [1], [4] เช่น วิธีการบนฐานแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator Model) ซึ่งมีโทโพโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีชื่อเรียกว่า เครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือน (Virtual Synchronous Machine: VSM) [5] และ Synchronverter, วิธีการบนฐานสมการการแกว่ง (Swing Equation), วิธีการบนฐานการควบคุมครูป (Droop Control), และวิธีการบนฐานการตอบสนองความถี่-กำลังไฟฟ้า (Frequency-Power Response) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน (Virtual Synchronous Generator: VSG) [6], [7] โดยแต่ละวิธีมีจุดเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เช่น เครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือนอาศัยแบบจำลองบนแกน dq0 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในโหมดสร้างกริดโดยพิจารณาครูปของความถี่และให้ความถี่เสมือน ทำให้แบบจำลองมีความซับซ้อนจากการใช้แบบจำลองบนแกน dq0 และอาจมีปัญหาจากความไม่เสถียรเชิงตัวเลข [1] นอกจากนี้เครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือนให้ความสำคัญกับการตอบสนองเชิงความถี่-กำลังแอกทีฟซึ่งมักจะไม่ได้พิจารณาการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ ส่วนของวิธีการบนฐานสมการการแกว่งเป็นการนำสมการการแกว่งอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาใช้ในการสร้างความถี่เสมือน มีวิธีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อนมาก เนื่องจากเป็นการแก้สมการการแกว่งโดยใช้กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์, แรงดันที่จุดเชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์และระบบไฟฟ้า, และกำลังแอกทีฟเอาต์พุต [4] วิธีการบนฐานสมการการแกว่งจึงมักจะไม่ได้พิจารณากำลังรีแอกทีฟเช่นเดียวกันกับเครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือน สำหรับวิธีการบนฐานครูปเป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับไมโครกริดและการทำงานในโหมดแยกโคด (Islanding Mode) ใช้หลักการครูประหว่างความถี่-กำลังแอกทีฟและแรงดัน-กำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ซิงโครนัส วิธีการบนฐานครูปไม่ได้จำลองความถี่เสมือนโดยตรงจึงอาจไม่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ต้องการความถี่เสมือนในปริมาณที่มาก ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนเป็นวิธีการควบคุมความถี่เสมือนที่ให้อินเวอร์เตอร์จำลองพฤติกรรมการตอบสนองเชิงความถี่ (Inertial Response) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยนำหลักการการตอบสนองความถี่-กำลังแอกทีฟมาใช้ในการควบคุม ทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถกำหนดปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้จึงมีลักษณะการทำงานที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [1] จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมพบว่าโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ควบคุมกำลังแอกทีฟ และควบคุมกำลังรีแอกทีฟ แต่มักจะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบควบคุมกำลังแอกทีฟตามหลักการการตอบสนองระหว่างความถี่-กำลังแอกทีฟ ขณะที่ควบคุมกำลังรีแอกทีฟมักไม่ได้ถูกพิจารณา ทำให้ไม่มีการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับควบคุมกำลังรีแอกทีฟที่ชัดเจน [6], [7] หรือถูกกำหนดค่ากำลังรีแอกทีฟเป็นศูนย์ [8] และไม่มีทดสอบในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่มีกำลังรีแอกทีฟ รวมถึงการแสดงผลตอบสนองของกำลังรีแอกทีฟในระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม วิธีการควบคุมความถี่เสมือนเหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนจำนวนมากมีเสถียรภาพ รวมถึงเพื่อรองรับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

บทความนี้นำเสนอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนสำหรับการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบสร้างกริด (Grid-Forming Inverter: GFM Inverter) เพื่อให้แหล่งพลังงานหมุนเวียนมีส่วนร่วมในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ โดยพิจารณาทั้งควบคุมกำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟ สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนที่นำเสนอทดสอบโดยใช้แบบจำลองระบบทดสอบ IEEE 9 บัสจำลองสถานการณ์ที่สูญเสียสมดุกำลังโดยเพิ่มโหลดขนาดใหญ่เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลดที่นำมาต่อเพิ่มมีทั้งโหลดกำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟเพื่อให้ใกล้เคียงกับโหลดในระบบไฟฟ้าจริง นอกจากนี้ได้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อนำไปเทียบกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้องและข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid Code)

2. ระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ

2.1 ความถี่ในระบบไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้าดั้งเดิมผลิตไฟฟ้าโดยแปลงพลังงานกลที่ได้จากการหมุนของโรเตอร์เป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ละเครื่องมีความถี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งสัมพันธ์กับรัศมีและน้ำหนักของโรเตอร์แต่ละเครื่องดังนี้

$$J = \int r^2 dm \quad (1)$$

เมื่อ J คือความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), r คือรัศมี (m), และ m คือน้ำหนัก (kg) ของโรเตอร์ โดยทั่วไป ให้ถือว่าระบบไฟฟ้าไม่สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้หากไม่มีระบบกักเก็บพลังงาน พลังงานจึงถูกสะสมในรูปของพลังงานจลน์โดยให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วพิคของระบบ [9] ปริมาณพลังงานจลน์ที่สะสมไว้สัมพันธ์กับความเฉื่อยดังนี้

