

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมทในการต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

Remote Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation

มานพ ยิ่งรัมย์^{1*}

Manop Yingram^{1*}

Received: June 20, 2019; Revised: December 2, 2019; Accepted: December 12, 2019

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เสนอรายละเอียดของเทคนิคการตรวจจับแบบรีโมท และนำเสนอเทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อเพื่อเป็นตัวแทนเทคนิคแบบรีโมท จากผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้อย่างทันทีทันใดและการรับส่งสัญญาณเพียง 1 จุดสามารถครอบคลุมกลุ่มขนาดใหญ่ของกริดได้ สำหรับการใช้งานกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็ก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำมีความเหมาะสม โดยสามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายใน 0.08 วินาที

คำสำคัญ : การตรวจจับการแยกตัวอิสระ; หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว; เชื่อมต่อกริด

¹ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

¹ Establishment Project of the Faculty of Engineering and Industrial Technology, Chaiyaphum Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: manopyin@hotmail.com

Abstract

The research paper presents the details of remote techniques. Specifically, the paper presents a signal produced by disconnect technique to present the remote techniques. The simulation results show that the proposed technique could achieve a sudden anti-islanding condition and it is possible to use only one transmitter to cover a big part of the grid. The research results show that an over/under-voltage and under voltage shift islanding detection technique is suitable to use with a small distributed generation, in which the anti-islanding condition within 0.08 s is achieved.

Keywords: Islanding Detection; Distributed Generation; Grid-Connected

บทนำ

ไฟฟ้าเป็นพลังที่สำคัญ การผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตได้จากหลากหลายวัตถุดิบนอกจากการผลิตด้วยพลังงานจากฟอสซิล โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าที่ได้มาจากพลังงานทดแทน อาทิ แสงเซลล์แสงอาทิตย์ และกังหันลม เพราะเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่สามารถช่วยสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ลดปัญหาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าอันเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน ซึ่งไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานเหล่านี้ส่วนมากเป็นรูปแบบของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation; DG) ที่ได้รับความนิยมในการดำเนินการติดตั้งเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้นเรื่อย ๆ [1] แต่การต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวก็สร้างปัญหาให้กับระบบไฟฟ้ากำลังเช่นกัน หนึ่งในปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นคือ สภาวะการแยกตัวอิสระ (Islanding Condition) ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวยังคงจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าอยู่

การแก้ปัญหานี้ต้องทำการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระเพื่อทำการต่อต้านสภาวะนี้ไม่ให้เกิดขึ้น โดยสามารถแบ่งเทคนิคเพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้หลัก ๆ คือ 1) เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท เทคนิคแบบรีโมทนี้ใช้วิธีการในการตรวจจับผ่านระบบสื่อสาร ซึ่งเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพสูงมากและไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ แต่จุดด้อยคือมีราคาแพงมากจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (หน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 kW) [2] 2) เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอล เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กเพราะราคาไม่แพง โดยที่เทคนิคแบบโลคอลยังสามารถแบ่งได้เป็นเทคนิคแบบพาสซีฟ เทคนิคนี้จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังสภาวะการแยกตัวอิสระได้เกิดขึ้น อาทิ แรงดัน ความถี่ ผลรวมฮาร์มอนิก อื่น ๆ ข้อดีคือ ไม่มีการฉีดสัญญาณเข้าไปในระบบแต่ข้อเสียคือ มีพื้นที่ไร้การตรวจจับกว้าง [3] - [6] เทคนิคแบบแอคทีฟ เทคนิคนี้จะฉีดสัญญาณเข้าไปสู่ระบบในจังหวะที่เกิดความสงสัยว่าเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระแล้วหรือไม่ โดยเทคนิคกลุ่มนี้มีพื้นที่ไร้การตรวจจับเล็กกว่าแบบพาสซีฟ แต่มีข้อเสียคือ มีสัญญาณเข้าไปรบกวน

คุณภาพไฟฟ้าของระบบ [7] - [8] และเทคนิคแบบไฮบริด เป็นการนำคุณลักษณะของทั้งแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟมารวมกัน [9] - [10]

ปัจจุบันหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีขนาดใหญ่คือ ขนาดมากกว่า 10 kW ยังคงได้รับความนิยมในการต่อเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น โซลาร์ฟาร์ม รวมทั้งขนาดที่น้อยกว่า 10 kW ด้วย เช่น โซลาร์รูฟท็อป ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระ มีโอกาสที่จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้กลุ่มเทคนิคแบบรีโมทมีความน่าสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาสภาวะการแยกตัวอิสระในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น บทความวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าเทคนิคแบบรีโมทมีความเหมาะสมกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดใหญ่ โดยเลือกเทคนิคการสื่อสารพาสซีฟผ่านสายไฟฟ้าในการนำเสนอเพราะเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและมีแนวโน้มที่จะใช้งานกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดใหญ่ รวมทั้งเปรียบเทียบและแสดงให้เห็นว่าเทคนิคแบบโลคอลมีความเหมาะสมในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กโดยเลือกเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำเพราะเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและมีแนวโน้มที่จะใช้งานกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็ก รายละเอียดที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท



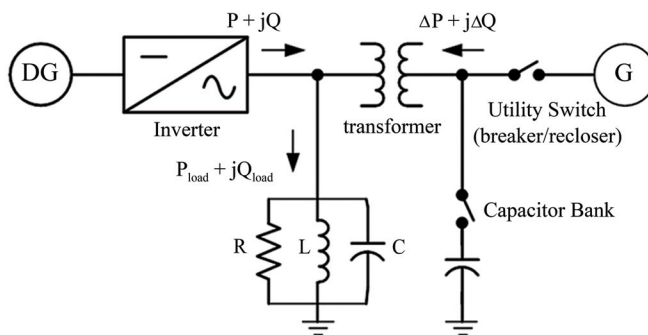
รูปที่ 1 สรุปเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระ

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Detection Techniques) เพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระ และต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระไม่ให้เกิดขึ้นนั้นมีอยู่หลากหลายเทคนิคซึ่งแต่ละเทคนิคมีข้อดีข้อเสียต่าง ๆ กันไป โดยสามารถที่จะแบ่งเทคนิคในการตรวจจับการแยกตัวอิสระได้เป็น 2 เทคนิคหลัก คือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอล (Local Islanding Detection Techniques) และเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟ

แบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท (Remote Islanding Detection Techniques) โดยเทคนิคแบบโลคอลนี้สามารถแบ่งได้อีก 3 แบบ คือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบพาสซีฟ (Passive Islanding Detection Techniques) เทคนิคนี้จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป อาทิ แรงดัน ความถี่ ผลรวมฮาร์มอนิก อื่น ๆ ข้อดีคือ เทคนิคนี้จะไม่มีการฉีดสัญญาณเข้าไปรบกวนระบบแต่ข้อเสียคือ มีพื้นที่รับการตรวจจับกว้าง เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแอคทีฟ (Active Islanding Detection Techniques) เทคนิคนี้จะฉีดสัญญาณเข้าไปสู่ระบบในจังหวะที่เกิดความสงสัยว่าเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระแล้วหรือไม่โดยเทคนิคนี้มีพื้นที่รับการตรวจจับเล็กกว่าแบบพาสซีฟ แต่มีข้อเสียคือ มีสัญญาณเข้าไปรบกวนคุณภาพไฟฟ้าของระบบ และเทคนิคสุดท้ายคือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบไฮบริด (Hybrid Islanding Detection Techniques) เป็นการนำคุณลักษณะของทั้งแบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟมารวมกัน โดยเทคนิคทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1 ในส่วนนี้จะให้รายละเอียดของเทคนิคในกลุ่มเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบรีโมท โดยเนื้อหาในกลุ่มเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบโลคอลและรายละเอียดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้นำเสนอไว้แล้ว [4] - [6], [8]

1. เทคนิคการสอดแทรกอิมพีแดนซ์ (Impedance Insertion Technique)

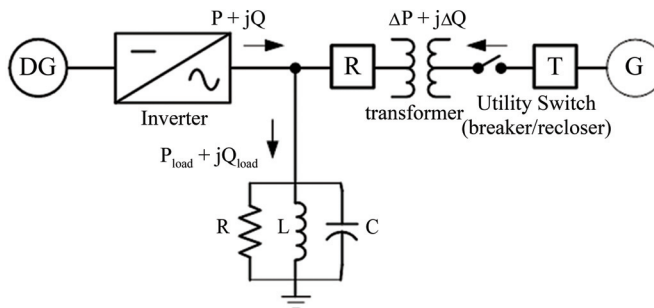
วิธีการนี้เป็น การต่อโหลดอิมพีแดนซ์ขนาดต่ำ (โดยทั่วไปใช้คาปาซิเตอร์เบงค์) เข้ากับจุด PCC ในจังหวะที่เบรกเกอร์ของการไฟฟ้าเปิดออก ผลที่เกิดขึ้นคือ ความสมดุลระหว่างการกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดจะถูกปรับเปลี่ยนไป การรบกวนนี้ทำให้เฟสเปลี่ยนแปลง และเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีของความถี่รีโซแนนซ์ซึ่งสามารถจะตรวจได้จากความถี่เกินหรือความถี่ต่ำ การต่ออิมพีแดนซ์เข้ามาต้องมีการหน่วงเวลาเพื่อความเหมาะสมในการตรวจจับความเบี่ยงเบนของความถี่ที่เกิดขึ้น [11] - [13] ลักษณะของวิธีการแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของวิธีการสอดแทรกอิมพีแดนซ์

วิธีการนี้ใช้เวลาตอบสนองต่ำ อย่างไรก็ตามมีราคาแพงในการนำไปใช้และเวลาที่ใส่อิมพีแดนซ์เข้าไปหลังกริดหลุดไปไม่พบว่ามีความมาตรฐานที่แน่ชัด ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการใช้วิธีการนี้ อิมพีแดนซ์ที่ใส่เข้าไปควรมีค่าต่ำสุดเท่าที่เพียงพอต่อการหาความเบี่ยงเบนของความถี่ที่เกิดขึ้นภายหลังจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังขาดการเชื่อมต่อกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2. เทคนิคการสื่อสารพาหะผ่านสายไฟฟ้า (Power Line Carrier Communications Technique; PLCC Technique)



รูปที่ 3 ลักษณะของวิธีการการสื่อสารพาหะผ่านสายไฟฟ้า

เทคนิคนี้จะอาศัยสายไฟฟ้าเป็นช่องทางในการสื่อสาร แนวคิดพื้นฐานก็คือการส่งสัญญาณพลังงานต่ำอย่างต่อเนื่องระหว่างตัวส่งสัญญาณ (Transmitter; T) ที่อยู่ในฝั่งของกริดกับตัวรับสัญญาณ (Receiver; R) ที่อยู่ในฝั่งของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อการสื่อสารนี้หยุดลง ตัวรับสัญญาณจะตรวจจับได้ว่าสัญญาณได้หยุดลงและจะส่งสัญญาณไปที่อินเวอร์เตอร์หรือสวิตช์เพื่อให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายหยุดการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โหนด ลักษณะการทำงานของวิธีการนี้แสดงดังในรูปที่ 3 ข้อดีของวิธีการนี้คือ ใช้ได้กับพื้นที่ที่มีหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวนมาก ไม่มีพื้นที่ไรกริดตรวจจับ ไม่ลดทอนคุณภาพไฟฟ้า โดยการตอบสนองขึ้นอยู่กับสัญญาณที่จะส่งและเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวส่งเพียงหนึ่งตัวเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่หนึ่งของกริด ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นของตัวรับและตัวส่งสัญญาณซึ่งอาจจะสูงมาก รวมทั้งอาจมีการส่งสัญญาณซ้ำ ๆ ของเทคนิค PLCC ทำให้ไม่สามารถตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้ [12], [14] - [16]

3. เทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ (Signal Produced by Disconnect Technique; SPD Technique)

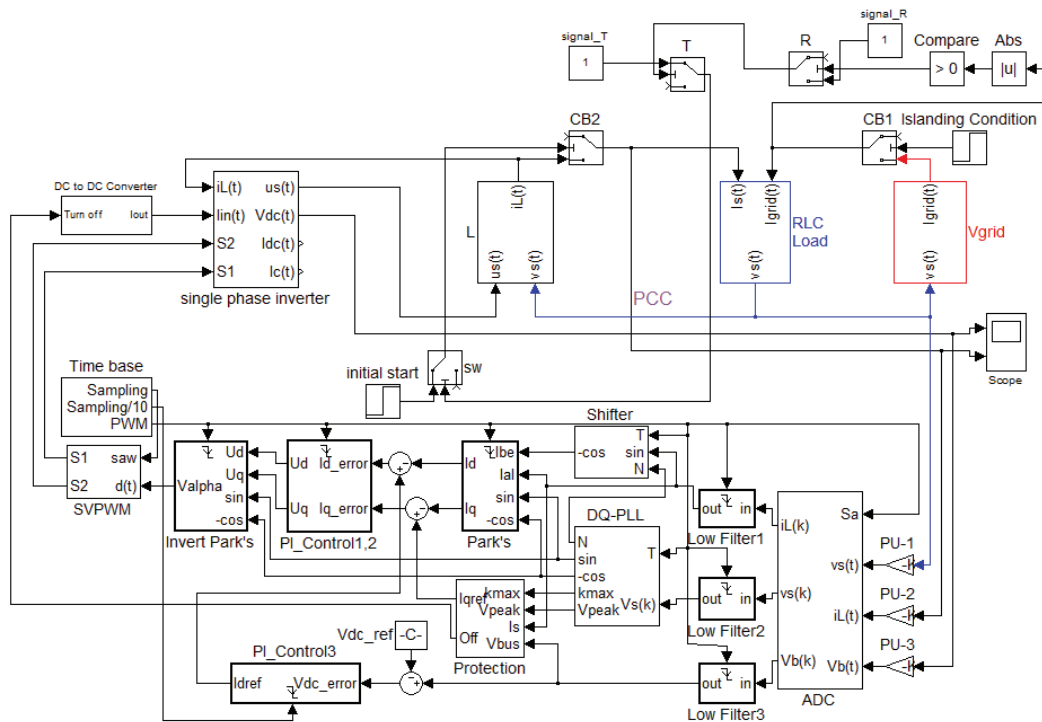
เทคนิคนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับเทคนิค PLCC เทคนิค SPD นี้จะใช้การสื่อสารระหว่างโครงข่ายกับอินเวอร์เตอร์ โดยที่วิธีการ SPD จะแตกต่างกับวิธีการ PLCC ตรงที่ชนิดของสัญญาณที่ส่งผ่าน โดยอาจเป็นการเชื่อมโยงผ่าน ไมโครเวฟ โทรศัพท์ หรืออื่น ๆ โดยที่วิธีการนี้มีข้อดีในการกำกับดูแลเพิ่มเติมและการควบคุมได้ทั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับกริด แต่วิธีการนี้มีข้อเสียอย่างมากในเรื่องค่าใช้จ่ายที่จะสูงมาก และค่าใช้จ่ายจะเพิ่มขึ้นในทุก ๆ หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เพิ่มขึ้น [12], [14]

