

บทที่ 5

การทดสอบตัวควบคุม

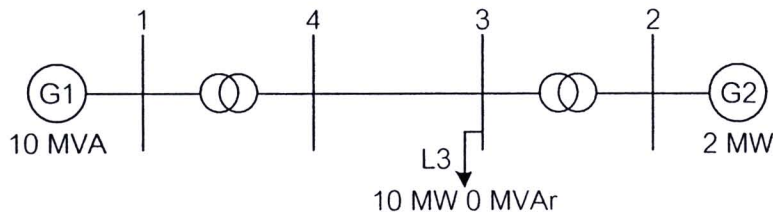
ในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink ทั้งนี้บทนี้จะกล่าวถึง ระบบทดสอบ อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทดสอบ วิธีการที่ใช้ทดสอบ ผลการทดสอบ และอธิบายผลที่ได้จากการทดสอบ

5.1 ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบทดสอบ ได้แก่ ระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง และระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน โดยข้อมูลของระบบทดสอบทั้งสองแสดงไว้ในภาคผนวก [14] ทั้งนี้แบบจำลองทั้งสองถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink

5.1.1 ระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

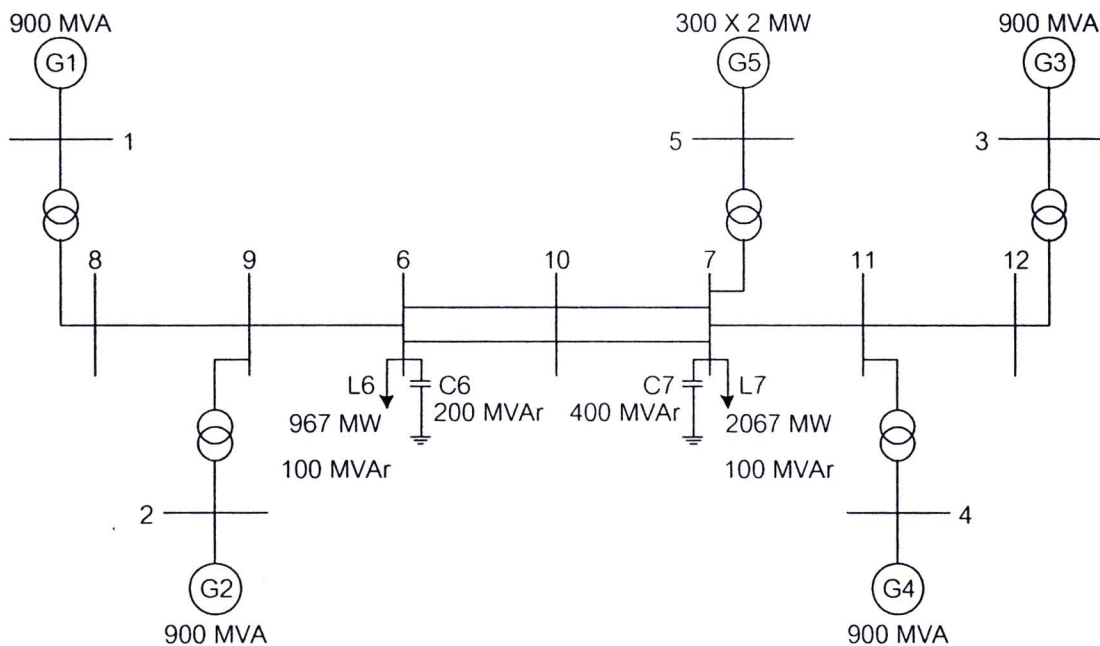
ระบบทดสอบนี้ประกอบด้วยบัสไฟฟ้าจำนวน 4 บัส สายส่งจำนวน 1 วงจร หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ตัว โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่จำนวน 1 โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 1 เครื่อง (G1) และโรงไฟฟ้าพลังงานลมจำนวน 1 แห่ง (G2) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

5.1.2 ระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ระบบทดสอบนี้ประกอบด้วยบัสไฟฟ้าจำนวน 12 บัส สายส่งจำนวน 8 วงจร หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 5 ตัว ตัวเก็บประจุขนานจำนวน 2 ตัว โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่จำนวน 2 โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 4 เครื่อง (G1, G2, G3, G4) และโรงไฟฟ้าพลังงานลมจำนวน 1 แห่ง (G5) ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

5.2 อุปกรณ์ในระบบทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทดสอบ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ระบบส่งไฟฟ้า และโหลด โดยค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก [14]

5.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ละเลยผลของภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ที่ส่งผลในช่วงชั่วพริบตา [14–16] ระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ได้แก่ ระบบควบคุมความเร็ว (Speed Governor) และระบบกระตุ้น (Excitation System) ที่ประกอบด้วยส่วนรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator หรือ AVR) และส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer หรือ PSS)

5.2.2 ระบบส่งไฟฟ้า

แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้าแทนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ของแรงดันที่บัสและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัสในลักษณะเมตริกซ์แบบผสม (Hybrid Matrix) ซึ่งพิจารณาจากจำนวนบัส การเชื่อมโยงของสายส่ง และแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ที่แต่ละบัส โดยละเลยผลของภาวะชั่วคราวในระบบส่ง

ทั้งนี้ หม้อแปลงไฟฟ้าและตัวเก็บประจุชานานจะถูกแทนด้วยรีแอกแตนซ์ซึ่งมีค่าคงที่

5.2.3 โหลด

แบบจำลองของโหลดที่ใช้เป็นแบบโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Constant Power Load) ชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว [14, 32]

5.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบทำโดยการจำลองการทำงานของตัวควบคุมในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง และระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ได้แก่ การควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ การควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ การควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริด สำหรับการรบกวนระบบทดสอบมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเท่านั้น โดยความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่วินาทีที่ 5 เป็นต้นไปดังรูปที่ 3.2 ทั้งนี้จะเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ

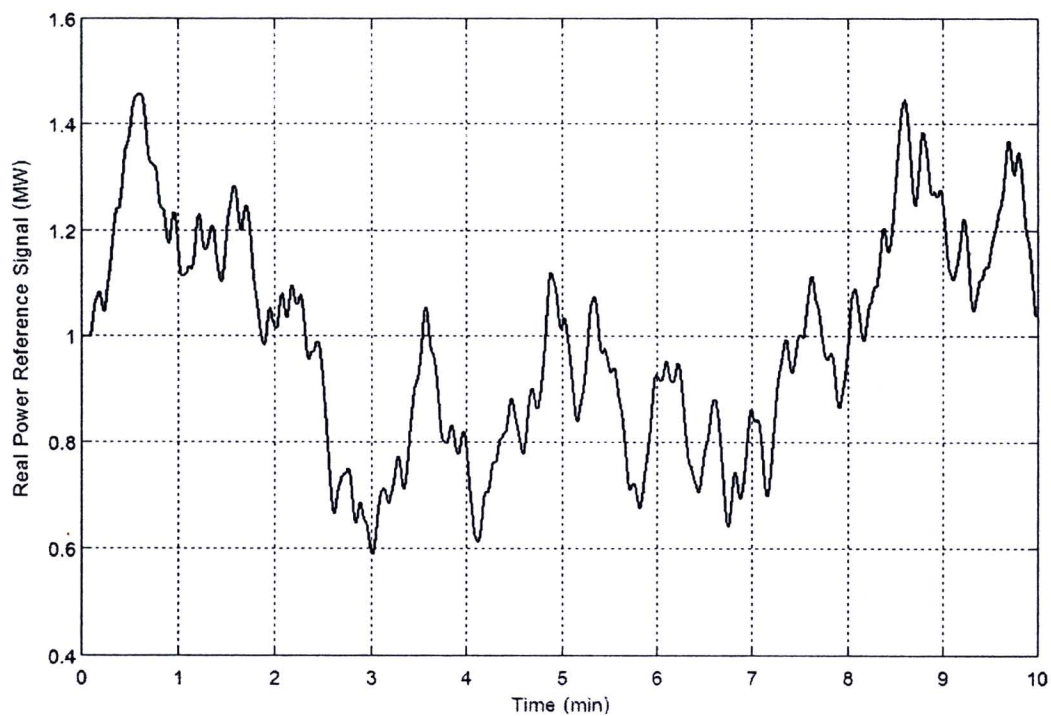
5.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ผลการทดสอบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องและผลการทดสอบกับระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

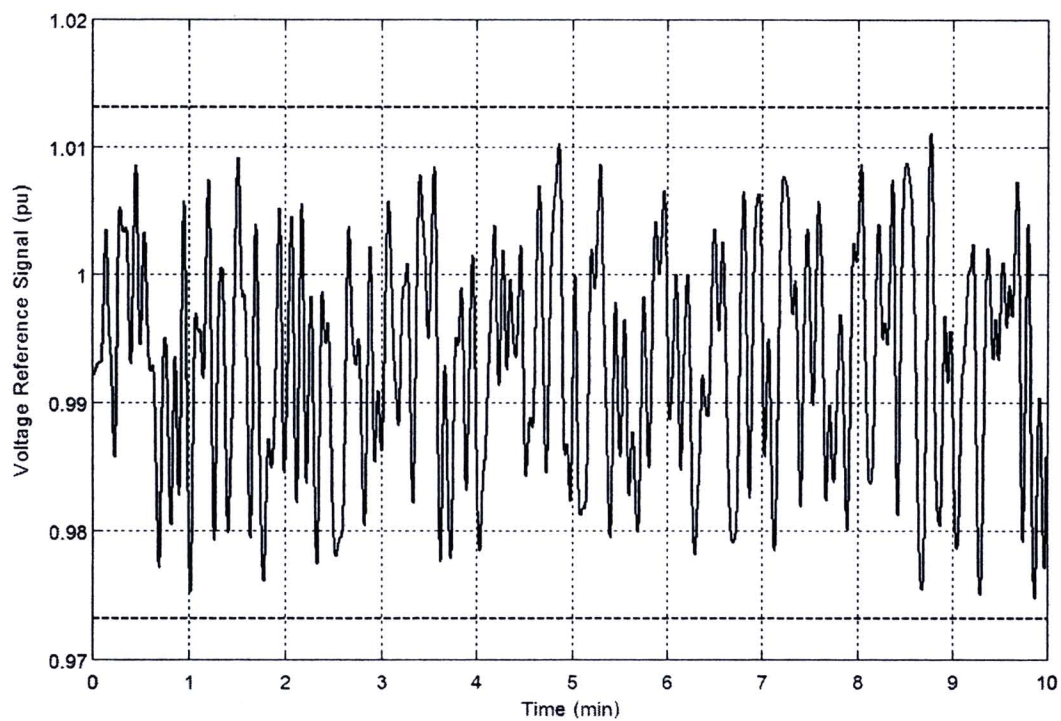
5.4.1 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

จากการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง ได้กราฟของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ดังรูปที่ 5.3–รูปที่ 5.5 ตามลำดับ