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2)$$

เมื่อ E_k คือพลังงานจลน์ (J) และ ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/s)

พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสที่พยายามรักษาความสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตและโหลดเพื่อไม่ให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไป สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ระบบไฟฟ้าที่แปรผันและความเฉื่อยในระบบไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับผลต่างระหว่างกำลังกล (กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้) และกำลังไฟฟ้า (โหลด) สมการที่แสดงคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสนี้เรียกว่า สมการการแกว่ง [9]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = M \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (3)$$

เมื่อ f คือความถี่ของระบบ (Hz), P_m คือกำลังกลอินพุต (p.u.), P_e คือกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (p.u.), และ M คือความเฉื่อยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสที่ใช้ในการเร่งความเร็วโรเตอร์ให้ถึงความเร็วระบบที่กำหนดไว้ (Nominal Speed) ซึ่งเรียกว่าความเร็วนี้ว่า ความเร็วเชิงโรตัส

ค่าคงที่ความเฉื่อยเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความเฉื่อยของระบบไฟฟ้า ซึ่งกำหนดจากระยะเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดให้แก่โหลดโดยใช้พลังงานจลน์ที่สะสมไว้ในโรเตอร์เท่านั้น ค่าคงที่ความเฉื่อยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H = \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) / S_{rated} \quad (4)$$

เมื่อ H คือค่าคงที่ความเฉื่อย (s) โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 3 – 5 วินาที และ S_{rated} คือพิคกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส

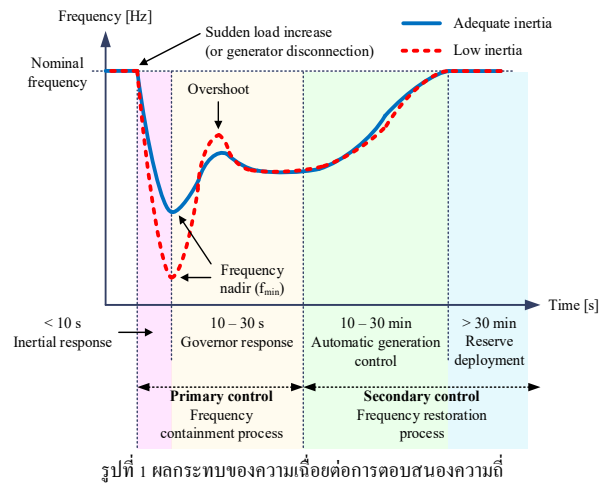
เมื่อกำหนดให้กำลังกลจากโรงไฟฟ้ามีค่าคงที่ ซึ่งหมายถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าคงที่ แต่สมมติให้กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังกลและกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการแล้ว ปริมาณพลังงานจลน์ในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วของโรเตอร์เปลี่ยนแปลง เช่น กรณีที่มีโหลดมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะทำให้ความเร็วของโรเตอร์ลดลงและความถี่ของระบบจะลดลงด้วย

ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนจะได้สมการการแกว่งเป็น

$$M \frac{df}{dt} = P_m - P_e = (P_{SG} + P_{NSG}) - (P_D - P_L) \quad (5)$$

เมื่อ P_{SG} คือกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสผลิต, P_{NSG} คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไม่เชิงโรตัส

(Asynchronous) รวมถึงแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ (Inverter-Based Resource: IBR) และแหล่งพลังงานไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ไม่เหมาะสมสำหรับการควบคุม, และ P_L คือกำลังสูญเสีย เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนในสัดส่วนที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความถี่รวมในสมการที่ (5) มีค่าลดลง ซึ่งจะทำความถี่เบี่ยงเบนเกินไปจากช่วงค่าที่ยอมรับได้ในพื้นที่ที่ระบบไฟฟ้าสูญเสียสมดุลกำลัง กรณีที่โหลดเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันหรือสูญเสียกำลังผลิตจะพบว่าระบบไฟฟ้าที่มีความเฉื่อยไม่เพียงพอจะทำให้ความถี่ตกลงไปอย่างมากและเกิดค่าความถี่เบี่ยงเบนต่ำสุด (Frequency Nadir) ที่ต่ำกว่าระบบไฟฟ้าที่มีความเฉื่อยเพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลกระทบของความถี่ต่อการตอบสนองความถี่