4. เทคนิคการควบคุมกำกับดูแลและเก็บข้อมูล (Supervisory Control and Data Acquisition Technique; SCADA Technique)

การรวมกันของอินเวอร์เตอร์ระบบ SCADA เป็นทางเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลสำหรับการป้องกันการแยกตัวอิสระ โดยระบบ SCADA จะใช้เครือข่ายการสื่อสารที่กว้าง ร่วมกับเซนเซอร์เพื่อควบคุมและตรวจสอบอุปกรณ์เชื่อมต่อกริด ช่วยให้สามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์ฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้นในกริดได้อย่างรวดเร็ว ลดการตรวจจับการแยกตัวอิสระเมื่อกริดไม่ได้เชื่อมต่อกับโหนดแล้ว และชุดสัญญาณเตือน

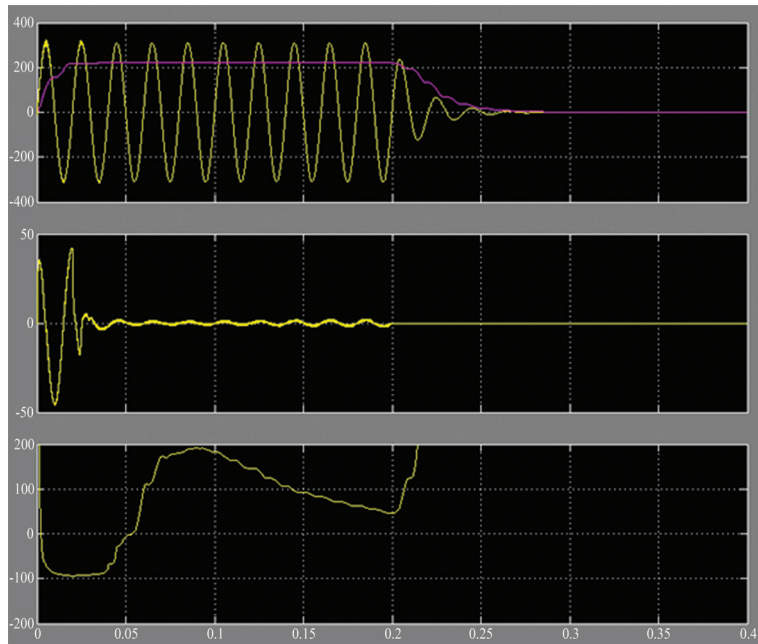
จะเปิดใช้งานเมื่อตัดการเชื่อมต่อกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวแล้ว วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับการแยกตัวอิสระ และไม่มีพื้นที่ไรการตรวจจับ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียคือมีราคาแพงเกินไป ต้องมีเซนเซอร์จำนวนมาก และต้องการคุณสมบัติเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังไม่สามารถทำได้กับการติดตั้งขนาดเล็ก [12], [14], [17]

เทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ

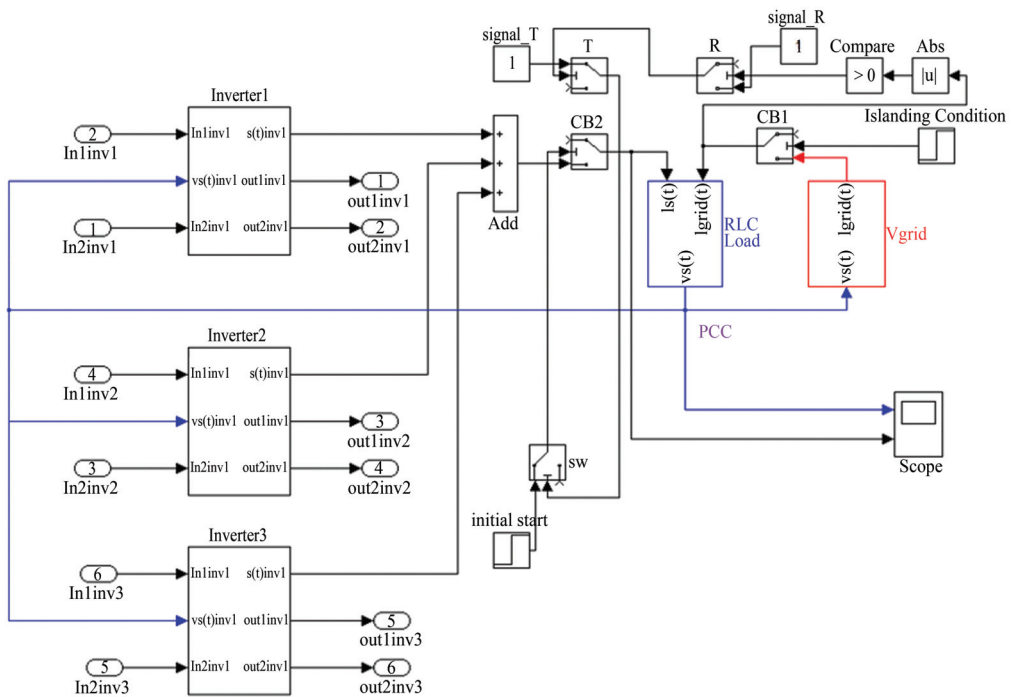


รูปที่ 4 วิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ

เทคนิคนี้เป็นการเชื่อมโยงผ่านไมโครเวฟ โทรศัพท์ หรืออื่น ๆ โดยที่วิธีการนี้มีข้อดีในการกำกับดูแลเพิ่มเติมและการควบคุมได้ทั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับกริดช่องทางในการสื่อสาร แนวคิดพื้นฐานก็คือการส่งสัญญาณ ตัวส่งสัญญาณที่อยู่ในฝั่งของกริดกับตัวรับสัญญาณที่อยู่ในฝั่งของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อการสื่อสารนี้หยุดลง ตัวรับสัญญาณจะตรวจจับได้ว่าสัญญาณได้หยุดลงและจะส่งสัญญาณไปที่อินเวอร์เตอร์หรือสวิตช์เพื่อให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายหยุดการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โหนด ลักษณะการทำงานของเทคนิคนี้คล้ายคลึงกับเทคนิคการสื่อสารพาหะผ่านสายไฟฟ้าในรูปที่ 3 และแนวคิดของเทคนิคนี้สามารถสร้างแบบจำลองดังในรูปที่ 4