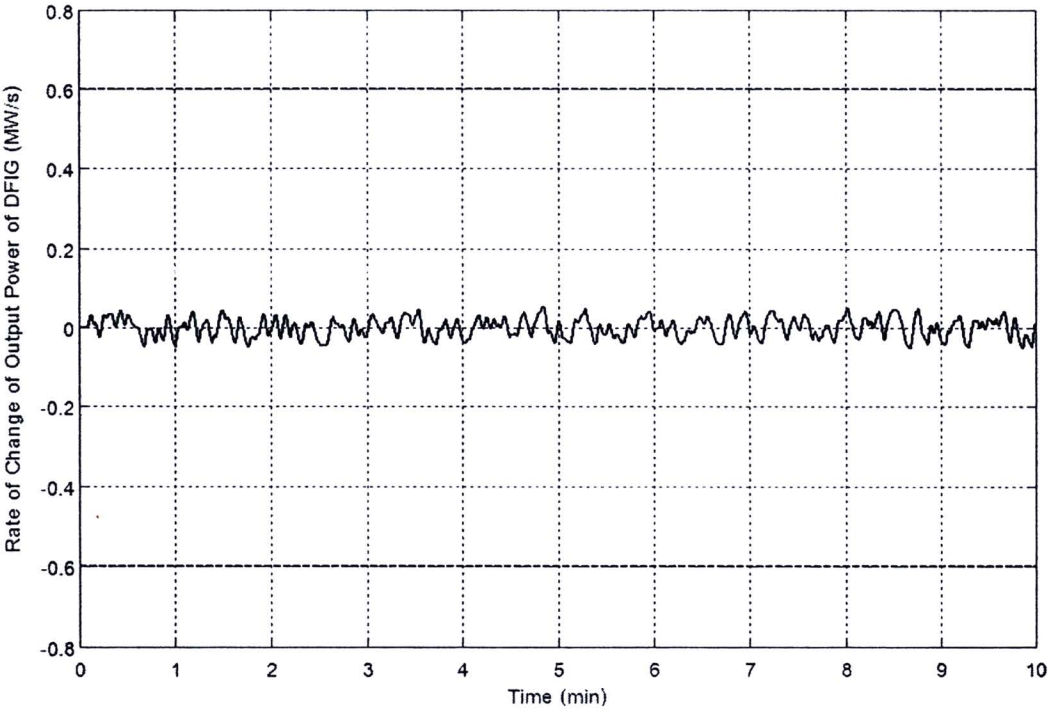
สำหรับการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนกับตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ได้ผลดังนี้ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ความถี่ของระบบ และขนาดแรงดันที่บัลลิสต์ติดตั้ง DFIG เป็นดังรูปที่ 5.6–รูปที่ 5.9 ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาทีและความแปรปรวนของความถี่ของระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1



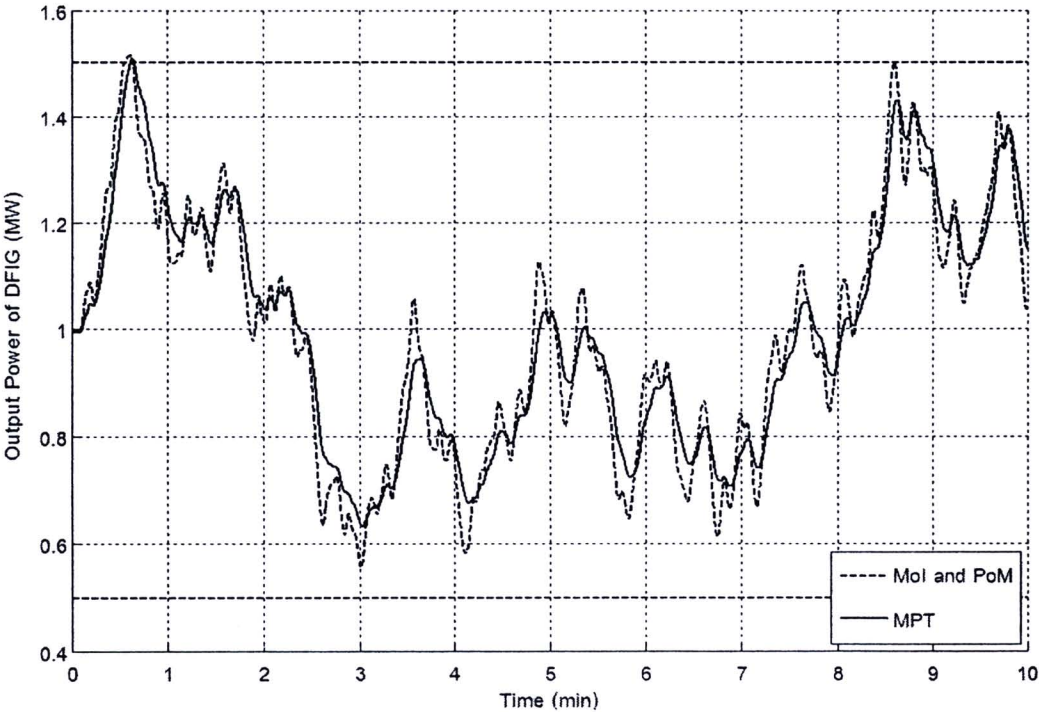
รูปที่ 5.3 ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