2.2 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ

เสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถประเมินได้จากความถี่ซึ่งใช้เป็นสัญญาณในการควบคุมสมดุลกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า ความถี่ที่มีความผันผวนที่อาจมีสาเหตุมาจากความถี่ต่ำมีผลต่อคุณภาพไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลด ผลกระทบของความถี่ต่ำจะปรากฏให้เห็นเมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ (Contingency) หรือระบบไฟฟ้าได้รับการรบกวน (Disturbance) จนสูญเสียสมดุลกำลัง เมื่อระบบไฟฟ้ามีความถี่ไม่เพียงพอที่จะชดเชยส่วนต่างของพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความถี่เบี่ยงเบนออกไปจากช่วงค่าที่กำหนดอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่กว้างจึงทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สูง อาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ป้องกันอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำงาน เกิดการตัดการเชื่อมต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่จึงเป็นตัวชี้วัดที่แสดงถึงความอ่อนไหวของความถี่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

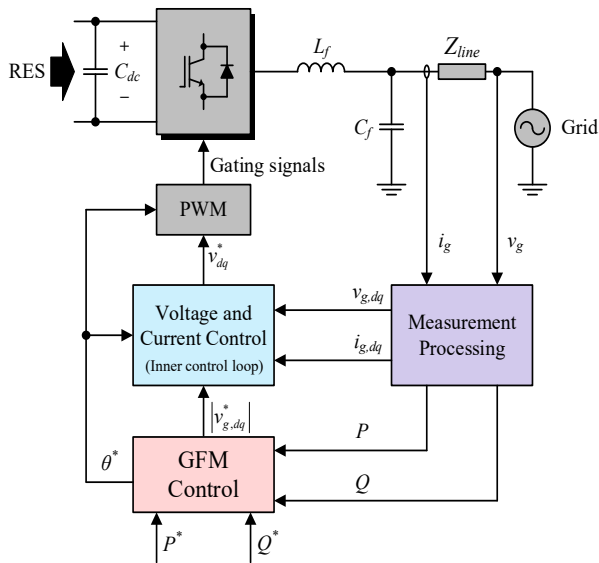
$$ROCOF = \frac{(P_m - P_e) f_0}{2 S_{rated} H} = \frac{\Delta P f_0}{2 S_{rated} H} = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (6)$$

เมื่อ $ROCOF$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Hz/s) และ f_0 คือความถี่ระบบที่กำหนดไว้ (Nominal Frequency) อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ยังใช้เป็นตัวชี้วัดเสถียรภาพได้ด้วย ในกรณีนี้จะคำนวณจาก

ความถี่ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าที่กำหนด (Δf) และระยะเวลาที่พิจารณา อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Time Window: Δt) สมการที่ (6) นี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่จะมีค่าที่สูงเมื่อค่าคงที่ความเฉื่อย (H) น้อย ซึ่งหมายถึงความเฉื่อย (J) ที่ต่ำ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุดมักจะเกิดขึ้นทันทีที่ปริมาณโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันหรือเกิดการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบไฟฟ้า

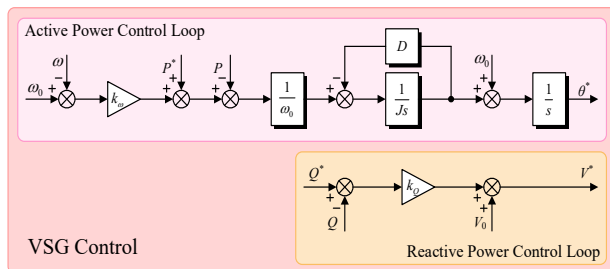
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียม คือวิธีการควบคุมความถี่เสมือนสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด (Grid-Connected Inverter) ที่ทำงานในโหมดสร้างกริด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมจะทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมสร้างกริด (GFM Control) ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบสร้างกริด

หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมคือจำลองพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมโดยใช้การตอบสนองความถี่-กำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมโดยทั่วไปประกอบด้วยลูปควบคุมกำลังแอกทีฟ (Active Power Control Loop) สำหรับกำหนดมุมอ้างอิงในการซิงโครไนซ์และลูปควบคุมกำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power Control Loop) สำหรับกำหนดแรงดันอ้างอิง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียม

ลูปควบคุมกำลังแอกทีฟจำลองโดยใช้สมการการแกว่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ตอบสนองต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียม [7], [9] สมการที่ (7) การแกว่งสำหรับสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมเป็นดังนี้

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (7)$$

เมื่อ J คือความเฉื่อยเสมือน, T_m คือแรงบิดทางกลเสมือน, T_e คือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเสมือน, D คือสัมประสิทธิ์การหน่วงเสมือน (Virtual Damping Coefficient), ω คือความเร็วเชิงมุมเสมือนที่เกิดขึ้นจริง (Actual Virtual Angular Speed), และ ω_0 คือความเร็วเชิงมุมเสมือนที่กำหนด (Nominal Virtual Angular Speed) แรงบิดเสมือนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) ดังนี้

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_0} \text{ และ } T_e = \frac{P_e}{\omega_0} \quad (8)$$