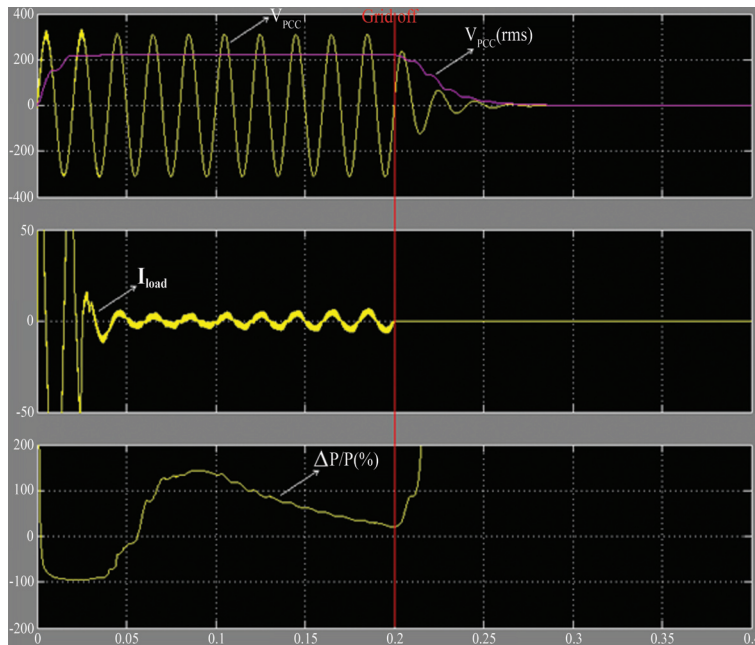


รูปที่ 5 ผลการจำลองการทำงานของวิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ



รูปที่ 6 วิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อในกรณีกลุ่มอินเวอร์เตอร์

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5 จะไม่ขึ้นกับสภาพของโหลดหรือปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นจึงสามารถแทนทุกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากรูปจะเห็นได้ว่าทันทีที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น ระบบสามารถตรวจจับได้ทันที ในที่นี้ถือว่าสัญญาณที่ส่งไปเป็นสัญญาณโทรศัพท์ ทำให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถตัดตัวเองออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันที จุดด้อยของวิธีการนี้คือ หากเกิดเหตุการณ์ที่ระบบสัญญาณโทรศัพท์ไม่สามารถใช้งานได้ในช่วงนั้น จะไม่สามารถตรวจจับได้นับเป็นข้อเสียที่สำคัญของวิธีการนี้ ส่วนในเรื่องค่าใช้จ่ายการออกแบบระบบสามารถใช้ร่วมกับอินเวอร์เตอร์หลายตัวได้ดังแสดงให้เห็นในการใช้งานแบบเป็นกลุ่มอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6 และผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 7 สามารถแสดงทุกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถตัดหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างรวดเร็วภายหลังจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระเช่นกัน ดังนั้นหากมีการออกแบบระบบที่ดี วิธีการนี้ไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ และรวดเร็วในการตรวจจับ รวมทั้งหากใช้งานกับกลุ่มอินเวอร์เตอร์จำนวนมากวิธีการนี้จะมีราคาไม่แพง แต่มีข้อเสียคือ หากสัญญาณที่รับและส่งไม่สามารถใช้งานได้

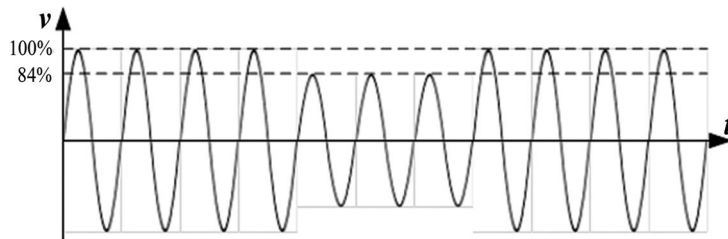


รูปที่ 7 ผลการจำลองการทำงานของวิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อในกรณีกลุ่มอินเวอร์เตอร์

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

ขั้นตอนเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ [9] - [10] เริ่มจากวัดแรงดันทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแล้วใช้การตรวจจับแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ โดยใช้

มาตรฐานสากล IEC 62116 แรงดันเกินคือมากกว่า 115 % และแรงดันต่ำน้อยกว่า 85 % ในการตรวจสอบซึ่งเป็นลักษณะของเทคนิคในกลุ่มแบบพาสซีฟ ถ้ายังไม่เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ DG จะยังไม่หยุดทำงานก็จะทำการตรวจสอบอีกครั้งว่าเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระหรือไม่โดยเปลี่ยนแรงดันต่ำ 84 % 3 รูปคลื่นลักษณะดังรูปที่ 8 เข้าสู่ระบบเพื่อทำการตรวจสอบอีกครั้งหากแรงดันยังคงไม่น้อยกว่าเกณฑ์แสดงว่าสภาวะแยกตัวอิสระไม่ได้เกิดขึ้น



รูปที่ 8 ลักษณะของรูปคลื่นที่ฉีดเข้าสู่ระบบ

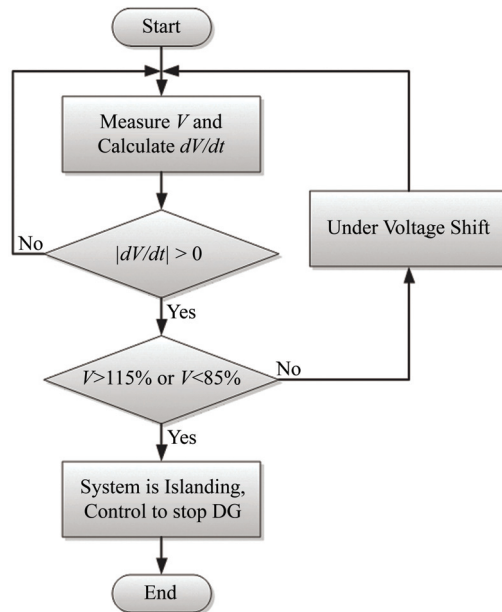
ดังนั้นสามารถวาดผังงาน (Flowchart) รวมทั้งให้รายละเอียดต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหาสภาวะการแยกตัวอิสระโดยใช้เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ดังรูปที่ 9 และสามารถอธิบายแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