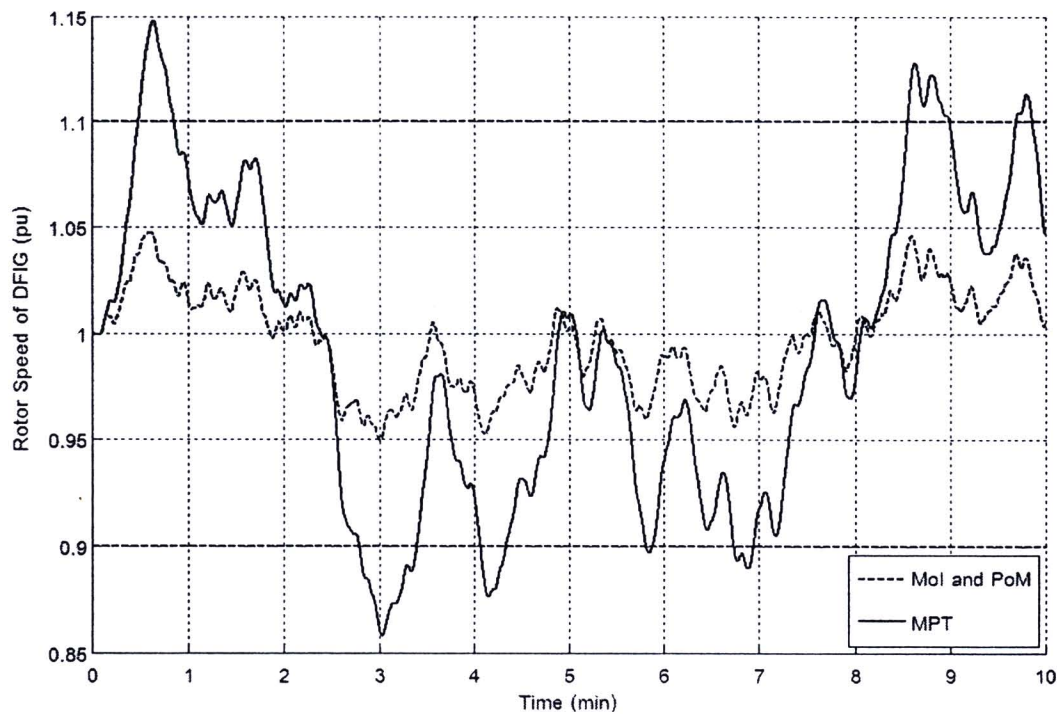
รูปที่ 5.4 ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



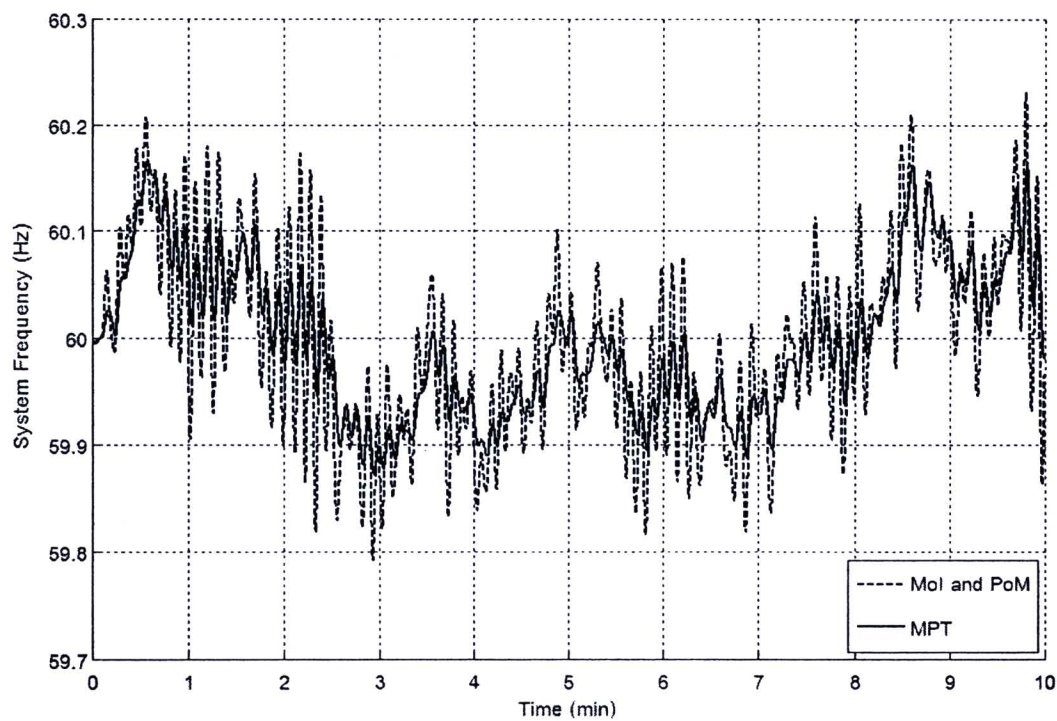
รูปที่ 5.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



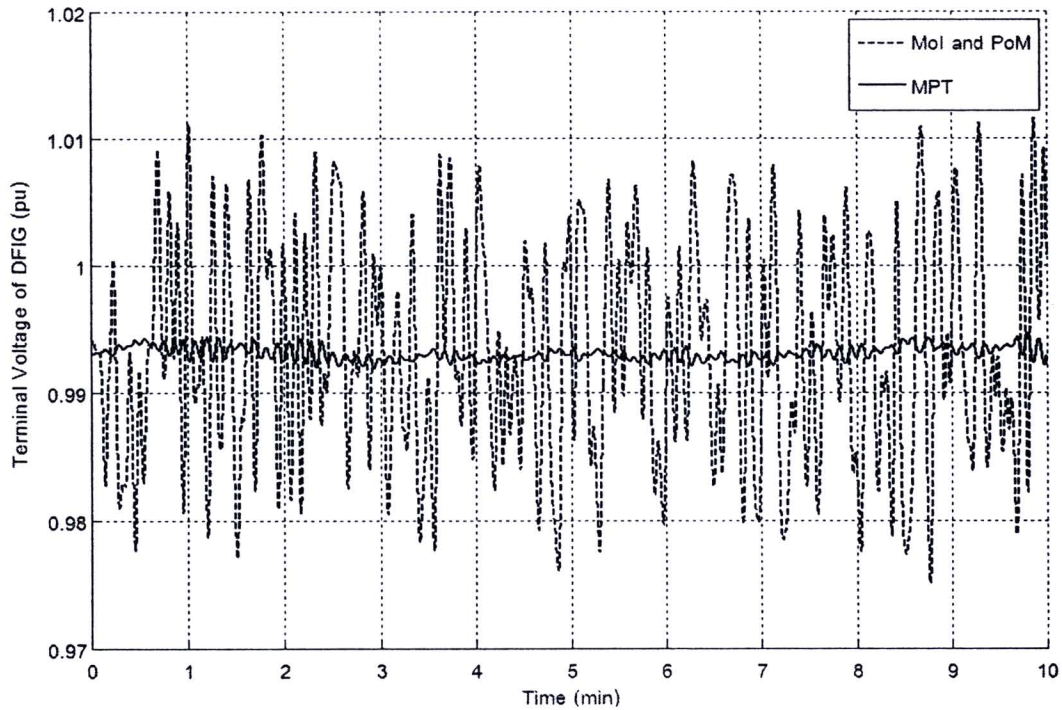
รูปที่ 5.6 กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