กำลังกลเสมือนในสมการที่ (8) สามารถกำหนดได้จากสมการที่ (9)

$$P_m = P^* + k_\omega (\omega_0 - \omega) \quad (9)$$

เมื่อ P^* คือกำลังแอกทีฟอ้างอิง และ k_ω คือสัมประสิทธิ์รูปร่างของกำลังแอกทีฟ (Droop Coefficient of Active Power)

เมื่อระบบไฟฟ้าสูญเสียสมดุลกำลังงานความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าปกติที่กำหนดไว้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมต้องรักษาความถี่ไม่ให้เบี่ยงเบนออกไปจากช่วงค่าที่ระบบไฟฟ้ากำหนดไว้หมายความว่าเมื่อเกิดส่วนต่างระหว่างโหลดและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากที่สุด ($\Delta P_{\max}$) แล้วความถี่ต้องไม่เบี่ยงเบนเกินไปจากช่วงค่าที่ยอมรับได้ ($\Delta f_{\max}$) สัมประสิทธิ์รูปร่างจึงกำหนดเป็น

$$k_\omega = -\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta \omega_{\max}} = -\frac{\Delta P_{\max}}{\omega_0 \Delta \omega_{\max}} = -\frac{P_m - P^*}{\omega_0 (\omega - \omega_0)} \quad (10)$$

ความถี่และกำลังแอกทีฟมีความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกัน ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะลดลง ($\Delta f < 0$) เมื่อมีโหลดเพิ่ม ($\Delta P > 0$) และในทางกลับกันความถี่ของระบบไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น ($\Delta f > 0$) เมื่อโหลดหายไป ($\Delta P < 0$) ความสัมพันธ์นี้ทำให้สัมประสิทธิ์รูปร่างของกำลังแอกทีฟมีค่าติดลบจึงใส่เครื่องหมายลบไว้ที่ฝั่งขวามือของสมการที่ (10) เพื่อให้เป็นค่าบวก

ลูปควบคุมกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียมเป็นการจำลองระบบการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเทียม

กำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนจะควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเสมือนโดยทำการปรับระดับแรงดันที่ขั้วและปริมาณกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิม แรงเคลื่อนไฟฟ้าเสมือน ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงจากสมการที่ (11)

$$P_m = P^* + k_\omega (\omega_0 - \omega) \quad (11)$$

เมื่อ V^* คือแรงดันอ้างอิง, k คืออัตราขยายของตัวควบคุมกำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power Control Gain), k_Q คือสัมประสิทธิ์รูปของกำลังรีแอกทีฟ (Droop Coefficient of Reactive Power), Q^* คือกำลังรีแอกทีฟอ้างอิง, และ Q คือกำลังรีแอกทีฟที่คำนวณจากแรงดันและกระแสของระบบไฟฟ้าที่วัดได้, V_0 คือแรงดันที่กำหนด (Nominal Voltage), และ V คือแรงดันเอาต์พุตจริง

การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์รูปของกำลังรีแอกทีฟมีหลักการคล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์รูปของกำลังแอกทีฟ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่มากที่สุดแล้ว ระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าต้องไม่เกินระดับที่ระบบไฟฟ้ายอมรับได้ สัมประสิทธิ์รูปของกำลังรีแอกทีฟจึงกำหนดโดยใช้กำลังรีแอกทีฟที่เปลี่ยนแปลงได้มากที่สุด ($\Delta Q_{\max}$) และระดับแรงดันที่ยอมให้เบี่ยงเบนได้มากที่สุดที่ระบบกำหนดไว้ ($\Delta V_{\max}$)

$$k_Q = -\frac{\Delta V_{\max}}{\Delta Q_{\max}} \quad (12)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังรีแอกทีฟที่แปรผกผันทำให้สัมประสิทธิ์รูปของกำลังรีแอกทีฟเป็นค่าเป็นลบเสมอ สมการที่ (12) จึงใส่เครื่องหมายลบเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์รูปของกำลังแอกทีฟ

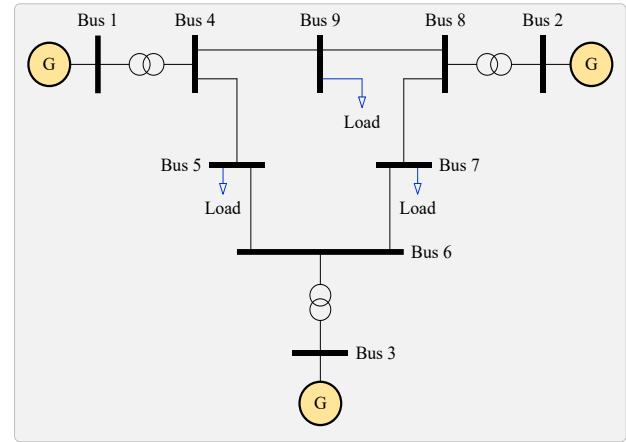
4. ผลการจำลองและวิเคราะห์

4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า

สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนที่นำเสนอประเมินโดยใช้แบบจำลองระบบทดสอบ IEEE 9 บัส [5] ดังรูปที่ 4 ในการศึกษาได้จำลองผลตอบแทนของระบบไฟฟ้า 2 รูปแบบคือระบบไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งเป็นแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเท่านั้น และระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำที่จำลองระบบไฟฟ้าที่มีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็น 2 ใน 3 ของกำลังผลิต