เริ่มจากระบบจะทำการวัดแรงดัน ณ จุด PCC (V_{PCC}) ในทุก ๆ คาบเวลา และทำการคำนวณ dV/dt ของ V_{PCC}

ต่อมาเปรียบเทียบ $|dV/dt| > 0$ หรือไม่ หากมากกว่าจะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป แต่หากไม่มากกว่าจะเป็นการกลับไปเริ่มต้นใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก (ในทางปฏิบัติเนื่องจากระดับของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่เสมอ ดังนั้นการกำหนดการเปรียบเทียบค่าอาจไม่ใช่ศูนย์ซึ่งควรจะมีค่ามากกว่าศูนย์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังสามารถใช้ความถี่แทนที่แรงดันในการเปรียบเทียบ)

ขั้นตอนต่อมาจะทำการเปรียบเทียบ $V > 115\%$ (ถ้ากำหนดแรงดันก่อนการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระให้คงที่เท่ากับ 220 V จะได้ $220 \times 115\% = 253$ V) หรือ $V < 85\%$ ($220 \times 85\% = 187$ V) หรือไม่ ถ้ามากกว่าหรือน้อยกว่าตามเงื่อนไข จะกระทำในขั้นตอนต่อไปคือ ระบบควบคุมจะทำการปลด DG ออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ถ้าไม่เป็นจริงจะเริ่มขบวนการต่อไป

โดยระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดัน $V = 84\%$ หรือ $V = 184.8$ V (แรงดัน $V = 84\%$ เมื่อแรงดันปกติเท่ากับ 220 V ดังนั้นจะได้ $V = 0.84 \times 220 = 184.8$ V) เข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง บทความวิจัยนี้กำหนดการฉีดแรงดัน 184.8 V 3 รูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 9 ขั้นตอนของเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

จากนั้นระบบจะเริ่มกลับเข้าสู่ขบวนการตั้งแต่นั้น นั่นคือวัดแรงดัน V_{PCC} ซึ่งผลจากการวัดแรงดัน 184.8 V 3 รูปคลื่น เข้าไปจะทำให้ $V_{PCC} < 187$ V ถ้าสถานะที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสถานะการแยกตัวอิสระ จะทำให้อินเวอร์เตอร์ทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ แต่ถ้าไม่ใช่แสดงว่าสถานะนั้นไม่ใช่สถานะการแยกตัวอิสระ โดยผลจากการที่วัดแรงดันเข้าไปแต่ไม่เป็นสถานะการแยกตัวอิสระนั้น V_{PCC} จะยังคงเท่าเดิม แต่สิ่งที่เปลี่ยนไปคือ P (กำลังไฟฟ้าจริงของ DG) จะลดลง ส่วน ΔP (กำลังไฟฟ้าจริงของ Grid) จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้คือ

ในสถานะปกติกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดจะเป็นการร่วมกันจ่ายให้โดยกำลังไฟฟ้าจริงของ DG และกำลังไฟฟ้าจริงของ Grid สิ่งแรกที่จุด PCC ที่สามารถวิเคราะห์และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (1) - (3)

$$P_{load} = P_{DG} + P_{Grid} = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{R \cdot (P_{DG} + P_{Grid})} \quad (2)$$

ทำการเคอสมการที่ (1) จะได้สมการที่ (3) - (5)

$$\frac{\partial(P_{DG} + P_{Grid})}{\partial V} = 2 \cdot \frac{V}{R} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(P_{DG} + P_{Grid})}{\partial V} = 2 \cdot \frac{\sqrt{R \cdot (P_{DG} + P_{Grid})}}{R} \quad (4)$$

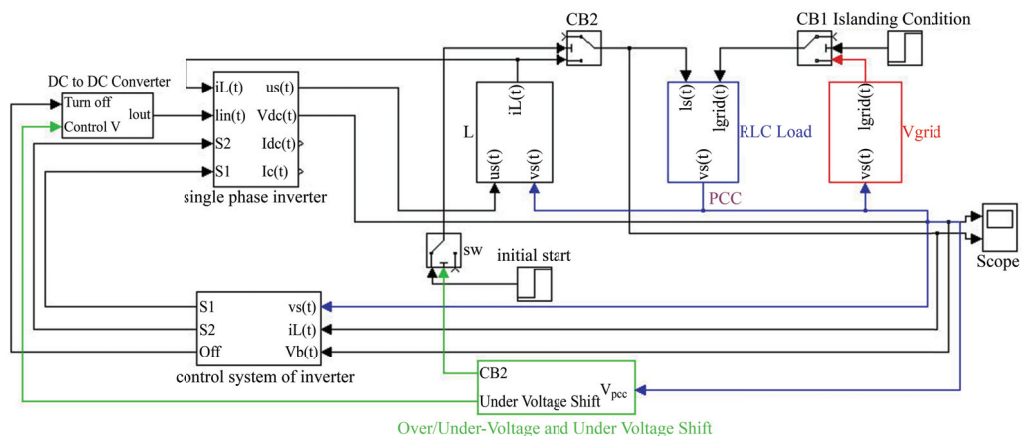
$$\frac{\partial(P_{DG} + P_{Grid})}{\partial V} = 2 \cdot \frac{\sqrt{(P_{DG} + P_{Grid})}}{R} \quad (5)$$

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงจะแสดงได้ตามสมการที่ (6)

$$\Delta P_{DG} + \Delta P_{Grid} = 2 \cdot \Delta V \cdot \sqrt{\frac{P_{load}}{R}} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะเห็นได้ว่า R และ P_{load} มีค่าคงที่ เมื่อระบบควบคุมจัดแรงดัน 184.8 V (84 %) 3 รูปคลื่นเข้าสู่ระบบ หากสภาวะที่เกิดขึ้นไม่เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระจะทำให้แรงดัน V_{PCC} (ΔV) จะเท่าเดิม แต่ ΔP_{DG} ลดลงซึ่งกลับกันกับ ΔP_{Grid} เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เพื่อเป็นการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อโหลดที่ยังคงต้องการกำลังไฟฟ้าเท่าเดิม

โดยสามารถสร้างแบบจำลองดังรูปที่ 10 แสดงแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ในกรณีใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 1 ตัว ส่วนรายละเอียดภายในบล็อกต่อต้านสภาวะแสดงในรูปที่ 11