รูปที่ 5.7 ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



รูปที่ 5.8 ความถี่ของระบบในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง



รูปที่ 5.9 ขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง DFIG ในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

ตารางที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที และความแปรปรวนของความถี่ของระบบในระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

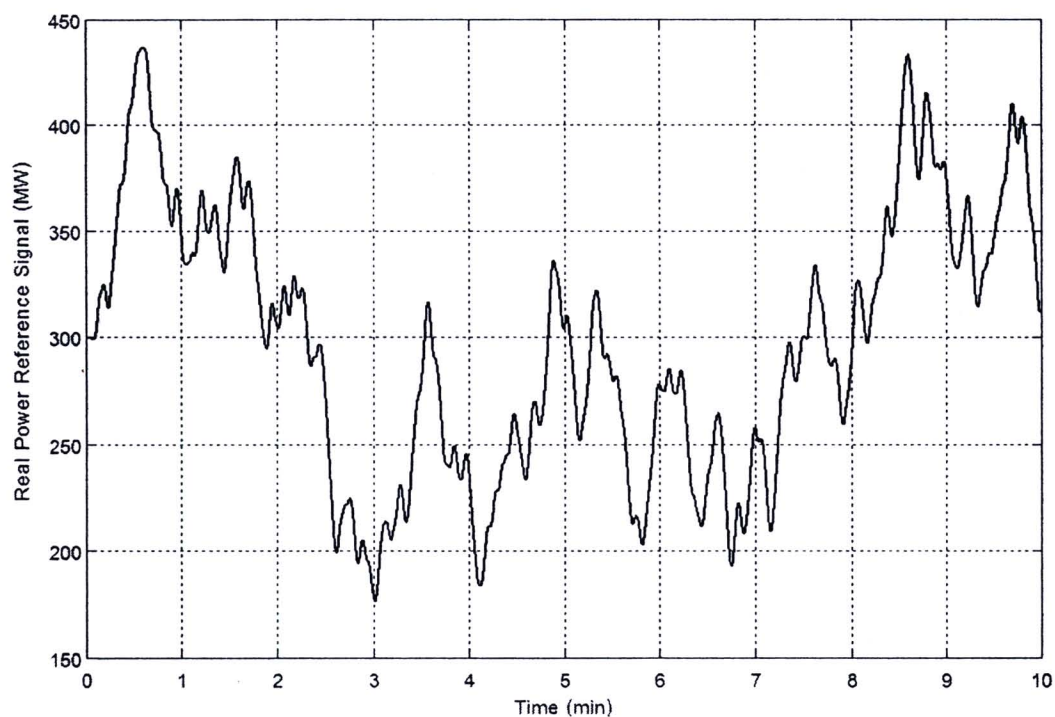
ผลการทดสอบ	ออกแบบโดย กรอบงานชาเกียน	ออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้า สูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที (kWh)	164.6	165.7
ความแปรปรวนของความถี่ ของระบบ (Hz^2)	0.007910	0.004998

5.4.2 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

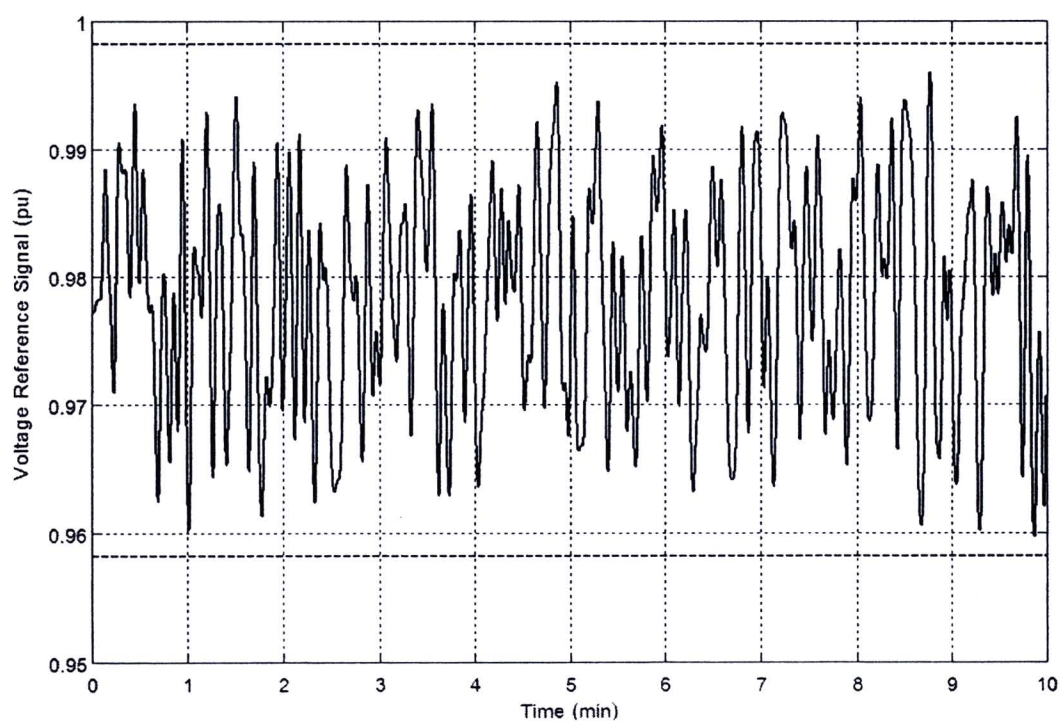
จากการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานชาเกียนกับระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน ได้กราฟของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ดังรูปที่ 5.10–รูปที่ 5.12 ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานชาเกียนกับตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ได้ผลดังนี้ กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ความถี่ของระบบ และขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง DFIG เป็นดัง