ระบบไฟฟ้าความถี่สูงจำลองโดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่บัส 1, บัส 2, และ 3 (SG1 – 3) ส่วนระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำจำลองโดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่บัส 1 (SG1) และต่อแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบสร้างกริดที่ควบคุมด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนที่บัส 2 และ 3 (VSG2 – 3) กำหนดให้บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละบัสมีกำลังเท่ากับ 100 MVA (1 p.u.) บัส 5, บัส 7,

และบัส 9 เป็นบัสโหลด แต่ละบัสโหลดเชื่อมต่อกับโหลดขนาด 75 MW (0.75 p.u.)



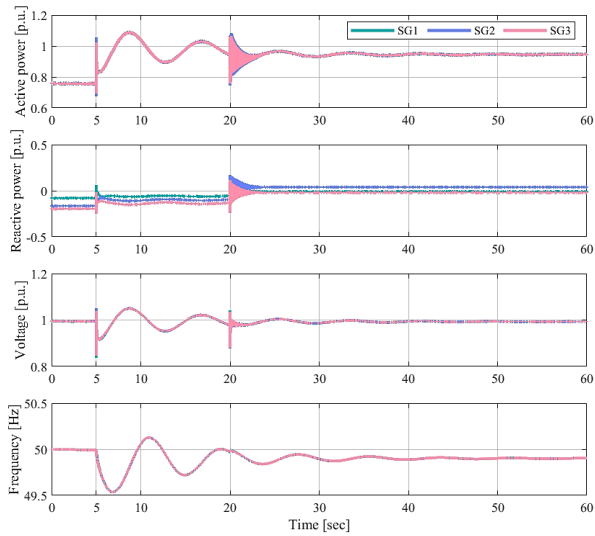
รูปที่ 4 แบบจำลองระบบทดสอบ IEEE 9 บัส

4.2 ผลตอบสนองต่อการรบกวนจากโหลด

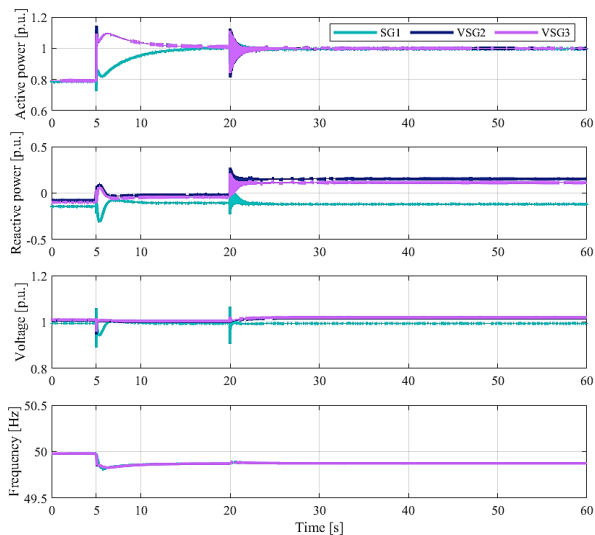
ผลตอบสนองต่อการรบกวนจากโหลด (Load Disturbance) ทดสอบโดยต่อโหลดเพิ่มที่บัส 7 เพื่อจำลองเหตุการณ์ที่ระบบไฟฟ้าสูญเสียสมดุลกำลังจาก โหลดที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน (Sudden Load Increase) กำหนดให้โหลดที่ต่อเพิ่มมีขนาด 75 MVA (0.75 p.u.) ค่าตัวประกอบกำลัง 0.9 แบบตาม ซึ่งเป็นค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำสุดที่ยอมรับได้จากมาตรฐาน IEEE 1547 หลังจากเพิ่มโหลดจึงมีโหลดรวมในระบบเป็น 300 MVA (3 p.u.) ซึ่งเท่ากับพิกัดกำลังผลิตของแบบจำลองระบบไฟฟ้าในการศึกษานี้ โดยจะต่อโหลดส่วนที่เป็นกำลังแอกทีฟที่เวลา 5 วินาทีและต่อโหลดส่วนที่เหลือที่เป็นกำลังรีแอกทีฟที่เวลา 20 วินาที ผลตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละบัสจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่สูงและความถี่ต่ำเป็นดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ตามลำดับ

ผลตอบสนองจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่สูงในรูปที่ 5 พบว่ากำลังแอกทีฟ แรงดัน และความถี่เกิดการแกว่งทันทีที่เพิ่มโหลด โดยกรณีที่เพิ่มโหลดกำลังแอกทีฟมีแนวโน้มลดลงของการแกว่งที่ใหญ่กว่าและมีแนวโน้มที่ใช้เวลาเข้าสู่สถานะคงตัวที่นานกว่ากรณีที่เพิ่มโหลดกำลังรีแอกทีฟ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีการตอบสนองต่อการรบกวนจากโหลดกำลังแอกทีฟที่เร็วจึงพบการสั่น (Oscillation) ในผลตอบสนองของกำลังแอกทีฟ กำลังรีแอกทีฟ และแรงดัน ความถี่เกิดการตอบสนองแบบขึ้น (Step Response) เล็กน้อยเท่านั้นเนื่องจากแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีโครงสร้างที่ กำลังรีแอกทีฟไม่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการควบคุมความถี่ กำลังแอกทีฟเอาต์พุตที่สถานะคงตัวเท่ากันทั้ง 3 บัสเนื่องจากกำหนดจุดรับตั้ง (Set Point) ให้เท่ากันเพื่อให้เกิดการกระจายภาระในการจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ผลตอบสนองของกำลังรีแอกทีฟไม่พบการแกว่งที่ชัดเจน แต่การใช้กำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ละบัสมีปริมาณที่ไม่เท่ากันเป็นผลมาจากอิมพีแดนซ์สายส่งและระยะห่างจาก

โหลดที่ไม่เท่ากัน แต่ละบัสจึงใช้ปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่แตกต่างกันในการรักษาระดับแรงดันที่บัส



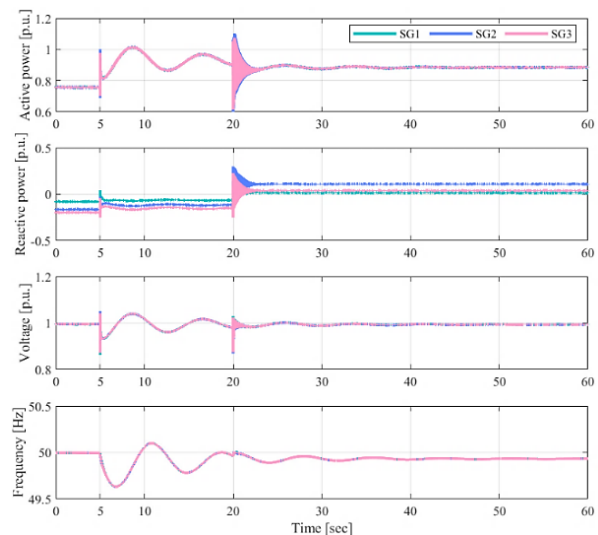
รูปที่ 5 ผลตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของโหลด 75 MVA (0.75 p.u.)
ตัวประกอบกำลัง 0.9 แบบตามจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่สูง



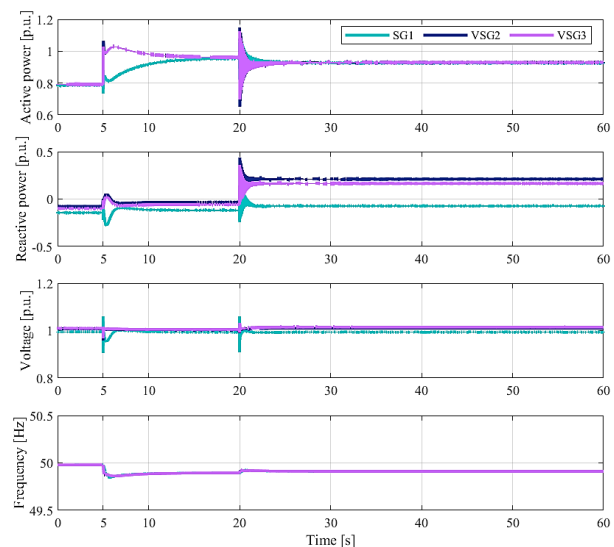
รูปที่ 6 ผลตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของโหลด 75 MVA (0.75 p.u.)
ตัวประกอบกำลัง 0.9 แบบตามจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่สูง

ผลตอบสนองของแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำในรูปที่ 6 ไม่พบการแกว่งและเข้าสู่สถานะคงตัวได้เร็วกว่าระบบไฟฟ้าความถี่สูง ช่วงแรกที่เพิ่มโหลดกำลังรีแอกทีฟพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน (VSG2 – 3) เพิ่มเอาต์พุตของกำลังรีแอกทีฟทันทีเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ความถี่จึงไม่ตกลงไปมากเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าความถี่สูง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีการตอบสนองที่ช้าค่อย ๆ เพิ่มกำลังรีแอกทีฟในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนค่อย ๆ ลดกำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับให้เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกำลังรีแอกทีฟเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากโหลดกำลังรีแอกทีฟที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงดันชั่วขณะ (Voltage Sag) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ซิงโครนัสจึงต้องใช้กำลังรีแอกทีฟมากขึ้นเพื่อรักษาระดับแรงดัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนจึงจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลตอบสนองของแรงดันที่บัสแรงดันตกแต่สามารถกลับสู่ค่าเดิมได้อย่างรวดเร็ว ผลตอบสนองของความถี่พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนมีค่าความถี่เบี่ยงเบนต่ำสุดที่น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเล็กน้อยและถึงค่าอ้างอิงใหม่ที่สถานะคงตัวก่อน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจึงซิงโครไนซ์ตามค่าใหม่ได้ เมื่อพิจารณาช่วงเวลาตั้งแต่ 20 วินาทีเป็นต้นไปที่เพิ่มโหลดกำลังรีแอกทีฟพบว่ากำลังรีแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟเกิดการสั่นแต่หายไปอย่างรวดเร็ว พบแรงดันตกที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่สามารถกลับสู่ค่าเดิมได้ทันที ส่วนของความถี่พบผลตอบสนองแบบขั้น (Step Response) เล็กน้อยแต่เข้าสู่สถานะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 7 ผลตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของโหลด 75 MVA (0.75 p.u.)
ตัวประกอบกำลัง 0.7 แบบตามจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่สูง



รูปที่ 8 ผลตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของโหลด 75 MVA (0.75 p.u.)
ตัวประกอบกำลัง 0.7 แบบตามจากแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่สูง

รูปที่ 7 และ รูปที่ 8 เป็นการทดสอบโดยเพิ่มโหลด 75 MVA (0.75 p.u.) ที่มีค่าตัวประกอบกำลัง 0.7 แบบตาม ซึ่งเป็นค่าตัวประกอบกำลังต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ ผลตอบสนองที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับกรณี que เพิ่มโหลด 75 MVA ที่มีค่าตัวประกอบกำลัง 0.9 แบบตาม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนยังคงสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ทันทีและกำหนดค่าอ้างอิงใหม่ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสซิงโครนัสตามได้อย่างรวดเร็ว ระบบไฟฟ้าจึงสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้

จากการเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างแบบจำลองระบบไฟฟ้า ความถี่สูงและความถี่ต่ำพบว่าแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างรวดเร็วและใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวที่สั้นกว่าแบบจำลองระบบไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนที่เป็นอินเวอร์เตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนสามารถกำหนดค่าอ้างอิงใหม่ในการซิงโครไนส์ได้อย่างรวดเร็วจึงนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้ซิงโครไนส์ตามได้อย่างรวดเร็วด้วยโดยไม่ให้เกิดการแกว่งของสัญญาณ ผลตอบสนองของแรงดันและความถี่แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบสร้างกริดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

4.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่

ในหัวข้อนี้ ได้เปรียบเทียบเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้า ความถี่สูงและระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำที่มีสัดส่วนของแหล่งพลังงานหมุนเวียนมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสตามรูปที่ 4 โดยทำการประเมินอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังแอกทีฟขนาด 75 MW (0.75 p.u.) ซึ่งเท่ากับปริมาณกำลังแอกทีฟที่มากที่สุดที่เพิ่มได้ (ΔP_{max}) ที่กำหนดในการศึกษานี้ เลือกระยะเวลาที่พิจารณา (Δt) ในสมการที่ (6) เป็น 0.1 วินาทีตามมาตรฐาน IEEE 1547 ทดสอบโดยต่อโหลดเพิ่มเข้าไปที่บัส 7 ที่เวลา 5 วินาที อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่จึงพิจารณาจากความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 5 วินาทีถึง 5.1 วินาที นอกจากนี้ ได้ศึกษาสมรรถนะเชิงเสถียรภาพความถี่ของระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำที่ใช้วิธีการควบคุมความถี่เสมือนที่แตกต่างกันอีก 2 วิธีนอกเหนือจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน (VSG) คือ วิธีการควบคุมรูปและเครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือน (VSM) ทดสอบโดยการเปลี่ยนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนที่บัส 2 และ 3 ในรูปที่ 4 ให้เป็นการควบคุมรูปและเครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือนแบบจำลองของการควบคุมรูปและเครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือนที่ใช้ในหัวข้อนี้เป็นแบบจำลองที่นำเสนอโดย [5] ซึ่งประกอบด้วย 2 ควบคุมหลักเช่นเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน คือ ควบคุมสำหรับกำหนดมุมอ้างอิงและควบคุมสำหรับกำหนดแรงดันอ้างอิง มุมอ้างอิงกำหนดมาจากการสัมพันธ์ระหว่างความถี่และกำลังแอกทีฟโดยพิจารณาความคลาดเคลื่อนระหว่างกำลังแอกทีฟอ้างอิง