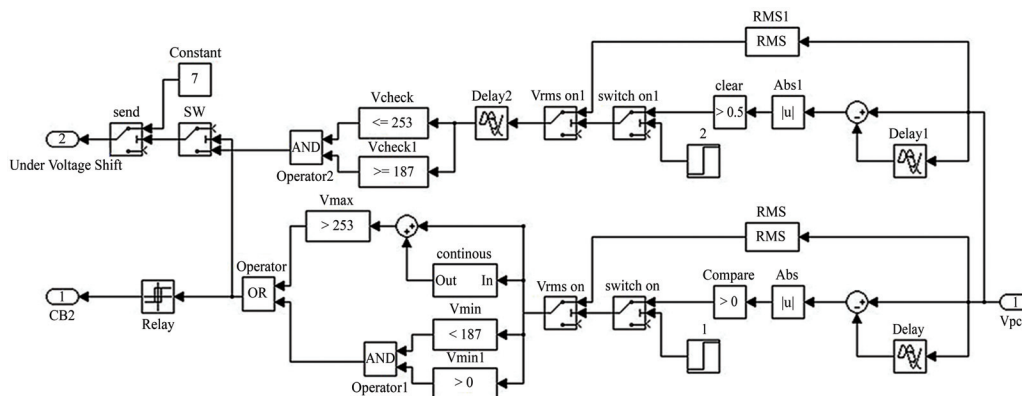
รูปที่ 10 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

โดยการนำเสนอจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกับการนำเสนอเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ [6] กรณีของ $\Delta P/P > 38.41\%$ กรณีของ $\Delta P/P < -24.39\%$ และกรณีของ $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$

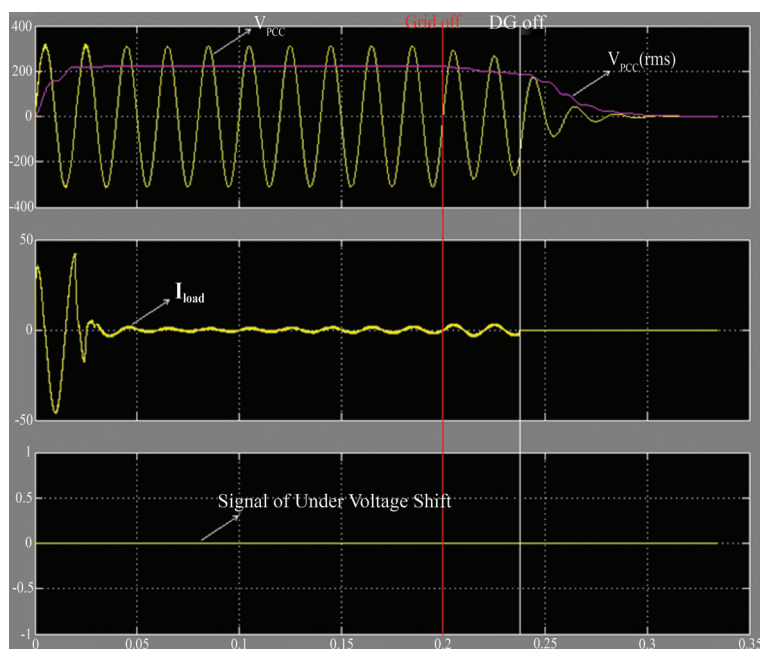
1) กรณีของ $\Delta P/P > 38.41\%$

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $P < P_{load}$ โดยจะต้องมีขนาด $\Delta P/P > 38.41\%$ ซึ่งเมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นจะทำให้ V_{PCC} น้อยกว่า 187 V ในการนำเสนอเทคนิคนี้สร้างสภาวะการแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s ผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 12 จากรูปจะเห็นได้ว่าภายหลังจากที่สภาวะการแยกตัว

อิสระเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s แรงดัน V_{PCC} มีการลดลงมาเรื่อย ๆ ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ทำการสั่งให้หยุดจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ณ จุดที่แรงดัน $V_{PCC}(\text{rms}) < 187 \text{ V}$ นั่นคือ ณ เวลา 0.24 s ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s ในกรณีของ $\Delta P/P > 38.41 \%$



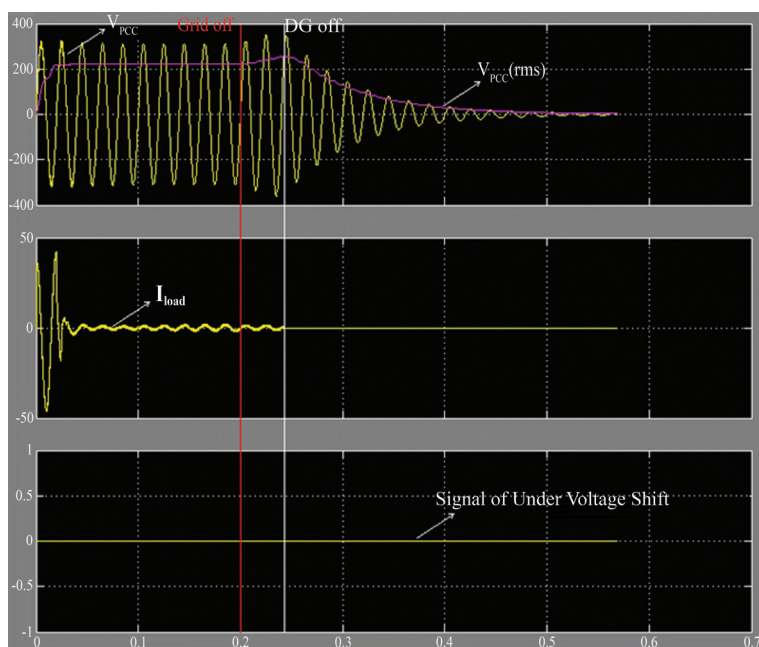
รูปที่ 11 บล็อกของเทคนิคการตรวจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

รูปที่ 12 V_{PCC} ในช่วงแรงดันต่ำ

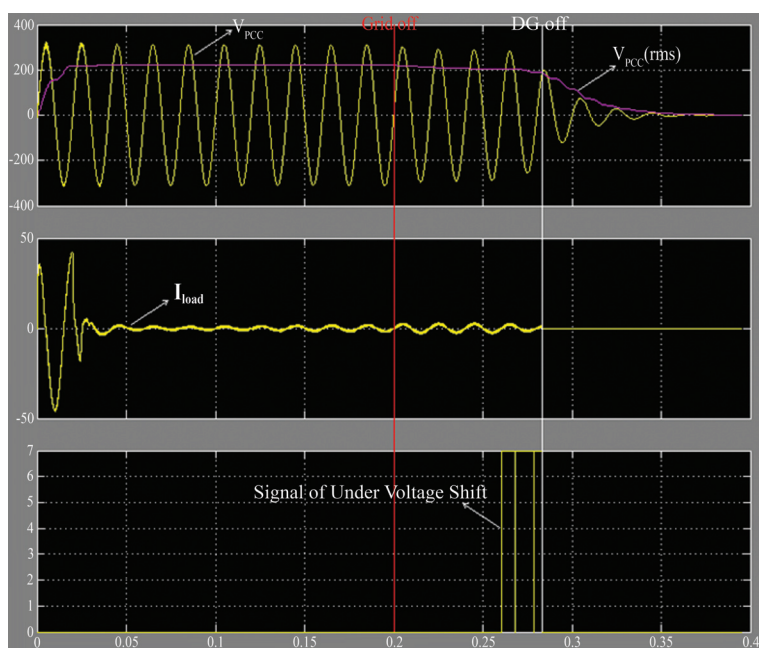
2) กรณีของ $\Delta P/P < -24.39\%$

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $P > P_{load}$ โดยต้องมีขนาด $\Delta P/P < -24.39 \%$ ซึ่งเมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นจะทำให้ V_{PCC} มากกว่า 253 V โดยสร้างสภาวะการแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s ผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 13 จากรูปจะเห็นว่าภายหลังจากที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s แรงดัน V_{PCC} มีการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ทำการสั่งให้หยุดจ่าย

ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ณ จุดที่แรงดัน $V_{PCC}(rms) > 253$ V นั่นคือ ณ เวลา 0.24 s ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในกรณีนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s



รูปที่ 13 V_{PCC} ในช่วงแรงดันเกิน

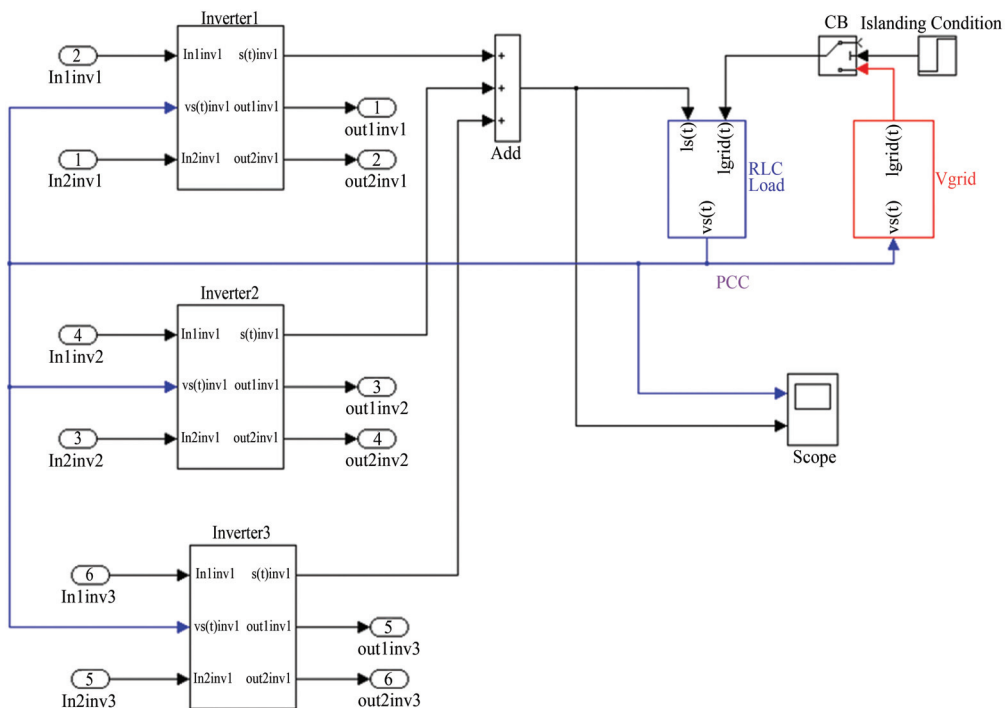


รูปที่ 14 V_{PCC} ในช่วงแรงดันอยู่ในขอบเขตปกติ

3) กรณีของ $-24.39 \% \leq \Delta P/P \leq 38.41 \%$

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $P \approx P_{load}$ โดยจะต้องมีขนาด $-24.39 \% \leq \Delta P/P \leq 38.41 \%$ ซึ่งเมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นจะทำให้ V_{PCC} ไม่น้อยกว่า 187 V และไม่มากกว่า 253 V โดยสร้างสภาวะการแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s ผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 14 จากรูปจะเห็นได้ว่าภายหลังจากที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s แรงดัน V_{PCC} จะไม่น้อยกว่า 187 V และจะไม่มากกว่า 253 V ต่อมาระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ทำการสั่งให้ฉีดยุติสัญญาณเป็นแรงดันคงที่ 184.4 V (84 %) 3 รูปคลื่นเข้าสู่โหลด ถ้าสภาวะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์จะทำการหยุดจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โหลดเพราะว่าเมื่อระบบควบคุมวัดแรงดันที่ V_{PCC} จะพบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่า 187 V เมื่อสังเกตในรูปที่ 14 สามารถเห็นได้ว่า DG หยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.28 s แสดงว่าเทคนิคนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระภายในเวลา 0.08 s

เมื่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์แบบกลุ่ม เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ สามารถสร้างแบบจำลองได้ดังในรูปที่ 15 ส่วนรายละเอียดภายในบล็อกต่อต้านสภาวะแสดงในรูปที่ 11 เช่นเดียวกัน และการนำเสนอผลการจำลองการทำงานแบ่งออกเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกัน ในบทความนี้นำเสนอเฉพาะข้อสรุป จากผลการจำลองการทำงานพบว่า ในกรณีของ $\Delta P/P > 38.41 \%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.06 s ในกรณีของ $\Delta P/P < -24.39 \%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.08 s และในกรณีของ $-24.39 \% \leq \Delta P/P \leq 38.41 \%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.01 s



รูปที่ 15 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ในกรณีกลุ่มอินเวอร์เตอร์

วิเคราะห์ผล

จากผลจำลองการทำงานพบว่าเมื่อแบ่งการพิจารณาการใช้งานเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระออกเป็น 2 แบบ คือ แบบเดี่ยว และแบบกลุ่ม โดยแบบเดี่ยวหมายถึง การผลิตอินเวอร์เตอร์เพื่อการจำหน่ายเป็นสินค้า เพราะหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายที่ต่อเข้ากับโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังโดยเฉพาะระบบที่ต่อผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อการแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ ส่วนแบบกลุ่มคือ การใช้งานอินเวอร์เตอร์จำนวนมากเป็นกลุ่มหรือรูปแบบของผู้ผลิตไฟฟ้าจากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพื่อการจำหน่าย เช่น โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถออกแบบจัดสร้างแต่ละส่วนได้เองทั้งหมด

เทคนิคที่เหมาะสมกับการใช้งานในการจัดสร้างอินเวอร์เตอร์แบบเดี่ยวนี้ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าควรเป็นเทคนิคในกลุ่มโลคอลเพราะจะเห็นได้ว่าเทคนิคแบบรีโมท เช่น เทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ ไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตอินเวอร์เตอร์เพื่อจำหน่ายเนื่องจากเทคนิคในกลุ่มนี้ทั้งหมดต้องมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับในส่วนฝั่งของการไฟฟ้า เช่น ติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณในฝั่งของการไฟฟ้า จึงจะเห็นได้ว่าไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับผู้ใช้รายบุคคล เช่น เมื่อนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในระบบโซลาร์รูฟท็อป ที่ได้รับการส่งเสริมให้บุคคลทั่วไปผลิตและขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับการไฟฟ้า โดยเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ สามารถตรวจจับและต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้อย่างรวดเร็ว และไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ ในกรณี $\Delta P/P > 38.41\%$ และในกรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s ส่วนในกรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.08 s