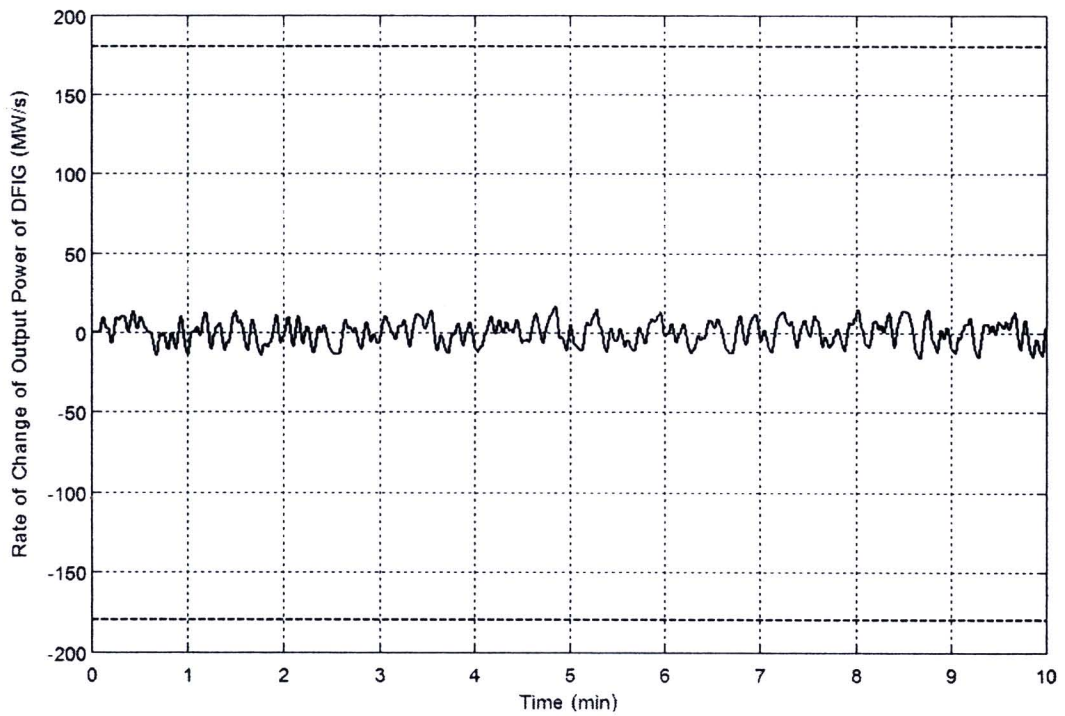
รูปที่ 5.13-รูปที่ 5.16 ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาทีและความแปรปรวนของความถี่ของระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.2



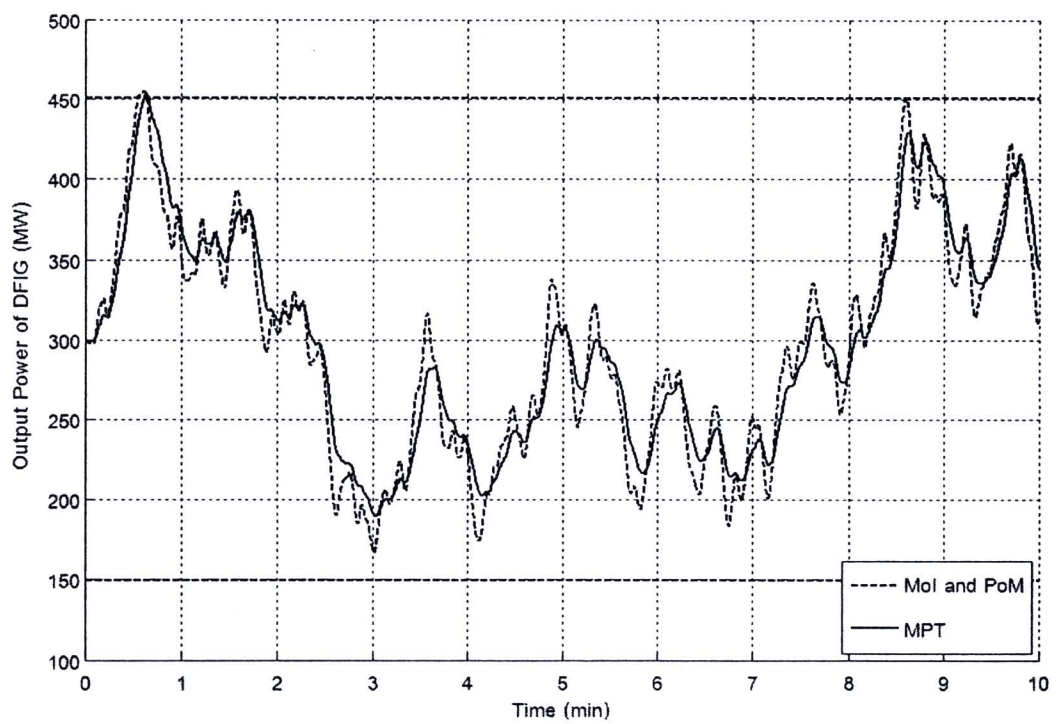
รูปที่ 5.10 ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่ที่เชื่อมต่อกัน