และกำลังแอกทีฟที่วัดได้ ซึ่งมีแนวคิดที่คล้ายคลึงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน แต่การกำหนดแรงดันอ้างอิงมีวิธีการที่แตกต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนคือพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันอ้างอิงและแรงดันที่วัดได้ กำลังรีแอกทีฟจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการกำหนดแรงดันอ้างอิงของการควบคุมรูปและเครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือน แบบจำลองระบบไฟฟ้าแต่ละแบบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแบบจำลองระบบไฟฟ้า

แบบจำลองระบบไฟฟ้า	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Hz/s)
ระบบไฟฟ้าความถี่สูง	1.2938
ระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ (ครูป)	1.4003
ระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ (VSM)	1.2389
ระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ (VSG)	1.2090

จากการประเมินเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าพบว่า ทั้งระบบไฟฟ้าความถี่สูงและระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำที่ใช้วิธีการควบคุมความถี่เสมือนรูปแบบต่าง ๆ มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ไม่เกิน 2 Hz/s ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 1547 โดยทั่วไปแล้ว ระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำมักจะมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงกว่าระบบไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งอาจทำให้รีเลย์ความถี่ทำงานโดยไม่จำเป็น อันเป็นผลมาจากคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการควบคุมความถี่เสมือน เช่น การควบคุมรูป, เครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือน, และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนนี้จะช่วยให้อินเวอร์เตอร์สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ใกล้เคียงมากขึ้น ส่งผลให้สามารถลดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำแต่ละรูปแบบพบว่าระบบไฟฟ้าที่ใช้การควบคุมรูปมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงกว่าระบบที่ใช้เครื่องจักรกลซิงโครนัสเสมือนและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน ทั้งนี้เนื่องจาก 2 วิธีหลังได้รับการออกแบบมาเพื่อจำลองพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ทำให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าความถี่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือนมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ำกว่าระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำรูปแบบอื่น แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างการควบคุมที่ประกอบด้วยทั้งรูปควบคุมกำลังแอกทีฟซึ่งจำลองการตอบสนองระหว่างความถี่-กำลังแอกทีฟ และรูปควบคุมกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งจำลองความสัมพันธ์รูประหว่างแรงดัน-กำลังรีแอกทีฟจะสามารถเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเสมือน รวมถึงวิธีการควบคุมความถี่เสมือนรูปแบบอื่น ๆ จึงช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำได้มากขึ้น

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมความถี่เสมือนสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบสร้างกริดที่เรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเสมือนเพื่อให้แหล่งพลังงานหมุนเวียนจำลองพฤติกรรมการตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสและมีส่วนร่วมในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ ผลการประเมินประสิทธิภาพการทำงานโดยเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเสมือนพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเสมือนมีการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดและกำหนดค่าอ้างอิงใหม่ได้อย่างแม่นยำสามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเข้าสู่สถานะคงตัวได้เร็วและความถี่เบี่ยงเบนน้อยกว่าระบบไฟฟ้าดั้งเดิม นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเสมือนมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ต่ำกว่าระบบไฟฟ้าดั้งเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเสมือนสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Y. Yap, C. R. Sarimuthu, and J. M.-Y. Lim, "Virtual Inertia-Based Inverters for Mitigating Frequency Instability in Grid-Connected Renewable Energy System: A review," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 24, pp. 5300, 2019.
- [2] สุรัช ชัยทัศนีย์. (2025). ไฟฟ้าดับครั้งใหญ่ในยุโรป : บทเรียนจากสเปน-โปรตุเกส 2025 แนวทางรับมือและออกแบบระบบพลังงานอย่างสมดุล. [PDF document], 2568.
- [3] L. Badesa. (2025). Blackout in Spain and Portugal: Latest update. [PDF document].
- [4] U. Tamrakar, D. Shrestha, M. Maharjan, B. P. Bhattarai, T. M. Hansen, and R. Tonkoski, "Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions," *Appl. Sci.*, vol. 7, pp. 654, 2017.
- [5] A. Tayyebi, D. Groß, A. Anta, F. Kupzog, and F. Dörfler, "Frequency Stability of Synchronous Machines and Grid-Forming Power Converters," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 8, no. 2, pp. 1004–1018, 2020.
- [6] D. B. Rathnayake, R. Razzaghi, and B. Bahrani, "Generalized Virtual Synchronous Generator Control Design for Renewable Power Systems," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 13, no. 2, pp. 1021–1036, 2022.
- [7] Q. Hu et al., "Grid-forming inverter-enabled virtual power plants with inertia support capability," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 13, no. 5, pp. 4134–4143, 2022.
- [8] J. Liu, Y. Miura, and T. Ise, "Fixed-Parameter Damping Methods of Virtual Synchronous Generator Control Using State Feedback," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99177–99190, 2019.
- [9] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, and Y. Mitani, *Virtual Inertia Synthesis and Control*. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2021.