เมื่อพิจารณาการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวหลายตัวหรือสามารถผลิตไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ ซึ่งนับว่าเป็นแบบกลุ่มพบว่าเทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ เป็นเทคนิคที่เหมาะสม เพราะทันทีที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น ระบบสามารถตรวจจับได้ทันทีทำให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถตัดตัวเองออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันที (หรือกล่าวได้ว่า สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระใช้เวลาน้อยกว่า 0.01 s) รวมทั้งการส่งสัญญาณและรับสัญญาณเพียง 1 จุดสามารถครอบคลุมหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ได้ โดยเฉพาะ การผลิตไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ ที่สามารถออกแบบและจัดสร้างระบบต่าง ๆ ได้เองทั้งหมด เช่น โซลาร์ฟาร์ม เป็นต้น ในส่วนของจุดอ่อนของวิธีการนี้เช่น การใช้สัญญาณโทรศัพท์เป็นจุดรับส่งสัญญาณ ถ้าหากว่าระบบสัญญาณโทรศัพท์เกิดล่มในขณะที่ระบบจะต้องทำการตรวจจับการแยกตัวอิสระในช่วงเวลานั้นพอดี สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วิธีการอื่นร่วม เช่น ในช่วงเวลานี้ผู้ดูแลระบบจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เช่น จัดหาอินเวอร์เตอร์ 1 ตัวแยกอิสระจากแบบกลุ่มทั้งหมดแล้วใช้วิธีการแบบโลคอลในอินเวอร์เตอร์ตัวนี้ เป็นต้น

สรุป

เทคนิคที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์แบบเดี่ยวคือ วิธีการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ซึ่งเป็นเทคนิคในกลุ่มแบบไฮบริด เพราะสามารถตรวจจับและต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับเมื่อพิจารณาแล้ว ในกรณี $\Delta P/P > 38.41\%$

และในกรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s ส่วนในกรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.08 s เพียงแต่มีการรบกวนระบบเพราะต้องฉีดสัญญาณเปลี่ยนแรงดันต่ำเข้าไปตรวจสอบว่าเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระในกรณีนี้เท่านั้น

ส่วนเทคนิคที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์แบบกลุ่มคือ วิธีการที่เหมาะสมเป็นวิธีการแบบรีโมท เพราะวิธีการนี้ไม่มีพื้นที่ใ้การตรวจจับ รวดเร็ว แม่นยำ มีประสิทธิภาพสูง ในโครงการวิจัยนี้พบว่าเทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อเป็นเทคนิคที่เหมาะสมเพราะทันทีที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น ระบบสามารถตรวจจับได้ทันที ทำให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถตัดตัวเองออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันที รวมทั้งการส่งสัญญาณและรับสัญญาณเพียง 1 จุดสามารถครอบคลุม หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ได้โดยเฉพาะ การผลิตไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ ที่สามารถออกแบบและจัดสร้างระบบต่าง ๆ ได้เองทั้งหมด เช่น โซลาร์ฟาร์ม เป็นต้น ในส่วนของจุดอ่อนของวิธีการนี้เช่นการใช้สัญญาณโทรศัพท์เป็นจุดรับส่งสัญญาณและหากว่าระบบสัญญาณโทรศัพท์เกิดล้มในขณะที่ระบบจะต้องทำการตรวจจับการแยกตัวอิสระในช่วงเวลานั้นพอดี สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วิธีการอื่นร่วม เช่น ในช่วงเวลานี้ผู้ดูแลระบบจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เช่น จัดหาอินเวอร์เตอร์ 1 ตัวแยกอิสระจากแบบกลุ่มทั้งหมดแล้วใช้วิธีการแบบโลคอลในอินเวอร์เตอร์ตัวนี้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561 ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

References

- [1] REN21. (2018). **Renewables 2018 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
- [2] IEEE Std. 1547. (2003). **IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. SASB/SCC21 - SCC21 - Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage
- [3] Yingram, M. (2013). Passive Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 30, No. 3, pp. 19-24
- [4] Yingram, M. and Soonrat, S. (2017). Active Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 10, No. 1, pp. 11-21
- [5] Yingram, M. (2014). **Passive Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation on Matlab/Simulink**. Research Report, Faculty of Arts and Science, Chaiyaphum Rajabhat University

- [6] Yingram, M. (2015). Over/Under-Voltage Islanding Detection Technique of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation on Matlab/Simulink. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 32, No. 1, pp. 67-72
- [7] Yingram, M. (2015). **Development of Anti-Islanding Detection Technique in Grid-Connected Distributed Generation on Computer Program**. Research Report, Faculty of Arts and Science, Chaiyaphum Rajabhat University
- [8] Yingram, M. (2015). Active Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation: Part 1. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 33, No. 2, pp. 1-7
- [9] Yingram, M. (2015). **Development of Anti-Islanding Hybrid Detection Technique in Grid-Connected Distributed Generation**. Ph.D. Dissertation Chiang Mai University
- [10] Yingram, M. and Premrudeepreechacharn, S. (2015). Over/Undervoltage and Undervoltage Shift of Hybrid Islanding Detection Method of Distributed Generation. **The Scientific World Journal**. DOI: 10.1155/2015/654942
- [11] Kitamura, A., Okamoto, M., Yamamoto, F., Nakaji, K., Matsuda, H., and Hotta, K. (1994). **Islanding Phenomenon Elimination Study at Rokko Test Center**. United States: N
- [12] Velasco, D., Trujillo, C. L., Garcera, G., and Figueres, E. (2010). Review of Anti-Islanding Techniques in Distributed Generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. pp. 1608-1614
- [13] Hotta, K., Kitamura, A., Okamoto, M., Takigawa, K., Kobayashi, H., and Ariga, Y. (1993). Islanding Prevention Measures: Demonstration Testing at Rokko Test Center for Advanced Energy Systems. In **Proceedings of the 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC, Spain**. pp. 1063-1067
- [14] Yu, B., Matsui, M., and Yu, G. (2010). A Review of Current Anti-Islanding Methods for Photovoltaic Power System. **Solar Energy**. Vol. 84, Issue 5, pp. 745-754. DOI: 10.1016/j.solener.2010.01.018
- [15] Ropp, M., Aaker, K., Haigh, J., and Sabhah, N. (2000). Using Power Line Carrier Communications to Prevent Islanding. In **Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conference**. pp. 1675-1678. DOI: 10.1109/PVSC.2000.916224
- [16] Xu, W., Zhang, G., Li, C., Wang, W., Wang, G., and Kliber, J. (2007). A Power Line Signaling Based Technique for Anti-Islanding Protection of Distributed Generators-Part I: Scheme and Analysis. **IEEE Transaction on Power Delivery**. Vol. 22, No. 3, pp. 1758-1766. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899618
- [17] Funabashi, T., Koyanagi, K., and Yokoyama, R. (2003). A Review of Islanding Detection Methods for Distributed Resources. In **2003 IEEE Bologna PowerTech - Conference Proceedings**. Vol. 2, pp. 608-613. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304617