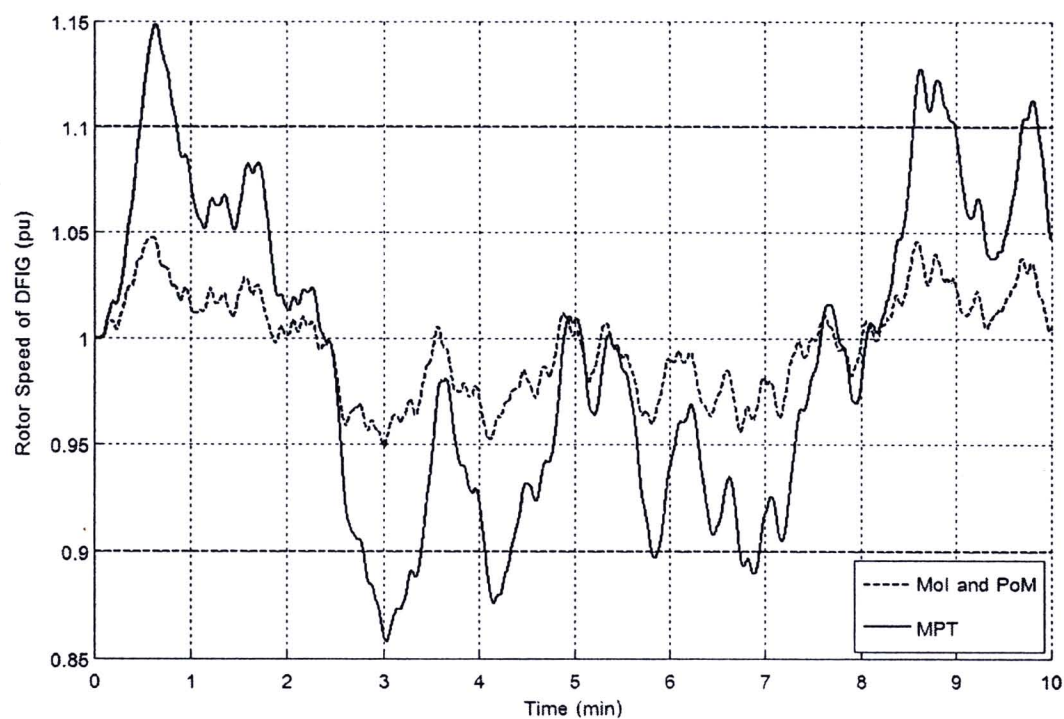
รูปที่ 5.11 ค่าอ้างอิงขนาดแรงดันของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่ที่เชื่อมต่อกัน



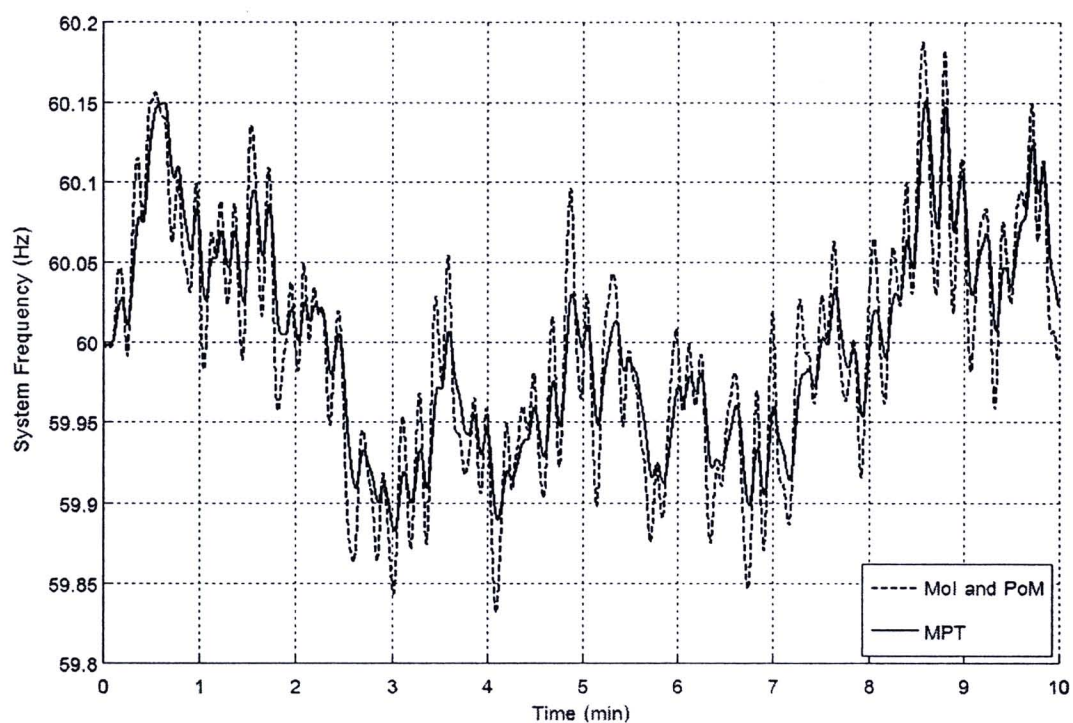
รูปที่ 5.12 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่ที่เชื่อมต่อกัน



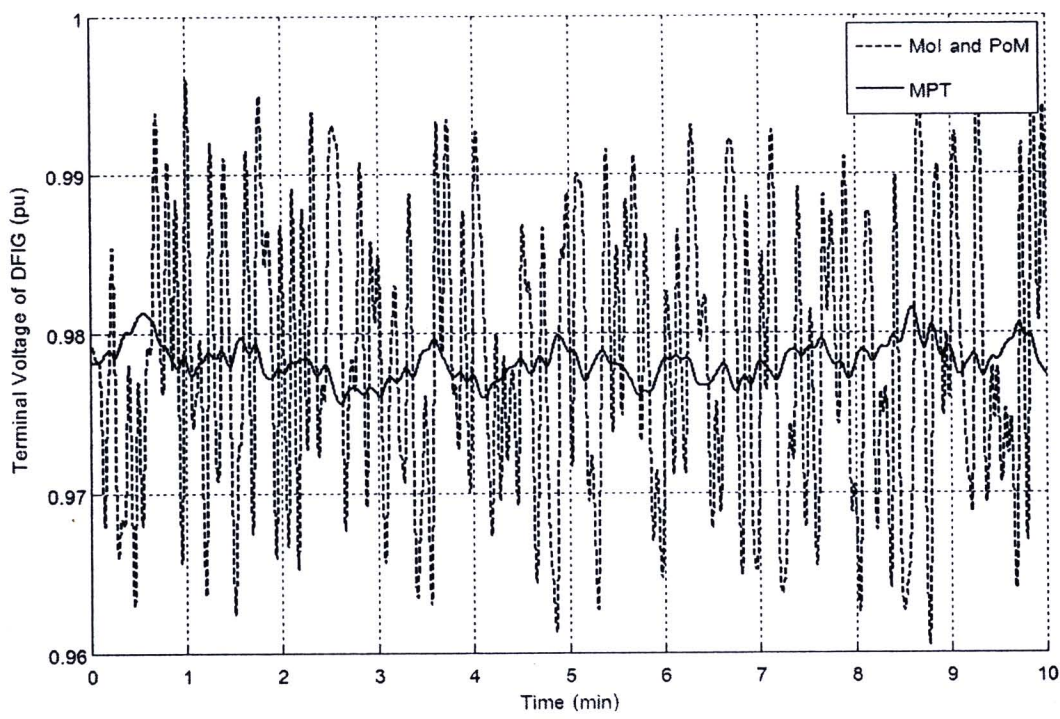
รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จาก DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่ที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5.14 ความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5.15 ความถี่ของระบบในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5.16 ขนาดแรงดันที่บัลที่ติดตั้ง DFIG ในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ตารางที่ 5.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที และความแปรปรวนของความถี่ของระบบในระบบทดสอบสองพื้นที่เชื่อมต่อกัน

ผลการทดสอบ	ออกแบบโดย กรอบงานชาเกียน	ออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้า สูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DFIG ในเวลา 10 นาที (MWh)	49.30	49.64
ความแปรปรวนของความถี่ ของระบบ (Hz ²)	0.006051	0.004669

5.5 อธิบายผลการทดสอบ

จากรูปที่ 5.4 รูปที่ 5.5 รูปที่ 5.7 รูปที่ 5.11 รูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.14 จะเห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้ ความเร็วโรเตอร์ และค่าอ้างอิงขนาดแรงดันมีค่าอยู่ในขอบเขตที่ต้องการดังตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้ในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.13 มีค่าเกินขอบเขตในตารางที่ 4.2 เนื่องจากความเร็วลมในช่วงเวลานั้นเปลี่ยนแปลงไปจากค่าความเร็วลมที่ใช้ในการทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นมาก จึงทำให้แบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมคลาดเคลื่อนไปจากแบบจำลองเดิมดังรูปที่ 4.1

กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวมากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.13 ซึ่งแสดงว่าตัวควบคุมที่ออกแบบไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ได้ นอกจากนี้ ความถี่ของระบบในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวมากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.8 รูปที่ 5.15 ตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 เนื่องจาก เมื่อกำลังไฟฟ้าแกว่งมากขึ้นจะทำให้ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งคอนสตรัคควบคุมความถี่ได้น้อยลงซึ่งทำให้ความถี่ของระบบแกว่งมากขึ้นด้วย

ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ เนื่องจากตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าควบคุมให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากสเตเตอร์เรียบ ซึ่งจะทำให้ความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากโรเตอร์จึงมีการแกว่งมากด้วยเหตุนี้กำลังไฟฟารวมจึงยังมีการแกว่งมาก

ขนาดแรงดันที่บัสที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวมากกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.16 เนื่องจากตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนปรับขนาดแรงดันเพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงผ่านทางตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันดังรูปที่ 4.7 จึงทำให้ความสามารถในการควบคุมขนาดแรงดันลดลง

การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันส่งผลให้ขนาดแรงดันมีการแกว่งมากดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.16 การแกว่งของขนาดแรงดันที่มากอาจทำให้ระบบเสียดิถยภาพได้ ดังนั้นจึงต้องจำกัดการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดัน ด้วยเหตุนี้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันจึงไม่สามารถช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้เต็มที่

เนื่องจากพลังงานจากลมถูกเก็บไว้ในรูปของพลังงานจลน์ในโรเตอร์ก่อนที่จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นตัวควบคุมจึงสามารถควบคุมให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้แกว่งน้อย ในขณะที่พลังงานที่ได้จากลมแกว่งมาก โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ในโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนและกรณีที่ใช้ตัวควบคุมตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ จึงมีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 แต่ความเร็วโรเตอร์ ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนมีการแกว่งตัวน้อยกว่า

กรณีที่ใช้ตัวควบคุมตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ ดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.14 ทั้งนี้ตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ จะควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมรับพลังงานจากลมให้ได้มากที่สุดในทุกค่าความเร็วลม ในขณะที่ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนไม่ได้ควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมรับพลังงานจากลมมากที่สุด เนื่องจากใช้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยกรอบงานซาเกียนจึงมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมตัวควบคุมที่ออกแบบเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ

